

白云岩的成因、储集空间及实验技术研究新进展

李茜^{1,2}, 胡安平^{1,2}, 沈安江^{1,2}, 张建勇^{1,2}, 乔占峰^{1,2}, 段军茂^{1,2}

(1. 中国石油天然气集团公司 国家能源碳酸盐岩油气重点实验室, 浙江 杭州 310023; 2. 中国石油 杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023)

摘要:全球广布的白云岩中蕴含着丰富的油气资源,但是白云岩的成因机理和储集空间保持机制还存在诸多疑问。分析研究了近年来白云岩的成因机理、储集空间控制因素与新型实验技术等方面研究取得的重大进展。①通过溶解-再沉淀方法成功合成出低温有序白云石,白云岩的形成受热力学和动力学屏障共同制约。②研究建立、拓展和完善了多种白云石化模型。新建了有机物(微生物)诱导模型,完善了无机物催化模型,修订了混合水白云石化模型,拓展了蒸发泵和渗透回流白云石化模型,细化了埋藏白云石化类型。③原始沉积环境和后期成岩改造对白云岩储层演化具有重要控制作用。适度的白云石化作用及次生溶蚀作用增加白云岩储层的孔隙空间,过度的胶结作用、大量热液矿物沉淀及轻-中度重结晶作用减少白云岩储层的孔隙空间。④发展了微区元素分析、Mg-Ca同位素、激光原位U-Pb同位素、团簇同位素、激光共聚焦-CT扫描成像解析及核磁共振-频谱激发极化实验新技术。研发了白云岩储层正演模拟技术、多尺度定量表征白云岩孔隙的三维结构和流动性技术,为白云石成因机理、储集空间研究提供重要的技术支持。

关键词:成因机理;储集空间控制因素;白云岩;新型实验技术;油气勘探

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Recent advances in the study of the origin and reservoir space of dolomites and emerging experimental techniques

LI Xi^{1,2}, HU Anping^{1,2}, SHEN Anjiang^{1,2}, ZHANG Jianyong^{1,2}, QIAO Zhanfeng^{1,2}, DUAN Junmao^{1,2}

(1. State Energy Key Laboratory for Carbonate Oil and Gas, CNPC, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 2. Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

Abstract: Dolomites, distributed extensively across the world, are known to contain abundant hydrocarbon resources. However, questions regarding their formation mechanisms and reservoir space preservation are yet to be clarified. We delve into recent significant advances in the study of dolomites' genetic mechanisms and factors governing their reservoir space, along with emerging experimental techniques. The findings indicate that low-temperature ordered dolomites can be successfully synthesized through dissolution-reprecipitation reactions and that dolomite formation is constrained by both thermodynamic and kinetic barriers. Various dolomitization models have been established, expanded, and improved, including the newly constructed organic matter- or microbially induced dolomitization model, the enhanced inorganically catalyzed dolomitization model, and the modified mixed-water-zone dolomitization model. Furthermore, the model for dolomitization by evaporative pumping and seepage reflux of brines has been expanded, and the burial dolomitization model has been refined. The findings highlight the significant controlling effects of the original sedimentary environment and late-stage diagenetic transformations on the evolution of dolomite reservoirs. Moderate dolomitization and secondary dissolution increase the porosity of dolomite reservoirs. In contrast, excess cementation, precipitation of substantial hydrothermal minerals, and mild to moderate recrystallization lead to a decrease in reservoir porosity. Novel experimental techniques have been developed, including element microanalysis, Mg-Ca isotopic tracing, in-situ U-Pb isotopic dating by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP/MS),

收稿日期:2024-03-06;修回日期:2024-07-30。

第一作者简介:李茜(1996—),男,博士研究生,沉积地球化学与沉积储层评价。E-mail: geolixi@126.com。

通信作者简介:胡安平(1982—),女,博士、高级工程师,碳酸盐岩储层与实验技术研发。E-mail: huap_hz@petrochina.com.cn。

基金项目:国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(U23B20154)。

clumped isotope thermometry, confocal laser scanning microscopy (CLSM) combined with CT scanning imaging, and nuclear magnetic resonance (NMR) combined with spectral induced polarization (SIP). Additionally, techniques for the forward modeling of dolomite reservoirs and the multiscale quantitative characterization of the 3D structures and fluid mobility of dolomite pores have also been developed. These emerging techniques provide significant technical support for research on the genetic mechanisms and reservoir space of dolomites.

Key words: genetic mechanism, controlling factor of reservoir space, dolomite, novel experimental technique, hydrocarbon exploration

引用格式:李茜,胡安平,沈安江,等.白云岩的成因、储集空间及实验技术研究新进展[J].石油与天然气地质,2024,45(5):1456–1482. DOI: 10.11743/ogg20240518.

LI Xi, HU Anping, SHEN Anjiang, et al. Recent advances in the study of the origin and reservoir space of dolomites and emerging experimental techniques[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1456–1482. DOI: 10.11743/ogg20240518.

在1789—1790年间,法国学者Deodal de Dolomieu在对意大利东北部的南阿尔卑斯山脉进行地质调查过程中,首次发现了一种与稀盐酸反应很轻微的碳酸盐岩,后来被命名为白云岩。从海洋至湖泊,从古元古代到新生代,从地表至万米深层,均可以发育白云岩^[1-3],并且白云岩在超深层也发育良好的油气储集空间^[4-6]。正是源于全球白云岩具有分布范围广、地层发育时代全和深埋藏下孔隙空间丰富的特性,因而被视为最重要的油气储集岩类之一^[7-10]。

尽管白云岩储层在油气勘探领域中非常重要,但其成因机理和储层孔隙演化规律仍存在诸多难以回答的问题。一方面,白云岩的形成受到沉积环境、成岩流体来源、埋藏深度和微生物活动等多种因素的影响,导致其成因机制长期以来备受争议^[11]。另一方面,白云岩的现今储集物性是原始沉积物的先存孔隙经过白云石化、溶蚀、胶结和断裂等多种成岩作用共同作用的结果,概述白云岩储层孔隙成因机理需要全面考虑构造-沉积-成岩多因素的综合影响,很大程度上增加了判识地下白云岩储层优劣的难度^[12]。白云岩成因机理和孔-缝-洞保持机制的复杂性,导致在实际勘探过程中精准预测优质含油气白云岩储层的分布范围并成功指导大规模油气勘探突破的概率并不高。

针对白云岩研究中存在的问题,近年来广大学者们通过多学科交叉融合,从更加多元的视角开展了深入的探索,在白云岩的成因、储集空间以及实验技术等研究方面取得了诸多进展。为进一步推动中国白云岩油气勘探进程,本文系统回顾了白云岩成因机理、储层孔隙控制因素和新型实验技术等方面近年来取得的重大进展,以期白云岩油气勘探发现提供理论支撑。

1 白云岩成因机理

白云岩自被发现以来,其成因机制长期困扰着地质学者^[11-13]。一方面,地质记录显示,白云岩在远古地层中广泛发育,但在现今自然沉积环境中却相对罕见^[14]。另一方面,即使在Mg/Ca浓度过饱和的溶液中,实验室也难以在常温、常压和无机条件下合成出白云石^[15-16]。这些矛盾的古、今沉积记录和失败的实验室合成结果给白云岩的成因带来了诸多疑团,统称为“白云岩之谜”。近年来学者们通过不断改进实验合成方案和解析各种白云岩沉积环境中的水化学条件,在揭示白云岩成因机理方面取得了显著的进展。

1.1 白云石形成过程中的热力学和动力学屏障

白云石的形成受到热力学和动力学屏障的双重制约。热力学屏障主要与白云石形成的能量相关。尽管白云石的组成离子(Mg^{2+} , Ca^{2+} 和 CO_3^{2-})在自然水体中普遍存在,但由于 Mg^{2+} 相较于 Ca^{2+} 具有更高的电荷密度,这使得 Mg^{2+} 更难与 CO_3^{2-} 结合成稳定的配位结构,导致直接从水溶液中沉淀白云石需要克服较大的能量障碍^[17]。另外,即使热力学上满足白云石的形成条件,动力学屏障也可能导致白云石的实际形成过程十分缓慢。白云石的晶体结构要求 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 在晶格中有序排列,这就要求溶液中的 Ca^{2+} , Mg^{2+} 和 CO_3^{2-} 迁移至特定的晶格位置。然而这些离子在低温条件下迁移至晶格中特定位置的速率很缓慢,很大程度上限制了白云石晶体快速有序生长的能力^[18]。受热力学和动力学屏障共同作用的影响,白云石在自然环境中的形成较为困难和缓慢,这解释了其在现代沉积环境中直接沉淀的稀有性。

1.2 溶解-再沉淀方法成功培育出低温有序白云石

地球化学和结晶研究表明,组成白云岩的主要矿物是白云石,化学成分为 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$,晶体属三方晶系,晶形为菱面体或马鞍状^[19]。理想白云石的Mg/Ca摩尔比(mol/mol)等于50:50,且晶体结构中 Ca^{2+} 层和 Mg^{2+} 层沿坐标 c 轴与 CO_3^{2-} 层交替排列,从而具有阳离子的有序超结构,也称为有序白云石^[20]。然而,在实验室条件下培育有序白云石是非常困难的,有序白云石的合成机制一直是个谜团^[21]。

白云石的合成需要2个步骤:成核和生长。成核是指在过饱和的溶液中形成稳定的晶体核,而生长是指在晶体核上沉淀更多的原子使其变大^[22]。随着实验研究工作的开展和地球化学数据库的生成,研究人员开始怀疑白云石的形成和Mg-Ca有序化可能是在地质时期内溶解-重结晶反应的结果,并指出未来的研究应该同步考虑内部(即晶体化学)和外部(即地质环境)因素,以确定天然白云石中阳离子有序的时间演化^[23]。

白云石的合成难度可能是源于成核或生长抑制, Kim等(2023)^[24]首先使用密度泛函理论来论证成核抑制的假说,通过计算白云石与其他碳酸盐矿物的成核势垒,发现白云石的成核势垒应该比方解石和文石的成核势垒低,这意味着白云石的成核不受限制,因此推断出白云石的合成难度是由于生长抑制所致,进一步探索白云石的生长机制后,发现了一个反直觉的现象,即溶解可以促进白云石的生长。合成实验显示,在不饱和水溶液条件下,白云石的无序层会发生溶解,而在饱和条件下会再沉淀形成有序层,在过饱和度和欠饱和度之间进行周期性的频繁切换可以加速白云石的生长。通过搭建的计算模型进行模拟显示,这种溶解-再沉淀的方法可以使白云石的生长速度从1 000万年缩短到几年(图1)。为了验证模拟结果的可靠性,研究者还采用透射电子显微镜,直接观察了实验中白云石在溶解后的生长情况,发现白云石晶体的表面有序度显著提高,而且晶体生长了约100 nm,相当于300层白云石。这一观测结果与上述理论和模拟结果一致,证明了溶解-再沉淀合成有序白云石的方法是可行的。据此,他们提出沉积体系中水化学的动荡过程(饱和-不饱和、盐度或pH波动等)是近地表有序白云石形成的有利条件,这为解决长期存在的白云岩之谜提供了新的思路。

1.3 拓展了有机/无机原生成因模型

1.3.1 新建了有机物(微生物)诱导模型

关于白云岩的成因,最引人注意的问题就是低温条件下白云石如何克服动力学屏障,以化学沉淀的方式从水体中直接沉淀下来^[25]。经过多年的研究,沉积学家们逐渐认识到过饱和离子溶液中低温白云石的沉淀受动力学制约, Mg^{2+} 水合作用是阻碍白云石沉淀的一个重要因素^[26]。如何打破水-镁化合键,使水合 Mg^{2+} 从水合状态转变为游离状态而进入 CO_3^{2-} 离子层晶格中是需要解释的关键问题。最近的研究显示,微生物调节作用被证实是一种行之有效的机制,能够为白云石沉淀营造一个有利的微环境,从而有助于白云石克服结晶动力学壁垒发生沉淀^[27-29]。在巴西Lagoa Vermelha潟湖中发现的硫酸盐还原细菌可以加速消耗水体中抑制白云石生长的 SO_4^{2-} ,克服白云石成核的动力学障碍,开启了微生物有机诱导原生白云石沉淀的先河^[30]。后续一系列可以诱导白云石沉淀的微生物陆续被报道,包括甲烷菌^[31-32]、好氧菌^[33-34]和嗜盐菌^[35-36]等。与微生物作用相似,有机大分子(例如多糖、羧甲基纤维素、羧基和胞外聚合物)也有助于减弱碳酸盐表面 Mg^{2+} 和水分子的结合力,增加 Mg^{2+} 进入沉淀的碳酸钙中的几率,促进了无序白云石的形成^[37-39]。

根据大数据统计结果显示,显生宙存在4次白云石含量峰值,对应生物大灭绝事件和S同位素值快速上升时期,显生宙的白云石很有可能以厌氧微生物诱导的原生白云石为主,该项研究为微生物诱导原生白云石沉淀可能广泛存在于地质历史时期的认识提供了重要依据^[40](图2)。团簇同位素-元素地球化学-岩相学证实埃迪卡拉系陡山沱组白云岩是在微生物及相关有机质的诱导下以无序白云石前体形式沉积于海水或孔隙水中的低温白云岩^[14]。

虽然有机物(微生物)诱导模型为回答低温白云石沉淀问题提供了新思路,但是微生物或有机大分子诱导形成的白云石为无序白云石,其晶体结构中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 处于无序排布状态,不符合岩石记录中观察到的白云石超有序晶体结构特征^[16]。为解释有机物(微生物)诱导模型如何实现低温条件下无序白云石向有序白云石转化,前人从内蒙古自治区盐湖中分离出多株具备室温沉淀原生白云石能力的细菌(图3)。多种矿物学表征手段共同显示微生物成因原生白云石含有丰富的结构水,质量分数高达7 wt%。进一步的成岩模

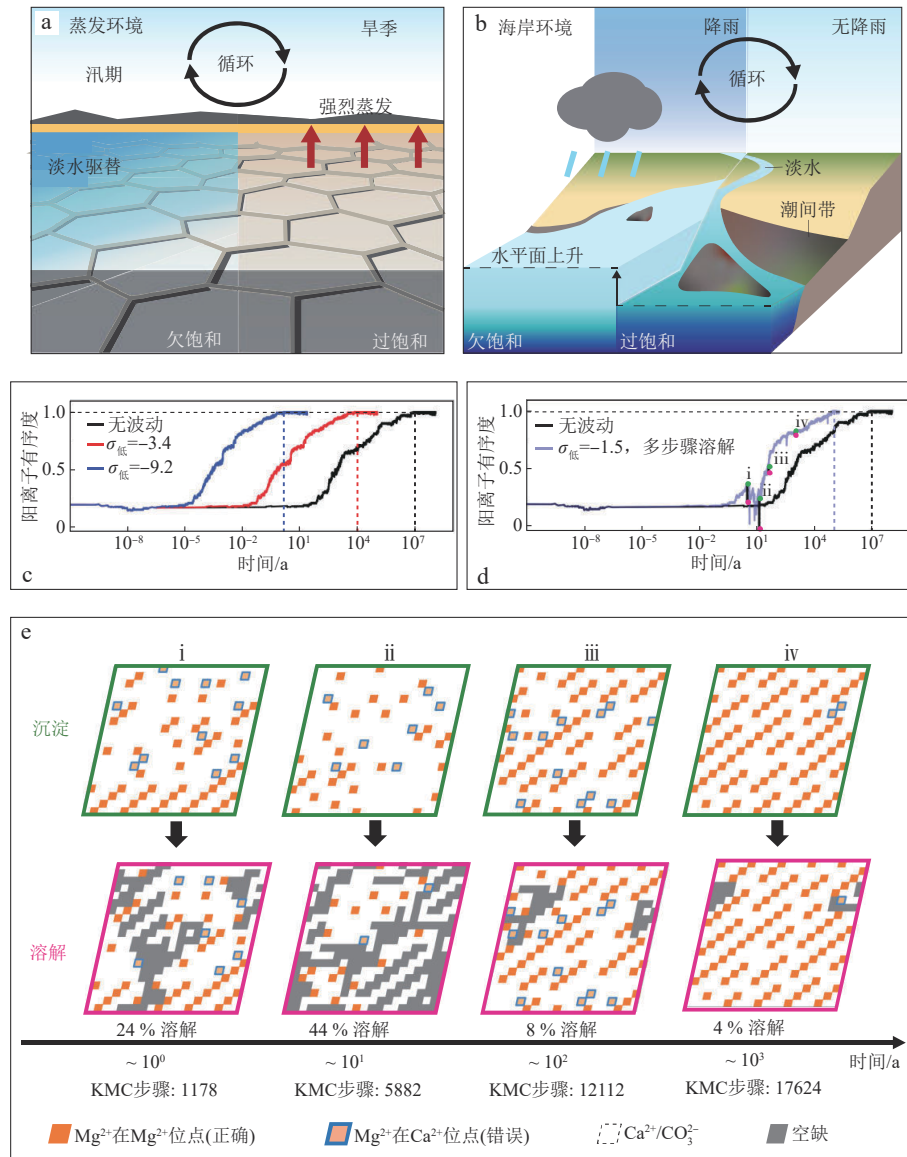


图1 过饱和度波动在加速白云石有序化溶解-再沉淀过程中的作用^[24]

