



震旦系一下寒武统白云岩优势成岩—成储效应深层白云岩成因及差异成储

刘媛媛, 王子晨, 明鑫雨, 姜磊

引用本文:

刘媛媛, 王子晨, 明鑫雨, 等. 震旦系一下寒武统白云岩优势成岩—成储效应深层白云岩成因及差异成储[J]. 沉积学报, 2024, 42(6): 2159-2173.

LIU YuanYuan, WANG ZiChen, MING XinYu, et al. Profitable Diagenetic Path and Reservoir Formation Efficiency of the Sinian-Lower Cambrian Dolostone: Origins of deep dolomites and differential reservoir formation[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(6): 2159-2173.

相似文献推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

非常规油气沉积学: 内涵与展望

Unconventional Petroleum Sedimentology: Connotation and prospect

沉积学报. 2020, 38(1): 1-29 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.116>

富有机质泥页岩纳米级孔隙结构特征研究进展

Research Advances on Characteristics of Nanopore Structure of Organic-rich Shales

沉积学报. 2019, 37(6): 1309-1324 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.030>

裂后沉降期碳酸盐岩缓坡沉积响应及成储特征——以塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组为例

Depositional Differentiation and Reservoir Potential and Distribution of Ramp Systems during Post-rift Period: An example from the Lower Cambrian Xiaerbulake Formation in the Tarim Basin, NW China

沉积学报. 2019, 37(5): 1044-1057 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.006>

伊拉克哈法亚油田白垩系Mishrif组碳酸盐岩孔隙结构及控制因素

Pore Structure Characteristics and Control Factors of Carbonate Reservoirs: The Cretaceous Mishrif Formation, Halfaya oilfield, Iraq

沉积学报. 2018, 36(5): 981-994 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.078>

致密砂岩储层致密化与成藏史耦合关系研究——以鄂尔多斯南部镇原—泾川地区延长组长8油层组为例

The Coupling Relationship of Reservoir Densification History and Hydrocarbon Emplacement in Tight Sandstone Reservoir: A case study of the Chang 8 Oil Member, Yanchang Formation, southern Ordos Basin

沉积学报. 2018, 36(2): 401-414 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.029>

文章编号: 1000-0550(2024)06-2159-15

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2023.041

# 震旦系一下寒武统白云岩优势成岩—成储效应 ——深层白云岩成因及差异成储

刘媛媛<sup>1</sup>, 王子晨<sup>2,3</sup>, 明鑫雨<sup>2,3</sup>, 姜磊<sup>1,2,3,4</sup>

1. 成都理工大学沉积地质研究院, 成都 610059

2. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化与环境演变全国重点实验室, 北京 100029

3. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

4. 长江大学资源与环境学院, 武汉 430100

**摘要** 【目的】深层—超深层碳酸盐岩具有巨大的油气勘探潜力。由于经历了复杂的成岩改造, 其储层具有非均质性强、预测困难等显著特征。因此, 厘清优势成岩作用对储层的差异性改造, 即优势成储效应, 是揭示深部碳酸盐岩储层成因的关键。【方法】基于系统对比四川盆地和塔里木盆地(含少量阿曼盆地和西伯利亚台地数据)震旦系一下寒武统白云岩储层地球化学参数及孔隙度与渗透率, 包括碳氧同位素( $n=617$ )、锶同位素( $n=189$ )、稀土元素( $n=106$ )、流体包裹体均一化温度( $n=161$ )、团簇同位素温度( $n=117$ )和孔隙度与渗透率( $n=1557$ ), 建立了两个层系储层不同成因白云石和晚期方解石的地球化学特征模板。【结果】两个层系储层成岩矿物的地球化学特征总体上具有较高的相似性, 均经历了白云石化、大气水、裂隙、热液作用等具建设性意义的成岩改造过程。而与下寒武统白云岩储层相比, 区内储层质量最高的灯影组经历的渗透回流白云石化作用及后期热液流体改造作用最强, 表明差异性成岩改造是成储效应优劣的关键。【结论】综合上述特点, 提出四川盆地和塔里木盆地震旦系—寒武系优质白云岩储层的发育主要受沉积期蒸发作用及晚期构造热液发育程度共同控制。该认识可用于深层—超深层碳酸盐岩储层预测, 对深部油气勘探具有重要的启示意义。

**关键词** 深层—超深层油气勘探; 碳酸盐岩; 白云石化; 成岩作用; 孔隙演化; 成储效应

**第一作者简介** 刘媛媛, 女, 1999年出生, 硕士研究生, 地质学, E-mail: 1398525279@qq.com

**通信作者** 姜磊, 男, 研究员, E-mail: lei.jiang@mail.iggcas.ac.cn

**中图分类号** P588.24\*5 **文献标志码** A

## 0 引言

碳酸盐岩的油气产量占全球总产量的60%以上, 并且半数以上为白云岩储层。深层(>4500 m)含油气盆地碳酸盐岩的探明油气储量占全球总储量的1/3以上, 其白云岩储层的成因是近年来国内外石油勘探的研究热点与重点<sup>[1]</sup>。寒武系—前寒武系油气藏以白云岩储层为主<sup>[2-3]</sup>, 只有少数油气产出于碎屑岩和岩浆岩<sup>[4-5]</sup>, 是近年来国内外深层油气勘探的重点, 例如我国的四川盆地、塔里木盆地和阿曼的南阿曼盐盆(South Oman Salt Basin)等。特别是我国在塔里木盆地和四川盆地的勘探实践充分表明了深层—超深层碳酸盐岩潜力巨大, 油气地质理论研究向万

米深层进军乃大势所趋<sup>[6-10]</sup>。然而, 深层碳酸盐岩储层成因复杂, 受成岩及裂隙化改造程度高且过程复杂。因此, 厘清储层成岩演化过程及其与孔隙形成的关系, 对深部储层发育规律的认识及储层预测等颇有裨益<sup>[11-16]</sup>。

四川盆地与塔里木盆地震旦系一下寒武统以白云岩为主, 储层孔隙度高(孔隙度达14.4%), 且富含天然气资源<sup>[17]</sup>。由于该套地层经历长期的构造及其他成岩流体改造, 致使学者在储层成因方面存在颇多争议<sup>[6,10]</sup>。尽管前人已开展了大量的成岩作用研究, 并取得了系统的成岩改造过程及流体特征、来源的认识<sup>[18-22]</sup>, 然而在优势成岩改造及差异性成储效应研究方面的考虑相对欠缺。至今未见将不同地区、

收稿日期: 2023-03-26; 修回日期: 2023-05-23; 录用日期: 2023-06-08; 网络出版日期: 2023-06-08

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA0430202) [Foundation: The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No. XDA0430202]

层位进行综合对比研究的报道,而其对研究区差异性成储效应的成因可能有新的启示意义。

基于上述问题,本研究系统对比了四川盆地和塔里木盆地的震旦系一下寒武统白云岩储层地球化学特征及孔渗特征,并对国外西伯利亚台地 Parshino 组、Byuk 组、Uspun 组、Kudulakh 组、Yuryakh 组<sup>[23-24]</sup>,阿曼盆地 Huqf 组<sup>[25]</sup>和 Ara 群<sup>[26-27]</sup>的地球化学特征进行对比。统计包括四川盆地、塔里木盆地、阿曼盆地和西伯利亚台地早寒武统和震旦系(埃迪卡拉系)各类白云石和方解石的碳氧同位素( $n=617$ )、锶同位素( $n=189$ )、稀土元素( $n=106$ )、流体包裹体均一化温度( $n=161$ )、团簇同位素温度( $n=117$ )、孔隙度与渗透率( $n=1557$ )数据<sup>[23-50]</sup>。

此次选择数据的依据与标准:(1)四川、塔里木盆地重点收集四个目的层(灯影组、龙王庙组、其格布拉克、奇格布拉克组、肖尔布拉克组)白云岩储层相关数据;(2)国外盆地选择阿曼盆地和西伯利亚台地埃迪卡拉系至下寒武统,主要原因是其亦发育含蒸发岩的白云岩油气储层,相应的数据可与四川盆地、塔里木盆地进行对比分析。另外,尽管上述统计的地球化学与岩石物理数据测试来自国内外不同实验室,但各数据均有统一的国际标准和分析方法,可用于对比研究。值得注意的是,以上层系均为油气储层,且储层岩石的沉积年龄相近,均为前寒武纪—寒武纪转折期。因此,本研究所取得的认识对全球

前寒武系—寒武系深层—超深层白云岩勘探可能具有范式启示意义。

### 1 区域地质背景

四川盆地地处中国西南部,位于上扬子地台中上部,属华南板块西北部,面积约 $2.3 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。四川盆地震旦系—寒武系地层可划分为陡山沱组、灯影组、筇竹寺组、沧浪铺组、龙王庙组、高台组以及洗象池群(图1)。陡山沱组直接不整合覆盖于南沱组之上,广泛发育代表深水—半深水的黑色页岩、浅水泥晶碳酸盐岩以及局部磷块岩<sup>[52]</sup>,与上覆灯影组以陡山沱组顶部黑色页岩、粉砂岩为界。四川盆地震旦系灯影组自下而上划分为灯一段、灯二段、灯三段、灯四段。研究区曾经历多期次构造运动,其中震旦纪晚期桐湾运动对灯影组储层发育起重要作用<sup>[50]</sup>。筇竹寺组主要岩性为深灰色粉砂质泥岩、深灰—灰黑色页岩、泥晶灰岩等。沧浪铺组岩性可以划分为上下两段,下段岩性主要为含砾砂岩、粉砂岩紫红色砂岩;上段岩性为灰质细砂岩、含泥质条带灰岩<sup>[53]</sup>。龙王庙组主要岩性为泥晶白云岩、砂级内碎屑颗粒云岩、鲕粒云岩以及膏质云岩等。高台组沉积总体上继承了龙王庙组的沉积格局,洗象池群主要沉积了大套碳酸盐岩沉积,沉积岩性为浅灰—深灰色泥晶白云岩,可见薄层粉砂岩、砂砾屑白云岩夹层。

