

文章编号: 1671-1505(2025)01-0126-15 DOI: 10.7605/gdtxb.2025.00.015

# 塔里木盆地顺北地区奥陶系鹰山组超深层白云岩类型及成储潜力评价\*

刘大卫<sup>1</sup> 李映涛<sup>1</sup> 韩俊<sup>2</sup> 张继标<sup>1</sup> 汝智星<sup>1</sup>  
杨孝群<sup>1</sup> 王石<sup>1</sup> 黄诚<sup>2</sup> 肖重阳<sup>2</sup>1 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206  
2 中国石化西北油田分公司, 新疆乌鲁木齐 830011

**摘要** 塔里木盆地顺北地区中下奥陶统鹰山组白云岩是极具勘探潜力的岩相类型, 但目前对该地区成层分布的白云岩成因及其物性差异尚无系统阐释。本研究基于详细的岩石学观察、碳氧同位素和微区微量稀土元素分析、碳酸盐岩 U-Pb 定年、覆压孔渗测试等资料, 对鹰山组内幕成层发育的白云岩类型、成因机制进行探讨, 并初步评价了不同成因白云岩的物性差异。研究发现: (1) 顺北地区鹰山组下段白云岩相对发育, 主要包括 2 类成层分布白云岩, 分别是埋藏压溶白云岩 (I 类) 和准同生渗透—回流白云岩 (II 类); (2) I 类白云岩为埋藏白云石化成因, 分布于低能沉积相内, 为埋藏过程中缝合线建造驱动黏土矿物转化成因机制, 在顺北中部地区较为发育; (3) II 类白云岩为准同生渗透—回流白云石化成因, 主要分布于地貌较高、相对高能的沉积相区, 在顺北西区、顺南地区相对发育; (4) I 类白云岩实测物性数据 ( $\varphi$ : 0.3%~1.0%;  $K$ :  $0.003 \times 10^{-3} \sim 0.074 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) 低于 II 类白云岩 ( $\varphi$ : 0.4%~2.0%;  $K$ :  $0.009 \times 10^{-3} \sim 0.055 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ), 但 I 类白云岩的发育可提升地层中白云岩和灰岩互层的比例, 具裂缝改造成储潜力。研究成果对于塔里木盆地顺北地区超深层白云岩油气勘探选区具有借鉴意义。

**关键词** 塔里木盆地 鹰山组 白云岩类型 白云石化 储层评价

**第一作者简介** 刘大卫, 男, 1992 年生, 博士, 副研究员, 主要从事沉积学、储集层地球化学方面研究。  
E-mail: liudawei.syky@sinopec.com。

**通讯作者简介** 李映涛, 男, 1986 年生, 博士, 副研究员, 主要从事沉积学、储集层地质学方面研究。  
E-mail: liyt.syky@sinopec.com。

中图分类号: P588.24<sup>+</sup>5 文献标志码: A

## Ultra-deep dolomite types and their reservoirs potential of the Ordovician Yingshan Formation in Shunbei area, Tarim Basin

LIU Dawei<sup>1</sup> LI Yingtao<sup>1</sup> HAN Jun<sup>2</sup> ZHANG Jibiao<sup>1</sup> RU Zhixing<sup>1</sup>  
YANG Xiaoqun<sup>1</sup> WANG Shi<sup>1</sup> HUANG Cheng<sup>2</sup> XIAO Chongyang<sup>2</sup>1 *Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China*  
2 *Northwest Oil Field Company, SINOPEC, Urumqi 830011, China*

\* 国家自然科学基金企业创新发展联合基金 (编号: U21B2063) 和中国石化科技部项目 (编号: P24077) 共同资助。[Co-funded by the Enterprise Innovation and Development of National Natural Science Foundation of China (No. U21B2063) and SINOPEC Science and Technology Department Project (No. P24077)]

收稿日期: 2024-07-10 改回日期: 2024-10-21

**Abstract** Dolomites of the Ordovician Yingshan Formation, which exhibit significant exploration potential, are found in the Shunbei area of the Tarim Basin. However, there is no systematic explanation on the genesis and physical property variations of the stratified dolomite in this region. Based on detailed petrology observation, carbon and oxygen isotopes, rare earth element analysis, carbonate U-Pb chronology dating, and porosity and permeability testing under different stress states, this study discussed the types and genetic mechanisms of the inner stratified dolomites of the Yingshan Formation. Furthermore, it provides a preliminary evaluation of the differences in physical properties among dolomites of various origin. The findings can be summarized as follows: (1) The relative development of dolomites in the lower part of the Yingshan Formation located in the northern region of Shunbei area primarily consists of two types of stratified dolomites, including the buried pressure-dissolved dolomite (Class I) and the penecontemporaneous seepage reflux dolomite (Class II). (2) The Class I dolomites, which are predominantly distributed in low-energy sedimentary facies, have their origin in burial dolomitization. This is attributed to the genetic mechanism of clay mineral transformation, driven by the formation of stylolites during the burial process. These dolomites are relatively more developed in the central part of the Shunbei area. (3) The Class II dolomites are characterized by penecontemporaneous seepage reflux dolomitization in sedimentary facies that display high geomorphology and relatively high energy. These dolomites are primarily distributed and well developed in the western and southern Shunbei area. (4) The measured physical properties of Class I dolomites ( $\varphi$ : 0.3% ~ 1.0%;  $K$ :  $0.003 \times 10^{-3} \sim 0.074 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ) are lower than those of Class II dolomites ( $\varphi$ : 0.4% ~ 2.0%;  $K$ :  $0.009 \times 10^{-3} \sim 0.055 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ). However, Class I dolomites can enhance the ratio of dolomite-limestone interbedding, and there are fractures to transform into reservoir potential. This study is of significant reference value for ultra-deep dolomite oil and gas exploration in the Shunbei area of the Tarim Basin.

**Key words** Tarim Basin, Yingshan Formation, dolomite types, dolomitization, reservoir evaluation

**About the first author** LIU Dawei, born in 1992, Ph. D., associate researcher, is mainly engaged in sedimentology and reservoir geochemistry. E-mail: liudawei.syky@sinopec.com.

**About the corresponding author** LI Yingtao, born in 1986, Ph. D., associate researcher, is mainly engaged in sedimentology and reservoir geology. E-mail: liyt.syky@sinopec.com.

塔里木地区中下奥陶统鹰山组海相碳酸盐岩层系是目前超深层海相油气勘探的重点目标。近些年,已在鹰山组的多种类型储集层内见规模油气发现,如塔北隆起的塔河、哈拉哈塘、塔中隆起等岩溶型储集层(刘嘉庆等,2020;宁超众等,2021;倪新锋等,2023)及顺托果勒低隆区域的顺北、富满油气田等走滑断控型储集层(漆立新,2020;王清华等,2021)。国内外勘探实例证实,白云岩同样是深部规模成储的有利目标(Sun,1994,1995;沈安江等,2022),前人已提出鹰山组内幕白云岩具构造—热流体改造成储潜力(尤东华等,2018),但鹰山组内部成规模发育的白云岩成因类型及其相关的成储潜力评价有待深入研究。

顺北地区主要位于塔里木满加尔坳陷与阿瓦提坳陷之间的“鞍状”低隆过渡区带,是中国石化顺北油气田的重要探区,目前已在鹰山组走滑断控领域落实  $10 \times 10^8$  t 级的探明油气储量(漆立新,2020),但在走滑断裂带之间如何寻找规模油气富集是目前所面临的重要勘探问题,因此对鹰山组白云岩成储潜力评价意义深远。前人已针对顺北及邻区的鹰山组白云岩成因方面做了系统工作,如郭春涛等(2018)基于稀土元素地球化学特征,在古城地区识别出 6 种白云岩类型,其成因复杂多样,有蒸发泵模式、渗透回流模式、埋藏白云化模式、热液白云化模式等多种叠加影响;冯军等(2022)发现鹰山组三段(鹰下段)白云岩丘滩相成储因

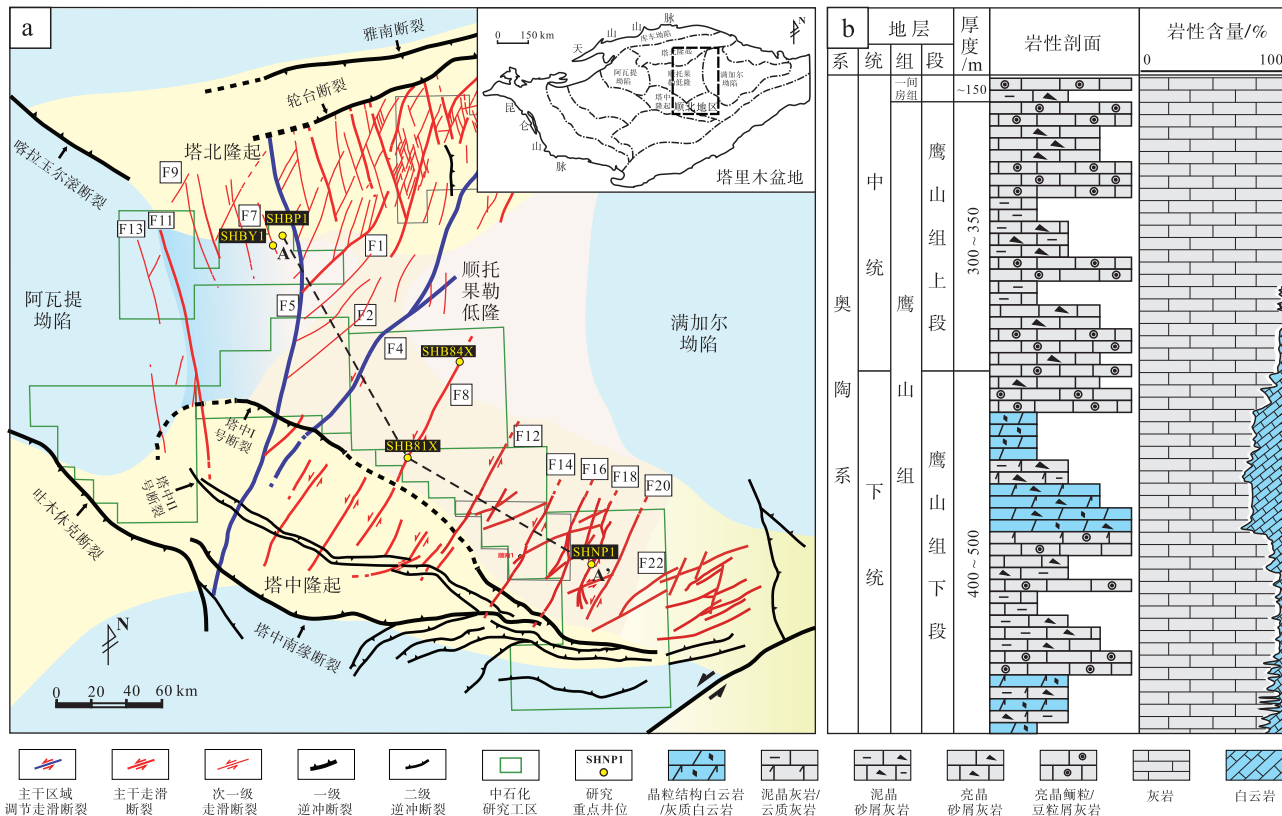
素与规模白云石化叠加大气淡水、断裂热液改造有关，可与上覆鹰山组一、二段（鹰上段）灰岩形成良好的储盖组合；尤东华等（2018，2020）认为奥陶系鹰山组存在多类型白云岩储集层，可划分为浅埋藏型白云岩储集层（玉北8井）、岩溶型白云岩储集层（中19井）和热液改造型白云岩储集层（SN501井），并进一步论证了顺南地区SN501井鹰山组下段储集层为白云岩晶间孔和相应裂缝改造扩溶缝；康仁东等（2020）认为顺南地区鹰山组主要发育3类白云岩，分别为粉—细晶白云岩、细—中白云岩和缝洞充填的中—粗晶白云石，是近地表环境蒸发白云石化的产物或形成于埋藏环境以及构造—热液活动。综上，前人虽对顺北及邻区鹰山组内部白云岩类型及成因进行了系统评述，但尚未明确规模发育的层状白云岩的成因及其成储潜力，并且对于顺北地区的研究前人主要聚焦于顺北南部地区（顺南地区），而随着近几年顺北中区深钻井的增多，已具备再综合评价顺北地区鹰山组内幕白云岩潜力条件。