Fig. 1 Role of supersaturation fluctuations in accelerating the dissolution-precipitation process for dolomite ordering^[24]

a. 现代蒸发环境下白云石形成过程;b. 现代海岸环境下白云石形成过程;c. 阶跃调节的过饱和度波动模拟盐度波动;d. 时间调节的动力学蒙特卡罗模拟(在过饱和度波动下,阳离子有序化过程与恒定过饱和度下的有序化相比,有序化过程被加速了几个数量级);e. 在 $\sigma=-1.5$ 时,由时间调节的过饱和度波动所得表面结构的快照(相应的时间标记在d图中)

σ . 饱和度; KMC. 动力学蒙特卡罗(kinetic Monte Carlo)

(c和d的纵坐标中,0代表无序状态,1代表完全有序状态。)

拟实验揭示结构水在无外源流体条件下(即封闭成岩环境)可以促进无序白云石向有序白云石转化^[41]。

1.3.2 丰富了无机物催化模型

除了有机物有助于沉淀白云石外,原生白云石还可以依靠特定的物理-化学溶液条件或无机物催化沉淀。Zhang等(2021b)^[42]通过在室温下使用 CO_2 气体扩散法进行了钡白云石的矿化实验,发现在含有高Mg/Ba浓度及充足的 CO_3^{2-} 的碱性溶液中可以直接沉淀

高度阳离子有序的钡白云石。Zhang等(2012)^[43]认为溶解硫化物可以降低碳酸盐表面生长的镁-水复合物脱水的能量障碍,引发无序白云石的沉淀。Vandeginste等(2019)^[44]发现溶液中加入 ZnCl_2 形成的正二价锌水合物,能显著缩短诱导期的时间,提高原生白云石形成的反应速率。Fang和Xu(2022)^[45]证明了在室温下的Mg/Ca比溶液中如果存在溶解的二氧化硅(SiO_2)就会促进无序的白云石沉淀。这是由于溶解 SiO_2 具有与硫化氢、二氧六环、多糖和外聚物质相似的低偶极矩和

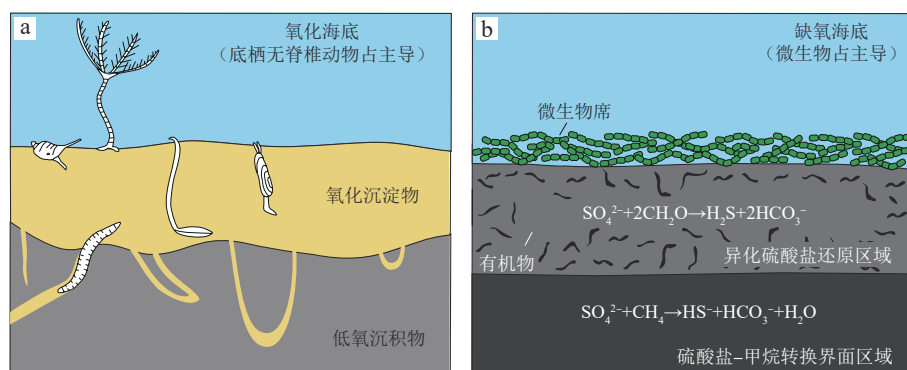


图2 海底氧化和缺氧环境下底栖生物群落和氧化-还原条件模型示意图^[40]

Fig. 2 Schematic diagrams showing benthic communities and redox conditions in submarine oxidizing and anoxic environments^[40]

a. 氧化条件下,海底以底栖无脊椎动物为主,沉积物因底栖无脊椎动物的掘穴和灌溉而被氧化;b. 缺氧条件下,微生物占主导地位,海底被微生物席所定殖,微生物席为底层沉积物提供足够的有机质,以维持强烈的硫酸盐还原反应

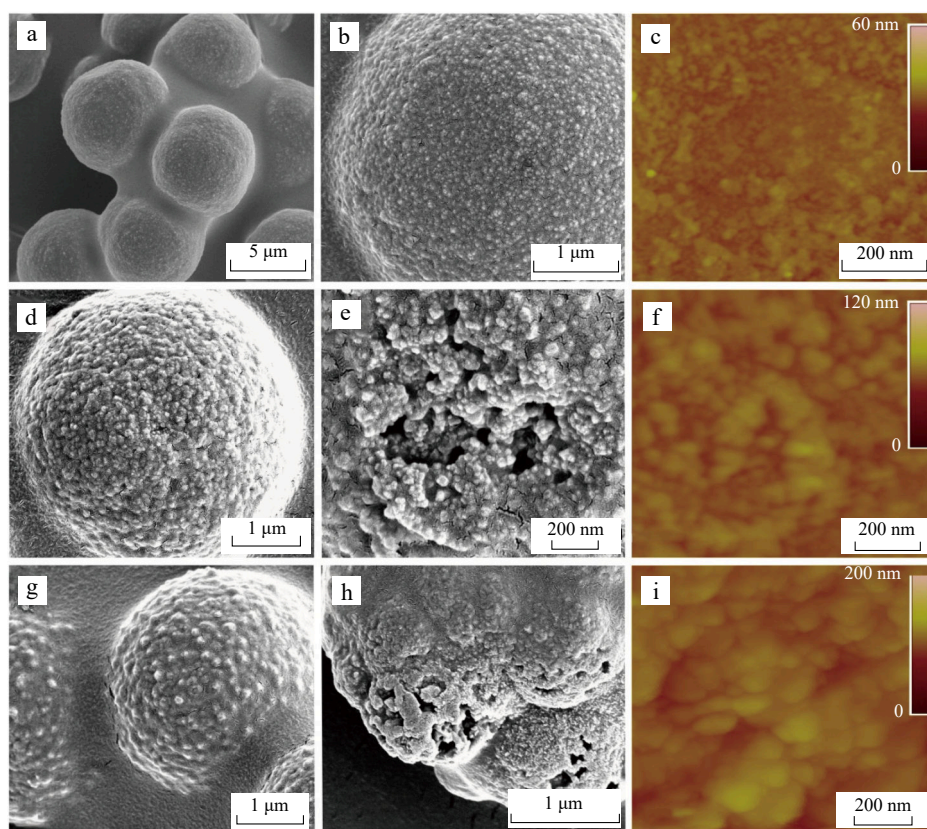


图3 扫描电子显微镜(SEM)和原子力显微镜(AFM)下微生物成因无序白云石及其干热作用后样品形貌对比^[41]

Fig. 3 Comparison of the morphologies of microbially-induced disordered dolomites and dolomites post-hot dry treatment present in scanning electron microscope (SEM) and atomic force microscope (AFM) images^[41]

a—c. SEM和AFM镜下的微生物成因无序白云石;d—f. 200 °C干热作用后SEM和AFM镜下的白云石样品;

g—i. 300 °C干热作用后SEM和AFM镜下的白云石样品

(a,b,d,e,g,h为SEM照片;c,f,i为AFM照片。)

介电常数,吸附在白云石表面的低偶极矩分子可以降低表面镁水合物的脱水能垒,促进白云石的成核和生长(图4)。

2个最新的地质实例很好地支持了在无有机物参

与的情况下可以沉淀出原生白云石的说法。新疆北天山赛里木湖早全新世沉积物中发育12 cm厚的白云岩层,这套白云岩被证实与微生物作用无关,而是由于中亚地区早全新世温暖干旱气候使得湖泊具有高Mg/Ca

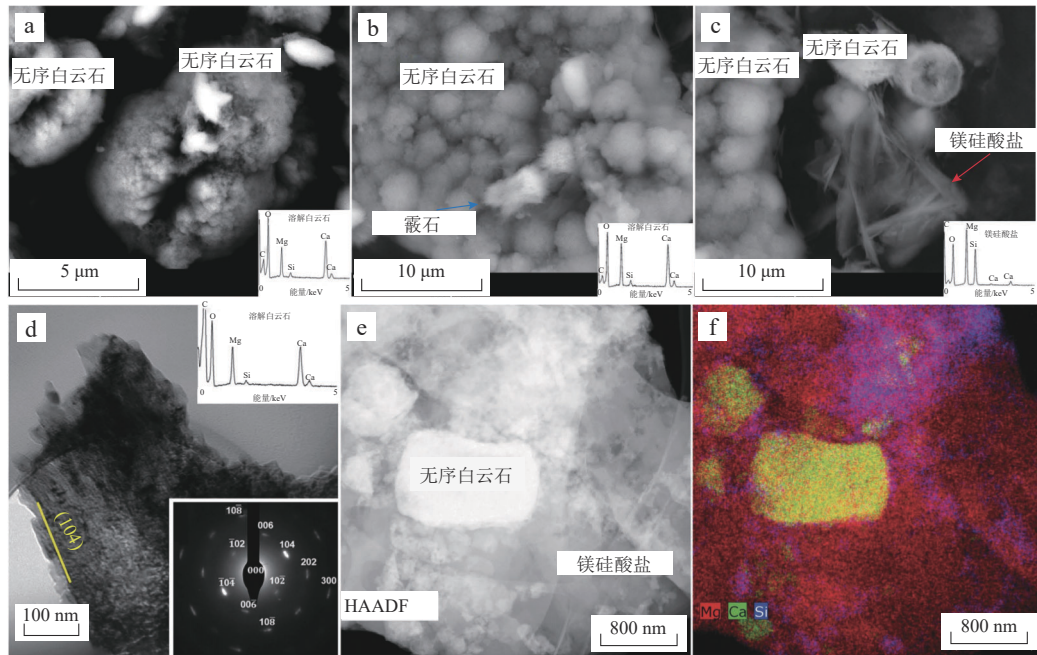


图4 溶解的 SiO_2 促进无序白云石沉淀的背散射电子成像(BSE)图像^[45]

Fig. 4 Backscattered electron (BSE) images demonstrating the promotion of disordered dolomite precipitation by dissolved silica^[45]

a. 在 20 °C、溶解 SiO_2 浓度为 2 mM、初始 Mg/Ca 摩尔比为 5:1 的条件下,合成的无序白云石的 BSE 图像(右下角为晶体谱); b. 在 40 °C、溶解 SiO_2 的浓度为 2 mM、初始 Mg/Ca 摩尔比为 5:1 的条件下,合成的无序白云石的 BSE 图像(右下角为晶体谱); c. 在 40 °C、溶解 SiO_2 的浓度为 2 mM、初始 Mg/Ca 摩尔比为 5:1 的条件下,合成的镁硅酸盐的 BSE 图像(右下角为晶体谱); d. 无序白云石纳米晶体的明场透射电子显微镜(TEM)图像[左上角为晶体谱,右下角为选区电子衍射(SAED)图像]; e. 被镁硅酸盐凝胶包围的无序白云石高角度环形暗场成像(HAADF)图像; f. e 相同视域下显示 Mg, Ca 和 Si 元素分布的 X 射线能量散射谱图像

摩尔比,促使不稳定的 Ca-CO_3 键转化为稳定的 Mg-CO_3 键,从而沉淀了原生白云石^[46]。位于中国西北部三塘湖地区的二叠系芦草沟组白云岩受到显著的热液作用影响,在芦草沟湖的水下环境中,局部的高温 and 由火山-热液活动供应丰富的 Mg^{2+} 为原生白云石的直接沉淀创造了有利的化学条件^[47](图 5)。

1.4 修订和完善了现有白云石化模型

1.4.1 修订了混合水白云石化模型

混合水白云石化过程通常涉及至少 2 种不同来源的流体(海水与大气降水/地下水)在特定区域内相遇形成诱发白云石化作用的混合水,此过程常见于地下水与海水交汇的台地边缘地区,以及孤立岛屿上大气降水和海水混合地带^[48-49]。Hardie (1987)^[50]认为经典的混合水白云石化模型的基础非常薄弱,难以作为解释大规模白云石化的可行理论。Petrash 等 (2021)^[51]结合基因组和同位素数据研究发现,不同成分流体的混合对流机制调节了一系列由生物地球化学作用诱导的矿物溶解和再沉淀反应,这些流体之间的生物和非生物相互作用影响着碳酸盐平衡,导致

可溶性方解石和文石矿物的溶解、白云石的沉淀以及新生置换反应的发生(图 6)。

1.4.2 深化了蒸发泵和渗透回流白云石化模型

蒸发泵白云石化强调蒸发作用的重要性,通常发生在气候炎热干燥、蒸发量大和盐度高的干旱浅海沉积环境中。在气候干旱的地区,强烈的蒸发作用会导致表层水体迅速减少,从而使水体中的盐分和 Mg^{2+} 浓度显著增加,高浓度的水体会不断被泵送到下覆沉积层,促使白云石化作用的发生^[52]。此外,随着蒸发的进行会促使石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)的沉淀,石膏的形成消耗了水体中 SO_4^{2-} 和 Ca^{2+} ,溶液的 pH 值和 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 浓度升高,离子强度和离子配对平衡被打破,这种改变有利于降低白云石成核的动力学障碍^[53]。

渗透回流白云石化过程主要发生于早成岩时期,沉积环境以半干旱的潮坪、泻湖和浅海台地为主。由于水体密度的变化和岩石内部的压差,使得富含 Mg^{2+} 的海水在岩石孔隙中循环渗流,海水中的 Mg^{2+} 不断补给使得白云石化过程得以持续进行^[54]。渗透回流白云石化被广泛用于解释大规模的厚层白云岩成因机理。最新的研究探讨了美国东南部密西西比河流域地区侏罗系 Smackover

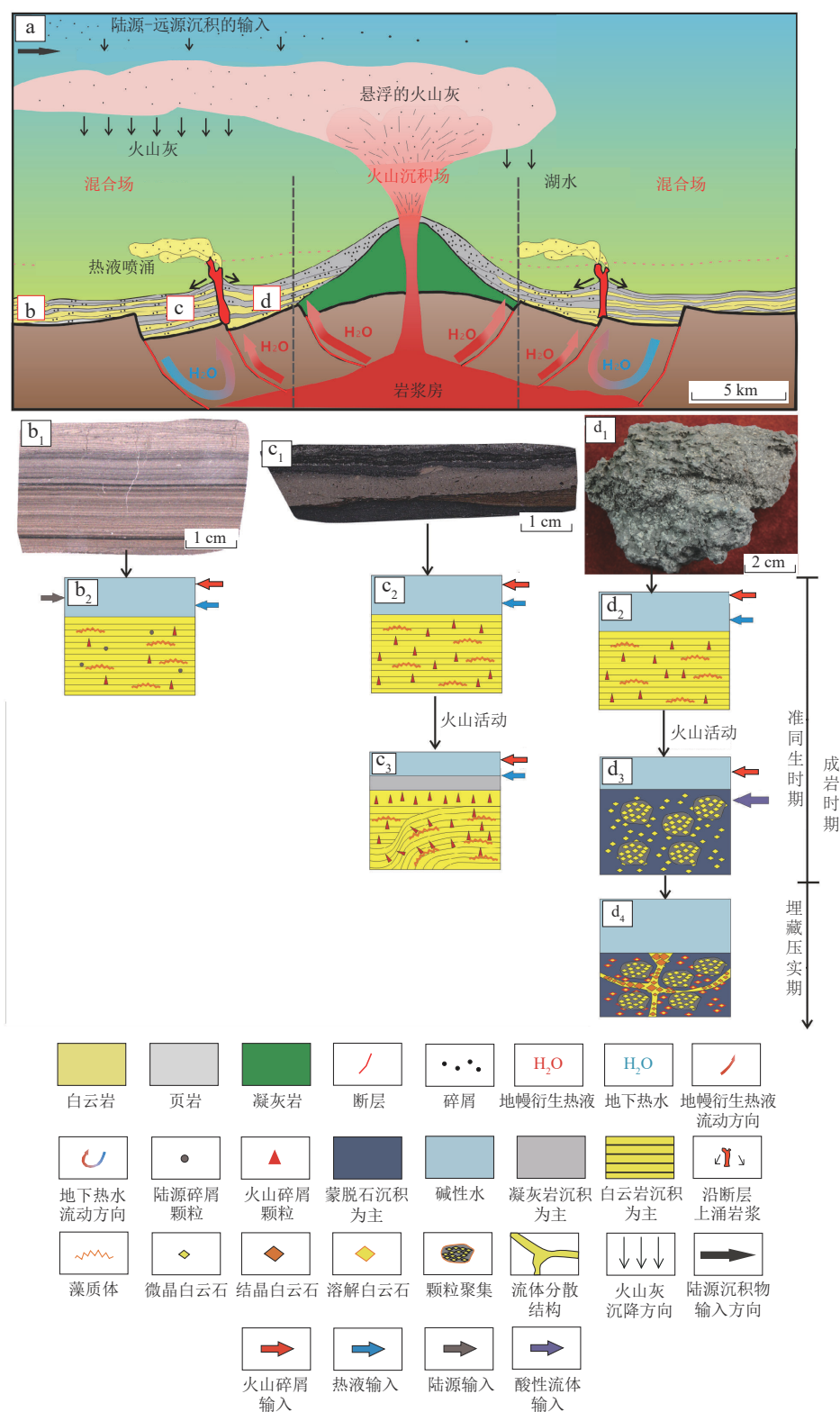


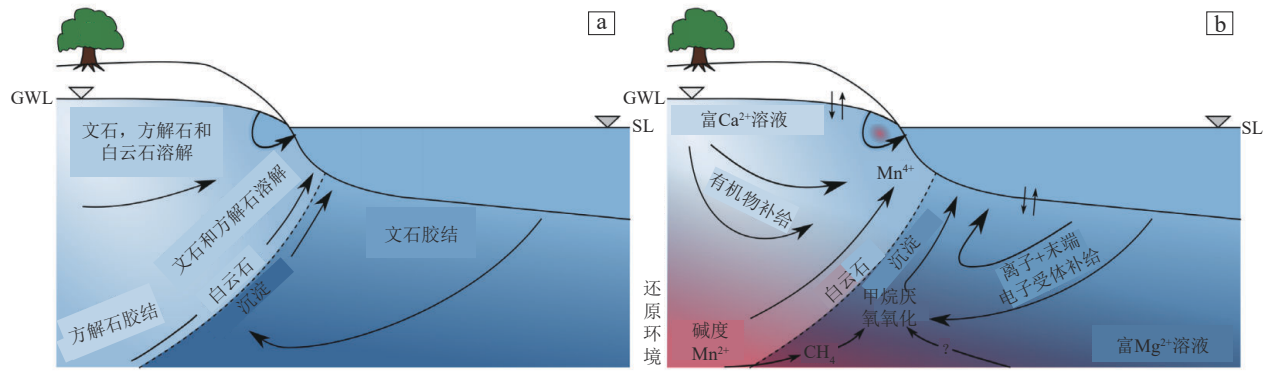
图5 火山湖中3种类型芦草沟组白云岩的沉积模式^[47]