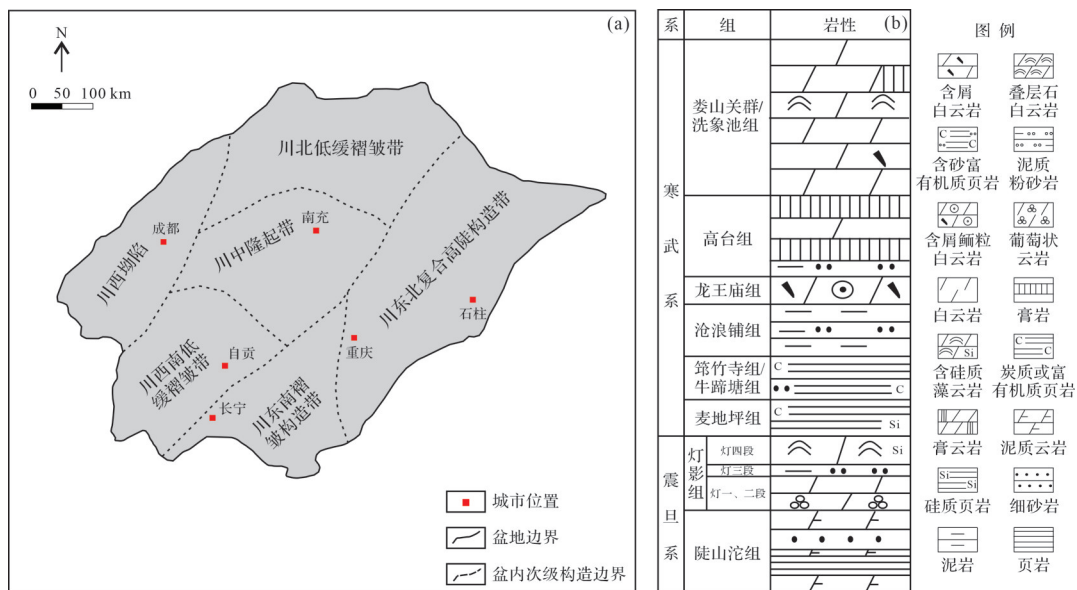


图1 四川盆地地理位置图(a)及岩性地层综合柱状图(b)(据文献[50-51]修改)

Fig.1 Schematic diagram of the geographical location (a) and a typical stratigraphic column (b) of the study area (modified from references [50-51])

塔里木盆地面积约 $56 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,是中国最大的含油气盆地。塔里木盆地构造格局受其北部天山、西南部昆仑山及东南部阿尔金山等造山带的构造活动影响<sup>[54]</sup>。上震旦统奇格布拉克组及上覆中下寒武统均为碳酸盐岩沉积(图2)。奇格布拉克组为一套分布在中央隆起带以北地区的以蓝细菌藻白云岩、颗粒白云岩为主的地层,可见大量叠层石。寒武纪开始,塔里木盆地进入裂后沉降阶段,呈现出东西分异<sup>[55]</sup>。下寒武统自下而上划分为玉尔吐斯组、肖尔布拉克组及吾松格尔组。玉尔吐斯组是一套以黑色泥页岩、薄层含磷结核硅质泥岩为主的海泛期沉积;肖尔布拉克组可划分为三个岩性段,下段为深灰色—黑灰色薄层泥晶云岩、中段发育薄层—中厚层(藻)颗粒白云岩/泡沫棉层白云岩及藻云岩、上段则发育薄层泥质藻(纹层)白云岩夹薄层颗粒滩云岩;吾松格尔组表现出薄—中层泥质白云岩与泥粉晶白云岩互层的特征,局部见薄—中厚层膏盐岩。中寒武统发育了巨厚的蒸发岩,最厚在400 m以上,垂向上划分为沙依里克组和阿瓦塔格组,除沙依里克组顶部发育一套40~60 m厚灰岩外,均表现为中—厚层膏盐岩夹膏云岩或含泥云岩<sup>[56]</sup>(图2)。

## 2 白云岩地球化学特征

已有研究表明四川盆地灯影组和龙王庙组储层及塔里木盆地奇格布拉克组经历了较为类似的成岩作用过程(图3),包括早期渗透回流白云石化及白云石胶结和晚期多期的埋藏或热液白云石化、早期的大气水作用、油气充注与有机酸溶蚀、晚期裂缝相关的石英与方解石充填及热化学硫酸盐活动,且晚期成岩流体具有较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值特征等。以上说明不同地区两个层系经历了相似的埋藏及成岩流体改造过程,两地储层的成因模式可能类似,而目前差异性成储效应的原因可能是优势成岩改造的强度不一致造成的。鉴于此,本研究统计了国内外震旦系一下寒武统碳酸盐岩的地球化学特征,用于判别成岩矿物成因、成岩过程及发育的强度,且本论文重点探讨了储层中发育的五期白云石及一期晚期方解石,其成因分类综合并沿用了前人的分类标准<sup>[34,37,39,42,53]</sup>。五期白云石按照其成岩先后顺序依次为:(1)泥微晶白云石基质(D1);(2)早期白云石胶结物(D2),其在震旦系中表现为粗—巨晶(几百微米至毫米级)的纤维状白云石,而在下寒武统中表现为晶粒状白云石,其晶体大小大多在 $100 \mu\text{m}$ 以内;(3)浅埋藏白云石胶

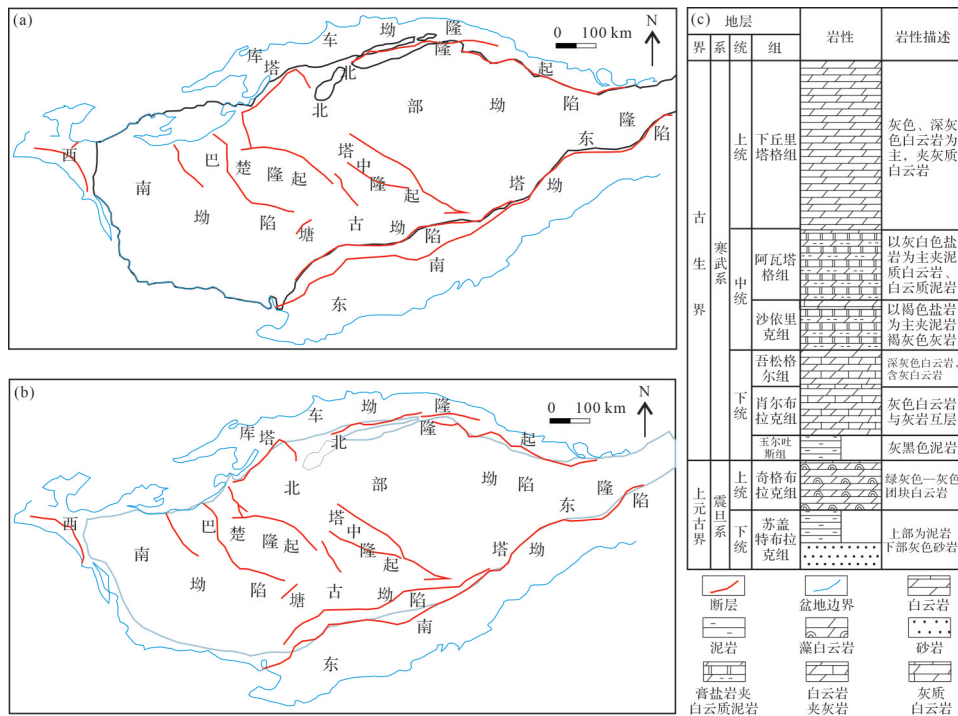


图2 塔里木盆地震旦系—寒武系地质特征(据文献[54]修改)

(a)震旦系顶面构造图;(b)寒武系顶面构造图;(c)岩性地层综合柱状图

Fig.2 Sinian and Cambrian geological characteristics in Tarim Basin (modified from reference [54])

(a) structural map of the top surface of the Sinian strata; (b) structural map of the top surface of the Cambrian strata; (c) typical stratigraphic column of the study area

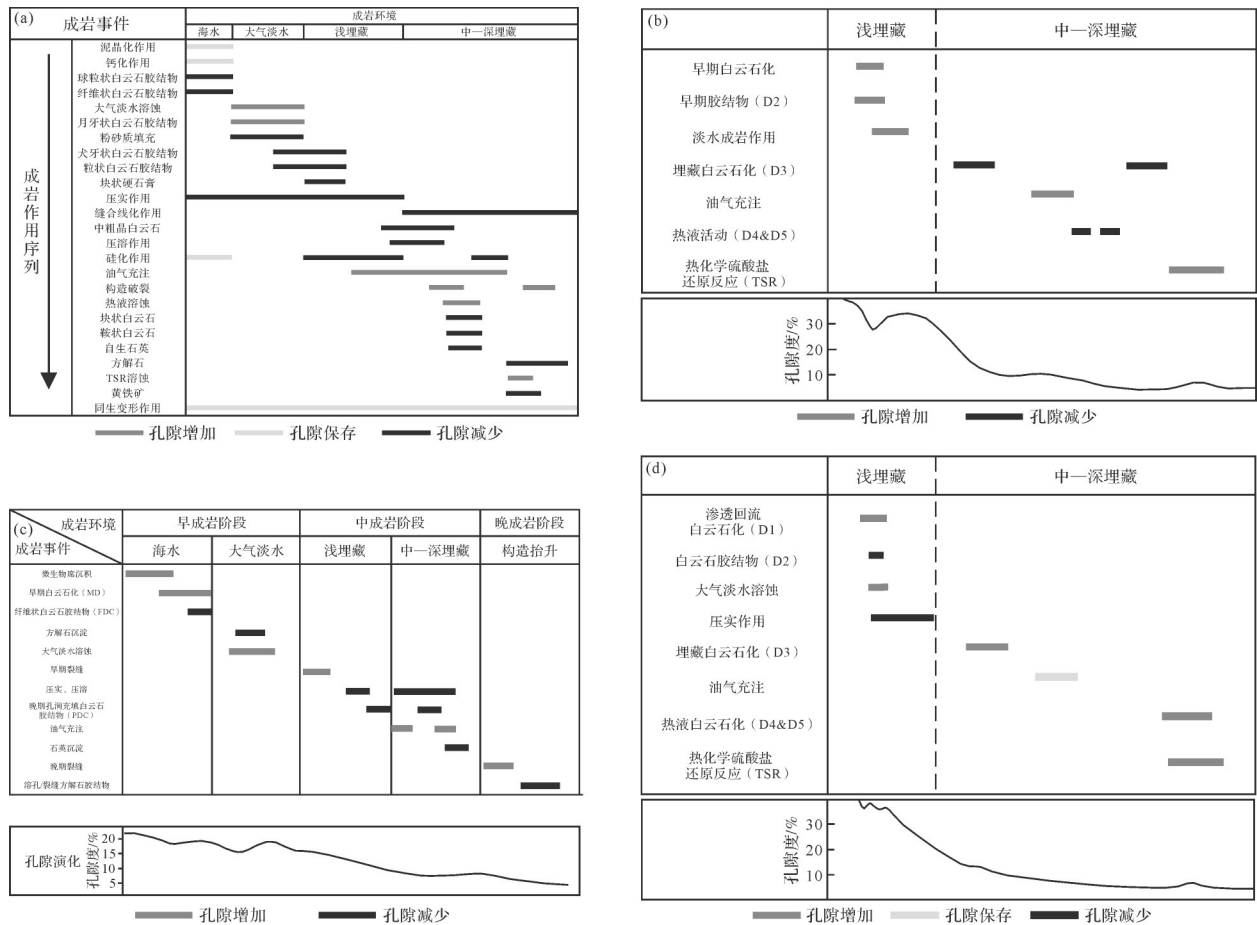


图3 研究区不同层系储层的成岩演化模式对比

(a) 肖尔布拉克组; (b) 龙王庙组; (c) 奇格布拉克组; (d) 灯影组

Fig.3 Comparison of diagenetic evolution patterns among different formations from this study