基于以上地质实际和勘探需求，笔者选取顺北

地区多口钻遇层状白云岩井段岩样，进行详细的岩石学特征观察，并进一步基于碳—氧稳定同位素、微区微量—稀土元素测试、碳酸盐岩 U-Pb 定年技术，厘定白云岩类型和形成的沉积/成岩环境，对关键层段样品进行柱塞岩样的覆压孔渗测试，以进一步评价成储潜力。笔者拟建立区带规模白云石化模式和成储差异，为目标层系的白云岩油气勘探选区提供理论支撑。

### 1 区域地质概况

塔里木盆地位于中国西北部，是由古生代克拉通盆地与中—新生带前陆盆地叠加而成的大型叠合型盆地。顺北地区位于塔北隆起与塔中隆起之间的低隆区带，东、西分别毗邻满加尔坳陷、阿瓦提坳陷，即位于“两隆两坳”之间，呈马鞍状分布（图 1-a）。前人研究表明，塔里木盆地早—中奥陶世继承发育了晚寒武世的古地理格局，在研究区所处的塔西台地，西部地区发育典型的蒸发台地、局限台地、开阔台地以及台地边缘等相带，向东则



a—顺北中区位置及重点井位分布；b—顺北中区鹰山组综合岩性柱状图

图 1 塔里木盆地顺北地区奥陶系鹰山组断裂体系分布及地层柱状图

Fig. 1 Distribution of fault system and stratigraphic column of the Ordovician Yingshan Formation in Shunbei area of Tarim Basin

逐渐过渡为斜坡、陆棚、深水盆地等相区（冯增昭等，2007；赵宗举等，2009；林畅松等，2011）。晚奥陶世早期发育淹没台地相碳酸盐岩，晚奥陶世中晚期一志留纪则以碎屑岩沉积为主（何登发等，2005；林畅松等，2011）。顺北地区奥陶系发育完整，自下而上划分为下统蓬莱坝组、中下统鹰山组、中统一间房组及上统恰尔巴克组、良里塔格组及桑塔木组。其中，鹰山组可划分为上、下 2 段，整体厚度为 500~900 m（肖玮琦，2019；李兴旺，2020）。

塔里木盆地鹰山组沉积时期整体为“西台东盆”的沉积格局，在顺北西区及以西地区主要发育台内局限潟湖、潮坪等沉积（孙玉景，2016；郑和荣等，2022），顺北中区—顺南地区鹰山组沉积环境主要为台内局限—半局限环境（陈代钊和钱一雄，2017；赵锐等，2019），向东部古城地区沉积环境愈加开阔，发育台缘环境（彭军等，2022）。目前在中国石化勘探区钻探至鹰山组下段或钻穿鹰山组的深井有 5 口（图 1-a），其揭示出鹰山组下段白云岩含量明显高于鹰山组上段，鹰山组上段以泥晶砂屑灰岩和泥晶灰岩为主，含少量亮晶砂屑灰岩、云质灰岩，而鹰山组下段以泥晶砂屑灰岩、细晶晶粒云岩和砂屑灰岩为主，含少量生屑泥晶灰岩和砾屑泥晶灰岩（图 1-b）。

## 2 样品采集与测试

研究基于详细的岩石学观察，系统观察了顺北地区 5 口钻至鹰山组下段或钻穿鹰山组的深钻井，分别为顺北蓬 1 井（SHBP1）、顺北鹰 1 井（SHBY1）、顺北 81X 井（SHB81X）、顺北 84X 井（SHB84X）以及顺南蓬 1 井（SHNP1）。采集岩心样品 46 块，小柱样品 8 件，磨制厚度 30  $\mu\text{m}$  的标准光薄片 40 块，进行相应的岩石学鉴定。对不同岩相特征的白云岩进行地球化学和物性测试以分析其成因和储集物性，具体包含碳酸盐岩碳氧同位素测试、激光剥蚀微区微量稀土元素测试、碳酸盐岩 U-Pb 定年测试、小柱岩样的覆压孔渗性测试。

**碳、氧稳定同位素测试：**低倍数显微镜下，利用手持牙钻对薄片上各类灰岩、白云岩钻取粉末 1~2 mg；在 90  $^{\circ}\text{C}$  高温条件将其与磷酸反应约 10 h，采集的  $\text{CO}_2$  通入 Finnigan-MAT 252 型号质谱仪（Land，1980）进行测试。将测试结果与国际参考

箭石标样（Vienna Pee Dee Belemnite，V-PDB）进行校对，内部标准监测显示  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{18}\text{O}$  的标准偏差分别优于 0.15‰ 和 0.20‰。该实验完成于中国科学院地质与地球物理研究所稳定同位素地球化学实验室。

**激光剥蚀微区微量稀土元素测试：**应用激光剥蚀—等离子质谱方法对岩石薄片进行原位微量稀土元素测试，测试仪器型号为 Agilent 7500a Q-ICP-MS（Agilent 科技，美国），并组合了 193 nm 的 ArF 的准分子激光系统（Lambda Physik，德国）。测试过程中采用的激光束斑大小为 90  $\mu\text{m}$ ，能量密度为 3  $\text{J}/\text{cm}^2$ 。选取 NIST SRM 610 型号样品作为外部矫正标样，BCR-2G 型号样品作为质量控制参照标样。激光剥蚀法对微量元素检测精度可达 0.5  $\mu\text{g}/\text{g}$ ，对各稀土元素检测线可达 0.01~0.02  $\mu\text{g}/\text{g}$ ，测试误差小于 5%。最后将得到的微量元素测试值相对于上地壳（UCC）标准值校正（Taylor and McLennan，1985），稀土元素值相对于太古代平均页岩含量（PAAS）标准值校正（McLennan，1989）。在代表性稀土元素曲线配分形态参数计算中，对  $(\text{La}/\text{La}^*)_N = \text{La}_N / (3\text{Pr}_N - 2\text{Nd}_N)$ （Zhao *et al.*，2009）、 $(\text{Ce}/\text{Ce}^*)_N = \text{Ce}_N / [\text{Pr}_N^2/\text{Nd}_N]$ （Wu *et al.*，2019）、 $(\text{Eu}/\text{Eu}^*)_N = 3\text{Eu}_N / (2\text{Sm}_N + \text{Tb}_N)$ （Delpomdor *et al.*，2013；Wang *et al.*，2014）进行二次计算和统计。

**碳酸盐岩 U-Pb 定年测试：**采用电感耦合等离子质谱（MC-ICP-MS）组合激光剥蚀系统（LA）对薄片上的白云岩进行原位 U-Pb 同位素年龄测试。测试标样选取 WC-1（地质年龄为  $254 \pm 6$  Ma，Roberts *et al.*，2017）和 Duff（地质年龄为  $64.04 \pm 0.67$  Ma，Hill *et al.*，2016）进行误差传递和校对。每组采样 40 个点，使用 Igor Pro 软件处理原始数据，并将得到的同位素比值应用 Isoplot 4.15 插件进行等时线年龄绘图。实验完成于中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室。

**覆压孔渗物性测试：**取直径 2.5 cm、长度大于 4 cm 的标准小柱岩样，基于溶液饱和法测试样品孔隙度，具体实验流程参照 GB/T29172-2012 标准中的岩心物性分析方法。对小柱样品物性测试采用 STL-DX07G-01-YX 气体渗透率测定仪，先测定常压下样品的渗透率，再利用岩心夹持器对岩样施加 5 MPa 的初始压力，逐渐增加上覆压力并至少测试