Fig. 5 Sedimentary models of three types of dolomites in the Lucaogou Formation in a volcanic lake^[47]

a. 火山-热液湖泊相沉积环境(红色方框为b—d的位置); b₁, b₂. 火山碎屑白云岩岩心照片及其形成过程示意图;
c₁—c₃. 富凝灰质结晶白云岩岩心照片及其形成过程示意图; d₁—d₄. 富蒙脱石白云岩岩心照片及其形成过程示意图

组广泛的白云石化现象,该研究认为来自下部的卤水不断回流到上部Smackover组的颗粒灰岩中诱使白云石化

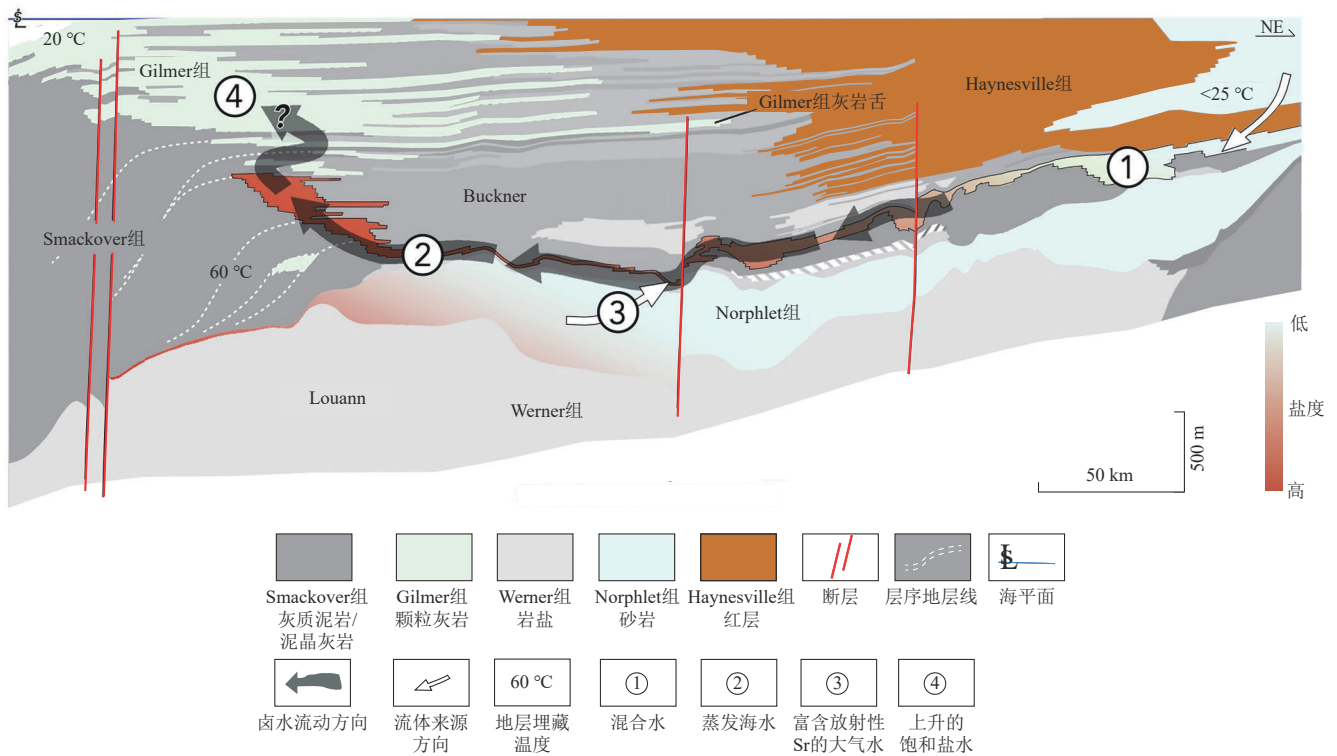
作用发生,这种渗透回流过程在早期埋藏期间持续进行,可能直到早白垩世末期才终止^[55](图7)。

图6 混合水白云石化的概念模型^[51]Fig. 6 Conceptual models of mixed-water-zone dolomitization^[51]

a. 传统的混合水白云石化模型,其中方解石溶解和白云石沉淀是由碳酸盐矿物的不同饱和状态控制和决定;b. 改进的混合水白云石化模型,包括了系统的碱度、末端电子受体和氧化-还原电位的变化

GWL. 地下水平面; SL. 海平面

[图中红色梯度表示氧化-还原梯度,颜色越红,还原性越强。b图中“?”代表未知元素(如Fe)的再循环。]

图7 浅埋藏的渗透回流白云石化流体动力模型^[55]Fig. 7 Hydrodynamic model of shallowly buried dolomitization by seepage reflux of brines^[55]

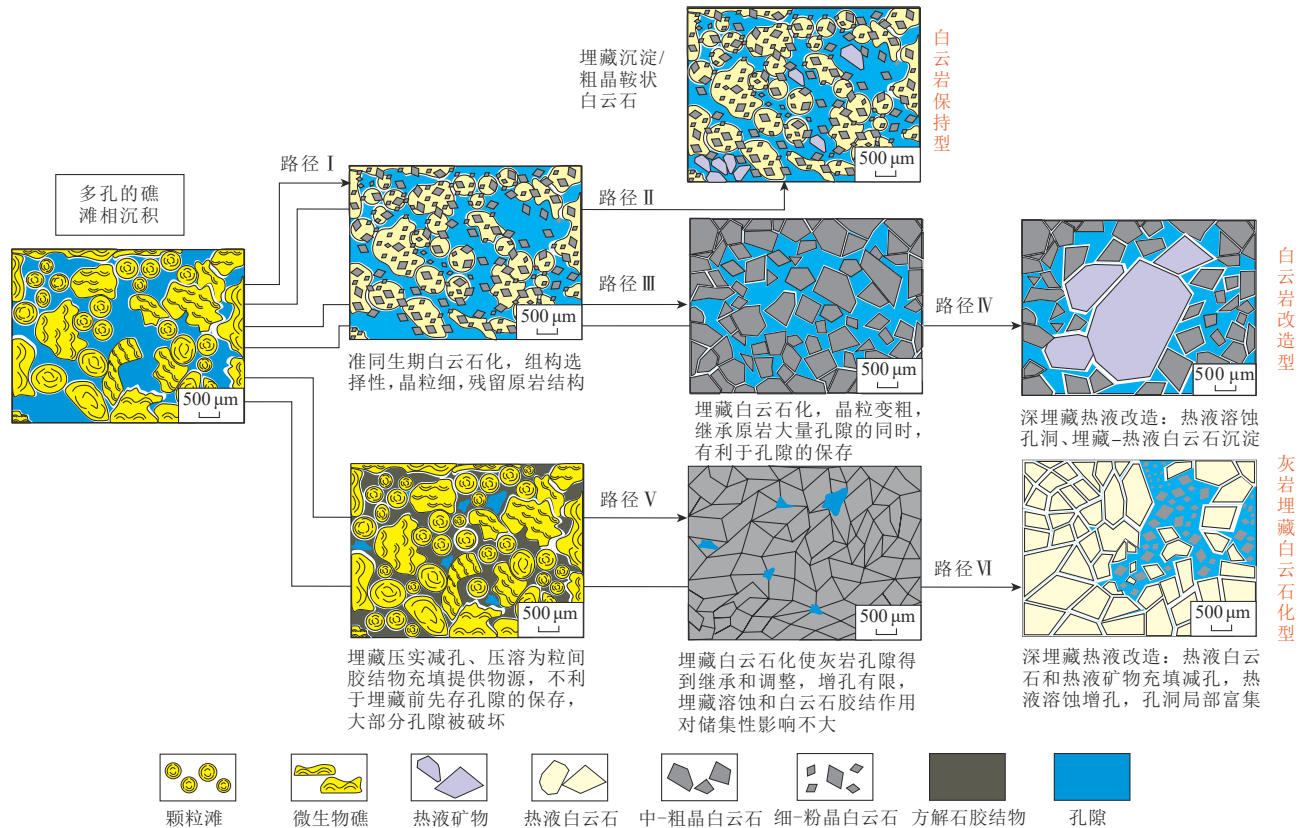
(Louann 和 Buckner 为地名。)

1.4.3 细化了埋藏白云石化类型

埋藏白云石化主要发生在后期埋藏成岩阶段,该阶段埋藏深(一般深度>2 000 m)、温度高(>60 °C)、压力大(>20 MPa),有利于白云石化反应的进行,可以分为埋藏灰岩白云石化和埋藏调整白云石化^[56](图8)。

埋藏灰岩白云石化是指孔隙残余流体和地层排替

流体在埋藏过程中促使灰岩转化为白云岩的过程^[57]。马锋等(2009)^[58]对塔里木盆地东部上寒武统突尔沙克塔格组白云岩的研究认为,由于深水盆地泥岩提供富镁流体两侧台地边缘压实运移,突尔沙克塔格组在晚寒武世发生埋藏灰岩白云石化作用。李斌等(2019)^[59]发现来自于盆地区的泥岩压实流体和浓缩孔隙水引发了塔里木盆地北部下丘里塔格群埋藏灰岩

图8 埋藏白云石化的最新模型^[56]Fig. 8 Most recent model for burial-related dolomitization^[56]

[埋藏调整白云石化指多孔的礁滩相灰岩先发生准同生白云石化, 后续在埋藏溶解-重结晶的调整改造作用下白云石晶粒增大的过程(路径 I—路径 II 或路径 I—路径 IV); 埋藏灰岩白云石化指灰岩在埋藏期直接转化为白云岩的过程, 没有经历地表白云石化阶段(路径 V—路径 VI)。图中白色边缘代表颗粒滩/微生物礁粘结构。]

白云石化。

埋藏调整白云石化是指灰岩在准同生期就已经发生了白云石化作用, 随后经埋藏期溶解-重结晶等一系列调整改造作用后形成晶体更粗的白云岩的过程^[60]。研究人员对匈牙利西南部 Villány 丘陵 Csukma 组围岩中的碳酸盐进行了调查, 将沉积学和地球化学特征与该地区的构造演化相结合的研究表明, 白云石化是在近地表-浅埋藏环境中, 因正常-轻微变质海水的地热对流而发生, 后续在低水-岩比的中-深埋藏环境中白云岩遭受了重结晶改造^[61]。正是因为漫长的埋藏演化过程中, 白云岩经历多期、复杂的成岩改造, 导致其往往具有复杂的岩石结构特征和难辨真假的地球化学特征, 使得埋藏白云石化的 Mg^{2+} 来源以及流体动力学机制成为了研究难题。

1.4.4 强调了断层对热液白云石化的控制作用

热液白云石化是指来自地球深部的富 Mg^{2+} 高温流体在流经上覆灰岩地层时形成白云岩的过程^[62], 主要发生在因构造运动导致热流升高的地区, 例如断层附

近^[63-64]。近年来, 研究者们对断层控制的热液白云岩进行了深入研究, 这主要是因为与断层相关的热液交代过程会产生溶蚀效应, 形成的热液白云岩体可以作为油气储层进行能源开发^[65-66]。

加拿大西部和美国东北部古生代碳酸盐岩中的许多油气储层显示了在伸展机制下发育的热液白云岩, 并与矿床有关, 最典型的就是密西西比河谷的 MVT (密西西比河谷型) 矿产^[67]。断层控制的热液白云岩化通常伴随着多期胶结作用和重结晶作用, 这些作用反映了沉积盆地流体性质, 以及促成反应发生的时间、深度和温度条件^[68]。Jiang 等 (2016)^[69] 发现四川盆地震旦系灯影组存在构造断裂控制的热液白云石化, 并识别出早寒武世、晚泥盆世和晚二叠世多期热液白云石化事件。斑马纹理、箱形纹理和角砾岩在断层控制的白云岩体中很常见, 通常被当作高温热流体作用的岩石学判断依据^[70]。然而, 热液白云岩可以在没有这些岩石纹理的情况下形成, 关于它们形成的机制仍存在争议^[71]。近期研究表明, 高压导致的断裂可能是热液白云岩纹理形成的主要过程^[72]。通过对西加拿大

沉积盆地中寒武系的热液白云岩体进行详细的岩相学和地球化学分析表明,热液白云岩的岩石纹理是由于扩张性断裂、角砾化和鞍状白云石作为胶结物沉淀而形成,高温、高压流体对交代碳酸盐岩起着关键作用^[73](图9)。

2 白云岩储集空间控制因素

尽管白云岩储层具备巨大的油气勘探潜力,但倘若无法清晰的认识白云岩储层的成因机理,将会很大程度上制约优质储层分布范围的精准预测,从而影响油气勘探效果^[74]。近年来,随着研究的深入,地质学家们发现白云岩储层孔隙主要受原始沉积环境和成岩改造两方面因素的控制^[75-76]。现今所观察到的白云岩

储集空间是原始沉积物的先存孔隙经过白云石化、溶解、胶结和断裂等一系列成岩作用后的综合产物,探究白云岩储层孔隙成因机理需要综合分析沉积背景和各種成岩作用对储层孔隙增加、减少和保持的相互耦合过程,建立白云岩储集空间的形成-改造-保存的动态演化过程,进而得出优质白云岩储层的主控因素和分布范围,最终为油气勘探指明正确的方向^[77]。

2.1 沉积相展布对优质白云岩储层分布的控制作用

全球大规模白云岩主要发育于局限台地蒸发海水环境或相邻的高能相带,预示着白云岩的分布与沉积相展布密切相关^[75]。通过对沉积相与储层物性关系进行研究,发现发育于不同沉积相带的白云岩的孔隙度和渗透率具有显著的差异,其中台地边缘浅滩相较