(a) Xiaerbrak Formation; (b) Longwangmiao Formation; (c) Qigebulake Formation; (d) Dengying Formation

结物(D3),以中—粗晶为主(100~300 μm);(4)中—深白云石胶结物(D4),以粗晶为主,晶体大小一般为几百个微米,少数可达毫米级;(5)构造热液白云石(D5),晶体一般大于500 μm,可高达2 mm。而晚期方解石(LC)一般与热液白云石具有紧密的共生关系,以巨晶、嵌晶状为主,方解石晶体一般大于500 μm,可高达毫米级。

2.1 碳氧同位素特征

统计了国内外典型盆地中震旦系(埃迪卡拉系)一下寒武统白云岩及晚期方解石的碳氧同位素数据,包括四川盆地地下寒武统龙王庙组<sup>[28-29]</sup>、震旦系灯影组<sup>[30-31]</sup>,塔里木盆地地下寒武统玉尔吐斯组<sup>[32]</sup>、肖尔布拉克组<sup>[32-39]</sup>,震旦系苏盖特布拉克组<sup>[32]</sup>、奇格布拉克组<sup>[32,35-38]</sup>,江汉盆地埃迪卡拉系陡山沱组<sup>[39]</sup>,西伯利亚台地 Parshino 组、Byuk 组、Uspun 组、Kudulakh 组、Yuryakh 组<sup>[23-24]</sup>,阿曼盆地 Huqf 组<sup>[25]</sup>和 Ara 群<sup>[26-27]</sup>。其中下寒武统数据 243 个,震旦系数据 374 个。通过

$\delta^{13}C$  和  $\delta^{18}O$  同位素<sup>[37]</sup>协变图将不同成岩阶段白云石和晚期方解石区分,并结合矿物学特征建立了五期成岩白云石和一期晚期方解石的碳氧同位素分布特征。总体而言,基质白云石(D1)和早期白云石胶结物(D2)具有最大的  $\delta^{13}C$  (-3‰~+8‰) 和  $\delta^{18}O$  (-7‰~0),与同时期海相碳酸盐岩的碳同位素类似,而氧同位素相对偏正,表明流体具有蒸发海水特征,可能为渗透回流白云石化的产物<sup>[13]</sup>;浅埋藏白云石胶结物(D3)较同期海水更负的  $\delta^{13}C$  (-8‰~0) 和  $\delta^{18}O$  (-12‰~-8‰),指示其可能经历大气淡水和/或重结晶作用<sup>[13]</sup>;相比之下深埋藏白云石(D4)具有类似于同期海水的  $\delta^{13}C$  (-2‰~+3‰) 和偏负的  $\delta^{18}O$  (-12‰~-7‰),表明为高温海源流体沉淀的产物;而热液白云石(D5)与 D4 相比具有略微偏负的  $\delta^{13}C$  (-4‰~+2‰) 和更负的  $\delta^{18}O$  值(-13‰~-8‰),同时 D5 常具有鞍形白云石特征,指示其为高温热液的产物。晚期方解石(LC)具有相对最低的  $\delta^{13}C$  (-14‰~0) 和  $\delta^{18}O$

(-13‰~-8‰),说明其与高温、富有机质流体相关。

基于对上述五期白云石和一期晚期方解石的碳氧同位素值分布范围的刻画可建立其识别图版(图4),结合其他证据,如岩石学及其他地球化学参数,可以综合判别各类碳酸盐岩成岩产物的成因。上述六类成岩碳酸盐岩矿物随成岩事件从图的右上角(最正的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值)向左下角(最负的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值)依次分布,表明成岩流体由最初的蒸发海水依次向正常海水和埋藏热流体转变;一些白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值存在较大重合,说明可能经历了类似的成岩流体改造。值得注意的是,与下寒武统白云岩储层相比,震旦系白云岩储层经历了更强的蒸发流体白云石化和晚期由于烃类氧化产生的方解石。因此,震旦系白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值具有更明显的线性分布特征(图4)。

进而对比全球各个层系的碳氧同位素分布情况,不难发现国外的Ara组和西伯利亚等地区的白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值普遍较高(图5),这可能与其发育广泛的蒸发岩有关,即 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素偏高是强蒸发作用的结果。本次研究所涉及的两个盆地的四个层系总体表现出较高的相似性,碳氧同位素按成岩时间先后呈现出较好的线性分布特征,且主要表现为 $\delta^{18}\text{O}$ 值差异大, $\delta^{13}\text{C}$ 值差异小。其中 $\delta^{18}\text{O}$ 值主要受成岩早期蒸发作用和埋藏增温的影响。因此, $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 协变图能很好地区分出研究区不同碳酸盐岩产物的成岩过程。

### 2.2 锶同位素特征

统计了四川盆地和塔里木盆地震旦系一下寒武

统白云岩及晚期方解石的Sr同位素数据,包括四川盆地龙王庙组<sup>[28]</sup>、灯影组<sup>[30-31]</sup>,塔里木盆地玉尔吐斯组<sup>[32]</sup>、肖尔布拉克组<sup>[32,34]</sup>、苏盖特布拉克组<sup>[34]</sup>、奇格布拉克组<sup>[35,37,39]</sup>。其中下寒武统 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 数据71个,震旦系 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值数据118个。总体上,下寒武统的早成岩白云石(D1、D2)具有同期海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值特征,说明白云石化流体主要来自同沉积海水;而D3白云石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值分布从同期海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值特征增高至0.7110,表明局部有富 $^{87}\text{Sr}$ 流体的贡献,说明白云石重结晶流体有来自淋滤了陆源碎屑 $^{87}\text{Sr}$ 的贡献;深埋藏白云石(D4)具有海源 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值特征;而热液白云石(D5)和晚期方解石(LC)均具有较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,表明成岩流体淋滤了陆源碎屑富 $^{87}\text{Sr}$ (图6)。相比之下,震旦系早成岩白云石(D1、D2)的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值分布极广,海水特征高达0.7100,说明经历了后期富 $^{87}\text{Sr}$ 流体的改造;埋藏和热液白云石(D4、D5) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值分布范围很广,海源特征高达0.7130(图6)。下寒武统的晚期成岩方解石(LC)具有超出海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值特征(>0.7100),而震旦系白云石具有比同时期海水略高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(<0.7095)。值得注意的是,与下寒武统白云岩储层相比,震旦系中主要的白云石类型,包括渗透回流白云石(D1、D2)、埋藏白云石(D4)和热液白云石(D5)具有更高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,指示震旦系储层经历更强度度的埋藏成岩改造(图6)。

各个层系的锶同位素分布情况对比显示,四个层系均受到不同程度富 $^{87}\text{Sr}$ 流体的改造作用(图7)。

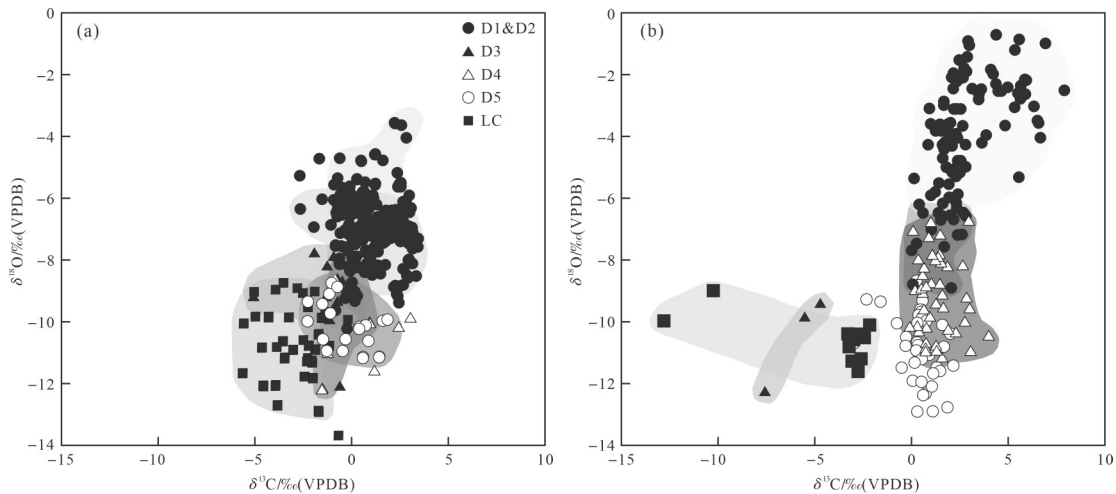


图4 各类白云石和晚期方解石 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 协变图

(a)下寒武统;(b)震旦系

Fig.4 Cross plots for  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values of various types of dolomite and late diagenetic calcite