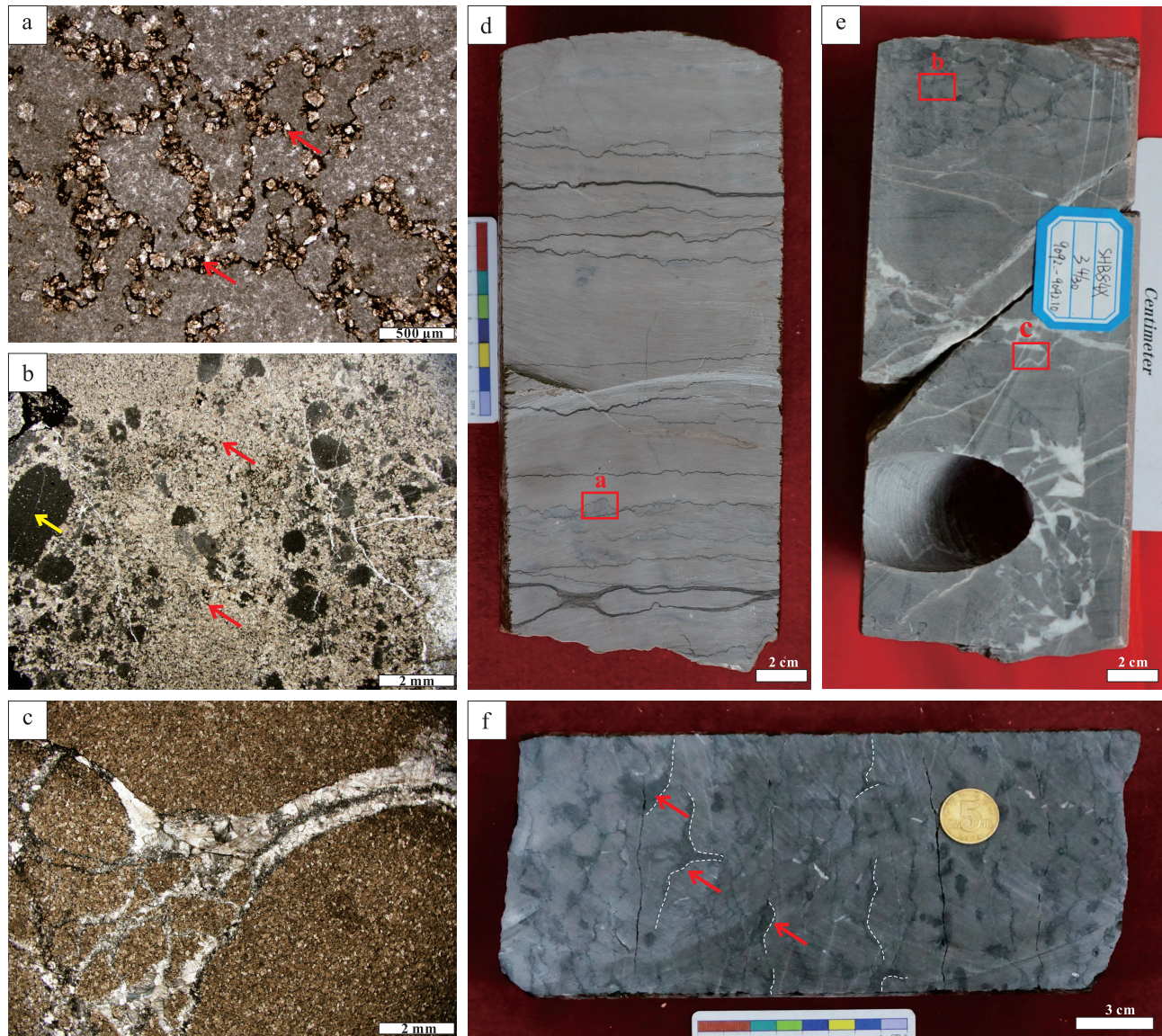
5 个压力点的渗透率, 具体步骤参见 GB/T 29172-2012 标准中物性分析方法。

### 3 岩石学特征

基于对顺北地区东部鹰山组井下岩心的详细鉴定, 揭示出 2 类成层状发育的白云岩。

第 I 类白云岩的发育和分布与缝合线建造相关(图 2)。显微镜下, 可见菱形白云石晶粒沿缝合线

发育(图 2-a, 2-d); 随着缝合线建造密度的增加, 在一定层段范围内逐渐形成残余颗粒结构的灰质晶粒白云岩, 镜下统计白云石含量可达 70%~80%(图 2-b), 并可见白云石晶粒围绕灰岩颗粒发育(图 2-b, 2-e); 若白云石化程度继续增加, 可逐渐形成呈层发育的粉细晶晶粒白云岩(图 2-c, 2-e)。观察发现, I 类白云岩的发育多呈成条带状, 在岩心上呈暗色的斑纹状(图 2-e, 2-f), 在顺北地区鹰山组岩心上较为常见。



a—灰岩基质中见多条网状缝合线发育, 伴有白云石晶粒 (红箭头), SHBY1 井, 8000.4 m, 单偏光; b—密集发育的白云石晶粒 (红箭头), 多围绕于砂屑灰岩颗粒 (黄箭头) 周缘, SHB84X 井, 9093.13 m, 单偏光; c—细晶白云岩基质, 可见破碎方解石脉体充填, SHB84X 井, 9093.30 m, 单偏光; d—见暗色条带状白云石发育, SHBY1 井, 7999.80~8000.10 m; e—见上部暗色斑纹状发育的白云石条带以及下部灰白色白云岩层段, SHB84X 井, 9092.10~9093.35 m; f—缝合线建造与暗色斑纹状白云石条带 (红箭头), SN501 井, 6290.00~6290.25 m

图 2 塔里木盆地顺北地区奥陶系鹰山组第 I 类白云岩岩石学特征

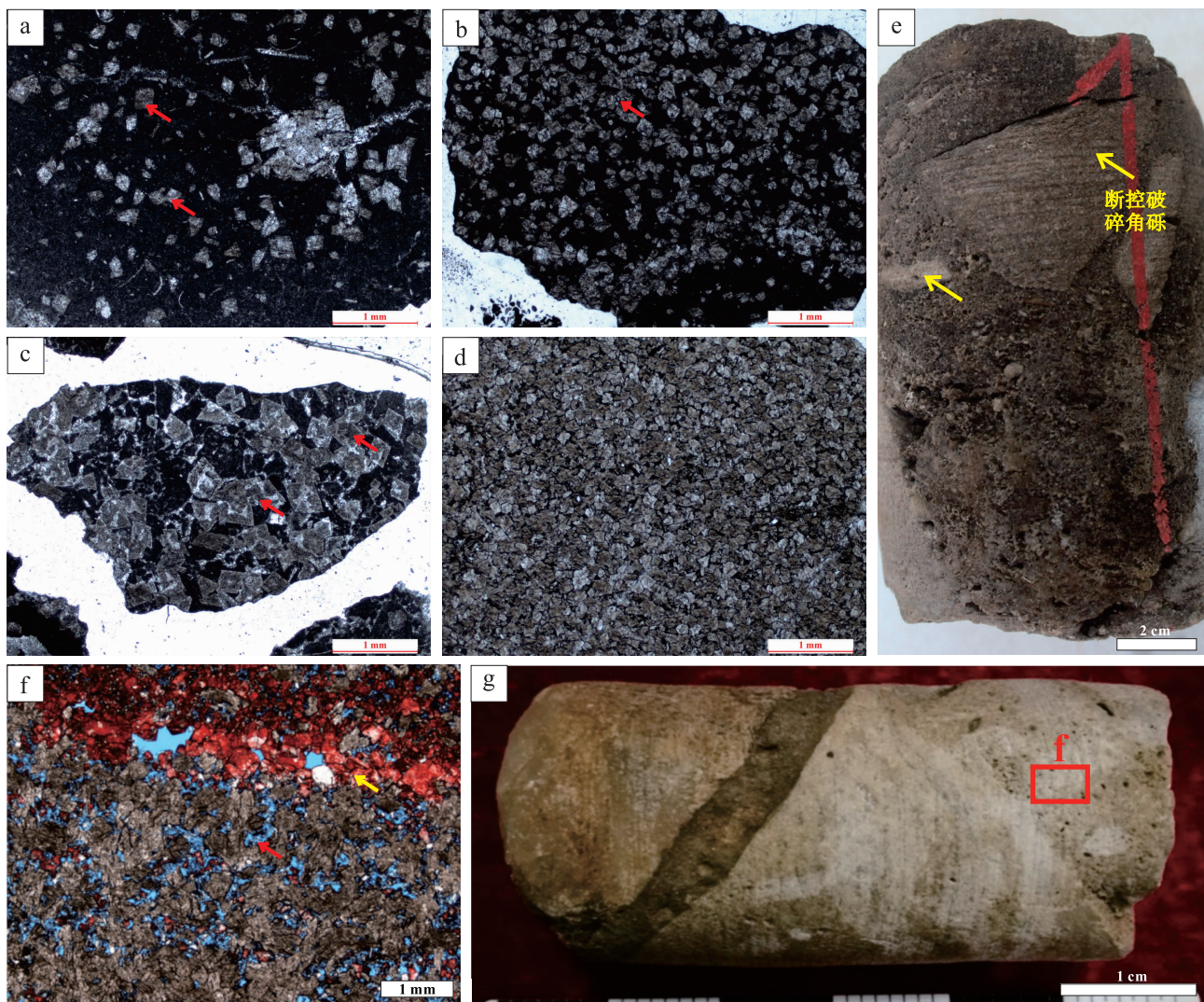
Fig. 2 Petrological characteristics of Class I dolomites of the Ordovician Yingshan Formation in Shunbei area, Tarim Basin

第 II 类成层白云岩的发育与层段内白云石化程度差异有关(图 3)。在白云石化程度较低的泥晶灰岩、泥粒灰岩岩相内,可见菱形白云石晶粒均一且零散的分布于围岩基质中(图 3-a);随着白云石化程度的增加晶粒逐渐富集(图 3-b),在部分高能滩相见随白云岩晶粒生长交代围岩颗粒组特征,形成残余颗粒幻影结构(图 3-c);在有利白云石化区带,可发育成层状的晶粒白云岩(图 3-d, 3-e)。岩心上,可见小型溶蚀孔洞发育于此类白云岩层段上,镜下可见晶粒间溶孔发育,后期发育去白云石化方解石沉淀现象(图 3-f, 3-g)。

## 4 地球化学特征

### 4.1 碳、氧同位素分布

对岩石学中识别的 2 类白云岩分别进行碳、氧同位素测试(图 4; 表 1), 其中 I 类白云岩碳、氧同位素分布范围分别为  $-2.08‰ \sim -1.80‰$ 、 $-8.67‰ \sim -7.97‰$  V-PDB, 基本位于同时期海水范围内 (Veizer *et al.*, 1999), 而 II 类白云岩碳、氧同位素范围分别为  $-1.70‰ \sim -0.20‰$ 、 $-8.01‰ \sim -5.10‰$  V-PDB, 与同时期海水相比分布相对正偏(图 4; 表 1)。碳、氧同位素证据指示 I 类白云



a—晶粒状白云石呈均一且零散分布现象(红箭头), SHBP1 井, 8100 m, 单偏光; b—晶粒状白云石逐渐发育, 形成白云石灰岩, SHBP1 井, 8204 m, 单偏光; c—白云石晶粒内可见残余砂屑颗粒形态(红箭头), SHBP1 井, 8440 m, 单偏光; d—细晶晶粒白云岩, SHBP1 井, 8286 m, 单偏光; e—成层发育的白云岩层段, 可见小型溶孔发育, 受断裂活动影响角砾化, 8450.25~8450.40 m; f, g—层状白云岩发育层段及镜下特征(单偏光), 晶粒状白云岩见小型溶孔发育, 后期方解石沉淀(黄箭头)形成去白云石化现象, 8450.50~8450.60 m

图 3 塔里木盆地顺北地区奥陶系鹰山组第 II 类成层状白云岩岩石学特征

Fig. 3 Petrological characteristics of Class II stratified dolomites of the Ordovician Yingshan Formation in Shunbei area, Tarim Basin