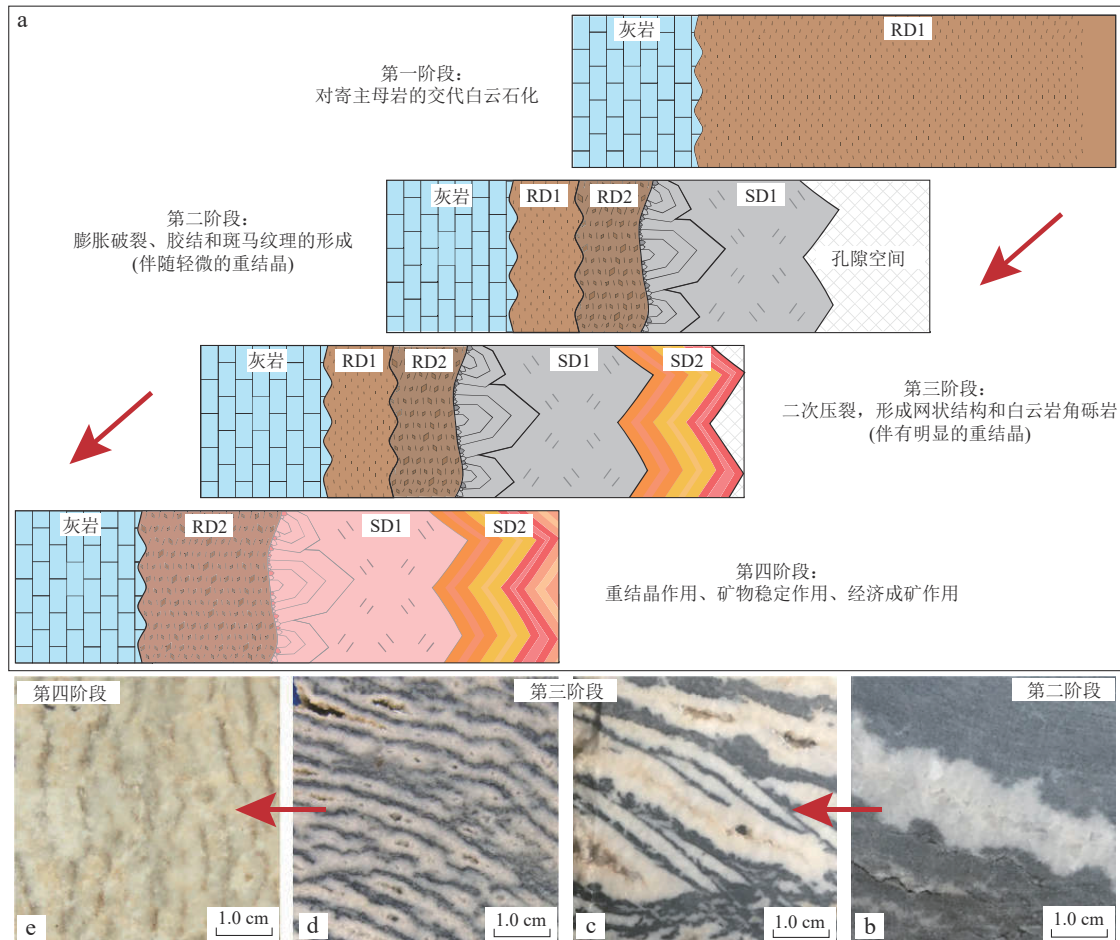


图9 高温、高压下热液白云岩体岩石纹理的多阶段形成演化模型^[73]

Fig. 9 Multistage formation and evolution model of textures in hydrothermal dolomites under high temperature and pressure^[73]

a. 多阶段形成演化过程示意;b. 第二阶段,斑马纹白云岩,手标本照片,黑色的交代白云石占主导,白色的鞍状白云石以单个脉体的形式存在;c. 第三阶段,斑马纹白云岩,手标本照片,白色的鞍状白云石增多,内部发育热液溶孔;d. 第三阶段,斑马纹白云岩,手标本照片,黑色的交代白云石与白色的鞍状白云石交替出现形成典型的网状纹理结构;e. 第四阶段,斑马纹白云岩,手标本照片,黑色的交代白云石几乎消失殆尽,强烈的高温、高压重结晶作用促使白色的鞍状白云石不断粗化(RD代表交代白云石;SD代表鞍状白云石。)

高,台地边缘生物礁及台地蒸发岩相次之^[5]。早期高能台缘相带中形成的礁灰岩和颗粒灰岩一般具有较好的储集物性,经历白云石化作用后可以形成优质的白云岩储层^[6]。

优质白云岩储层分布受沉积相控制的典型地质案例为四川盆地震旦系灯影组台缘带微生物白云岩^[78]和寒武系龙王庙组台内滩颗粒白云岩^[79]。随着原特提斯洋和古亚洲洋的开启,四川盆地晚震旦世受伸展作用影响,形成了克拉通内德阳-安岳裂陷^[80](图10a)。裂陷周缘的台缘带古地貌高,水体能量强,发育大规模的优质微生物白云岩储层。台内断陷低部位沉积水体较深,水体能量低,以富含泥质的泥晶灰岩和泥晶白云岩为主,

储层质量通常较差。台内断陷高部位发育一定规模的台内丘滩体,经历暴露溶蚀后,是台地内相对优质的白云岩储层^[81](图10b)。龙王庙组沉积期四川盆地西部和中部发育大规模水下隆起,处于碳酸盐台地上的同沉积隆起,古地貌相对高、水体浅,有利于盆地内部沿着古隆起周缘发育优质颗粒白云岩储层^[82]。该套颗粒白云岩储层规模巨大,分布广泛,且经历岩溶作用,孔隙度和渗透率较高,构成了中国最大的单体碳酸盐岩巨型气藏安岳气田的储集体(图10c)。

2.2 成岩改造对白云岩储层演化的控制作用

相比于沉积相对白云岩储层分布的控制作用,成岩

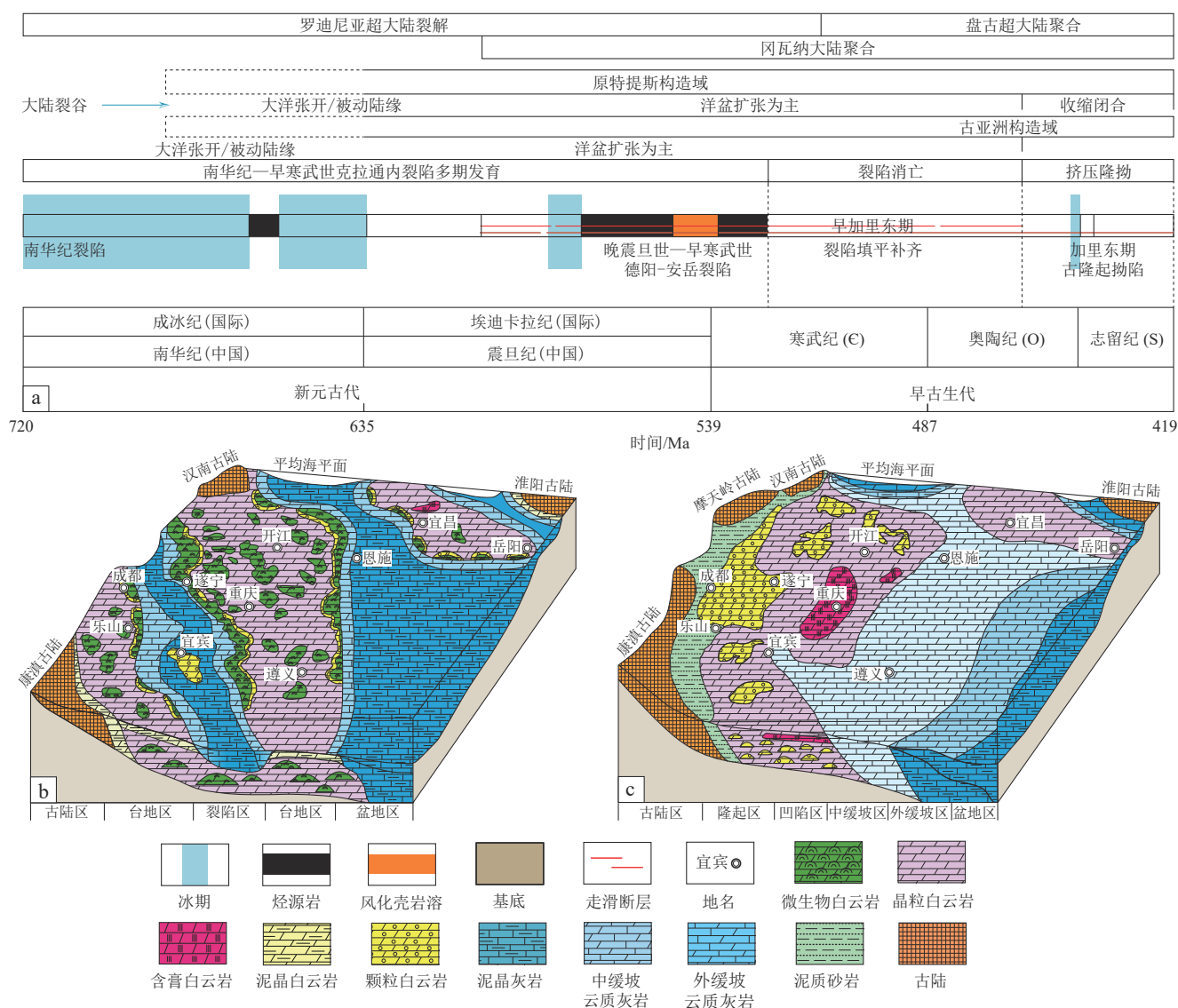


图10 沉积相展布对四川盆地灯影组和龙王庙组优质白云岩储层分布的控制^[83]

Fig. 10 Controlling effects of sedimentary facies distribution on the distributions of high-quality dolomite reservoirs in the Dengying and Longwangmiao formations in the Sichuan Basin^[83]

a. 构造演化过程(419 ~ 720 Ma); b. 震旦系灯影组白云岩分布; c. 寒武系龙王庙组白云岩分布

作用对白云岩储层的影响更加复杂,这表现在不同的成岩作用类型会对白云岩储集空间产生增加、减小或者保存效应,并且这些成岩作用还可以相互叠加,促使埋藏在地下的白云岩储集体具有较大的空间差异性^[84-85]。具体表现在不同流体和演化阶段形成的白云岩储层的孔隙度和渗透率存在显著差异^[86]。受大气淡水淋滤作用的影响,近地表成岩阶段形成的白云岩往往发育良好的原生孔隙和表生溶蚀孔隙,埋藏阶段形成的白云岩,受到深部酸性流体、热液流体、油气充注和重结晶等作用的持续调整,其储层孔隙发生了动态增、减^[87](图11)。

2.2.1 白云岩储层的增孔机制

1) 适度的白云石化作用

经典的白云石交代方解石理论指出,由于 Mg^{2+} 半径小于 Ca^{2+} 半径,白云石交代过程中会造成“减体积”效应,促使孔隙度增加13%,这使得早期研究陷入了只要发生白云石化就会增加孔隙从而形成优质储层的思维定式^[88]。可是近年来的一些地质实例却发现并非所有的白云岩都具备良好的储集性能。在塔里木盆地上寒武统-下奥陶统白云岩非常发育,厚数百米,但是许多白云岩都是致密的,无法作为有效储层^[89]。此外,在高通量蒸发渗透回流区域或者地热流改造区,过度的白云石化作用会促使晶体增生和胶结充填孔隙,一定程度上降低了储层的孔隙度^[90]。因此,需要客观评估白云石化作用的程度进而判断其对储层孔隙的实

际贡献。

2) 适度的次生溶蚀作用

白云岩作为一种重要的可溶性碳酸盐岩,在多种成岩环境下皆易发生溶蚀作用形成大量次生孔隙,溶蚀流体主要包括地表阶段大气降水^[91]、埋藏阶段酸性流体^[92]和热液流体^[93-94]。大气降水既可以溶蚀因海平面降低暂时暴露地表的白云岩^[95],还可以溶蚀因构造活动抬升至地表的白云岩^[96]。四川盆地震旦系灯影组顶部发育受桐湾运动抬升控制的岩溶型白云岩储层^[97],在埋藏成岩环境中,烃类活动和热化学硫酸盐还原反应产生的酸性流体会溶蚀白云岩,增加其孔隙度并改善物性^[98-99]。四川盆地震旦系灯影组上覆筇竹寺组烃源岩中的有机质在生烃过程中,产生大量酸性腐蚀性流体为灯影组四段埋藏溶蚀提供了物质基础^[100]。白云岩的脆性相对于灰岩更高,白云岩在构造活动影响下容易破裂形成裂缝,为热液流体溶蚀储集体提供了运移通道^[101]。李双建等(2021)^[102]发现四川盆地中二叠统栖霞组原始储集物性较差的白云岩储层受构造热液改造后物性改善更加明显。

2.2.2 白云岩储层的降孔机制

1) 过度的胶结作用

当白云岩受到压实和压溶作用时会产生大量的溶解物质,这些溶蚀物质会在原处或其余孔隙处形成胶结物,主体上对储层孔隙演化起着破坏作用^[103]。曲长

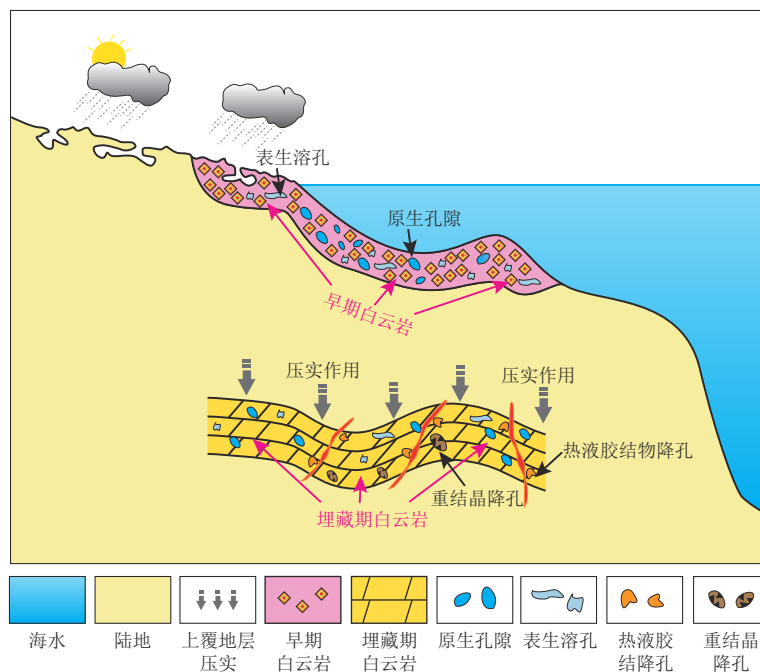


图11 不同形成阶段白云岩储层孔隙演化模式简图

Fig. 11 Sketch showing the evolutionary porosity patterns of dolomite reservoirs formed at various stages

伟等(2014)^[104]研究认为孔隙中大量方沸石胶结是造成渤海湾盆地古近系沙河街组白云岩储层物性变差的主要因素。王琼仙等(2018)^[105]对雷口坡组四段上亚段白云岩储层孔隙中胶结物成分、分布、期次和形成环境进行了系统分析,认为雷口坡组白云岩具有发育早期原生孔隙的沉积和成岩背景,但是多期胶结作用导致储层原生孔隙难以保存下来。

2) 大量热液矿物沉淀

在向上迁移过程中,深部热液流体由于温度和压力的下降会在断层和裂缝中析出特殊的热液矿物(铁白云石、石英和萤石等),填充并堵塞原有的储集空间^[106]。此外,虽然热液溶蚀作用可以增加孔隙,但溶蚀产生的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 CO_3^{2-} 会随热液注入到相邻的孔隙中,这些离子通过再沉淀的方式又降低了白云岩的储集性能^[107]。在四川盆地中西部的茅口组和栖霞组中,热液矿物的沉淀显著降低了白云岩储层的孔隙度^[108-109]。

3) 轻-中度重结晶作用

在埋藏环境中白云岩的重结晶现象很普遍,轻-中度重结晶作用可使晶体变大、晶形变好,有利于晶间孔隙的发育,对白云石的孔隙结构调整起到了关键的作用^[110]。普光气田下三叠统飞仙关组残余鲕粒白云岩中由于普遍发生了轻-中度重结晶作用而形成大量晶间孔和残余晶间溶孔,形成优质白云岩储层^[111]。塔里木盆地寒武系-奥陶系白云岩和华北北部地区蓟县系高于庄组-雾迷山组白云岩中,在轻-中度重结晶作用下白云石晶粒增大,导致晶粒间的结合力减小形成晶间缝隙,改善了储层的储集物性^[112-113]。值得注意的是,当白云岩重结晶过于强烈时,白云石晶体生长至相互紧密接触时会造成白云岩储层物性变差^[114]。

2.2.3 白云岩储层的保孔机制

1) 早期白云石化

早期白云石化作用促使灰岩部分转化或完全转化为白云岩后,鉴于白云岩比灰岩具有更优的抗压实和抗压溶特性,白云岩的孔隙能够在深埋藏条件下得到较好的保存^[115]。根据李茜等(2022)^[116]采用高精度Mg同位素分析的研究显示,四川盆地寒武系洗象池组白云岩是由海平面的持续升降诱发萨布哈与渗透回流白云石化多期叠加形成,这种早期白云石化形成的白云岩因其良好的储集物性可作为理想的油气储层。

2) 早期胶结作用

早期的胶结物通过增强颗粒对压实和压溶作用的抵抗力,来保持一部分原始孔隙和早期形成的次生孔

隙^[117]。王恕一等(2010)^[118]发现四川盆地普光气田下三叠统飞仙关组发育大量的鲕粒白云岩储层,并认为泥晶套在鲕粒内部早期溶蚀形成负鲕过程中起到了一定的保护作用。四川盆地上震旦统灯影组台地鲕粒滩和核形石颗粒滩,在海平面下降时暴露到近地表,受大气水作用产生颗粒等厚环边和粒间胶结物,这些早期胶结物起到了抑制压实和压溶作用,成为保持白云岩储层孔隙的关键要素^[119]。