(a) lower Cambrian; (b) Sinian

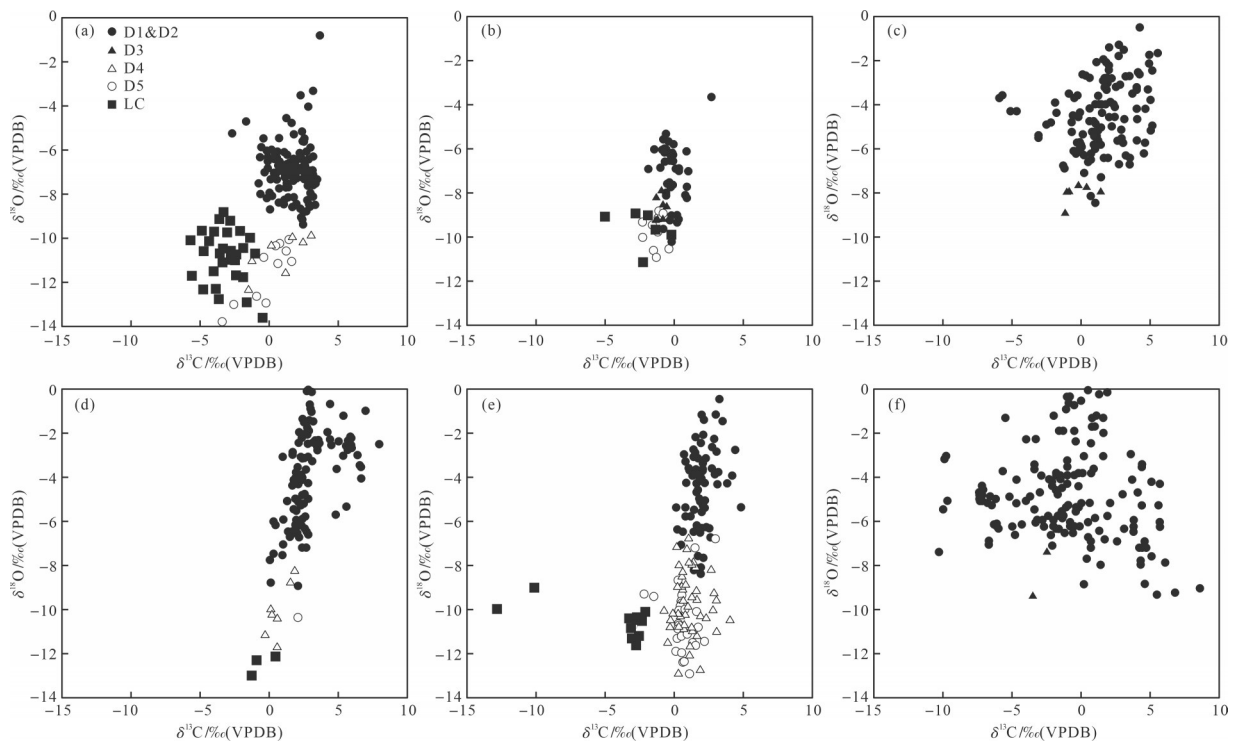


图5 全球不同地区震旦系(埃迪卡拉系)一下寒武统各类白云石和晚期方解石 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 协变图

(a)肖尔布拉克组;(b)龙王庙组;(c)Ara群,Bilir组,Yuryakh组;(d)奇格布拉克组;(e)灯影组;(f)西伯利亚台地埃迪卡拉系

Fig.5 Cross plots for  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  values of various types of dolomite and late diagenetic calcite across the global Sinian-lower Cambrian profiles

(a) Xiaerbrak Formation; (b) Longwangmiao Formation; (c) Ara Group, Bilir Formation, Yuryakh Formation; (d) Qigebrak Formation; (e) Dengying Formation; (f) Ediacaran strata of the Siberian Platform

比较而言,四川盆地灯影组和塔里木盆地肖尔布拉克组具有更为宽泛的Sr比值分布范围,指示受成岩富 $^{87}\text{Sr}$ 流体的改造程度相比同一盆地的其他层系(四川盆地龙王庙组和塔里木盆地奇格布拉克组)更高。

结合白云石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值的协变关系可分析其成岩流体来源(图8)。此次统计的六类成岩碳酸盐岩矿物随成岩事件发生的先后大致呈现出从图右下角(最大的 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值和最低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值)向左上角(最小的 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素值和最高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值)逐渐过渡的趋势,表明成岩过程中储层成岩流体由最初的海源流体为主向以富 $^{87}\text{Sr}$ 的埋藏热流体为主的转变。值得注意的是,各类型白云石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值存在一些重合区间指示白云石重结晶或沉淀过程经历或叠加了类似的成岩流体改造。与下寒武统白云岩储层相比,震旦系白云岩储层经历了更强的早期蒸发流体(富 $^{16}\text{O}$ )白云石化和构造热液(富 $^{87}\text{Sr}$ )的改造,造成震旦系白云岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值具有更明显的线性分布特征(图8)。

### 2.3 稀土元素特征

本研究统计了四川盆地和塔里木盆地震旦系一下寒武统白云岩及晚期方解石的稀土微量元素数据,包括四川盆地下寒武统龙王庙组<sup>[28]</sup>、震旦系灯影组<sup>[40-41]</sup>、塔里木盆地下寒武统肖尔布拉克组<sup>[34]</sup>、震旦系奇格布拉克组<sup>[39]</sup>。其中包括下寒武统微量元素数据65组,震旦纪微量元素数据41组,并对其进行了后太古代平均页岩(Post-Archean Average Shale, PAAS)标准化来绘制了稀土元素分配曲线,用以识别各类白云石、方解石的稀土元素丰度和分布形态。相比较而言,早成岩白云石(D1、D2),包括渗透回流白云石和正常海水白云石具有类似海水,即 $\text{Ce}^*$ 负异常和右上扬的稀土配分曲线特征;深埋藏白云石(D4)具有比较平缓的稀土配分曲线特征并显示 $\text{Ce}^*$ 负异常;热液白云石(D5)具有明显的重稀土富集和 $\text{Eu}^*$ 正异常特征;而晚成岩方解石(LC)具有明显的轻稀土富集、重稀土亏损及 $\text{Eu}^*$ 正异常(图9)。总体上,早寒武世和震旦纪两个年代地层不同成岩阶段碳酸盐岩矿物的稀土配分曲线具有很好的相似性。相比之下,震

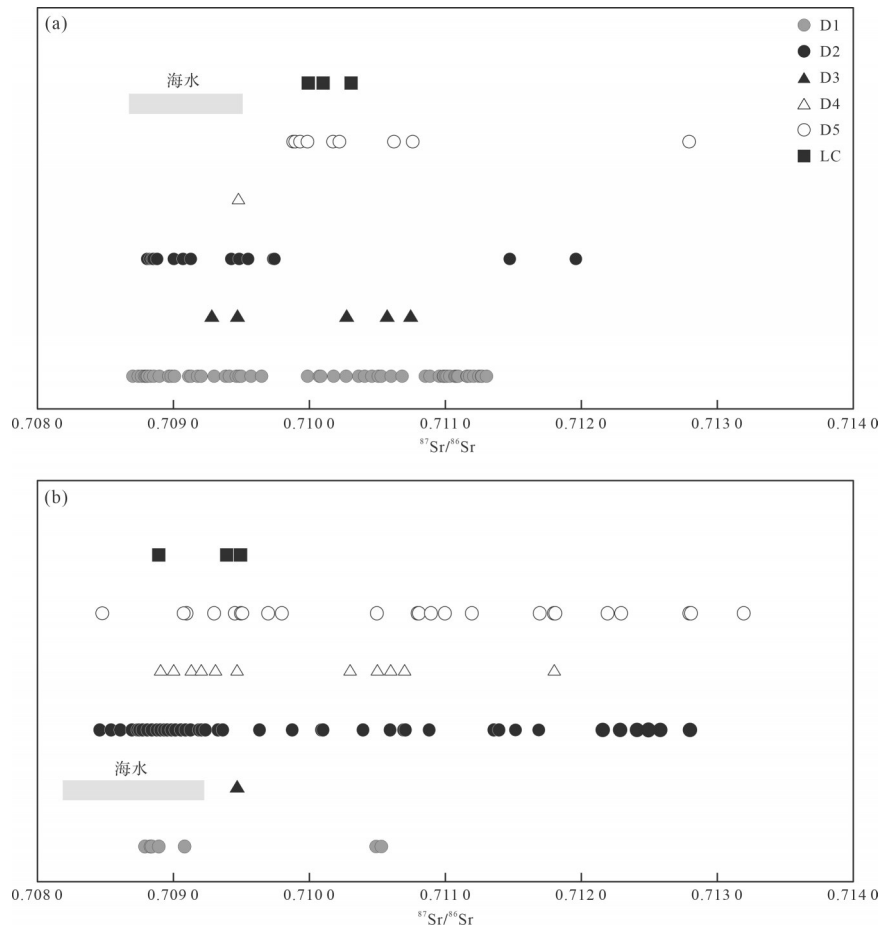


图6 各类白云石和晚期方解石  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值

(a)下寒武统;(b)震旦系

Fig.6  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  range for various types of dolomite and late diagenetic calcite

(a) lower Cambrian; (b) Sinian

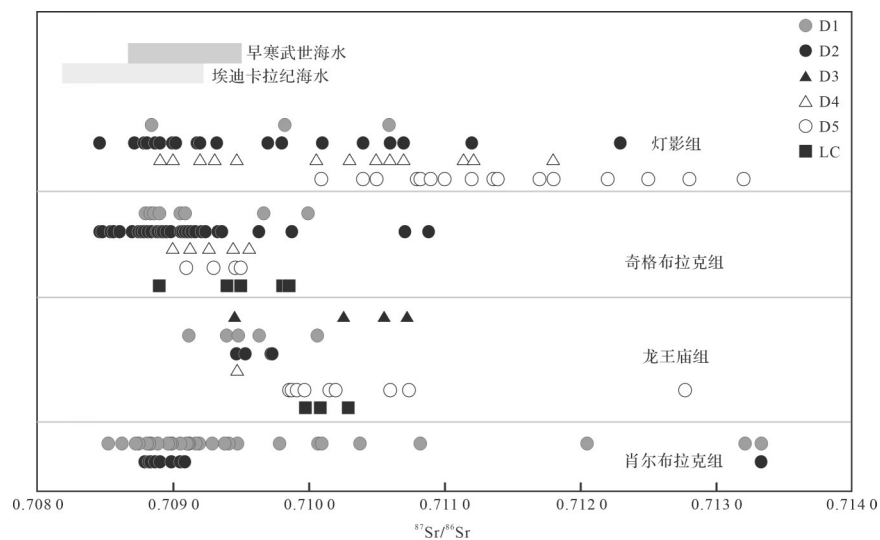


图7 研究区震旦系一下寒武统各类白云石和晚期方解石锶同位素对比图

Fig.7 Comparison of the Sr isotopic values for various types of dolomite and late diagenetic calcite across the Sinian-lower Cambrian profiles from this study