岩的形成与同时期海源碳酸盐相关，而Ⅱ类白云岩形成于更高盐度/蒸发环境 (Warren, 2000)，氧同位素具正偏趋势。

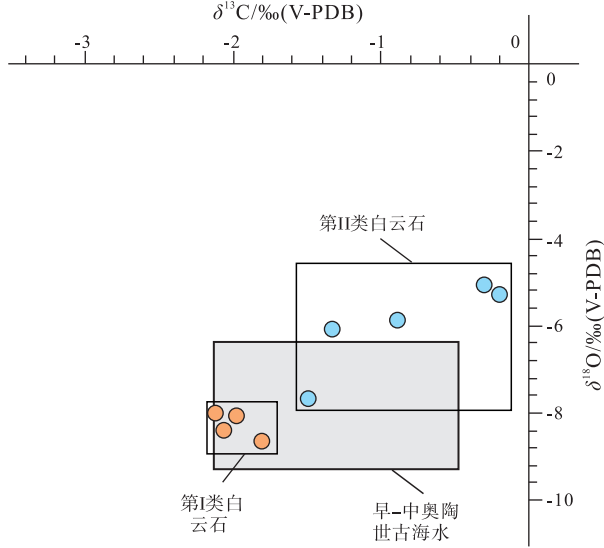


图 4 塔里木盆地顺北地区奥陶系鹰山组白云岩碳氧同位素分布 (古海水分布范围据 Veizer *et al.*, 1999)

Fig. 4 Distribution of carbon and oxygen isotopes in dolomites of the Ordovician Yingshan Formation in Shunbei area, Tarim Basin (ancient seawater data according to Veizer *et al.*, 1999)

#### 4.2 微量稀土元素分布特征

基于激光剥蚀 (La-ICP-MS) 微区微量稀土元素测试，揭示 I 类白云岩呈中稀土略微富集的稀土配分特征 (图 5-a)，而 II 类白云岩稀土元素配分特征整体较为平缓，呈轻稀土元素略微亏损的特征 (图 5-b)。指示稀土元素异常趋势的二次计算结果表明，I、II 类白云岩在  $(La/La^*)_{SN}$ 、 $(Ce/Ce^*)_{SN}$ 、 $(Eu/Eu^*)_{SN}$  分布上存在差异，其中 I 类白云岩

$(La/La^*)_{SN}$  的分布范围为 0.553 ~ 1.821 (均值 1.098)、II 类白云岩  $(La/La^*)_{SN}$  的分布范围为 0.630 ~ 1.144 (均值 0.788) (图 5-c); I 类白云岩  $(Ce/Ce^*)_{SN}$  的分布范围为 0.728 ~ 0.981 (均值 0.881)、II 类白云岩  $(Ce/Ce^*)_{SN}$  的分布范围为 0.639 ~ 0.944 (均值 0.778) (图 5-d); I 类白云岩  $(Eu/Eu^*)_{SN}$  的分布范围为 0.717 ~ 3.650 (均值 1.633)、II 类白云岩  $(Eu/Eu^*)_{SN}$  的分布范围为 0.387 ~ 1.208 (均值 0.786) (图 5-e)。综上所述，I 类白云岩相对 II 类白云岩具高  $(La/La^*)_{SN}$ 、 $(Ce/Ce^*)_{SN}$ 、 $(Eu/Eu^*)_{SN}$  的分布特征，指示 I 类白云岩形成于更偏还原、高温的成岩环境，而 II 类白云岩形成环境则更偏氧化、低温 (Zhao *et al.*, 2009)。

此外，在氧化还原敏感性指标 V/Cr 值中，I 类白云岩 V/Cr 值范围为 2.47 ~ 26.48，而 II 类白云岩 V/Cr 值较低，为 0.59 ~ 0.78 (图 5-f; 表 1)，比值差异揭示了 I 类白云岩形成于更为还原缺氧的环境 (Jones and Manning, 1994; 樊秋爽等, 2022)。

#### 4.3 扫描电镜及碳酸盐岩 U-Pb 定年结果

采用扫描电镜观察 (X-ray) 与微区白云石 U-Pb 年龄测试结合的手段，对 I 类白云岩内部矿物类型与成岩序次进行进一步厘定。观察结果揭示，在 I 类白云岩富集层段 (图 6-a) 不仅可见到晶粒状白云石分布，还可见到晶间黄铁矿、伊利石等黏土矿物富集的现象 (图 6-b, 6-c)。

微区白云石 U-Pb 定年结果揭示，I 类白云岩

表 1 塔里木盆地顺北地区奥陶系鹰山组白云岩碳氧同位素、微量元素统计

Table 1 Statistics of carbon and oxygen isotope, trace elements values of various dolomites of the Ordovician Yingshan Formation in Shunbei area, Tarim Basin

井号	井深/m	岩石类型	$\delta^{13}C/‰$	$\delta^{18}O/‰$	V/Cr	白云岩类型	数据来源
SHB84X	9092.30	细晶白云岩基质	-1.97	-8.07	26.48	I 类白云岩	本研究
SHB84X	9093.10	含灰质砂屑细晶白云岩基质	-2.08	-7.97	/		
SHB84X	9093.30	细晶白云岩基质	-1.80	-8.67	3.49		
SHB84X	9093.50	细晶白云岩基质	-2.05	-8.41	2.47		
SHBP1	8450.02	晶粒白云岩基质	-1.70	-8.01	0.59~0.78	II 类白云岩	张哨楠等, 2019
GL3	6236.80	微晶白云岩	-0.30	-5.10	/		
GL3	6235.70	微晶白云岩	-0.20	-5.30	/		
GL13	6487.68	细晶白云岩	-0.88	-5.90	/		
GL13	6610.66	粉-细晶白云岩	-1.32	-6.09	/		

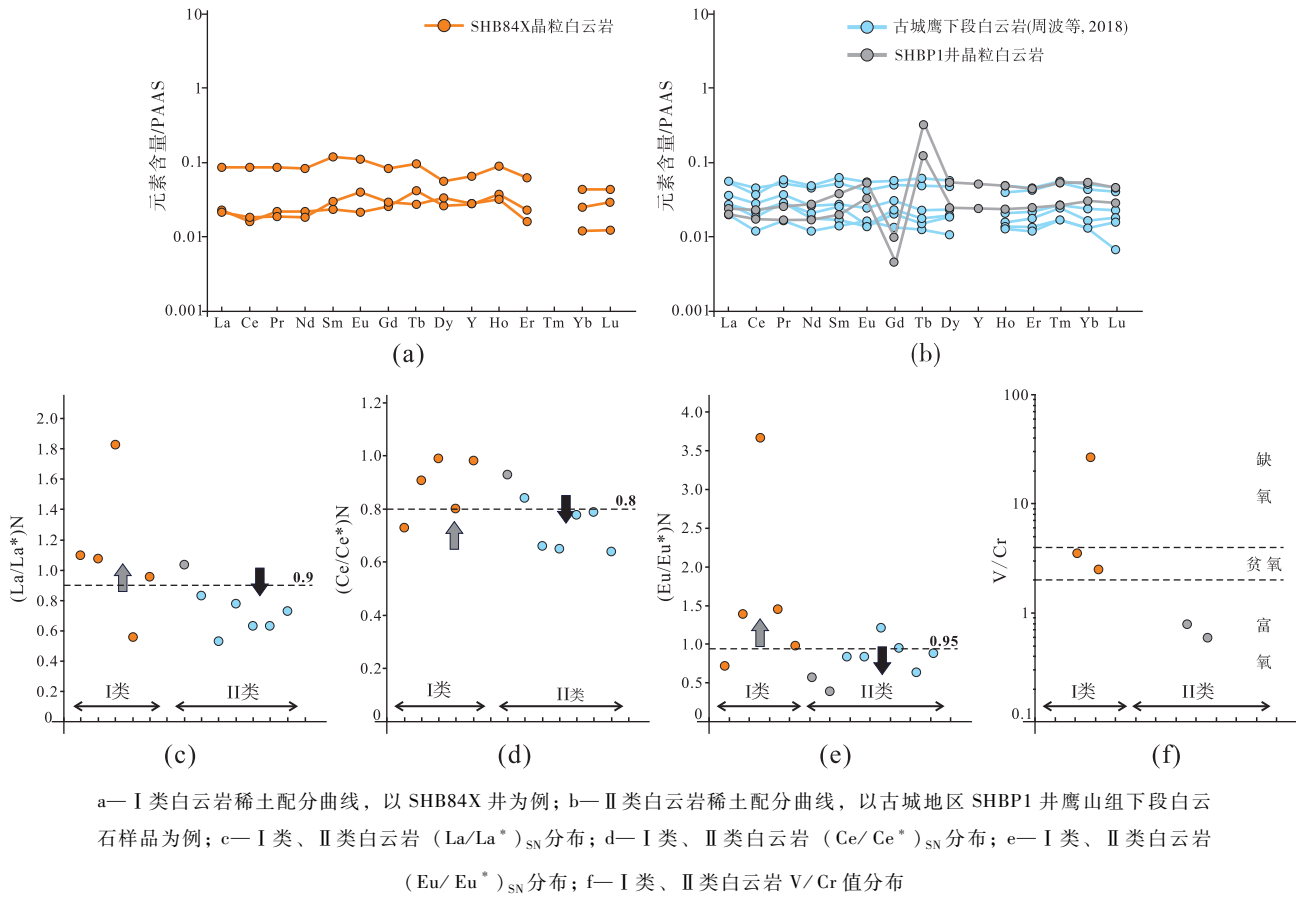


图 5 塔里木盆地顺北地区奥陶系鹰山组白云岩稀土元素配分样式及稀土含量分布特征  
 Fig. 5 Distribution characteristics of rare earth elements patterns and contains in various dolomites of the Ordovician Yingshan Formation in Shunbei area, Tarim Basin

记录年龄为  $393.9 \pm 7.7$  Ma、 $334.63 \pm 8.23$  Ma (图 6-d, 6-e), 约对应于加里东运动中期 III 幕至加里东晚期, 推断形成于浅-中埋藏阶段。II 类白云岩 U-Pb 年龄为  $470.73 \pm 6.19$  Ma (图 6-f), 约为鹰山组沉积时期 (ca. 460~480 Ma)。