3) 油气充注与裂解

对于白云岩储层来说,油气充注和原油裂解可有效抑制胶结作用的发生。首先白云岩孔隙中烃类流体的存在阻碍了 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 CO_3^{2-} 的扩散,从而抑制了现有孔隙中方解石胶结物的形成^[120]。其次,液态烃的充注会显著降低孔隙内可动水的含量,降低流体和岩石之间反应产生胶结物的可能性,有利于早期孔隙的保存^[121]。最后,油气在高-过成熟阶段的裂解作用过程中通常会释放高浓度的 CO_2 、 H_2S 和有机酸等酸性物质,这些酸性组分既会导致碳酸盐岩矿物溶蚀,也有助于抑制碳酸盐岩矿物的沉淀^[122]。朱东亚等(2015)^[123]通过对灯影组白云岩钻井及野外剖面进行系统研究认为,油气充注改变了白云岩储层中的成岩流体环境并抑制了成岩矿物的形成,在后期埋藏过程中,液态石油逐渐转变成沥青覆盖在孔洞壁周围,也抑制了成岩矿物的沉淀,促使在现今沥青存在的白云岩储层中仍有丰富的孔隙空间保存下来。

4) 异常高压与封闭体系

当成岩系统处于早期超压状态时,白云岩承受的地层压力会相对较低,利于保存储层的孔隙^[124]。深部白云岩储集空间与异常流体压力表现出密切关系,异常流体压力对次生孔隙起到了支撑和保护的作用^[125]。白云岩形成过程中成岩体系的开放程度影响着储层孔隙的增、减。前人研究认为,当成岩系统处于开放体系时,外部流体所携带的大量 CO_3^{2-} 会与 Ca^{2+} 结合在孔隙内重新沉淀,减少白云石化作用对增孔的贡献,甚至起着反作用。当成岩系统处于封闭体系时,由于没有外来流体的输入而使得 CO_3^{2-} 带入受限,白云石化作用产生“减体积”效应而增加储层孔隙^[126]。

3 白云岩新型实验分析技术

近年来,有关白云岩研究的实验分析技术取得了显著进展。主体上呈现3大分支系统:①微区多参数地球化学实验分析技术,其原理是通过白云岩基质或孔隙充填物的地球化学分析,提供高分辨率、原位和

多参数的地球化学数据,解决白云岩形成时间、温度和流体属性3个关键信息,反演白云岩储集层成岩-孔隙演化过程,进而判识储集层成因机制和成藏期次^[127]。②储层模拟技术,其原理是通过设置类似地下成岩环境的实验条件,尽可能逼真地模拟成岩过程,从正演的角度认识储集层的形成演化过程及优质储层分布规律^[128]。③多尺度储层表征技术,其可以提供高分辨率的白云岩孔喉结构三维图像,用于量化表征白云岩储层分布的非均质性及三维孔喉整体信息^[129]。微区多参数地球化学实验技术、储层模拟技术和多尺度储层表征技术相结合,为白云岩成因、成岩作用、储集空间刻画、分布范围预测及油气成藏过程的研究提供了重要技术手段。

3.1 微区多参数地球化学实验分析技术

3.1.1 微区采样技术

鉴于全岩分析具有很大的不确定性,各种污染物,如陆源碎屑和铁锰氧化物等,都有可能导致白云岩基质或孔隙充填物的地球化学性质发生改变,并且如果经历了强烈的成岩改造,甚至会导致同一样品在不同区域位置表现出差异的地球化学特征^[130]。相反在岩石组分与结构分析基础上,牙钻-微钻-激光3种尺度的微区取样技术,能够提供厘米-毫米-微米尺度的微区实验样本,提高所获取的地球化学信息的可靠性。研究者可以根据所研究的目标采集相应的微区样品,为后续分析白云岩提供更为明确的地球化学信息^[131]。

3.1.2 新型地球化学分析技术

近年来,随着多接收杯电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)和激光剥蚀-多接收等离子体质谱仪(LAMC-ICP-MS)的发展,Mg-Ca同位素、激光原位U-Pb同位素和团簇同位素等新型地球化学参数的测试精度大幅提升,理论依据更加丰富,为揭示白云岩成因机理、储层形成与保持机制以及油气富集成藏过程提供了更为直接的证据和新颖的视角。

1) Mg-Ca同位素示踪流体来源和白云石化过程

白云石化作用主要涉及流体中的 Mg^{2+} 取代碳酸盐矿物中的 Ca^{2+} ,从而使得钙质碳酸盐岩转化为白云岩,所以理清富 Mg^{2+} 流体的来源和流体-岩石相互作用过程中 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 交替机理是探讨白云岩成因的核心内容。考虑到Mg和Ca作为白云岩的核心元素,白云岩所携带的Mg-Ca同位素被认为是揭示流体来源和流体-岩石相互作用过程的直接示踪剂^[132-133]。

随着Mg同位素测量精度的提高,大量的白云岩和碳酸盐岩钙质前驱体(灰岩和文石等)的高精度Mg同位素测量数据被报道,白云岩的Mg同位素值($\delta^{26}Mg$)为 $-3.5\text{‰} \sim -0.5\text{‰}$,灰岩的Mg同位素值($\delta^{26}Mg$)为 $-5.0\text{‰} \sim -3.0\text{‰}$ ^[134]。此外,可能诱发白云石化的潜在流体,如海水、地下水和岩浆热液等,其Mg同位素组成也得到了准确的界定^[135]。在大量Mg同位素测试数据的基础上,根据实验模拟和理论计算得出,随着白云石化过程的持续进行,流体与岩石之间的相互作用会产生显著的Mg同位素分馏^[136-137]。白云岩的早期成岩体系可分为流体缓冲体系和沉积物缓冲体系。海水是流体缓冲体系的主要流体组成,该体系下形成的白云岩继承了海水较高的钙同位素值($\delta^{44}Ca$)。沉积物缓冲体系的成岩流体受海水和孔隙水混合程度的控制,该体系下形成的白云岩通常继承了原始碳酸盐岩较低的 $\delta^{44}Ca$ 值^[138]。因此,白云岩Mg-Ca同位素体系能够有助于限定区域内白云石化流体来源及流体-岩石相互作用过程^[139]。

来自塔里木盆地中-下奥陶统鹰山组白云岩、白云质灰岩和灰岩的Mg同位素研究显示,在云灰互层结构中,灰岩的 $\delta^{26}Mg$ 值明显低于白云岩,表明随着海平面的持续升高,流体的Mg/Ca摩尔比值降低,导致白云石化驱动力减弱(图12a₁—a₃)。在准同生白云岩结构中 $\delta^{26}Mg$ 值随着深度的增加而减小,说明白云石化流体受蒸发泵作用向上迁移(图12b₁—b₃)。渗透回流白云岩结构的 $\delta^{26}Mg$ 值随着深度的增加而增加,诱发白云石化的流体受重力作用向下迁移,促使下伏灰岩转化为白云岩(图12c₁—c₃)。埋藏白云岩结构的富Mg流体来源较为复杂,若同期海水与后期埋藏孔隙水等流体混合,会导致Mg同位素值在垂向上呈波动状态(图12d₁—d₃)^[140]。Wei等(2019)^[141]选取了全球范围内不同地区3条盖帽白云岩剖面:华南三峡地区九龙湾剖面、塔里木西北乌什剖面和纳米比亚西北Etoto剖面。通过分析盖帽白云岩样品的 $\delta^{44}Ca$ 值和放射成因Sr同位素含量比值($^{87}Sr/^{86}Sr$),对盖帽白云岩的沉积环境和成因给出了新的解释。结果显示,3条盖帽白云岩剖面下部均出现明显的 $\delta^{44}Ca$ 负漂移(变化幅度约0.6‰)和 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 正漂移(变化幅度约0.003),剖面下部低的 $\delta^{44}Ca$ 值和高的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值十分接近陆源河流的平均值,与当时海水的估计值相差很远,证实盖帽白云岩是通过同沉积白云岩化作用形成于混合水体中,因而记录了冰期后陆源淡水的信息。大量陆源离子输入到海水中说明了全球性冰期后极强的大陆风化和水动力条件,在保持高的碳酸盐饱和度的同时,淡水对高盐度海

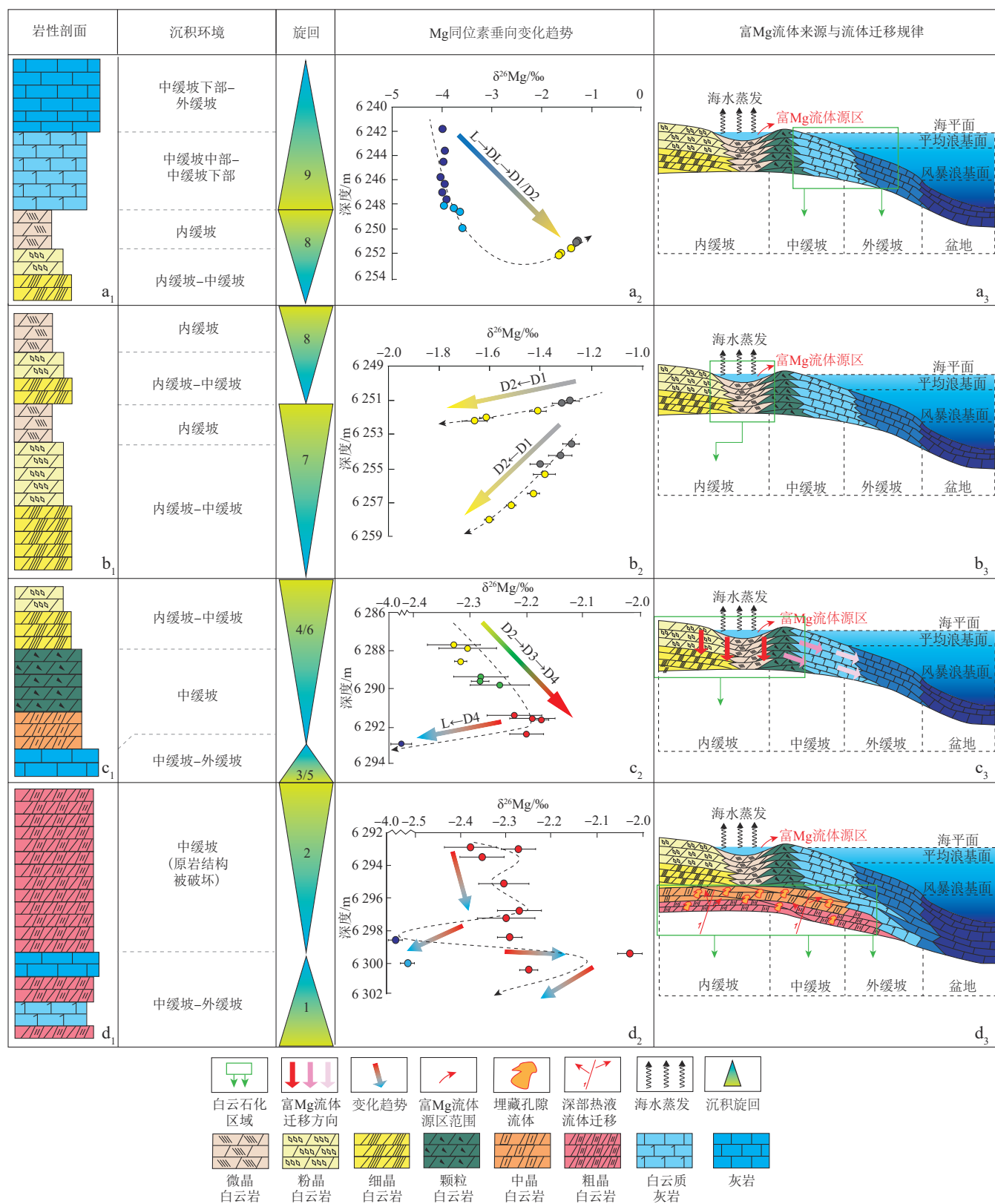


图12 塔里木盆地塔中隆起构造区中-下奥陶统鹰山组碳酸盐岩Mg同位素变化趋势与白云石化流体迁移规律^[140]

Fig. 12 Mg isotope variation trends of carbonate rocks and fluid migration patterns of dolomites of the Middle-Lower Ordovician Yingshan Formation in the Tazhong uplift structural zone, Tarim Basin^[140]

a₁—a₃. 云灰互层结构; b₁—b₃. 准同生白云岩结构; c₁—c₃. 渗透回流白云岩结构; d₁—d₃. 埋藏白云岩结构; a₁—d₁. 岩性剖面; a₂—d₂. Mg同位素变化趋势; a₃—d₃. 白云石化流体迁移规律

(L. 灰岩; DL. 白云质灰岩; D1. 微晶白云岩; D2. 粉-细晶白云岩; D3. 颗粒白云岩; D4. 中-粗晶白云岩。)

水的稀释也有利于白云岩的沉积(图13)。

2) 激光U-Pb和团簇同位素用于确定白云岩绝对年龄和形成温度

早期U-Pb定年主要基于同位素稀释法,采用热电离质谱或多接收电感耦合等离子体质谱进行测定。但是该方法存在耗时长、成功率低和适用范围窄等局限性。随着原位分析技术的发展,传统溶液法逐渐被原位激光剥蚀U-Pb定年技术所取代^[142]。Xiong等(2023)^[143]将原位微区U-Pb定年技术应用到前寒武纪地层中,通过测试扬子板块陕西省马元地区灯影组白云岩中的白云石,确定了该区灯影组白云岩的年龄为 (565.0 ± 5.5) Ma。周进高等(2022)^[144]为解决以往定性或半定量研究白云岩储集层形成过程所取得的认识中的争议问题,应用激光U-Pb原位定年技术对鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组白云岩储集层形成过程进行研究,发现马家沟组主要经历了5期成岩作用:第1期为基质白云岩的沉积或准同生期白云石化作用,发生时间为494.0 ~ 444.0 Ma;第2期为犬牙状或叶片状白云石胶结作用,发生时间为467.0 ~ 440.0 Ma;第3期为白云石粉砂充填作用,发生时间为381.0 ~ 316.5 Ma;

第4期为晶粒白云石充填作用,发生时间为354.0 Ma;第5期为晶粒方解石充填作用,发生时间为319.0 ~ 292.7 Ma。

团簇同位素值 Δ_{47} 是指磷酸消解产生的 CO_2 气体中,质量数为47的多取代同位素体与其“随机分布”状态下丰度的千分差。通过测试 Δ_{47} 值可以直接获得白云岩的形成(或改造)温度,被广泛应用于判断白云石化流体性质和估算流体温度^[145]。Millan等(2016)^[146]应用团簇同位素明确了加拿大艾伯塔盆地上泥盆统Nisku组经历了3期白云石化过程,并且认为白云石化阶段与地层埋藏史的成岩阶段相互吻合,有效证明了团簇同位素温度计能够重建复杂的白云岩成岩历史。通过对塔里木盆地塔中地区下奥陶统鹰山组白云岩的团簇同位素测试分析,刘嘉庆等(2020)^[147]认为鹰山组白云岩储层发育与埋藏溶蚀和热流体活动关系密切。近期研究表明, Δ_{47} 会明显受到同位素动力学效应(kinetic isotope effects)的影响,导致基于 Δ_{47} 计算获得的温度无法真实反映矿物形成时的温度^[138]。为解决该问题,研究者将“单一”团簇同位素值(Δ_{47})扩展为“双”团簇同位素值(Δ_{47} 和 Δ_{48}),为应用团簇同位素深入研究古老地层