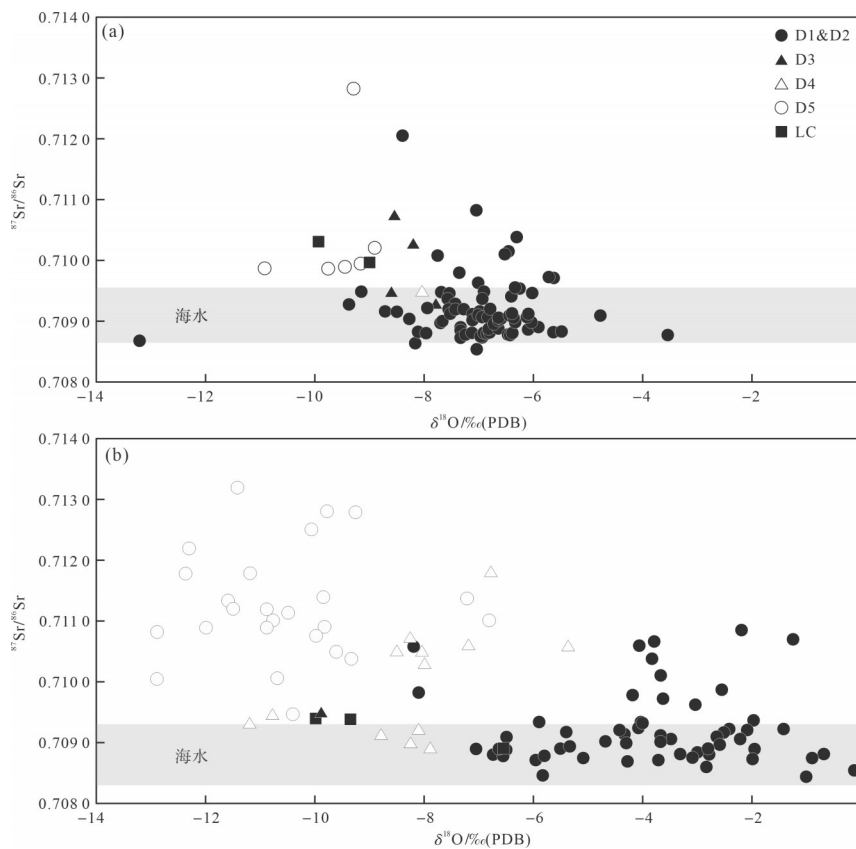


图8 各类白云石和晚期方解石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 协变图

(a)下寒武统;(b)震旦系

Fig.8 Cross plot of  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  for various types of dolomite and late diagenetic calcite

(a) lower Cambrian; (b) Sinian

旦系早成岩白云石(D1、D2)较下寒武统具有更明显的海源特征( $\text{Ce}^*$ 负异常和右上扬的稀土配分曲线);而寒武系热液白云石(D5)较震旦系更具热液特征( $\text{Eu}^*$ 正异)(图9)。

#### 2.4 成岩温度特征

收集统计了国内外典型盆地中震旦系一下寒武统白云岩及晚期方解石的流体包裹体均一温度和团簇同位素温度( $T_{\Delta 47}$ )数据。数据涵盖四川盆地下寒武统龙王庙组<sup>[28]</sup>、震旦系灯影组<sup>[31,39]</sup>、塔里木盆地下寒武统肖尔布拉克组<sup>[37]</sup>、震旦系奇格布拉克组<sup>[38]</sup>、江汉盆地埃迪卡拉系陡山沱组<sup>[33]</sup>和阿曼盆地Ara群<sup>[27]</sup>。统计的温度数据包括下寒武统流体包裹体均一温度数据42个、碳酸盐岩团簇同位素温度数据41个,震旦系流体包裹体均一温度数据119个,碳酸盐岩团簇同位素温度数据76个。将统计数据综合分析,建立了各期成岩白云石和晚期方解石的成岩温度分布特征图(图10,11)。数据表明,早成岩白云石(D1、D2)温度最低,一般低于 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;而浅埋藏白云石(D3)具有略高的成岩温度特征,主要介于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;相比

之下,深埋藏白云石(D4)的成岩温度主要介于 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,平均值约为 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;而热液白云岩(D5)和晚期方解石(LC)具有更高的温度特征,均主要介于 $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,平均值约为 $155\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图10)。与下寒武统相比,震旦系中的各类碳酸盐岩成岩矿物具有更为宽泛的成岩温度范围,表明经历了温度更高、更广泛的成岩流体改造(图10)。

对比本次研究涉及的两个盆地、四个层系及国外Ara群成岩矿物的温度分布特征(图11),结果显示肖尔布拉克组与龙王庙组具有类似的平均成岩温度( $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),相比之下,肖尔布拉克组成岩矿物温度分布范围更广。灯影组显示出最宽泛且最高的成岩温度范围( $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。而奇格布拉克组的成岩温度范围最低( $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。相对高的成岩温度可能指示了更广泛的晚期成岩改造,反之,则预示了储层后期成岩不发育,说明原生孔隙在早期成岩至浅埋藏成岩过程中已消失殆尽。因此,储层中晚期成岩改造的发育程度可以间接指示其孔隙的相对发育程度。

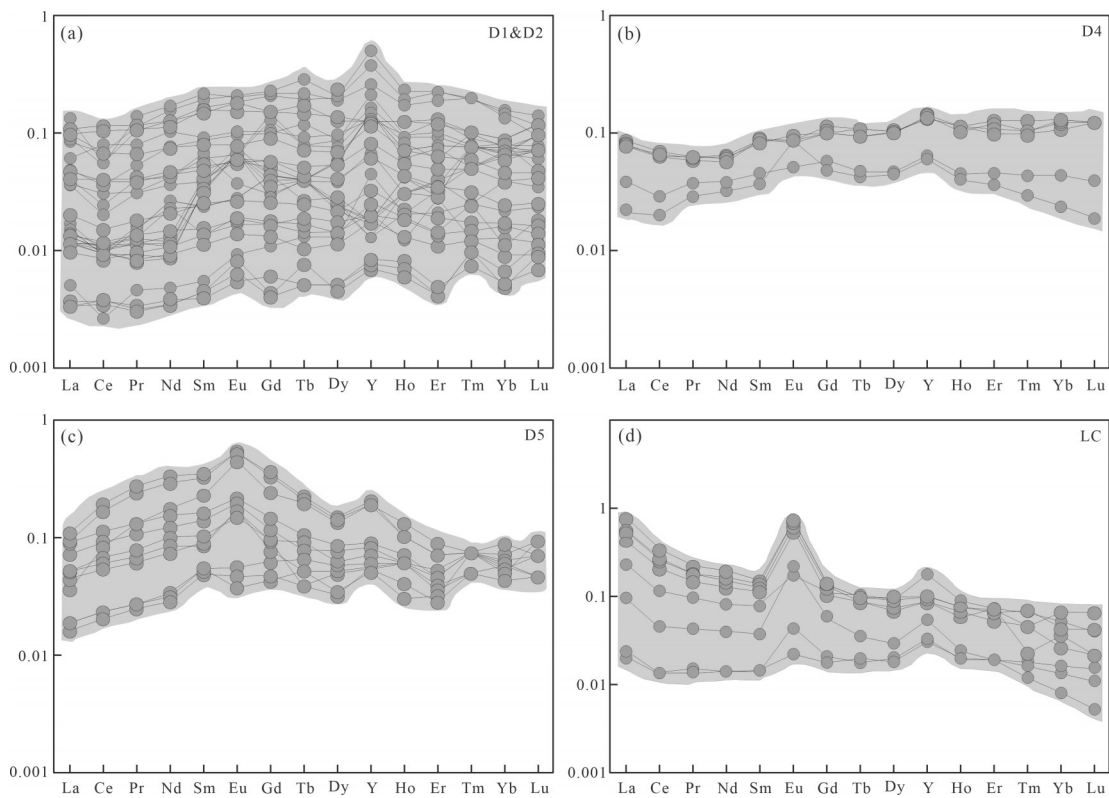


图9 震旦系和下寒武统各类白云石和晚期方解石稀土元素配分曲线分布特征图版

(a)早成岩白云石;(b)深埋藏白云石;(c)热液白云石;(d)晚成岩方解石

Fig.9 Rare earth element +yttrium (REY) distribution pattern for various types of dolomite and late diagenetic calcite for the Sinian and lower Cambrian profiles

(a) early diagenetic dolomite; (b) deep burial of dolomite; (c) hydrothermal dolomite; (d) late diagenetic calcite

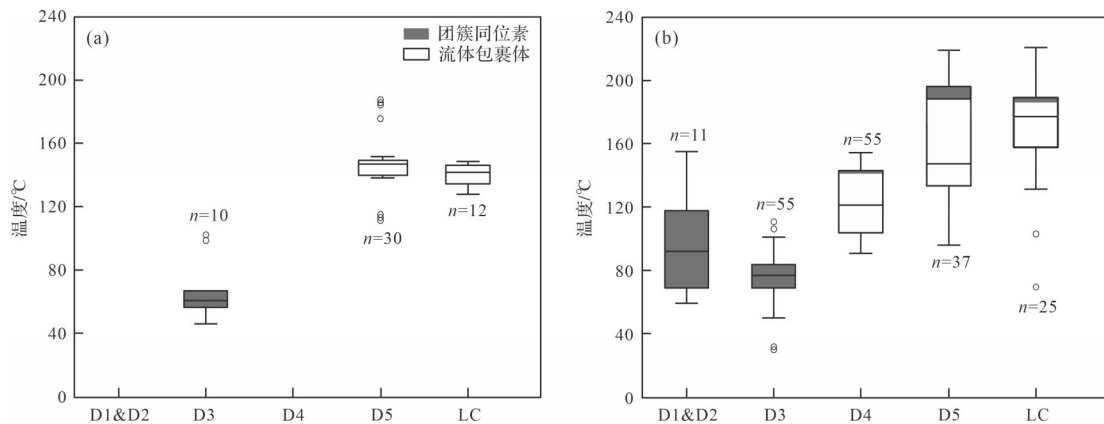


图10 各类白云石和晚期方解石形成温度特征图版

(a)下寒武统;(b)震旦系

Fig.10 Diagenetic temperature for various types of dolomite and late diagenetic calcite

(a) lower Cambrian; (b) Sinian

为了揭示震旦系一下寒武统储层质量差异性成因及其与成岩演化的内在联系,进而统计了两个盆地的孔隙度与渗透率数据共1 557个<sup>[42-49]</sup>。结果显示两个盆地、四个层系的白云岩储层孔隙度的分布区间类似,而渗透率的差异显著(图12)。总体上灯影组的储层性能最佳,表现为中低孔—高渗;龙王庙组

储层的储层质量次之,孔渗的分布范围跨度大;肖尔布拉克组的储层质量劣于前两者,表现为中—低孔、中—高渗;而奇格布拉克组的储层质量最差,以低孔—低渗为主要特征。值得注意的是,这些储层具有比较类似的沉积相<sup>[21,28-30,33,38]</sup>,说明沉积环境差异不是导致储层孔隙差异的主要原因。因此,上述分析