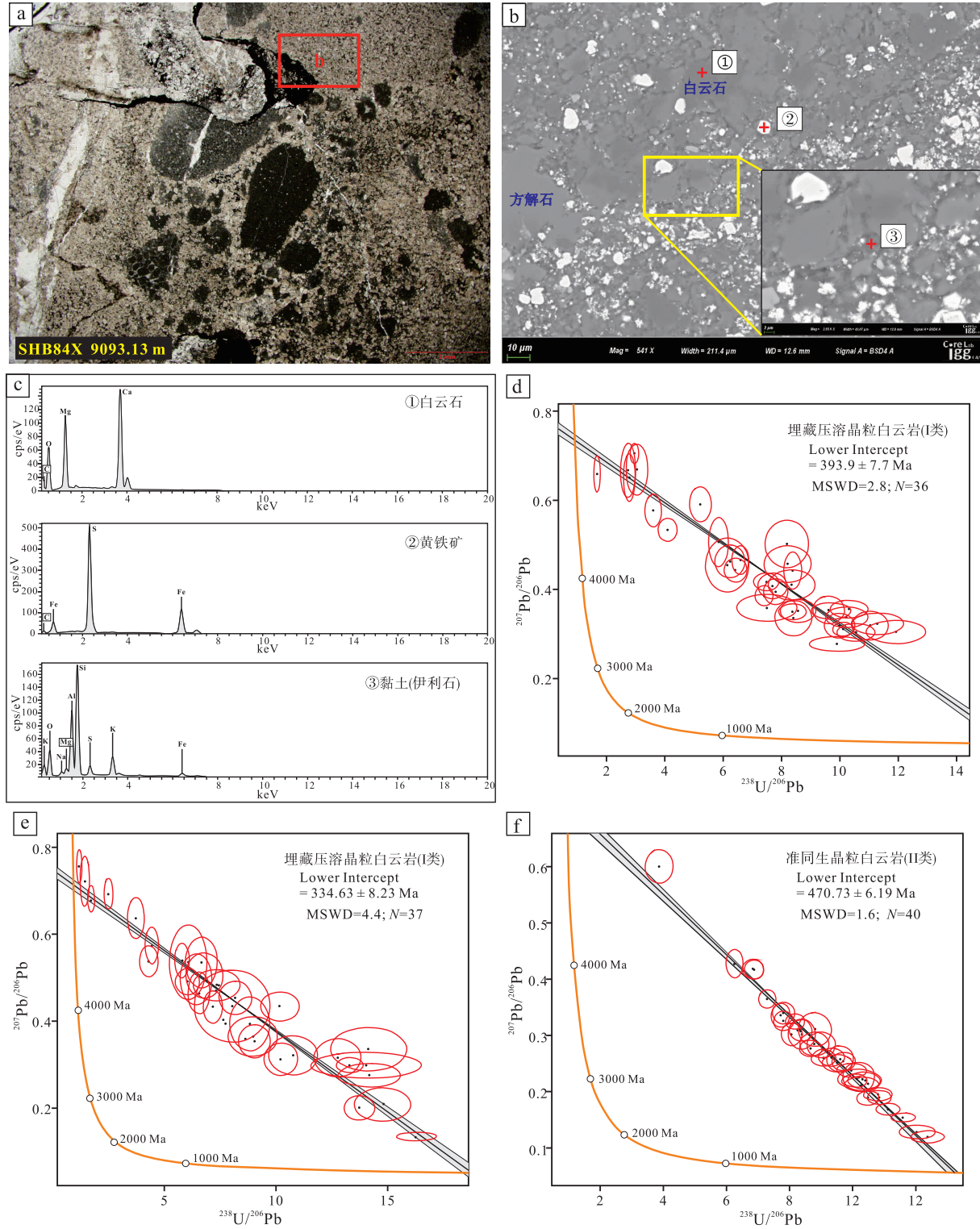
## 5 白云岩成因模式及成储潜力评价

### 5.1 白云岩的分布差异及成岩环境

在顺北地区连井层序格架内, 鹰山组下段的白云岩含量及分布明显高于鹰山组上段(图 7)。进一步对鹰山组内白云岩类型及含量分布进行统计, 发现顺北西区(顺北蓬 1 井)、顺南地区(顺南蓬 1 井)鹰山组下段 II 类白云岩的含量及占比较高, 而顺北中区(顺北 81X 井)鹰山组下段白云岩虽然总体含量和占比降低, 但 I 类白云岩发育且占比可增至 30%~40%。

研究发现, I 类、II 类白云岩发育的沉积相带具有一定差异。I 类白云岩多毗邻发育于泥晶灰岩、粒泥灰岩等深水低能沉积岩相单元(图 7; 图 8-a), 而 II 类白云岩则多发育于砂屑灰岩、亮晶砂屑灰岩等相对高能浅水沉积岩相单元(图 7; 图 8-a); 在层序格架中, I 类白云岩多集中发育于海泛界面范围, 而 II 类白云岩则多集中发育于海退界面范围(图 7)。因此, 岩相趋势指示 I 类白云岩多发育于低能深水环境, 而 II 类白云石多发育于浅水高能环境。此外, 在微量元素所指示的氧化还原环境指标中, I 类白云岩相对 II 类白云岩具有更高的 V/Cr 值(图 5-f; 表 1), 因 Cr 在氧化条件下能以铬酸盐的形式溶于水, 而还原环境中则以水合离子进入沉积物中 (Jones and Manning, 1994; 樊秋爽等, 2022), 故指示 I 类白云岩形成于缺氧的还原环境, II 类白云岩则形成于偏氧化的环境。

以上沉积环境推断也得到稀土元素证据的证实。



a— I 类白云岩岩石学特征, SHB84X 井, 9993.13 m, 单偏光; b, c—白云石富集部位不仅存在白云石, 还可见黄铁矿和伊利石, 扫描电镜 (SEM); d, e— I 类白云岩 U-Pb 定年结果, 其成岩年龄约为  $393.9 \pm 7.7$  Ma、 $334.63 \pm 8.23$  Ma; f— II 类白云岩 U-Pb 定年结果, 成岩年龄约为  $470.73 \pm 6.19$  Ma

图 6 塔里木盆地顺北地区奥陶系鹰山组白云岩微观成矿类型及 U-Pb 年龄测试结果

Fig. 6 Micropetrological characteristics and U-Pb age test results of dolomites of the Ordovician Yingshan Formation in Shunbei area, Tarim Basin

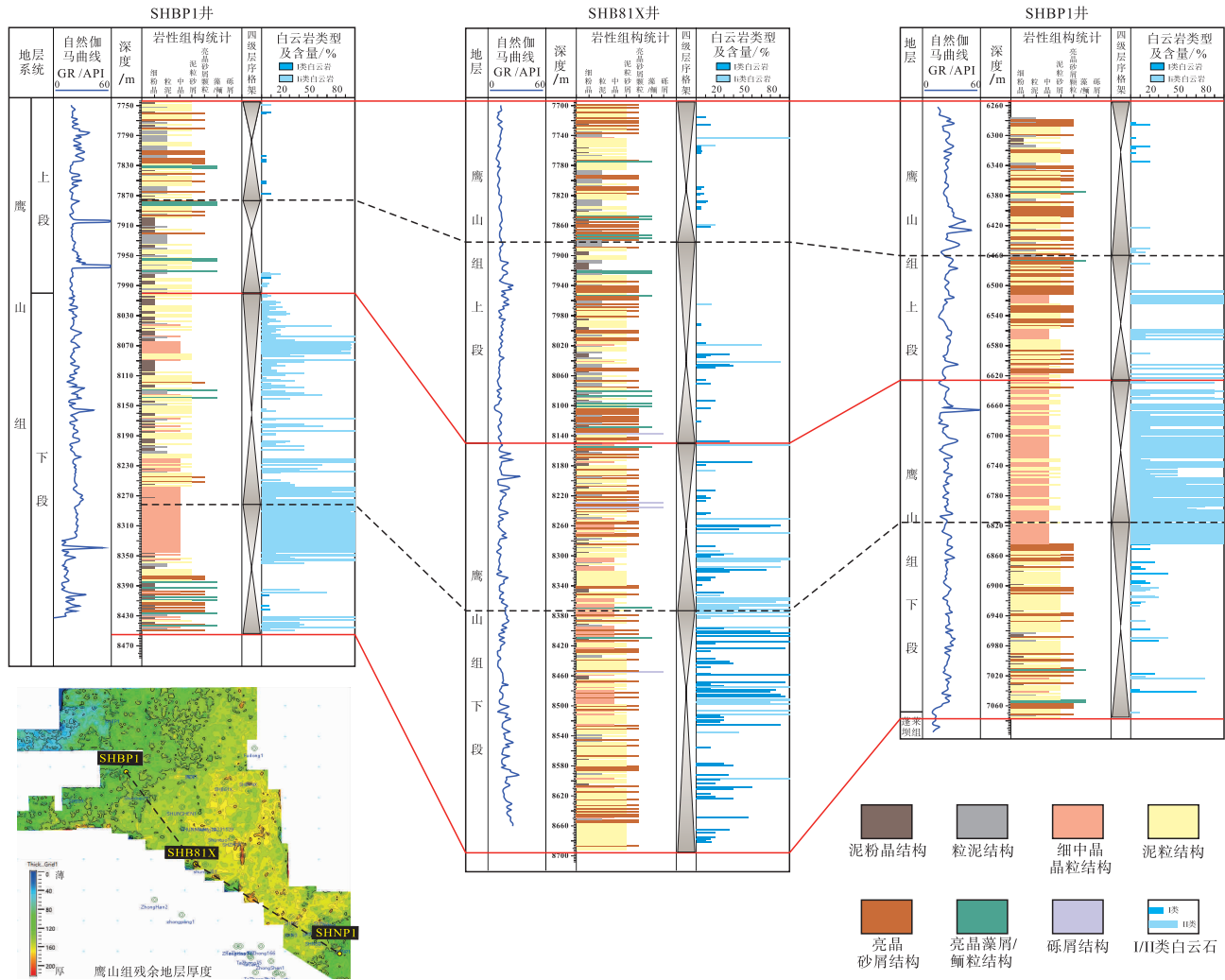


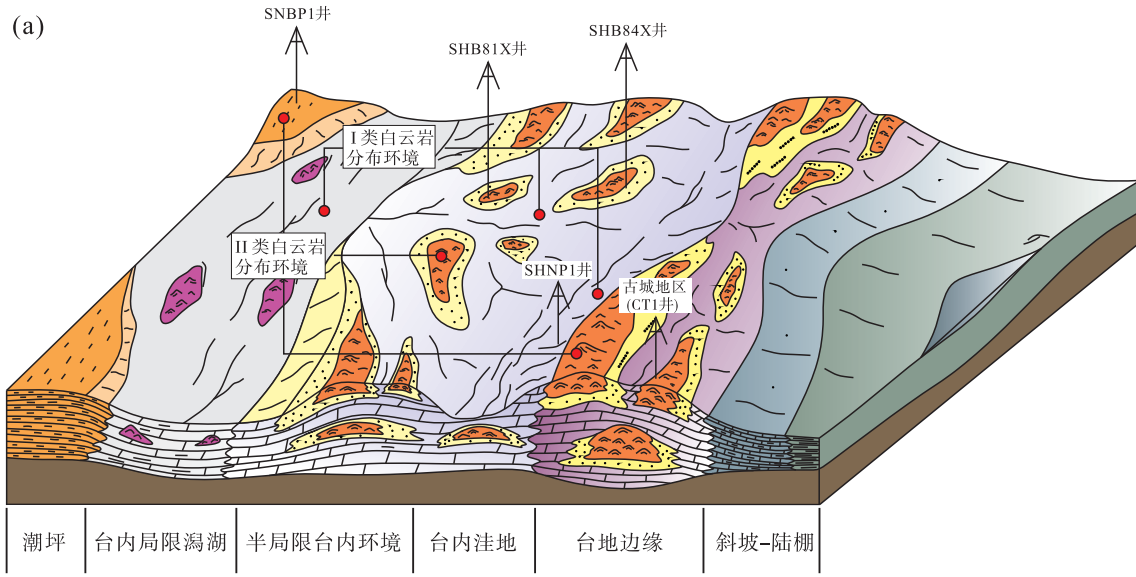
图 7 塔里木盆地顺北地区奥陶系鹰山组连井层序格架内部 I 类、II 类白云岩分布统计