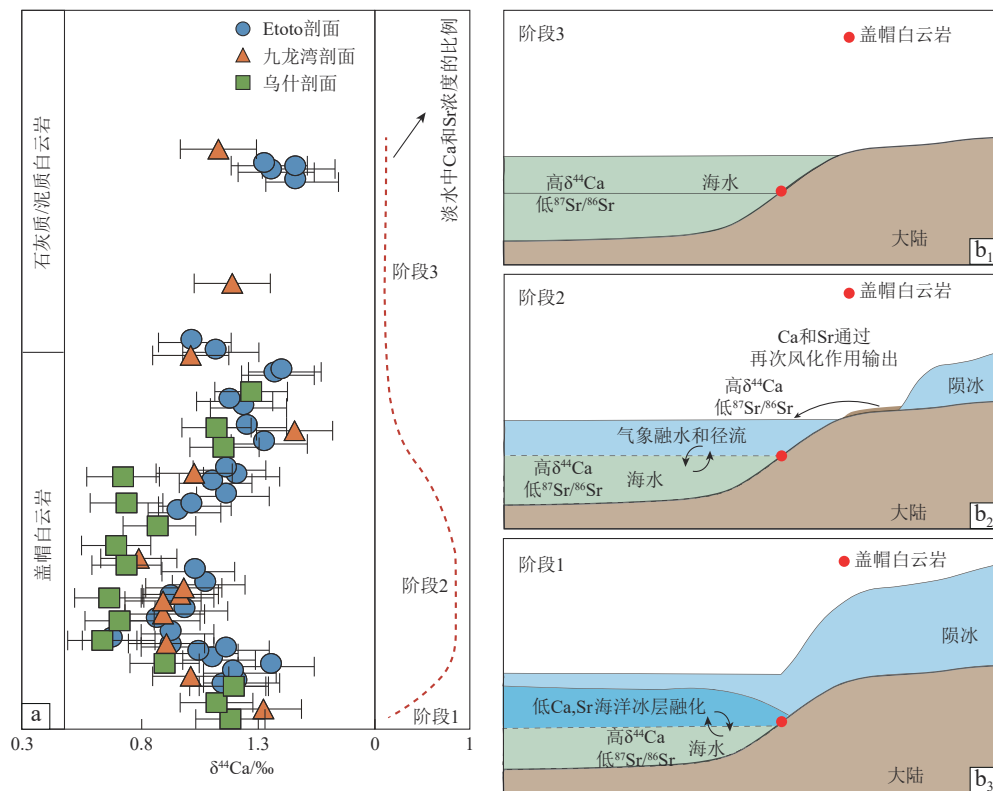


图13 盖帽白云岩Ca同位素数据汇总(a)及形成的3个阶段示意图(b_1 — b_3)^[141]

Fig. 13 Summary of the Ca isotope data of cap dolomites (a) and schematic diagrams showing the three stages in forming the cap dolomites (b_1 — b_3)^[141]

中白云岩形成机理开辟了新的方向^[148] (图14)。

对于地层年代老、埋藏深度大、地层温度高和构造演化期次多的白云岩地层,精准确定油气成藏时间一

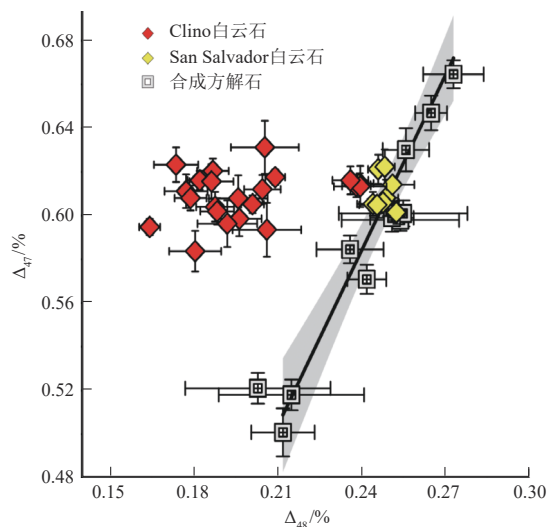


图14 巴哈马白云石 Δ_{47} 和 Δ_{48} 特征^[148]

Fig. 14 Δ_{47} and Δ_{48} values of Bahamian dolomites^[148]

(Clino和San Salvador代表巴哈马台地2口白云岩取样钻孔。San Salvador白云石的 Δ_{47} 和 Δ_{48} 值与实验室建立的理论平衡值均一致;Clino钻孔的白云石表现出明显的 Δ_{47} 和 Δ_{48} 不平衡,即其温度不能准确反应其形成温度。)

直是困扰油气地质学家的难题^[149]。随着激光原位U-Pb同位素定年技术与团簇同位素定温技术测试精度的不断提高,可以在绝对年龄坐标下分析油气成藏历史,为确定古代白云岩油气成藏分布规律提供了更为精准的方法^[150-151]。在对川中古隆起震旦系灯影组开展的研究中,通过测定含烃包裹体白云石宿主矿物的U-Pb同位素年龄和团簇同位素温度,确定了3个主要的油气聚集期:志留纪末 $[(416.0 \pm 23.0) \text{ Ma}]$ 、二叠纪末-早三叠世 $[(248.0 \pm 27.0) \sim (246.3 \pm 1.5) \text{ Ma}]$ 和燕山期-喜马拉雅期 $[(115.0 \pm 69.0) \sim (41.0 \pm 10.0) \text{ Ma}]$ ^[152] (图15)。

3.2 储层模拟技术正演白云岩储层形成过程

对于受多期流体相互叠加改造的白云岩储层,仅依靠地质观察和地球化学方法难以区分不同期次的溶蚀作用。储层模拟技术,通过在实验室中模拟溶蚀和沉积过程,已成为研究白云岩储层中孔隙发育主要控制因素和分布规律的有效手段^[153-154]。近年来,通过对溶解动力学物理模拟装置的不断改进,将白云岩储层模拟演化从二维拓展至三维,从浅层

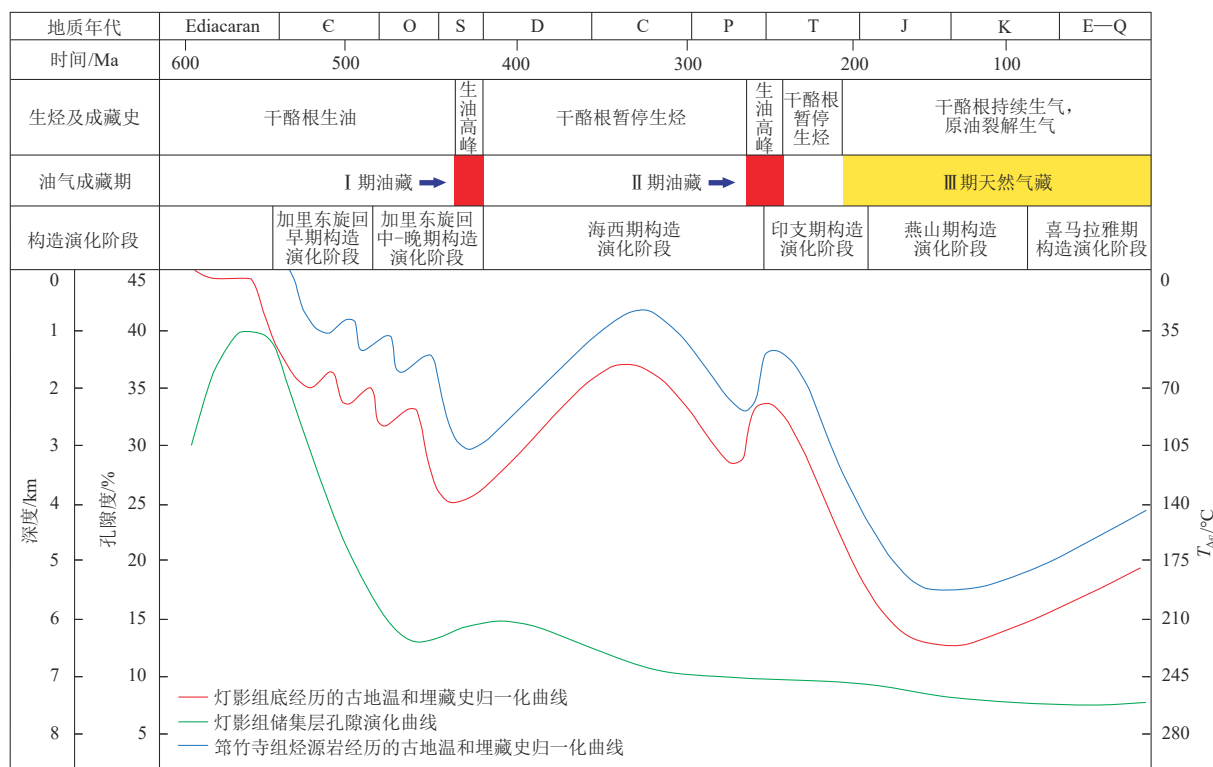


图15 四川盆地川中古隆起灯影组气藏基于含烃包裹体宿主矿物年龄和团簇同位素温度(T_{Δ_n})约束的成藏史重建^[152]

Fig. 15 Accumulation history of gas reservoirs of the Dengying Formation in the Chuanzhong Uplift reconstructed under the constraints of the ages of host minerals in hydrocarbon-bearing inclusions and the temperatures of clumped isotopes (T_{Δ_n})^[152]

C. 寒武纪;O. 奥陶纪;S. 志留纪;D. 泥盆纪;C. 石炭纪;P. 二叠纪;T. 三叠纪;J. 侏罗纪;K. 白垩纪;E-Q. 古近纪—第四纪

拓展到深层,揭示了白云岩储集层物性、孔喉结构类型、温度、压力、流体属性及流速对溶蚀和沉淀作用的控制,为认识白云岩埋藏溶蚀孔洞发育样式和分布规律提供了正演模型^[155]。

考虑到实验室模拟实验仅能依据反应流出溶液中化学成分分析结果进行溶蚀效果的评价,并通过对反应前、后岩石样品进行表征来获取岩石内部的孔隙结构特征,但却无法精准获取溶蚀过程中岩石孔隙内部的流体分布、流动状态以及离子浓度的分布情况。研究人员通过计算机模拟方法进行数字岩石物理、化学及生物模型的建立,通过孔隙尺度及岩心尺度的数值模拟来进一步探究孔隙结构、流体特征和矿物非均质性对反应速率的影响^[156]。其中,反应运输模型已被广泛应用于提高对地表和地下系统中的地球化学反应和

各种输运现象的认识^[157]。计算模拟方法,不仅能够获取孔隙空间内的浓度梯度变化等变量,且实验过程不易受其他环境条件的影响,获得的数据可以对岩心驱替实验进行有效补充,使我们能够进一步深入了解孔隙尺度的溶蚀过程的动态演化,特别是与实验数据进行比较时,还能够获得更加准确和全面的数据结果,为白云岩内部溶蚀过程的机理研究奠定基础并提供指导^[158]。

3.3 多尺度定量表征技术解析白云岩孔隙的三维结构和流动性

白云岩储层中孔、缝和洞通常表现出强非均质性特征,岩石薄片观察、低压气体吸附法和高压压汞法等常规储层表征技术,无法定量表征白云岩内部复杂孔喉结构

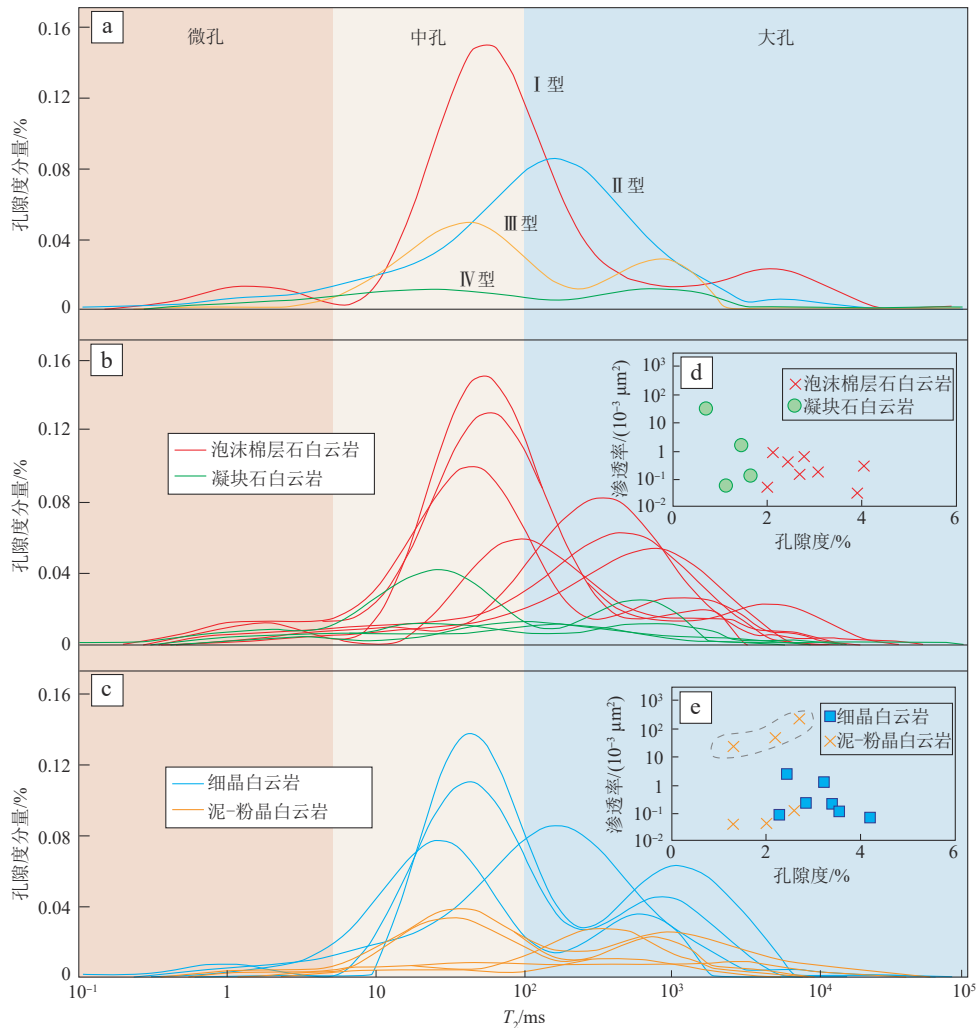


图16 塔里木盆地塔北地区奇格布拉克组白云岩核磁共振 T_2 谱特征^[163]

Fig. 16 Characteristics of NMR T_2 spectra of dolomites in the Qigebulake Formation, Tabei area, Tarim Basin^[163]

a. 基于核磁共振 T_2 谱的奇格布拉克组白云岩孔隙结构类型;b. 泡沫棉层白云岩和凝块白云岩核磁共振 T_2 谱特征;c. 细晶白云岩和泥-粉晶白云岩核磁共振 T_2 谱特征;d,e. 分别为b图和c图的孔隙度-渗透率分布散点图

特征,也无法提供岩石物理属性的定量计算结果和三维孔喉整体信息^[159]。随着实验仪器和测试技术的发展与改进,关于白云岩储层孔隙结构的表征已经实现了从定性向定量、二维向三维及单一尺度向多尺度的转变^[160]。

3.3.1 核磁共振-频谱激发极化

核磁共振-频谱激发极化利用饱和流体(如盐水)充注储层岩石孔隙后,测量储层岩石孔隙在磁场和电场作用下表现出的电磁响应特征,并通过经验模型加以解释,从而快速、原位地对整个样品的孔隙系统进行检测^[161]。选取塔里木盆地寒武系和鄂尔多斯盆地奥陶系不同类型的白云岩样品,开展核磁共振-频谱激发极化研究,结果显示,溶蚀作用对提高白云岩储层渗透率的贡献显著,可达数量级的提升,而对于孔隙体积的增加影响相对较小,最大增加率为33%^[162]。陈旭东等(2023)^[163]基于核磁共振的总孔隙度、 T_2 谱曲线形态和孔隙度分量等参数,识别出塔里木盆地奇格布拉克组白云岩中发育4种孔隙结构类型:I型(多峰-高孔型)和II型(单峰-中孔型)主要出现在泡沫绵层石白云岩和细晶白云岩中,具有发育较好的多尺度孔隙类型;III型(双峰-低孔型)和IV型(无峰-低孔型)主要形成于凝块石白云岩和泥粉晶白云岩中,以微小孔和微裂缝为主(图16)。

3.3.2 激光共聚焦-CT扫描成像解析

激光共聚焦显微镜图像分析法能够直接获得岩石表面孔隙分布图像,包括孔喉类型、形态、大小和连通性等信息^[164]。随着技术的发展,从视频型、荧光寿命成像和双光子到4Pi和多焦点多光子共聚焦激光显微镜,其分辨率不断提高,目前可达亚微米级^[165]。CT扫描技术可以获得白云岩的三维孔隙网络模型,并能够计算出白云岩的总孔隙度、孔喉半径、孔喉数量、孔喉长度和空间连通性等表征参数^[166]。该技术的分辨率可达微米级,具有测试速度快、对样品无损伤的优点^[167]。田兴旺等(2021)^[168]利用CT扫描成像技术详细分析了四川盆地灯影组四段非均质性白云岩储层的内部结构,深入揭示了不同品质储集空间的孔隙和喉道在立体空间中的形状、大小、分布和相互连通性特征。近年来,CT扫描测试方法也逐渐被应用于白云岩溶解动力学模拟实验中,以评价不同条件下溶蚀引起的孔隙结构变化^[169]。彭军等(2018)^[170]以塔里木盆地寒武系白云岩为实验样品,通过酸性流体渗流方式进行溶蚀模拟实验,模拟地层埋藏演化过程中的溶蚀作用,发现准同生期方解石是溶蚀孔