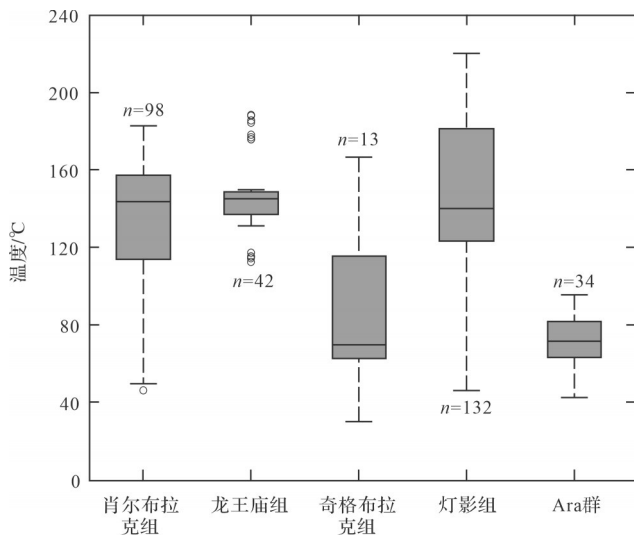


图 11 不同层系各类白云石和晚期方解石形成温度特征图版

Fig.11 Diagenetic temperature for various types of dolomite and late diagenetic calcite from different formations

间接指示差异性成岩作用可能是造成储层质量差异的主要控制因素。

### 3 优势成岩—成储效应

上述对储层地球化学特征的系统分析充分说明塔里木盆地和四川盆地震旦系—下寒武统的白云岩储层经历了相似的成岩改造过程,这亦体现在四个

目的储层灯影组、龙王庙组、奇格布拉克组、肖尔布拉克组具有相似的成岩共生序列上(图3)。概括来说,自原始灰岩沉积后两套地层均经历了广泛的渗透回流白云石化作用并形成基质白云岩。由于新元古海水以高Mg/Ca比值为特征,导致震旦系中富含纤维状白云石胶结,其在下寒武统中缺失可能与当时海水的Mg/Ca比值显著降低有关<sup>[57]</sup>。此后,地层经历构造抬升与大气水淋滤等的影响,导致储层的物理与化学性质显著改变。其中,各层位一些基质白云石的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值显著升高可能与大气水淋滤陆源碎屑物质相关,指示附近出露古陆及其风化剥蚀作用增加。地层在进一步的埋藏压实过程中发育多期白云石胶结(D3、D4)充填了部分孔隙空间。在晚期构造抬升过程中,白云岩储层被油气充注并伴有一期热液活动,并在储层中沉淀了鞍形白云石(D5)、方解石(LC)、萤石、石英等热液矿物及一些沥青充填。值得注意的是,这些热液矿物的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值显著升高,表明热液为外部流体,可能来自盆地深部并淋滤了富<sup>87</sup>Sr的碎屑岩地层<sup>[11-14]</sup>。

岩石薄片中可见热液矿物(鞍型白云石、方解石、石英等)充填于裂隙内,并基本堵塞了孔隙空间。同时,热液矿物主要分布在断裂区域附近,可见其在区内的分布主要受断裂活动控制。这种断裂表现出非组构选择性特征,即在各个岩相类型中,如潮坪、

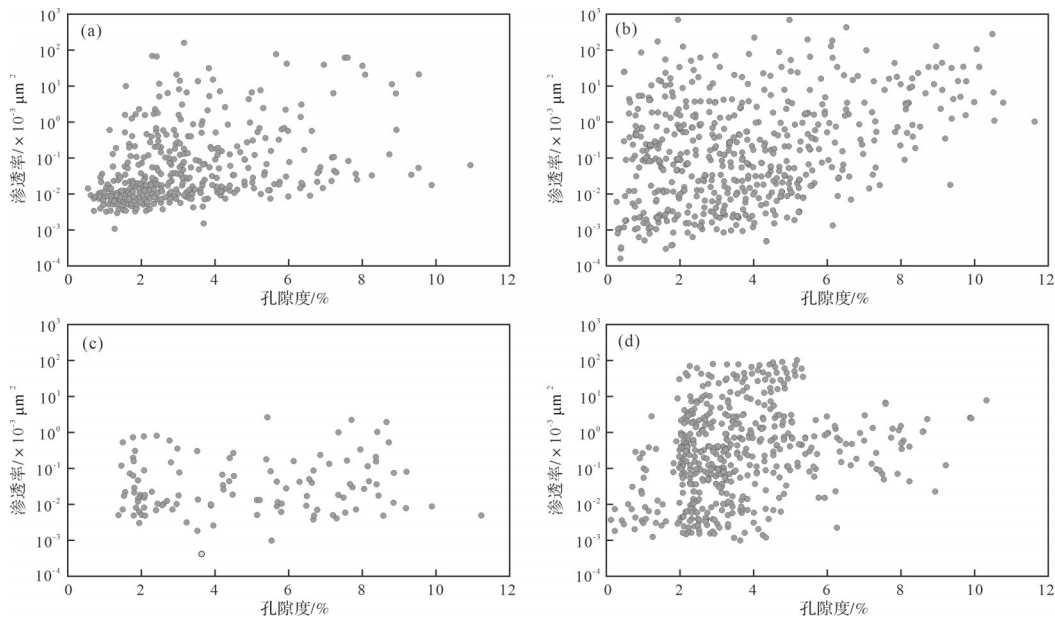


图 12 研究区不同层系白云岩储层孔隙度与渗透率分布对比图

(a) 肖尔布拉克组; (b) 龙王庙组; (c) 奇格布拉克组; (d) 灯影组

Fig.12 Comparison of porosity vs. permeability distribution patterns among different formations from this study

(a) Xiaerbrak Formation; (b) Longwangmiao Formation; (c) Qigebrak Formation; (d) Dengying Formation

潟湖、滩相复合体以及中缓坡等均发育。另外,受热液改造的储层段以低孔隙度(皆小于2%,平均值为0.92%)、低渗透率( $<0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ )为特征,表现为减孔效应。这类现象在龙王庙组尤为突出并与经典断控热液溶蚀型储层类型存在差异<sup>[58]</sup>,如塔里木盆地奥陶系顺北油气田,说明热液流体未能持续带走体系内溶解组分从而表现为胶结物沉淀<sup>[59]</sup>;而灯影组一些受热液影响的井位其孔隙度明显优于未受热液影响的井位<sup>[31]</sup>。综合来看,热液活动主要影响断裂周边区域,且对不同地区与层位影响相差迥异,主要表现为在溶蚀区明显增孔,而在沉淀区明显减孔。因此,构造活跃期相对开放、广泛的流体活动(包括热液)对研究区白云岩储层的改造程度越高,储层质量被改善的可能性亦越大。从而得到四个目的层位成岩流体温度越高、经历成岩改造时间越长的结论。因此,储层所经历的成岩改造程度和范围越强、储层质量亦越好(图12,13)。

综上所述,研究区不同地区、层位的成储效应差异主要受控于晚期构造裂隙的差异性分布及与之相关流体对储层的差异性改造。一方面,裂隙化过程发育能够提高白云岩储层的孔渗能力,另外一方面与之相关的热液流体在流体受限的充填区具有显著的减孔效应,而在流体活动顺畅的溶蚀区则具有叠加增孔、增渗效应。因此,优质储层形成与大规模构造断裂活动关系紧密。本研究充分说明了优势成岩改造对震旦系一下寒武统优质储层发育的重要控制作用,同时,构造成岩流体对深层碳酸盐岩优势性成岩改造的这一认识,亦适用于其他地区类似储层成因机制及预测方面研究,如塔里木盆地奥陶系、四川盆地中二叠统等。因此,研究结果对四川盆地与塔里木盆地深层油气勘探具有重要的启示意义。今后研究应对储层裂隙分布进行精细刻画,在此基础上对裂隙充填矿物开展系统的年代学研究(比如方解石、白云石的U-Pb定年)以期建立构造活动的年代序

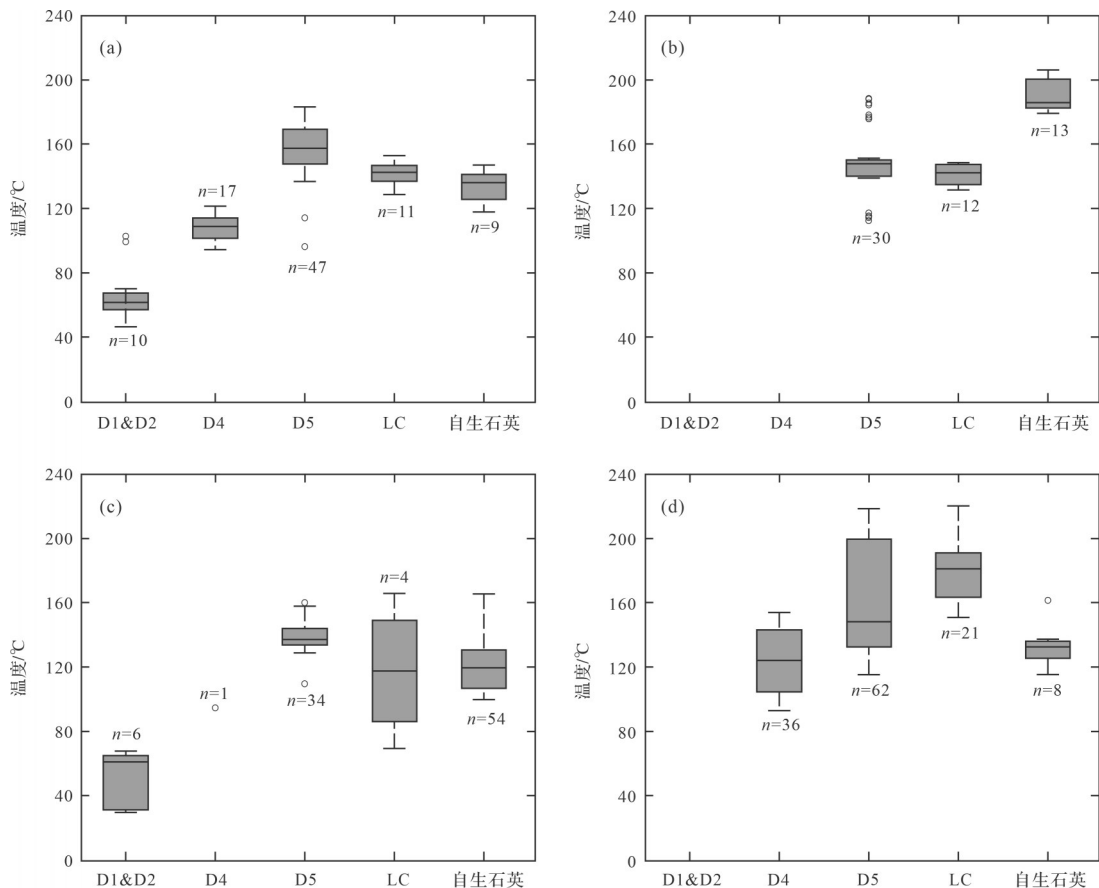


图13 震旦系一下寒武统储层成岩矿物温度对比

(a)肖尔布拉克组;(b)龙王庙组;(c)奇格布拉克组;(d)灯影组;D1&D2为早成岩白云石;D4为深埋藏白云石;D5为热液白云石;LC为晚成岩方解石

Fig.13 Comparison of precipitation temperatures for diagenetic minerals from the Sinian-lower Cambrian profiles