Fig. 7 Distribution statistics of Class I and Class II dolomites of the Ordovician Yingshan Formation in sequence lattice of connected wells in Shunbei area, Tarim Basin

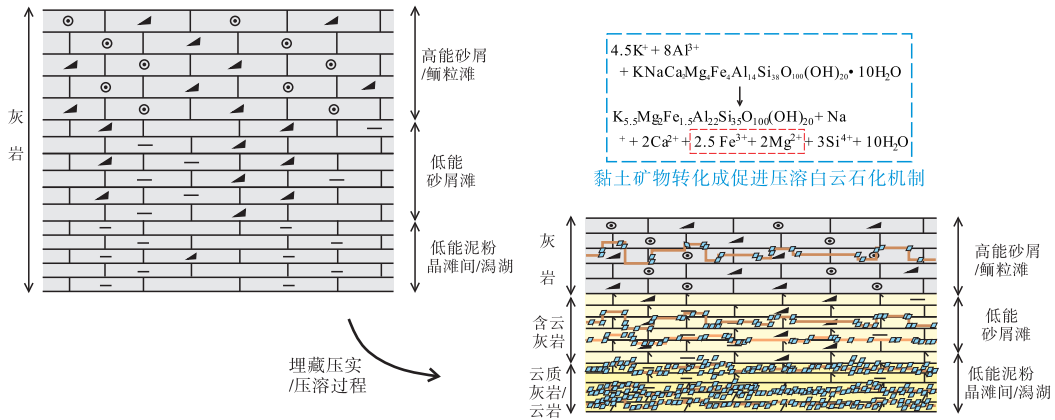
I类白云岩的 La (镧)、Ce (铈)、Eu (铕) 元素具正异常特征。在 La 元素的环境指示中,  $(La/La^*)_{SN}$  值的增大表示偏海水沉积环境 (Bau *et al.*, 1996; Kamber *et al.*, 2004), 而  $(La/La^*)_{SN}$  值降低则代表更为氧化的水体环境 (Kamber *et al.*, 2004; Tang *et al.*, 2013), 可见II类白云岩中的  $(La/La^*)_{SN}$  值降低代表更为氧化的环境(图 5-c)。Ce 元素同样具有特殊的环境指示意义, 作为镧系稀土中较为特殊三价元素, Ce 可从易溶解的  $Ce^{3+}$  经过氧化成为溶解度降低的  $Ce^{4+}$  (Tanaka *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2019), 从而使得氧化环境下沉积的 Ce 元素呈亏损配分样式, 因此I类白云岩的  $(Ce/Ce^*)_{SN}$  正偏代表更为还原的环境, II类白云岩的  $(Ce/Ce^*)_{SN}$  负偏代表更为

氧化的水体环境(图 5-d)。Eu 元素也常作为沉积/成岩环境的判别指标, 这是因为在高温还原成岩环境下  $Eu^{3+}$  会转化为更易富集于矿物中的  $Eu^{2+}$  (Bau, 1991; Bau *et al.*, 2010; Craddock *et al.*, 2010), 使得此成岩环境中矿物  $(Eu/Eu^*)_{SN}$  具正偏富集特征, 因此 Eu 的正异常通常指示埋藏高温、还原以及高氯含量的成岩流体环境 (Michard *et al.*, 1983), 而在 I 类、II 类白云岩的 Eu 稀土配分特征中, I 类白云岩具更明显的正偏富集特征(图 5-e), 指示其更为高温、还原的成岩环境。

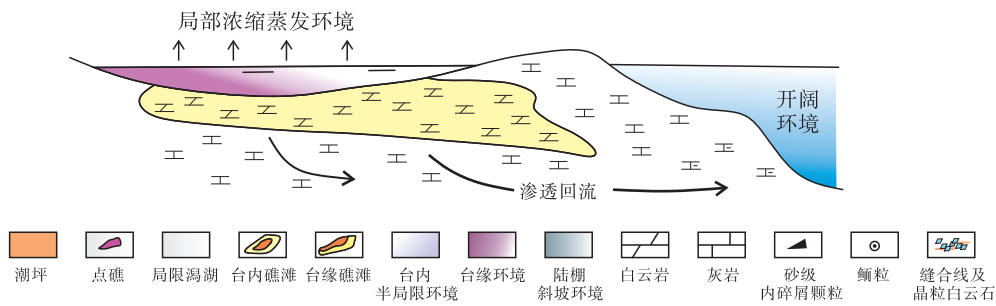
综合沉积岩相与地球化学证据, 揭示 I 类白云岩形成时的沉积环境更为还原、低能, 受到埋藏高温条件的影响, 且多分布于泥晶、泥粒等沉积岩相内。II 类白云岩的形成环境更为氧化、高能, 多分



(b) 模式一：I类白云岩埋藏白云石化过程



(c) 模式二：II类白云岩渗透-回流白云石化过程



a—研究区岩相古地理示意及多类型白云石分布区带；b—I类白云岩形成于埋藏白云石化环境；

c—II类白云岩形成于准同生渗透-回流白云石化过程

图 8 塔里木盆地顺北地区奥陶系鹰山组白云岩沉积环境及白云石化成因模式

Fig. 8 Sedimentary environment of Class I and Class II dolomites of the Ordovician Yingshan Formation in Shunbei area of Tarim Basin and their genetic model of dolomitization

布于砂屑、亮晶砂屑等沉积岩相内(图 8-a)。

## 5.2 顺北东区鹰山组综合白云石化模式

前述分析表明, I 类白云岩具高温、还原的成岩环境且其沉积环境相对低能、局限, 在镜下见 I 类白云岩的分布与缝合线建造相关, 且在对 I 类白云岩的微观岩相观察中不仅可见晶粒白云石矿物, 还可见分布于白云石晶粒之间的黄铁矿、伊利石等矿物(图 6-b, 6-c), 基于以上岩石学、地球化学证据, 提出 I 类白云岩为埋藏白云石化成因模式(图 8-b), 即在沉积阶段低能环境(潟湖、滩间洼地等)中更易富集微量的黏土矿物, 在埋藏压实/压溶的过程中, 缝合线建造逐渐发育并逐渐富集黏土矿物, 埋藏递增的温-压条件促使黏土矿物转化(蒙脱石向伊利石转化)释放出含大量镁、铁等离子的流体(Boles and Franks, 1979; McHargue and Price, 1982), 逐渐形成沿缝合线附近白云石、黄铁矿、伊利石等黏土矿物富集的成岩相特征, 并且在相对低能、局限的环境中缝合线的发育密度更高, 形成的此类埋藏白云岩的含量和厚度也越大(图 8-b)。此外, I 类白云石测得的 U-Pb 年龄约为  $393.9 \pm 7.7$  Ma、 $334.63 \pm 8.23$  Ma(图 6-d), 与鹰山组的沉积年龄(ca. 460~480 Ma)存在明显差异, 指示矿物内部 U-Pb 体系( $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ - $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ )的封闭时间晚于沉积年龄(Ben-Israel *et al.*, 2024), 成岩时期可推至中埋藏成岩环境(Machel, 1999), 进一步证实了 I 类白云石形成于埋藏成岩环境。

II 类白云石的岩石学、地球化学证据揭示其形成于一定氧化背景的成岩环境, 且在沉积相序上不仅分布于海退层段, 还与相对高能沉积相带(砂屑、亮晶砂屑)岩相相关(图 7), 并且在 II 类白云岩相对发育的顺北西区(顺北蓬 1 井揭示)、顺南地区(顺南蓬 1 井揭示), 地层残余厚度相对较小, 基于地层残厚法揭示其沉积古地貌相对较高(图 7; Martin, 1966), 综上推测此类白云岩形成于准同生渗透-回流白云石化模式, 即在准同生阶段, 在古地貌的高部位受蒸发作用影响, 水体经历一定的浓缩作用使得密度增大、盐度增高, 氧同位素呈一定正偏趋势(图 4), 在重力势能的影响下逐渐形成渗透-回流的水文环境, 在此过程中  $\text{Mg}^{2+}$  逐渐取代碳酸盐岩晶格中的  $\text{Ca}^{2+}$ (图 8-c), 逐渐

使毗邻区带地层经历白云石化(Warren, 2000), 而在相对深水带白云石化流体影响较弱, 可形成灰岩基质中零散发育的白云石晶粒现象(图 3-a, 3-b)。此外, 现今此类白云岩的 U-Pb 年龄为  $470.73 \pm 6.19$  Ma(图 6-f), 与鹰山组沉积年龄(ca. 460~480 Ma)相近, 进一步证实了其准同生白云石化成因。

## 5.3 不同类型白云岩成储潜力评价

为客观评价 I 类埋藏成因白云岩、II 类准同生渗透-回流白云岩的成储潜力, 对 I 类、II 类白云岩发育层段岩心进行小柱样品的取样和覆压孔渗性测试。测试结果揭示, I 类白云岩孔隙度为 0.3%~1.0%、渗透率为  $(0.003 \sim 0.074) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 而 II 类白云岩的物性则明显变好, 孔隙度为 0.4%~2.0%、渗透率为  $(0.009 \sim 0.055) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 9 所示)。值得注意的是, I 类白云岩若受断裂-裂缝改造, 孔隙度则略微提升至 0.5%~1.3%、渗透率极大提升至  $(0.382 \sim 6.150) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 9), 前人也基于 SN501 井揭示出鹰山组下段裂缝改造型白云岩具备一定的成储潜力, 孔隙度可达到 2.5%~2.93%(尤东华等, 2018)。此外, I 类白云岩发育时所形成的较为密集的白云岩-灰岩互层现象(图 7, 顺北 81X), 理论上加剧了岩性地层互层差异所导致的地层能干性增加, 更有利于构造应力作用下破碎裂缝的形成(Olson, 2004; Tang *et al.*, 2008; 李映涛等, 2023)。顺北