洞发育的物质基础,以早期大气淡水溶蚀为主,埋藏条件下受与有机质热演化有关的酸性流体和深部热流体等多种酸性流体溶蚀叠加改造,形成规模优质白云岩储集层。

4 结论与展望

作为全球最重要的油气储集岩类型之一,白云岩在油气勘探领域的地位举足轻重。基础理论和实验技术的不断创新,为深入认识白云岩成因机理、优质储层控制因素和油气富集过程注入了新活力。成因上,逐渐意识到白云岩成因是一个复杂且动态的过程,单一的白云岩成因模式绝大多数情况下只能适用于局部地区,在探究白云岩成因机理时需要重视多期白云岩成因的识别,建立白云岩的多期动态形成过程。成储上,摒弃了只要发生白云石化就会形成优质储层的固有思维,从更为综合的角度分析原始沉积背景和后期成岩作用对储层孔隙的形成-改造-保存的控制作用。实验技术上与时俱进,多学科交叉融合,微区取样、高精度Mg-Ca同位素、激光U-Pb同位素、团簇同位素、储层模拟实验和多尺度定量储层表征技术等为揭示白云岩成因-成储机理提供了更直接和全面的判识信息。随着地质理论与新技术的不断发展和应用,未来对白云岩成因机理和储层孔隙发育机制的研究将更加深入和精确。建立包括岩石学、地球化学、实验模拟和地球物理等多学科交叉评价方法,不断提高对白云岩沉积环境和成岩条件的理解和认识,将是未来评估和预测白云岩储层含油气潜力的潜在发展方向。

参 考 文 献

- [1] PETRASH D A, BIALIK O M, BONTIGNALI T R R, et al. Microbially catalyzed dolomite formation: From near-surface to burial[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 171: 558-582.
- [2] KOESHIDAYATULLAH A, CORLETT H, HOLLIS C. An overview of structurally-controlled dolostone-limestone transitions in the stratigraphic record[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 220: 103751.
- [3] GUO Pei, WEN Huaguo, LI Changzhi, et al. Lacustrine dolomite in deep time: What really matters in early dolomite formation and accumulation?[J]. *Earth-Science Reviews*, 2023, 246: 104575.
- [4] 马永生,蔡勋育,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.
- [5] 马永生, 何治亮, 赵培荣, 等. 深层—超深层碳酸盐岩储层形成机理新进展[J]. 石油学报, 2019, 40(12): 1415-1425.
- MA Yongsheng, HE Zhiliang, ZHAO Peirong, et al. A new progress in formation mechanism of deep and ultra-deep carbonate reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(12): 1415-1425.
- [6] 何治亮, 马永生, 朱东亚, 等. 深层—超深层碳酸盐岩储层理论技术进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 533-546.
- HE Zhiliang, MA Yongsheng, ZHU Dongya, et al. Theoretical and technological progress and research direction of deep and ultra-deep carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 533-546.
- [7] SCHMOKER J W, KRYSTINIK K B, HALLEY R B. Selected characteristics of limestone and dolomite reservoirs in the United States[J]. AAPG Bulletin, 1985, 69(5): 733-741.
- [8] WILSON M E J, EVANS M J, OXTOBY N H, et al. Reservoir quality, textural evolution, and origin of fault-associated dolomites [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(9): 1247-1272.
- [9] OMIDPOUR A, MAHBOUBI A, MOUSSAVI-HARAMI R, et al. Effects of dolomitization on porosity-Permeability distribution in depositional sequences and its effects on reservoir quality, a case from Asmari Formation, SW Iran [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208(Part A): 109348.
- [10] 乔占峰, 张峭楠, 沈安江, 等. 塔里木和四川盆地白云岩规模优质储层形成与发育控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 92-104.
- QIAO Zhanfeng, ZHANG Shaonan, SHEN Anjiang, et al. Controls on formation and development of large-sized high-quality dolomite reservoirs in the Tarim and Sichuan basins [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 92-104.
- [11] CAI Wenkai, LIU Jiahui, ZHOU Chunhui, et al. Structure, genesis and resources efficiency of dolomite: New insights and remaining enigmas[J]. Chemical Geology, 2021, 573: 120191.
- [12] MOHAMMED SAJED O K, GLOVER P W J. Dolomitisation, cementation and reservoir quality in three Jurassic and Cretaceous carbonate reservoirs in north-western Iraq [J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 115: 104256.
- [13] WARREN J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations[J]. Earth-Science Reviews, 2000, 52(1/3): 1-81.
- [14] CHANG Biao, LI Chao, LIU Deng, 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, 2020, 117(25): 14005-14014.
- [15] LAND L S. Failure to precipitate dolomite at 25 °C from dilute solution despite 1000-fold oversaturation after 32 years [J]. Aquatic Geochemistry, 1998, 4(3): 361-368.
- [16] GREGG J M, BISH D L, KACZMAREK S E, et al. Mineralogy, nucleation and growth of dolomite in the laboratory and sedimentary environment: A review[J]. Sedimentology, 2015, 62(6): 1749-1769.
- [17] CHEN Chao, ZHONG Hanting, WANG Xinyu, et al. Thermodynamic and kinetic studies of dolomite formation: A review[J]. Minerals, 2023, 13(12): 1479.
- [18] FENTER P, ZHANG Z, PARK C, et al. Structure and reactivity of the dolomite (104)-water interface: New insights into the dolomite problem [J]. Geochimica et Cosmochimica acta, 2007, 71(3): 566-579.
- [19] ZENGER D H, BOURROUILH-LE JAN F G, CAROZZI A V. Dolomieu and the first description of dolomite [M]//PURSER B, TUCKER M, ZENGER D. Dolomites: A Volume in Honour of Dolomieu. Chichester, UK: The International Association of Sedimentologists, 1994: 21-28.
- [20] REEDER R J, NAKAJIMA Y. The nature of ordering and ordering defects in dolomite [J]. Physics and Chemistry of Minerals, 1982, 8(1): 29-35.
- [21] GARCÍA-RUIZ J M. A fluctuating solution to the dolomite problem [J]. Science, 2023, 382(6673): 883-884.
- [22] RODRIGUEZ-BLANCO J D, SHAW S, BENNING L G. A route for the direct crystallization of dolomite [J]. American Mineralogist, 2015, 100(5/6): 1172-1181.
- [23] PINA C M, PIMENTEL C, CRESPO Á. The dolomite problem: A matter of time[J]. ACS Earth and Space Chemistry, 2022, 6(6): 1468-1471.
- [24] KIM J, KIMURA Y, PUCHALA B, et al. Dissolution enables dolomite crystal growth near ambient conditions [J]. Science, 2023, 382(6673): 915-920.
- [25] FANG Yihang, HOBBS F, YANG Yiping, et al. Dissolved silica-driven dolomite precipitation in the Great Salt Lake, Utah, and its implication for dolomite formation environments [J]. Sedimentology, 2023, 70(4): 1328-1347.
- [26] HASHIM M S, ROSE K G, COHEN H F, et al. Effects of sodium and potassium concentrations on dolomite formation rate, stoichiometry and crystallographic characteristics[J]. Sedimentology, 2023, 70(7): 2355-2370.
- [27] ZHANG Fangfu, XU Huifang, SHELOBOLINA E S, et al. Precipitation of low-temperature disordered dolomite induced by extracellular polymeric substances of methanogenic Archaea *Methanosarcina barkeri*: Implications for sedimentary dolomite formation[J]. American Mineralogist, 2021, 106(1): 69-81.
- [28] DONG Hailiang, HUANG Liuqin, ZHAO Linduo, et al. A critical review of mineral-microbe interaction and co-evolution: mechanisms and applications [J]. National Science Review, 2022, 9(10): nwac128.
- [29] 沈安江, 胡安平, 张杰, 等. 微生物碳酸盐岩“三因素”控储地质认识和分布规律[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 582-596.
- SHEN Anjiang, HU Anping, ZHANG Jie, et al. “Three-factor” driven microbial carbonate reservoirs and their distribution [J].

- Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 582–596.
- [30] VASCONCELOS C, MCKENZIE J A. Microbial mediation of modern dolomite precipitation and diagenesis under anoxic conditions (Lagoa Vermelha, Rio de Janeiro, Brazil)[J]. Journal of Sedimentary Research, 1997, 67(3): 378–390.
- [31] KENWARD P A, GOLDSTEIN R H, GONZÁLEZ L A, et al. Precipitation of low-temperature dolomite from an anaerobic microbial consortium: the role of methanogenic Archaea [J]. Geobiology, 2009, 7(5): 556–565.
- [32] LU Yang, SUN Xiaoming, XU Huifang, et al. Formation of dolomite catalyzed by sulfate-driven anaerobic oxidation of methane: Mineralogical and geochemical evidence from the northern South China Sea[J]. American Mineralogist, 2018, 103(5): 720–734.
- [33] SÁNCHEZ-ROMÁN M, VASCONCELOS C, SCHMID T, et al. Aerobic microbial dolomite at the nanometer scale: Implications for the geologic record[J]. Geology, 2008, 36(11): 879–882.
- [34] LIU Deng, YU Na, PAPINEAU D, et al. The catalytic role of planktonic aerobic heterotrophic bacteria in protodolomite formation: Results from Lake Jibuhulangu Nuur, Inner Mongolia, China [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2019, 263: 31–49.
- [35] DENG Shicai, DONG Hailiang, LV Guo, et al. Microbial dolomite precipitation using sulfate reducing and halophilic bacteria: Results from Qinghai Lake, Tibetan Plateau, NW China [J]. Chemical Geology, 2010, 278(3/4): 151–159.
- [36] WANG Jiajia, ZHAO Yangang, LI Dan, et al. Extreme halophilic bacteria promote the surface dolomitization of calcite crystals in solutions with various magnesium concentrations [J]. Chemical Geology, 2022, 606: 120998.
- [37] KENWARD P A, FOWLE D A, GOLDSTEIN R H, et al. Ordered low-temperature dolomite mediated by carboxyl-group density of microbial cell walls [J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(11): 2113–2125.
- [38] WEN Yixiong, SÁNCHEZ-ROMÁN M, LI Yalin, et al. Nucleation and stabilization of Eocene dolomite in evaporative lacustrine deposits from central Tibetan Plateau[J]. Sedimentology, 2020, 67(6): 3333–3354.
- [39] ZHAO Yangang, WEI Xiangyu, GAO Xiao, et al. Proto-dolomite spherulites with heterogeneous interior precipitated in brackish water cultivation of freshwater cyanobacterium *Leptolyngbya boryana* [J]. Science of the Total Environment, 2024, 906: 167552.
- [40] LI Mingtao, WIGNALL P B, DAI Xu, et al. Phanerozoic variation in dolomite abundance linked to oceanic anoxia [J]. Geology, 2021, 49(6): 698–702.
- [41] ZHENG Weili, LIU Deng, YANG Shanshan, et al. Transformation of protodolomite to dolomite proceeds under dry-heating conditions [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2021, 576: 117249.
- [42] ZHANG Yifan, YAO Qizhi, QIAN Feijin, et al. Formation pathway of norsethite dominated by solution chemistry under ambient conditions [J]. American Mineralogist, 2021, 106(8): 1306–1318.
- [43] ZHANG Fangfu, XU Huifang, KONISHI H, et al. Dissolved sulfide-catalyzed precipitation of disordered dolomite: Implications for the formation mechanism of sedimentary dolomite [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2012, 97: 148–165.
- [44] VANDEGINSTE V, SNELL O, HALL M R, et al. Acceleration of dolomitization by zinc in saline waters[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 1851.
- [45] FANG Yihang, XU Huifang. Dissolved silica-catalyzed disordered dolomite precipitation [J]. American Mineralogist, 2022, 107(3): 443–452.
- [46] CHENG Jianru, MENG Xianqiang, ZHANG Enlou, et al. An Early Holocene primary dolomite layer of abiotic origin in Lake Sayram, Central Asia [J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(23): e2021GL096309.
- [47] JIAO Xin, LIU Yiqun, YANG Wan, et al. Microcrystalline dolomite in a Middle Permian volcanic lake: Insights on primary dolomite formation in a non-evaporitic environment [J]. Sedimentology, 2023, 70(1): 48–77.
- [48] BADIOZAMANI K. The Dorag dolomitization model, application to the Middle Ordovician of Wisconsin [J]. Journal of Sedimentary Research, 1973, 43(4): 965–984.
- [49] WARD W C, HALLEY R B. Dolomitization in a mixing zone of near-seawater composition, late Pleistocene, northeastern Yucatan Peninsula [J]. Journal of Sedimentary Research, 1985, 55(3): 407–420.
- [50] HARDIE L A. Dolomitization; a critical view of some current views [J]. Journal of Sedimentary Research, 1987, 57(1): 166–183.
- [51] PETRASH D A, BIALIK O M, STAUDIGEL P T, et al. Biogeochemical reappraisal of the freshwater-seawater mixing-zone diagenetic model [J]. Sedimentology, 2021, 68(5): 1797–1830.
- [52] MEHMOOD M, YASEEN M, KHAN E U, et al. Dolomite and dolomitization model-a short review [J]. International Journal of Hydrology, 2018, 2(5): 549–553.
- [53] SANZ-MONTERO M E, RODRIGUEZ-ARANDA J P, CALVO J P. Mediation of endoevaporitic microbial communities in early replacement of gypsum by dolomite: A case study from Miocene lake deposits of the Madrid Basin, Spain [J]. Journal of Sedimentary Research, 2006, 76(12): 1257–1266.
- [54] GABELLONE T, WHITAKER F. Secular variations in seawater chemistry controlling dolomitization in shallow reflux systems: Insights from reactive transport modelling [J]. Sedimentology, 2016, 63(5): 1233–1259.
- [55] PRATHER B E, GOLDSTEIN R H, KOPASKA-MERKEL D C, et al. Dolomitization of reservoir rocks in the Smackover Formation, southeastern Gulf Coast, U. S. A [J]. Earth-Science

- Reviews, 2023, 244: 104512.
- [56] 沈安江, 罗宪婴, 胡安平, 等. 从准同生到埋藏环境的白云石化路径及其成储效应[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(4): 637–647.
- SHEN Anjiang, LUO Xianying, HU Anping, et al. Dolomitization evolution and its effects on hydrocarbon reservoir formation from penecontemporaneous to deep burial environment [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(4): 637–647.
- [57] ZENGER D H. Burial dolomitization in the Lost Burro Formation (Devonian), east-central California, and the significance of late diagenetic dolomitization[J]. Geology, 1983, 11(9): 519–522.
- [58] 马锋, 许怀先, 顾家裕, 等. 塔东寒武系白云岩成因及储集层演化特征[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(2): 144–155.
- MA Feng, XU Huaixian, GU Jiayu, et al. Cambrian dolomite origin and reservoir evolution in east Tarim Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(2): 144–155.
- [59] 李斌, 彭军, 夏青松, 等. 塔北地区寒武系下丘里塔格群白云石化模式[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(2): 310–322.
- LI Bin, PENG Jun, XIA Qingsong, et al. Dolomitization model of Lower Qiulitage Group in Tabei area [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(2): 310–322.
- [60] 乔占峰, 沈安江, 梁峰, 等. 基于镁同位素的规模埋藏白云岩形成过程——以塔里木盆地蓬莱坝组为例[J]. 地质学报, 2023, 97(7): 2293–2310.
- QIAO Zhanfeng, SHEN Anjiang, LIANG Feng, et al. Magnesium isotope-based forming process of large sized burial dolomite: A case study of the Penglaiba Formation in Tarim Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(7): 2293–2310.
- [61] LUKOCZKI G, HAAS J, GREGG J M, et al. Early dolomitization and partial burial recrystallization: A case study of Middle Triassic peritidal dolomites in the Villány Hills (SW Hungary) using petrography, carbon, oxygen, strontium and clumped isotope data [J]. International Journal of Earth Sciences, 2020, 109(3): 1051–1070.
- [62] MACHEL H G, LONNÉE J. Hydrothermal dolomite—A product of poor definition and imagination [J]. Sedimentary Geology, 2002, 152(3/4): 163–171.
- [63] KOESHIDAYATULLAH A, CORLETT H, STACEY J, et al. Origin and evolution of fault-controlled hydrothermal dolomitization fronts: A new insight [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 541: 116291.
- [64] AFIFY A M, SANZ-MONTERO M E, GONZÁLEZ-ACEBRÓN L. Dolomite-magnesite formation and polymetallic mineralization in a rift-sag basin on the western margin of the Red Sea: Paleoenvironmental, hydrothermal, and tectonic implications [J]. Journal of Sedimentary Research, 2022, 92(2): 144–165.
- [65] FRIEDMAN G M. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview: Discussion [J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(9): 1339–1341.
- [66] SIMANDL G J, PARADIS S. Carbonatites: Related ore deposits, resources, footprint, and exploration methods [J]. Applied Earth Science, 2018, 127(4): 123–152.
- [67] DAVIES G R, SMITH L B, Jr. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1641–1690.
- [68] MARTÍN-MARTÍN J D, TRAVÉ A, GOMEZ-RIVAS E, et al. Fault-controlled and stratabound dolostones in the Late Aptian–Earliest Albian Benassal Formation (Maestrat Basin, E Spain): Petrology and geochemistry constrains [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 65: 83–102.
- [69] JIANG Yuqiang, TAO Yanzhong, GU Yifan, et al. Hydrothermal dolomitization in Dengying Formation, Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(1): 54–64.
- [70] CENTRELLA S, BEAUDOIN N E, KOEHN D, et al. How fluid-mediated rock transformations can mimic hydro-fracturing patterns in hydrothermal dolomite [J]. Marine and Petroleum Geology, 2022, 140: 105657.
- [71] WALLACE M W, HOOD A V S. Zebra textures in carbonate rocks: Fractures produced by the force of crystallization during mineral replacement [J]. Sedimentary Geology, 2018, 368: 58–67.
- [72] HIEMSTRA E J, GOLDSTEIN R H. Repeated injection of hydrothermal fluids into downdip carbonates: A diagenetic and stratigraphic mechanism for localization of reservoir porosity, Indian Basin Field, New Mexico, USA [J]. Geological Society, London, Special Publications, 2015, 406(1): 141–177.
- [73] MCCORMICK C A, CORLETT H, CLOG M, et al. Basin scale evolution of zebra textures in fault-controlled, hydrothermal dolomite bodies: Insights from the Western Canadian Sedimentary Basin [J]. Basin Research, 2023, 35(5): 2010–2039.
- [74] 何治亮, 赵向原, 张文彪, 等. 深层–超深层碳酸盐岩储层精细地质建模技术进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 16–33.
- HE Zhiliang, ZHAO Xiangyuan, ZHANG Wenbiao, et al. Progress and direction of geological modeling for deep and ultra-deep carbonate reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 16–33.
- [75] XIAO Di, CAO Jian, TAN Xiucheng, et al. Marine carbonate reservoirs formed in evaporite sequences in sedimentary basins: A review and new model of epeiric basin-scale moldic reservoirs [J]. Earth-Science Reviews, 2021, 223: 103860.
- [76] FENG Jun, ZHANG Yajin, ZHANG Zhenwei, et al. Characteristics and main control factors of Ordovician shoal dolomite gas reservoir in Gucheng area, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 52–63.
- [77] SEN S, ABIQUI M, GANGULI S S, et al. Petrophysical