(a) Xiaerbrak Formation; (b) Longwangmiao Formation; (c) Qigebrak Formation; (d) Dengying Formation; D1&D2 is early diagenetic dolomite; D4 is deeply buried dolomite; D5 is hydrothermal dolomite; LC is late diagenetic calcite

列,进而结合成储、成烃、成藏的年代学研究建立油气系统形成与演化的精细时间轴及有利储层和油气资源空间分布的精准预测,提升深层油气资源的勘探与开发效率。

## 4 结论

(1) 对比四川盆地和塔里木盆地震旦系一下寒武统储层中五期白云石和一期晚期方解石的地球化学特征(碳、氧、锶同位素、稀土元素、成岩温度),并提出两个层系的各类碳酸盐岩成岩改造过程高度相似。

(2) 与下寒武统白云岩储层相比,震旦系储层经历了蒸发程度更强的渗透回流白云石化作用,说明早期白云石可能更发育。另外,四川盆地震旦系灯影组经历了更广泛、程度更高的构造成岩改造过程,其储层质量最好,说明构造成岩作用对研究区的储层质量具有正面意义。

(3) 阐明了白云石化、大气水、裂隙、热液等优势成岩作用对储层质量的提升具有建设意义,并揭示出差异性构造热液活动的发育及与之相关流体对储层的改造决定了成储效应的优劣。这一认识能够助力研究区深层的高效油气勘探。

致谢 十分感谢评审专家及期刊编辑的建设性意见,对文章质量的提升及发表颇有帮助。

## 参考文献(References)

- [1] Ohm S E, Karlsen D A, Austin T J F. Geochemically driven exploration models in uplifted areas: Examples from the Norwegian Barents Sea[J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(9): 1191-1223.
- [2] Grotzinger J, Al-Rawahi Z. Depositional facies and platform architecture of microbialite-dominated carbonate reservoirs, Ediacaran-Cambrian Ara Group, Sultanate of Oman[J]. AAPG Bulletin, 2014, 98(8): 1453-1494.
- [3] Frolov S V, Akhmanov G G, Bakay E A, et al. Meso-Neoproterozoic petroleum systems of the eastern Siberian sedimentary basins[J]. Precambrian Research, 2015, 259: 95-113.
- [4] Salah M G, Alsharhan A S. The Precambrian basement: A major reservoir in the rifted basin, gulf of Suez[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1998, 19(3/4): 201-222.
- [5] Amthor J E, Ramseyer K, Faulkner T, et al. Stratigraphy and sedimentology of a chert reservoir at the Precambrian-Cambrian boundary: The Al Shomou Silicilyte, South Oman Salt Basin[J]. GeoArabia, 2005, 10(2): 89-122.
- [6] 马永生, 蔡勳育, 赵培荣. 深层、超深层碳酸盐岩油气储层形成机理研究综述[J]. 地学前缘, 2011, 18(4): 181-192. [Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Zhao Peirong. The research status and advances in porosity evolution and diagenesis of deep carbonate reservoir [J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(4): 181-192. ]
- [7] 孙龙德, 邹才能, 朱如凯, 等. 中国深层油气形成、分布与潜力分析[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(6): 641-649. [Sun Longde, Zou Caineng, Zhu Rukai, et al. Formation, distribution and potential of deep hydrocarbon resources in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 641-649. ]
- [8] 贾承造, 庞雄奇. 深层油气地质理论研究进展与主要发展方向[J]. 石油学报, 2015, 36(12): 1457-1469. [Jia Chengzao, Pang Xiongqi. Research processes and main development directions of deep hydrocarbon geological theories[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(12): 1457-1469. ]
- [9] 何治亮, 金晓辉, 沃玉进, 等. 中国海相超深层碳酸盐岩油气成藏特点及勘探领域[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(1): 3-14. [He Zhiliang, Jin Xiaohui, Wo Yujin, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics and exploration domains of ultra-deep marine carbonates in China[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(1): 3-14. ]
- [10] 何治亮, 张军涛, 丁茜, 等. 深层—超深层优质碳酸盐岩储层形成控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 633-644, 763. [He Zhiliang, Zhang Juntao, Ding Qian, et al. Factors controlling the formation of high-quality deep to ultra-deep carbonate reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 633-644, 763. ]
- [11] Jiang L, Cai C F, Worden R H, et al. Multiphase dolomitization of deeply buried Cambrian petroleum reservoirs, Tarim Basin, north-west China[J]. Sedimentology, 2016, 63(7): 2130-2157.
- [12] Jiang L, Pan W, Cai C, et al. Fluid mixing induced by hydrothermal activity in the Ordovician carbonates in Tarim Basin, China [J]. Geofluids, 2015, 15(3): 483-498.
- [13] Jiang L, Shen A J, Wang Z C, et al. U-Pb geochronology and clumped isotope thermometry study of Neoproterozoic dolomites from China[J]. Sedimentology, 2022, 69(7): 2925-2945.
- [14] Jiang L, Worden R H, Cai C F, et al. Diagenesis of an evaporite-related carbonate reservoir in deeply buried Cambrian strata, Tarim Basin, northwest China[J]. AAPG Bulletin, 2018, 102(1): 77-102.
- [15] Jiang L, Worden R H, Cai C F, et al. Contrasting diagenetic evolution patterns of platform margin limestones and dolostones in the Lower Triassic Feixianguan Formation, Sichuan Basin, China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 92: 332-351.
- [16] Jiang L, Worden R H, Yang C B. Thermochemical sulphate reduction can improve carbonate petroleum reservoir quality[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2018, 223: 127-140.
- [17] 魏国齐, 李君, 余源琦, 等. 中国大型气田的分布规律及下一步勘探方向[J]. 天然气工业, 2018, 38(4): 12-25. [Wei Guoqi, Li Jun, She Yuanqi, et al. Distribution laws of large gas fields and further exploration orientation and targets in China[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(4): 12-25. ]

- [18] Surdam R C, Jiao Z S, MacGowan D B. Redox reactions involving hydrocarbons and mineral oxidants: A mechanism for significant porosity enhancement in sandstones[J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(9): 1509-1518.
- [19] 蔡春芳,梅博文,马亭,等. 塔里木盆地有机酸来源、分布及对成岩作用的影响[J]. 沉积学报, 1997, 15(3): 103-109. [Cai Chunfang, Mei Bowen, Ma Ting, et al. The source, distribution of organic acids in oilfield waters and their effects on mineral diagenesis in Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1997, 15(3): 103-109.]
- [20] Bildstein O, Worden R H, Brosse E. Assessment of anhydrite dissolution as the rate-limiting step during thermochemical sulfate reduction[J]. Chemical Geology, 2001, 176(1/2/3/4): 173-189.
- [21] 朱光有,张水昌,梁英波,等. TSR对深部碳酸盐岩储层的溶蚀改造:四川盆地深部碳酸盐岩优质储层形成的重要方式[J]. 岩石学报, 2006, 22(8): 2182-2194. [Zhu Guangyou, Zhang Shuichang, Liang Yingbo, et al. Dissolution and alteration of the deep carbonate reservoirs by TSR: An important type of deep-buried high-quality carbonate reservoirs in Sichuan Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(8): 2182-2194.]
- [22] 张水昌,朱光有,何坤. 硫酸盐热化学还原作用对原油裂解成气和碳酸盐岩储层改造的影响及作用机制[J]. 岩石学报, 2011, 27(3): 809-826. [Zhang Shuichang, Zhu Guangyou, He Kun. The effects of thermochemical sulfate reduction on occurrence of oil-cracking gas and reformation of deep carbonate reservoir and the interaction mechanisms[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(3): 809-826.]
- [23] Kochnev B B, Pokrovsky B G, Kuznetsov A B, et al. C and Sr isotope chemostratigraphy of Vendian-lower Cambrian carbonate sequences in the central Siberian Platform[J]. Russian Geology and Geophysics, 2018, 59(6): 585-605.
- [24] Pokrovsky B G, Mavromatis V, Pokrovsky O S. Co-variation of Mg and C isotopes in Late Precambrian carbonates of the Siberian Platform: A new tool for tracing the change in weathering regime?[J]. Chemical Geology, 2011, 290(1/2): 67-74.
- [25] Vandeginste V, John C M, Beckert J. Diagenetic geobodies: Fracture-controlled burial dolomite in outcrops from northern Oman[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2015, 18(1): 84-93.
- [26] Schoenherr J, Reuning L, Kukla P A, et al. Halite cementation and carbonate diagenesis of intra-salt reservoirs from the Late Neoproterozoic to early Cambrian Ara Group (South Oman Salt Basin)[J]. Sedimentology, 2009, 56(2): 567-589.
- [27] Bergmann K D, Al Balushi S A K, Mackey T J, et al. A 600-million-year carbonate clumped-isotope record from the sultanate of Oman[J]. Journal of Sedimentary Research, 2018, 88(8): 960-979.
- [28] Liu D W, Cai C F, Hu Y J, et al. Multistage dolomitization and formation of ultra-deep lower Cambrian Longwangmiao Formation reservoir in central Sichuan Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2021, 123: 104752.
- [29] Ren Y, Zhong D K, Gao C L, et al. Origin of dolomite of the lower Cambrian Longwangmiao Formation, eastern Sichuan Basin, China[J]. Carbonates and Evaporites, 2019, 34(3): 471-490.
- [30] Feng M Y, Wu P C, Qiang Z T, et al. Hydrothermal dolomite reservoir in the Precambrian Dengying Formation of central Sichuan Basin, southwestern China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 82: 206-219.
- [31] Hu Y J, Cai C F, Pederson C L, et al. Dolomitization history and porosity evolution of a giant, deeply buried Ediacaran gas field (Sichuan Basin, China)[J]. Precambrian Research, 2020, 338: 105595.
- [32] Zhang Y G, Yang T, Hohl S V, et al. Seawater carbon and strontium isotope variations through the Late Ediacaran to late Cambrian in the Tarim Basin[J]. Precambrian Research, 2020, 345: 105769.
- [33] 魏天媛,蔡春芳,扈永杰,等. 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组储层成因[J]. 沉积学报, 2023, 41(2): 527-544. [Wei Tianyuan, Cai Chunfang, Hu Yongjie, et al. Origin of reservoirs in the lower Cambrian Xiaerbulak Formation, Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(2): 527-544.]
- [34] 郑剑锋,黄理力,袁文芳,等. 塔里木盆地柯坪地区下寒武统肖尔布拉克组地球化学特征及其沉积和成岩环境意义[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(5): 698-709. [Zheng Jianfeng, Huang Lili, Yuan Wenfang, et al. Geochemical features and its significance of sedimentary and diagenetic environment in the lower Cambrian Xiaerblak Formation of Keping area, Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(5): 698-709.]
- [35] 郑剑锋,沈安江,杨翰轩,等. 塔里木盆地西北缘震旦系微生物白云岩地球化学、年代学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2021, 37(7): 2189-2202. [Zheng Jianfeng, Shen Anjiang, Yang Hanxuan, et al. Geochemistry and geochronology characteristics and their geological significance of microbial dolomite in Upper Sinian, NW Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2021, 37(7): 2189-2202.]
- [36] Shang Y X, Gao Z Q, Fan T L, et al. The Ediacaran-Cambrian boundary in the Tarim Basin, NW China: Geological data anomalies and reservoir implication[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 111: 557-575.
- [37] 沈安江,胡安平,郑剑锋,等. 基于U-Pb同位素年龄和团簇同位素( $\Delta_{47}$ )温度约束的构造—埋藏史重建:以塔里木盆地阿克苏地区震旦系奇格布拉克组为例[J]. 海相油气地质, 2021, 26(3): 200-210. [Shen Anjiang, Hu Anping, Zheng Jianfeng, et al. Reconstruction of tectonic-burial evolution based on the constraints of laser in situ U-Pb date and clumped isotopic temperature: A case study from Sinian Qigebulak Formation in Akesu area, Tarim Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2021, 26(3): 200-210.]
- [38] 杨翰轩,胡安平,郑剑锋,等. 面扫描和定年技术在古老碳酸盐岩储集层研究中的应用:以塔里木盆地西北部震旦系奇格