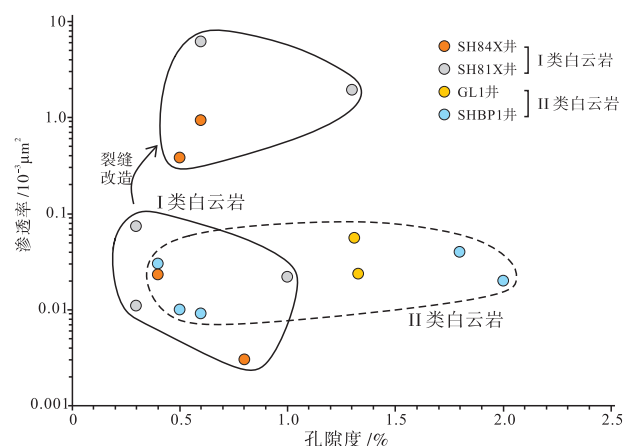


图 9 塔里木盆地顺北地区奥陶系鹰山组多类型白云岩小柱样孔隙度、渗透率交汇图

Fig. 9 Intersection diagram of porosity and permeability of small pillars of multi-type dolomites of the Ordovician Yingshan Formation in Shunbei area, Tarim Basin

地区发育多条克拉通内部走滑断裂体系(漆立新, 2020), 指示该区域具有有利的构造应力背景, 会使得 I 类白云岩的碎裂成储规模得到提升。

在下一阶段的勘探中, 针对顺北地区鹰山组 I 类、II 类成层发育的白云岩, 应该注重 I 类埋藏成因白云岩与构造应力有利区叠合区带, 寻找裂缝改造型规模白云岩储集层, 而 II 类准同生渗透回流白云岩多形成分布于古地貌的高部位, 应寻找其与岩溶暴露区、断裂改造的叠合区带, 以发现更具规模的白云岩储集体。

## 6 结论

1) 基于详细的岩石学、地球学证据, 揭示塔里木盆地顺北地区鹰山组发育 2 类成层分布的白云岩(I 类、II 类)。其中, I 类白云岩为埋藏压溶成因机制, 主要发育于相对低能(泥晶、粒泥)的沉积岩相内, 为埋藏升温环境下压溶缝合线驱动黏土矿物转化(高岭石向伊利石)过程中释放  $Mg^{2+}$  成因, 并且碳、氧同位素与围岩接近, 稀土微量元素具高  $(La/La^*)_{SN}$ 、 $(Ce/Ce^*)_{SN}$ 、 $(Eu/Eu^*)_{SN}$ 、 $V/Cr$  值等特征, 指示高温、还原的成因环境; II 类白云岩为准同生渗透一回流白云石化成因, 主要发育于相对高能(砂屑、亮晶砂屑)沉积岩相内, 为一定蒸发背景下在水文势驱动下富  $Mg^{2+}$  流体渗透一回流形成, 氧同位素相对围岩正偏, 其稀土微量元素具相对低  $(La/La^*)_{SN}$ 、 $(Ce/Ce^*)_{SN}$ 、 $(Eu/Eu^*)_{SN}$ 、 $V/Cr$  值等特征, 指示盐度高、偏氧化的成因环境。

2) 区带上, I 类白云石在顺北中区鹰山组较为发育, 而 II 类白云岩主要分布于顺北西区、顺南地区鹰山组内。实测物性显示 2 类白云石具有差异成储潜力, 其中准同生渗透一回流白云岩(II 类)孔渗性较高, 孔隙度( $\varphi$ )可达 0.4%~2.0%、渗透率( $K$ )可达  $(0.009 \sim 0.055) \times 10^{-3} \mu m^2$ 。I 类白云岩实测物性( $\varphi$ : 0.3%~1.0%;  $K$ :  $(0.003 \sim 0.074) \times 10^{-3} \mu m^2$ )虽低于 II 类白云岩, 但 I 类白云岩的发育可提升地层中白云岩和灰岩互层的比例, 具裂缝破碎改造增储的潜力。

### 参考文献 (References)

陈代钊, 钱一雄. 2017. 深层—超深层白云岩储集层: 机遇与挑战. 古地理学报, 19(2): 187-196. [Chen D Z, Qian Y X. 2017. Deep or super-deep dolostone reservoirs: opportunities and challenges. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 19(2): 187-196]

樊秋爽, 夏国清, 李高杰, 伊海生. 2022. 古海洋氧化还原条件分析方法与研究进展. 沉积学报, 40(5): 1151-1171. [Fan Q S, Xia G Q, Li G J, Yi H S. 2022. Analytical methods and research progress of redox conditions in the paleo-ocean. Acta Sedimentologica Sinica, 40(5): 1151-1171]

冯军, 张亚金, 张振伟, 付晓飞, 王海学, 王雅春, 刘洋, 张君龙, 李强, 冯子辉. 2022. 塔里木盆地古城地区奥陶系滩相白云岩气藏特征及主控因素. 石油勘探与开发, 49(1): 45-55. [Feng J, Zhang Y J, Zhang Z W, Fu X F, Wang H X, Wang Y C, Liu Y, Zhang J L, Li Q, Feng Z H. 2022. Characteristics and main control factors of Ordovician shoal dolomite gas reservoir in Gucheng area, Tarim Basin, NW China. Petroleum Exploration and Development, 49(1): 45-55]

冯增昭, 鲍志东, 吴茂炳, 金振奎, 时晓章, 骆艾荣. 2007. 塔里木地区奥陶纪岩相古地理. 古地理学报, 9(5): 447-460. [Feng Z Z, Bao Z D, Wu M B, Jin Z K, Shi X Z, Luo A R. 2007. Lithofacies Palaeogeography of the Ordovician in Tarim area. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 9(5): 447-460]

郭春涛, 李如一, 陈树民. 2018. 塔里木盆地古城地区鹰山组白云岩稀土元素地球化学特征及成因. 吉林大学学报(地球科学版), 48(4): 1121-1134. [Guo C T, Li R Y, Chen S M. 2018. Rare earth element geochemistry and genetic model of dolomite of Yingshan Formation in Gucheng area, Tarim Basin. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 48(4): 1121-1134]

何登发, 贾承造, 李德生, 张朝军, 孟庆任, 石昕. 2005. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化. 石油与天然气地质, 26(1): 64-77. [He D F, Jia C Z, Li D S, Zhang C J, Meng Q R, Shi X. 2005. Formation and evolution of polycyclic superimposed Tarim Basin. Oil and Gas Geology, 26(1): 64-77]

康仁东, 孟万斌, 肖春晖. 2020. 塔里木盆地顺南地区奥陶系鹰山组白云岩形成机制及其发育模式. 石油实验地质, 42(6): 900-909. [Kang R D, Meng W B, Xiao C H. 2020. Formation mechanisms and development models of dolomite reservoirs in Ordovician Yingshan Formation in Shunnan area, Tarim Basin. Petroleum Geology & Experiment, 42(6): 900-909]

李兴旺. 2020. 塔里木盆地顺北地区奥陶系碳酸盐岩储层特征研究. 成都理工大学硕士学位论文: 30-45. [Li X W. 2020. Sedimentary facies and depositional model of middle-lower Ordovician Yingshan Formation in Tazhong area. Masteral dissertation of Chengdu University of Technology: 30-45]

李映涛, 汝智星, 邓尚, 林会喜, 韩俊, 张继标, 黄诚. 2023. 塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩储层天然裂缝实验评价及油气意义. 石油实验地质, 45(3): 422-433. [Li Y T, Ru Z X, Deng S, Lin H X, Han J, Zhang J B, Huang C. 2023. Experimental evaluation and hydrocarbon significance of natural fractures in Shunbei ultra-deep carbonate reservoir, Tarim Basin. Petroleum Geology & Experiment, 45(3): 422-433]

林畅松, 李思田, 刘景彦, 钱一雄, 罗宏, 陈建强, 彭莉, 芮志峰. 2011. 塔里木盆地古生代重要演化阶段的古构造格局与古地理演化. 岩石学报, 27(1): 210-218. [Lin C S, Li S T, Liu J Y, Qian Y X, Luo H, Chen J Q, Peng L, Rui Z F. 2011. Tectonic framework and paleogeographic evolution of the Tarim Basin during the Paleozoic

- major evolutionary stages. *Acta Petrologica Sinica*, 27(1): 210-218]
- 刘嘉庆,李忠,颜梦珂, Peter K. Swart, 杨柳, 卢朝进. 2020. 塔里木盆地塔中地区下奥陶统白云岩的成岩流体演化: 来自团簇同位素的证据. *石油与天然气地质*, 41(1): 68-82. [Liu J Q, Li Z, Yan M K, Swart P K, Yang L, Lu C J. 2020. Diagenetic fluid evolution of dolomite from the Lower Ordovician in Tazhong area, Tarim Basin: clumped isotopic evidence. *Oil & Gas Geology*, 41(1): 68-82]
- 倪新锋, 沈安江, 乔占峰, 郑剑锋, 郑兴平, 杨钊. 2023. 塔里木盆地奥陶系缝洞型碳酸盐岩岩溶储层成因及勘探启示. *岩性油气藏*, 35(2): 144-158. [Ni X F, Shen A J, Qiao Z F, Zheng J F, Zheng X P, Yang Z. 2023. Genesis and exploration enlightenment of Ordovician fracture-vuggy carbonate karst reservoirs in Tarim Basin. *Lithologic Reservoirs*, 35(2): 144-158]
- 宁超众, 孙龙德, 胡素云, 徐怀民, 潘文庆, 李勇, 赵宽志. 2021. 塔里木盆地哈拉哈塘油田奥陶系缝洞型碳酸盐岩储层岩溶类型及特征. *石油学报*, 42(1): 15-32. [Ning C Z, Sun L D, Hu S Y, Xu H M, Pan W Q, Li Y, Zhao K Z. 2021. Karst types and characteristics of the Ordovician fracture-cavity type carbonate reservoirs in Halahatang oilfield, Tarim Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 42(1): 15-32]
- 彭军, 夏梦, 曹飞, 夏金刚, 李峰. 2022. 塔里木盆地顺北一区奥陶系鹰山组与一间房组沉积特征. *岩性油气藏*, 34(2): 17-30. [Peng J, Xia M, Cao F, Xia J G, Li F. 2022. Sedimentary characteristics of Ordovician Yingshan Formation and Yijianfang Formation in Shunbei-1 area, Tarim Basin. *Lithologic Reservoirs*, 34(2): 17-30]
- 漆立新. 2020. 塔里木盆地顺北超深断溶体油藏特征与启示. *中国石油勘探*, 25(1): 102-111. [Qi L X. 2020. Characteristics and inspiration of ultra-deep fault-karst reservoir in the Shunbei area of the Tarim Basin. *China Petroleum Exploration*, 25(1): 102-111]
- 沈安江, 罗宪婴, 胡安平, 乔占峰, 张杰. 2022. 从准同生到埋藏环境的白云石化路径及其成储效应. *石油勘探与开发*, 49(4): 637-647. [Shen A J, Luo X Y, Hu A P, Qiao Z F, Zhang J. 2022. Dolomitization evolution and its effects on hydrocarbon reservoir formation from penecontemporaneous to deep burial environment. *Petroleum Exploration and Development*, 49(4): 637-647]
- 孙玉景. 2016. 塔里木盆地台盆区中下奥陶统鹰山组岩相古地理研究. 西南石油大学硕士学位论文: 50-52. [Sun Y J. 2016. Lithofacies and paleogeography of Middle and lower Ordovician Yingshan Formation in Tarim Basin. Masteral dissertation of Southwest Petroleum University: 50-52]
- 王清华, 杨海军, 汪如军, 李世银, 邓兴梁, 李勇, 昌伦杰, 万效国, 张银涛. 2021. 塔里木盆地超深层走滑断裂断控大油气田的勘探发现与技术创新. *中国石油勘探*, 26(4): 58-71. [Wang Q H, Yang H J, Wang R J, Li S Y, Deng X L, Li Y, Chang L J, Wan X G, Zhang Y T. 2021. Discovery and exploration technology of fault-controlled large oil and gas fields of ultra-deep formation in strike slip fault zone in Tarim Basin. *China Petroleum Exploration*, 26(4): 58-71]
- 肖玮琦. 2019. 塔里木盆地顺托果勒低隆起奥陶系鹰山组沉积微相特征. 成都理工大学硕士学位论文: 52-57. [Xiao W Q. 2019. Sedimentary microfacies characteristics of Ordovician Yingshan Formation in Shuntuoguole lower uplift, Tarim Basin. Masteral dissertation of Chengdu University of Technology: 52-57]
- 尤东华, 韩俊, 胡文瑄, 陈强路, 曹自成, 席斌斌, 鲁子野. 2018. 塔里木盆地顺南501井鹰山组白云岩储层特征与成因. *沉积学报*, 36(6): 1206-1217. [You D H, Han J, Hu W X, Chen Q L, Cao Z C, Xi B B, Lu Z Y. 2018. Characteristics and genesis of dolomite reservoirs in the Yingshan Formation of Well SN501 in the Tarim Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 36(6): 1206-1217]
- 尤东华, 曹自成, 徐明军, 钱一雄, 王石, 王小林. 2020. 塔里木盆地奥陶系鹰山组多类型白云岩储层成因机制. *石油与天然气地质*, 41(1): 92-101. [You D H, Cao Z C, Xu M J, Qian Y X, Wang S, Wang X L. 2020. Genetic mechanism of multi-type dolomite reservoirs in Ordovician Yingshan Formation, Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 41(1): 92-101]
- 张哨楠, 黄柏文, 隋欢, 叶宁, 李映涛. 2019. 古城地区鹰山组储层特征及成岩孔隙演化. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 41(1): 33-46. [Zhang S N, Huang B W, Sui H, Ye N, Li Y T. 2019. The reservoir characteristics and the pore evolution of Yingshan Formation in Gucheng region, Tarim Basin. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 41(1): 33-46]
- 赵锐, 赵腾, 李慧莉, 焦存礼, 高晓鹏, 赵学琴. 2019. 塔里木盆地顺托果勒地区中下奥陶统鹰山组与一间房组沉积相与旋回地层. *东北石油大学学报*, 43(4): 1-16. [Zhao R, Zhao T, Li H L, Jiao C L, Gao X P, Zhao X Q. 2019. Sedimentary facies and cyclic stratigraphy of Yingshan and Yijianfang formations of Lower-Middle Ordovician in Shuntuoguole area, Tarim Basin. *Journal of Northeast Petroleum University*, 43(4): 1-16]
- 赵宗举, 吴兴宁, 潘文庆, 张兴阳, 张丽娟, 马培领, 王振宇. 2009. 塔里木盆地奥陶纪层序岩相古地理. *沉积学报*, 27(5): 939-955. [Zhao Z J, Wu X N, Pan W Q, Zhang X Y, Zhang L J, Ma P L, Wang Z Y. 2009. Sequence lithofacies paleogeography of Ordovician in Tarim Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(5): 939-955]
- 郑和荣, 田景春, 胡宗全, 张翔, 赵永强, 孟万斌. 2022. 塔里木盆地奥陶系岩相古地理演化及沉积模式. *石油与天然气地质*, 43(4): 733-745. [Zheng H R, Tian J C, Hu Z Q, Zhang X, Zhao Y Q, Meng W B. 2022. Lithofacies palaeogeographic evolution and sedimentary model of the Ordovician in the Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 43(4): 733-745]
- Bau M. 1991. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium. *Chemical Geology*, 93: 219-230.
- Bau M, Koschinsky A, Dulski P, Hein J R. 1996. Comparison of the partitioning behaviors of yttrium, rare earth elements, and titanium between hydrogenetic marine ferromanganese crusts and seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60: 1709-1725.
- Bau M, Balan S, Schmidt K, Koschinsky A. 2010. Rare earth elements in mussel shells of the Mytilidae family as tracers for hidden and fossil high-temperature hydrothermal systems. *Earth and Planetary Science Letters*, 299: 310-316.
- Ben-Israel M, Holder R M, Nelson L L, Smith E F, Kylander-Clark A R C, Ryb U. 2024. Late Paleozoic oxygenation of marine environments

- supported by dolomite U-Pb dating. *Nature Communication*, 15: 2892.
- Boles J R, Franks S G. 1979. Clay diagenesis in Wilcox Sandstones of Southwest Texas; implications of smectite diagenesis on sandstone cementation. *Journal of Sedimentary Research*, 49: 55-70.
- Craddock P R, Bach W, Seewald J S, Rouxel O J, Reeves E, Tivey M K. 2010. Rare earth element abundances in hydrothermal fluids from the Manus Basin, Papua New Guinea; indicators of sub-seafloor hydrothermal processes in back-arc basins. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74: 5494-5513.
- Delpomdor F, Blanpied C, Virgone A, Préat A. 2013. Paleoenvironments in Meso-Neoproterozoic carbonates of the Mbuji-Mayi Supergroup (Democratic Republic of Congo): microfacies analysis combined with C-O-Sr isotopes, major-trace elements and REE+Y distributions. *Journal of African Earth Sciences*, 88: 72-100.
- Hill C A, Polyak V J, Asmerom Y, Provencio P. 2016. 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. *Tectonics*, 35(3-4): 896-906.
- Jones B, Manning D A C. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical Geology*, 111: 111-129.
- Kamber B S, Bolhar R, Webb G E. 2004. Geochemistry of late Archaean stromatolites from Zimbabwe: evidence for microbial life in restricted epicontinental seas. *Precambrian Research*, 132: 379-399.
- Land L S. 1980. The isotopic and trace element geochemistry of dolomite: the state of the art. In: Zenger D H, Dunham J B, Ethington R L (eds). *Concepts and Models of Dolomitization*. SEPM Special Publication, 28: 87-110.
- Liu X M, Hardisty D S, Lyons T W, Swart P K. 2019. Evaluating the fidelity of the cerium paleoredox tracer during variable carbonate diagenesis on the Great Bahamas Bank. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 248: 25-42.
- Machel H G. 1999. Effects of groundwater flow on mineral diagenesis, with emphasis on carbonate aquifers. *Hydrogeology Journal*, 7(1): 94-107.
- Martin R. 1966. Paleogeomorphology and its application to exploration for oil and gas (with examples from western Canada). *AAPG Bulletin*, 50(10): 2277-2311.
- McHargue T R, Price R C. 1982. Dolomite from clay in argillaceous or shale-associated marine carbonates. *Journal of Sedimentary Petrology*, 52(3): 873-886.
- McLennan S M. 1989. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 21(1): 169-200.
- Michard A, Albarède F, Michard G, Minster J F, Charlou J L. 1983. Rare-earth elements and uranium in high-temperature solutions from East Pacific Rise hydrothermal vent field (13° N). *Nature*, 303: 795-797.
- Olson J E. 2004. Predicting fracture swarms: the influence of subcritical crack growth and the crack-tip process zone on joint spacing in rock. *Geological Society, London, Special Publications*, 231: 73-88.
- Roberts N M W, Rasbury E T, Parrish R R, Smith C J, Horstwood M S A, Condon D J. 2017. A calcite reference material for LA-ICP-MS U-Pb geochronology. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18: 2807-2814.
- Sun S Q. 1994. A reappraisal of dolomite abundance and occurrence in the Phanerozoic. *Journal of Sedimentary Research*, 64(2): 396-404.
- Sun S Q. 1995. Dolomite reservoirs: porosity evolution and reservoir characteristics. *AAPG Bulletin*, 79(2): 186-204.
- Tanaka K, Tani Y, Takahashi Y, Tanimizu M, Suzuki Y, Kozai N, Ohnuki T. 2010. A specific Ce oxidation process during sorption of rare earth elements on biogenic Mn oxide produced by *Acremonium* sp. strain KR21-2. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74: 5463-5477.
- Tang C A, Liang Z Z, Zhang Y B, Chang X, Tao X, Wang D G, Zhang J X, Liu J S, Zhu W C, Elsworth D. 2008. Fracture spacing in layered materials: a new explanation based on two-dimensional failure process modeling. *American Journal of Science*, 308: 49-72.
- Tang H S, Chen Y J, Santosh M, Zhong H, Yang T. 2013. REE geochemistry of carbonates from the Guanmenshan Formation, Liaohe Group, NE Sino-Korean Craton: implications for seawater compositional change during the Great Oxidation Event. *Precambrian Research*, 227: 316-336.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. *The Continental Crustal: Its Composition and Evolution*. Oxford: Blackwell, 311-312.
- Veizer J, Ala D, Azmy K, Bruckschen P, Buhl D, Bruhn F, Carden G A F, Diener A, Ebneth S, Godderis Y, Jasper T, Korte C, Pawellek F, Podlaha O G, Strauss H. 1999.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  evolution of Phanerozoic seawater. *Chemical Geology*, 161: 59-88.
- Wang Q X, Lin Z J, Chen D F. 2014. Geochemical constraints on the origin of Doushantuo cap carbonates in the Yangtze Gorges area, South China. *Sedimentary Geology*, 304: 59-70.
- Warren J K. 2000. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations. *Earth-Science Reviews*, 52(1): 1-81.
- Wu H P, Jiang S Y, Palmer M R, Wei H Z, Yang J H. 2019. Positive cerium anomaly in the Doushantuo cap carbonates from the Yangtze platform, South China: implications for intermediate water column manganese conditions in the aftermath of the Marinoan glaciation. *Precambrian Research*, 320: 93-110.
- Zhao Y Y, Zheng Y F, Chen F K. 2009. Trace element and strontium isotope constraints on sedimentary environment of Ediacaran carbonates in southern Anhui, South China. *Chemical Geology*, 265(3-4): 345-362.

(责任编辑 张西娟; 英文审校 刘贺娟)