- 布拉克组为例[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 935-946. [Yang Hanxuan, Hu Anping, Zheng Jianfeng, et al. Application of mapping and dating techniques in the study of ancient carbonate reservoirs: A case study of Sinian Qigebrak Formation in northwestern Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 935-946. ]
- [39] Chang B, Li C, Liu D, et al. Massive formation of early diagenetic dolomite in the Ediacaran ocean: Constraints on the "dolomite problem"[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(25): 14005-14014.
- [40] Hu Y J, Cai C F, Liu D W, et al. Formation, diagenesis and palaeoenvironmental significance of Upper Ediacaran fibrous dolomite cements[J]. Sedimentology, 2020, 67(2): 1161-1187.
- [41] 金民东, 谭秀成, 李毕松, 等. 四川盆地震旦系灯影组白云岩成因[J]. 沉积学报, 2019, 37(3): 443-454. [Jin Mindong, Tan Xiucheng, Li Bisong, et al. Genesis of dolomite in the Sinian Dengying Formation in the Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(3): 443-454. ]
- [42] Bai Y, Luo P, Wang S, et al. Structure characteristics and major controlling factors of platform margin microbial reef reservoirs: A case study of Xiaerbulak Formation, lower Cambrian, Aksu area, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(3): 377-386.
- [43] Li Q, Jiang Z X, Hu W X, et al. Origin of dolomites in the lower Cambrian Xiaerbulak Formation in the Tarim Basin, NW China: Implications for porosity development[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2016, 115: 557-570.
- [44] Luo B, Yang Y M, Luo W J, et al. Controlling factors of Dengying Formation reservoirs in the central Sichuan paleo-uplift[J]. Petroleum Research, 2017, 2(1): 54-63.
- [45] 沈安江, 陈娅娜, 潘立银, 等. 四川盆地寒武统龙王庙组沉积相与储层分布预测研究[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(8): 1176-1190. [Shen Anjiang, Chen Ya'na, Pan Liyin, et al. The facies and porosity origin of reservoirs: Case studies from Longwangmiao Formation of Cambrian, Sichuan Basin, and their implications to reservoir prediction[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(8): 1176-1190. ]
- [46] Xu Z H, Lan C J, Zhang B J, et al. Impact of diagenesis on the microbial reservoirs of the terminal Ediacaran Dengying Formation from the central to northern Sichuan Basin, SW China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2022, 146: 105924.
- [47] Yang X F, Wang X Z, Tang H, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of the Longwangmiao Formation in the Moxi area, central Sichuan Basin, China[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(3): 217.
- [48] Zheng J F, Pan W Q, Shen A J, et al. Reservoir geological modeling and significance of Cambrian Xiaerblak Formation in Keping outcrop area, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(3): 536-547.
- [49] Zhou Z, Wang X Z, Yin G, et al. Characteristics and genesis of the (Sinian) Dengying Formation reservoir in central Sichuan, China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 29: 311-321.
- [50] Jiang L, Hu A P, Ou Y L, et al. Diagenetic evolution and effects on reservoir development of the Dengying and Longwangmiao Formations, central Sichuan Basin, southwestern China [J]. Petroleum Science, 2003, 20(6): 3379-3393.
- [51] 何登发, 李德生, 张国伟, 等. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. 地质科学, 2011, 46(3): 589-606. [He Dengfa, Li Desheng, Zhang Guowei, et al. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin, China[J]. Chinese Journal of Geology, 2011, 46(3): 589-606. ]
- [52] Zhu M Y, Zhang J M, Yang A H, et al. Sinian-Cambrian stratigraphic framework for shallow- to deep-water environments of the Yangtze Platform: An integrated approach[J]. Progress in Natural Science, 2003, 13(12): 951-960.
- [53] 张满郎, 谢增业, 李熙喆, 等. 四川盆地寒武纪岩相古地理特征[J]. 沉积学报, 2010, 28(1): 128-139. [Zhang Manlang, Xie Zengye, Li Xizhe, et al. Characteristics of lithofacies palaeogeography of Cambrian in Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(1): 128-139. ]
- [54] 闫磊, 朱光有, 王珊, 等. 塔里木盆地震旦系—寒武系万米超深层天然气成藏条件与有利区带优选[J]. 石油学报, 2021, 42(11): 1446-1457. [Yan Lei, Zhu Guangyou, Wang Shan, et al. Accumulation conditions and favorable areas for natural gas accumulation in the 10 000 meters ultra-deep Sinian-Cambrian in Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(11): 1446-1457. ]
- [55] 刘伟, 张光亚, 潘文庆, 等. 塔里木地区寒武纪岩相古地理及沉积演化[J]. 古地理学报, 2011, 13(5): 529-538. [Liu Wei, Zhang Guangya, Pan Wenqing, et al. Lithofacies palaeogeography and sedimentary evolution of the Cambrian in Tarim area [J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(5): 529-538. ]
- [56] 朱永进, 沈安江, 刘玲利, 等. 塔里木盆地晚震旦世—中寒武世构造沉积充填过程及油气勘探地位[J]. 沉积学报, 2020, 38(2): 398-410. [Zhu Yongjin, Shen Anjiang, Liu Lingli, et al. Tectonic-sedimentary filling history through the later Sinian to the mid-Cambrian in Tarim Basin and its explorational potential [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(2): 398-410. ]
- [57] Hood A V S, Wallace M W, Drysdale R N. Neoproterozoic aragonite-dolomite seas? Widespread marine dolomite precipitation in Cryogenian reef complexes[J]. Geology, 2011, 39(9): 871-874.
- [58] Davies G R, Smith L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1641-1690.
- [59] Ehrenberg S N, Walderhaug O, Bjørlykke K. Carbonate porosity creation by mesogenetic dissolution: Reality or illusion? [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(2): 217-233.

## Profitable Diagenetic Path and Reservoir Formation Efficiency of the Sinian-Lower Cambrian Dolostone: Origins of deep dolomites and differential reservoir formation

LIU YuanYuan<sup>1</sup>, WANG ZiChen<sup>2,3</sup>, MING XinYu<sup>2,3</sup>, JIANG Lei<sup>1,2,3,4</sup>

1. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. State Key Laboratory of Lithospheric and Environmental Coevolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China

**Abstract:** [Objective] Deep-ultra-deep carbonate rocks have great potential in oil and gas exploration, and their reservoirs are characterized by strong heterogeneity and difficult prediction, which is closely related to their complex diagenetic alterations. Therefore, clarifying the beneficial diagenetic processes in reservoir development, that is, profitable diagenetic path and reservoir formation efficiency, is the key to revealing the genesis of deep carbonate reservoirs. [Methods] We have systematically compared the geochemical parameters, porosity, and permeability of the Sinian to lower Cambrian dolostone from the Sichuan Basin and Tarim Basin (including a small amount of data from the Oman Basin and Siberian Platform), including carbon and oxygen isotopes ( $n=617$ ), strontium isotope ( $n=189$ ), rare earth elements ( $n=106$ ), fluid inclusion homogenization temperature ( $n=161$ ), cluster isotope temperature ( $n=117$ ), and porosity and permeability ( $n=1557$ ). The geochemical feature templates of dolomite and late calcite of different origins in the two reservoirs were established. [Results] The results show that the geochemical characteristics of diagenetic minerals in the two reservoirs are similar, and both have undergone constructive diagenetic alterations such as dolomitization, meteoric water, fracturing, and hydrothermal fluids. Compared with the lower Cambrian dolostone reservoirs, the highest-quality reservoirs in the area (Dengying Formation) have experienced stronger seepage-reflux dolomitization, particularly the more intense hydrothermal alternations, suggesting that differential effective diagenetic alterations are the key to good carbonate reservoir formation. [Conclusions] Based on the above characteristics, the development of Sinian-Cambrian high-quality dolostone reservoirs in the Sichuan Basin and Tarim Basin is jointly controlled by the development of evaporite facies in the depositional period and the development of late structural hydrothermal fluids. The above findings can be used to predict deep-ultra-deep carbonate reservoirs, and have enlightenment significance for deep-ultra-deep oil and gas exploration.

**Key words:** deep-ultra-deep oil and gas exploration; carbonates; dolomitization; diagenesis; porosity evolution; reservoir formation efficiency