- heterogeneity of the Early Cretaceous Alamein dolomite reservoir from North Razzak oil field, Egypt integrating well logs, core measurements, and machine learning approach[J]. *Fuel*, 2021, 306: 121698.
- [78] 陈娅娜, 沈安江, 潘立银, 等. 微生物白云岩储集层特征、成因和分布——以四川盆地震旦系灯影组四段为例[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(5): 704–715.
- CHEN Yana, SHEN Anjiang, PAN Liyin, et al. Features, origin and distribution of microbial dolomite reservoirs: A case study of 4th Member of Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(5): 704–715.
- [79] 张建勇, 罗文军, 周进高, 等. 四川盆地安岳特大型气田下寒武统龙王庙组优质储层形成的主控因素[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(11): 2063–2074.
- ZHANG Jianyong, LUO Wenjun, ZHOU Jingao, et al. Main origins of high quality reservoir of Lower Cambrian Longwangmiao Formation in the giant Anyue Gas Field, Sichuan Basin, SW China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(11): 2063–2074.
- [80] 管树巍, 吴林, 任荣, 等. 中国主要克拉通前寒武纪裂谷分布与油气勘探前景[J]. *石油学报*, 2017, 38(1): 9–22.
- GUAN Shuwei, WU Lin, REN Rong, et al. Distribution and petroleum prospect of Precambrian rifts in the main cratons, China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(1): 9–22.
- [81] 马新华, 杨雨, 文龙, 等. 四川盆地海相碳酸盐岩大中型气田分布规律及勘探方向[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(1): 1–13.
- MA Xinhua, YANG Yu, WEN Long, et al. Distribution and exploration direction of medium-and large-sized marine carbonate gas fields in Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(1): 1–13.
- [82] 杨威, 魏国齐, 谢武仁, 等. 川中地区龙王庙组优质储层发育的主控因素及成因机制[J]. *石油学报*, 2020, 41(4): 421–432.
- YANG Wei, WEI Guoqi, XIE Wuren, et al. Main controlling factors and genetic mechanism for the development of high-quality reservoirs in Longwangmiao Formation, central Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(4): 421–432.
- [83] 李茜, 朱光有, 张志遥. 超深层白云岩成因与规模储层控制因素——以四川盆地震旦系灯影组和寒武系龙王庙组为例[J]. *中国科学: 地球科学*, 2024, 54(7): 2389–2418.
- LI Xi, ZHU Guangyou, ZHANG Zhiyao. Genesis of ultra-deep dolostone and controlling factors of large-scale reservoir: A case study of the Sinian Dengying Formation and the Cambrian Longwangmiao Formation in the Sichuan Basin[J]. *Science China Earth Sciences*, 2024, 54(7): 2389–2418.
- [84] 黄擎宇, 刘伟, 张艳秋, 等. 白云石化作用及白云岩储层研究进展[J]. *地球科学进展*, 2015, 30(5): 539–551.
- HUANG Qingyu, LIU Wei, ZHANG Yanqiu, et al. Progress of research on dolomitization and dolomite reservoir[J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(5): 539–551.
- [85] 钱一雄, 武恒志, 周凌方, 等. 深埋条件下微生物碳酸盐岩成岩作用与孔隙演化——以四川盆地西部中三叠统雷口坡组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(1): 55–74.
- QIAN Yixiong, WU Hengzhi, ZHOU Lingfang, et al. Diagenesis and porosity evolution of microbial carbonate rocks undergone a deep burial history: Taking the Leikoupo Formation of Middle Triassic in western Sichuan Basin as an example[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(1): 55–74.
- [86] ZHAO Wenzhi, SHEN Jiangng, ZHENG Jianfeng, et al. The porosity origin of dolostone reservoirs in the Tarim, Sichuan and Ordos basins and its implication to reservoir prediction[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(10): 2498–2511.
- [87] LUCIA F J. Origin and petrophysics of dolostone pore space[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2004, 235(1): 141–155.
- [88] WEYL P K. Porosity through dolomitization—Conservation-of-mass requirements[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1960, 30(1): 85–90.
- [89] GUO Ruixin, ZHANG Shaonan, BAI Xiaoliang, et al. Hydrothermal dolomite reservoirs in a fault system and the factors controlling reservoir formation—A case study of Lower Paleozoic carbonate reservoirs in the Gucheng area, Tarim Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 120: 104506.
- [90] BIEHL B C, REUNING L, SCHOENHERR J, et al. Impacts of hydrothermal dolomitization and thermochemical sulfate reduction on secondary porosity creation in deeply buried carbonates: A case study from the Lower Saxony Basin, northwest Germany[J]. *AAPG Bulletin*, 2016, 100(4): 597–621.
- [91] 于炳松, 樊太亮, 黄文辉, 等. 层序地层格架中岩溶储层发育的预测模型[J]. *石油学报*, 2007, 28(4): 41–45.
- YU Bingsong, FAN Tailiang, HUANG Wenhui, et al. Predictive model for karst reservoirs in sequence stratigraphic framework[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(4): 41–45.
- [92] JIN Zhijun, ZHU Dongya, HU Wenxuan, et al. Mesogenetic dissolution of the middle Ordovician limestone in the Tahe Oilfield of Tarim Basin, NW China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(6): 753–763.
- [93] 金之钧, 朱东亚, 胡文瑄, 等. 塔里木盆地热液活动地质地球化学特征及其对储层影响[J]. *地质学报*, 2006, 80(2): 245–253, 314.
- JIN Zhijun, ZHU Dongya, HU Wenxuan, et al. Geological and geochemical signatures of hydrothermal activity and their influence on carbonate reservoir beds in the Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(2): 245–253, 314.
- [94] 张军涛, 胡文瑄, 王小林, 等. 塔里木盆地西北缘寒武系中热水白云石团块特征及成因研究[J]. *地质学报*, 2011, 85(2): 234–245.
- ZHANG Juntao, HU Wenxuan, WANG Xiaolin, et al. Character and origin of Cambrian hydrothermal dolomite Conglomeration in

- the northwestern margin of Tarim Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(2): 234-245.
- [95] 张兵, 郑荣才, 王绪本, 等. 四川盆地东部黄龙组古岩溶特征与储集层分布[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(3): 257-267.
ZHANG Bing, ZHENG Rongcai, WANG Xuben, et al. Paleokarst and reservoirs of the Huanglong Formation in eastern Sichuan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(3): 257-267.
- [96] 何江, 冯春强, 马岚, 等. 风化壳古岩溶型碳酸盐岩储层成岩作用与成岩相[J]. *石油实验地质*, 2015, 37(1): 8-16.
HE Jiang, FENG Chunqiang, MA Lan, et al. Diagenesis and diagenetic facies of crust-weathered ancient karst carbonate reservoirs [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2015, 37(1): 8-16.
- [97] 朱东亚, 金之钧, 张荣强, 等. 震旦系灯影组白云岩多级次岩溶储层叠合发育特征及机制[J]. *地学前缘*, 2014, 21(6): 335-345.
ZHU Dongya, JIN Zhijun, ZHANG Rongqiang, et al. Characteristics and developing mechanism of Sinian Dengying Formation dolomite reservoir with multi-stage karst [J]. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(6): 335-345.
- [98] 黄康俊, 王炜, 鲍征宇, 等. 埋藏有机酸性流体对四川盆地东北部飞仙关组储层的溶蚀改造作用: 溶解动力学实验研究[J]. *地球化学*, 2011, 40(3): 289-300.
HUANG Kangjun, WANG Wei, BAO Zhengyu, et al. Dissolution and alteration of Feixianguan Formation in the Sichuan Basin by organic acid fluids under burial condition: Kinetic dissolution experiments [J]. *Geochimica*, 2011, 40(3): 289-300.
- [99] 余敏, 寿建峰, 沈安江, 等. 从表生到深埋藏环境下有机酸对碳酸盐岩溶蚀的实验模拟[J]. *地球化学*, 2014, 43(3): 276-286.
SHE Min, SHOU Jianfeng, SHEN Anjiang, et al. Experimental simulation of dissolution for carbonate rocks in organic acid under the conditions from epigenesis to deep burial environments [J]. *Geochimica*, 2014, 43(3): 276-286.
- [100] LI Yong, WANG Xingzhi, FENG Mingyou, et al. Reservoir characteristics and genetic differences between the second and fourth members of Sinian Dengying Formation in northern Sichuan Basin and its surrounding areas [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(1): 54-66.
- [101] 陈代钊. 构造-热液白云岩化作用与白云岩储层[J]. *石油与天然气地质*, 2008, 29(5): 614-622.
CHEN Daizhao. Structure-controlled hydrothermal dolomitization and hydrothermal dolomite reservoirs [J]. *Oil & Gas Geology*, 2008, 29(5): 614-622.
- [102] 李双建, 杨天博, 韩月卿, 等. 四川盆地中二叠统热液白云岩化作用及其储层改造意义[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(6): 1265-1280.
LI Shuangjian, YANG Tianbo, HAN Yueqing, et al. Hydrothermal dolomitization and its role in improving Middle Permian reservoirs for hydrocarbon accumulation, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(6): 1265-1280.
- [103] HEYDARI E. Meteoric versus burial control on porosity evolution of the Smackover Formation [J]. *AAPG Bulletin*, 2003, 87(11): 1779-1797.
- [104] 曲长伟, 林春明, 蔡明俊, 等. 渤海湾盆地北塘凹陷古近系沙河街组三段白云岩储层特征[J]. *地质学报*, 2014, 88(8): 1588-1602.
QU Changwei, LIN Chunming, CAI Mingjun, et al. Characteristics of dolostone reservoir in Sha 3 group from Palaeogene Shahejie Formation in Beitang Sag, Bohaiwan Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(8): 1588-1602.
- [105] 王琼仙, 宋晓波, 陈洪德, 等. 川西龙门山前雷口坡组四段白云岩储层胶结物对早期孔隙的影响[J]. *石油实验地质*, 2018, 40(6): 757-763.
WANG Qiongxian, SONG Xiaobo, CHEN Hongde, et al. Cement characteristics and effects on dolomite reservoir pores in the fourth member of Leikoupo Formation, Longmen Mountain front, western Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2018, 40(6): 757-763.
- [106] 刘文栋, 钟大康, 尹宏, 等. 川西北栖霞组超深层白云岩储层特征及主控因素[J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(2): 342-362.
LIU Wendong, ZHONG Dakang, YIN Hong, et al. Development characteristics and main controlling factors of ultra-deep dolomite reservoirs of the Qixia Formation in the northwestern Sichuan Basin [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(2): 342-362.
- [107] LIU Yan, JIN Siding, CAO Qian, et al. Tertiary hydrothermal activity and its effect on reservoir properties in the Xihu Depression, East China Sea [J]. *Petroleum Science*, 2019, 16(1): 14-31.
- [108] 黎霆, 诸丹诚, 杨明磊, 等. 热液活动对四川盆地中西部地区二叠系茅口组白云岩的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(3): 639-651.
LI Ting, ZHU Dancheng, YANG Minglei, et al. Influence of hydrothermal activity on the Maokou Formation dolostone in the central and western Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(3): 639-651.
- [109] 韩月卿, 张军涛, 何治亮, 等. 川西中二叠统栖霞组白云岩特征与成因[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(1): 75-88.
HAN Yueqing, ZHANG Juntao, HE Zhiliang, et al. Characteristics and genesis of the Middle Permian Qixia Formation dolostone in western Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(1): 75-88.
- [110] 张静, 胡见义, 罗平, 等. 深埋优质白云岩储集层发育的主控因素与勘探意义[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(2): 203-210.
ZHANG Jing, HU Jianyi, LUO Ping, et al. Master control factors of deep high-quality dolomite reservoirs and the exploration

- significance[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(2): 203-210.
- [111] 马永生, 蔡勋育, 李国雄. 四川盆地普光大型气藏基本特征及成藏富集规律[J]. *地质学报*, 2005, 79(6): 858-865.
- MA Yongsheng, CAI Xunyu, LI Guoxiong. Basic characteristics and concentration of the Puguang gas Field in the Sichuan Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(6): 858-865.
- [112] 赵文智, 沈安江, 胡素云, 等. 塔里木盆地寒武-奥陶系白云岩储层类型与分布特征[J]. *岩石学报*, 2012, 28(3): 758-768.
- ZHAO Wenzhi, SHEN Anjiang, HU Suyun, et al. Types and distributional features of Cambrian-Ordovician dolostone reservoirs in Tarim Basin, northwestern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(3): 758-768.
- [113] 李朋威, 何治亮, 罗平, 等. 华北北部地区蓟县系高于庄组-雾迷山组白云岩储层特征与形成主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(1): 26-36, 49.
- LI Pengwei, HE Zhiliang, LUO Ping, et al. Characteristics of and main factors controlling the dolomite reservoir of Gaoyuzhuang-Wumishan Formations in the Jixian System, the North of North China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(1): 26-36, 49.
- [114] 刘伟, 黄擎宇, 王坤, 等. 深埋藏阶段白云岩化作用及其对储层的影响——以塔里木盆地地下古生界白云岩为例[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(5): 772-779.
- LIU Wei, HUANG Qingyu, WANG Kun, et al. Dolomitization and influence on reservoir development in deep-burial stage: A case study of Lower Paleozoic in Tarim Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(5): 772-779.
- [115] ZHAO Wenzhi, SHEN Jiangng, QIAO Zhanfeng, et al. Genetic types and distinguished characteristics of dolomite and the origin of dolomite reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(6): 983-997.
- [116] 李茜, 朱光有, 李婷婷, 等. 川中地区寒武系洗象池组白云岩 Mg 同位素特征与成因机制[J]. *石油学报*, 2022, 43(11): 1585-1603.
- LI Xi, ZHU Guangyou, LI Tingting, et al. Mg isotopic characteristics and genetic mechanism of dolomite of Cambrian Xixiangchi Formation in central Sichuan Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 43(11): 1585-1603.
- [117] 毕义泉, 田海芹, 赵勇生, 等. 论泥晶套与次生白云岩原岩结构特征的恢复及意义[J]. *岩石学报*, 2001, 17(3): 491-496.
- BI Yiquan, TIAN Haiqin, ZHAO Yongsheng, et al. On the micrite envelope to restoration of primary texture character of secondary dolomites and its significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(3): 491-496.
- [118] 王恕一, 蒋小琼, 管宏林, 等. 川东北普光气田下三叠统飞仙关组储层成岩作用研究[J]. *石油实验地质*, 2010, 32(4): 366-372.
- WANG Shuyi, JIANG Xiaoqiong, GUAN Honglin, et al. Diagenesis effects of Lower Triassic Feixianguan formation reservoir in Puguang gas field, northeast Sichuan [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2010, 32(4): 366-372.
- [119] 强深涛, 沈平, 张健, 等. 四川盆地川中地区震旦系灯影组碳酸盐沉积物成岩作用与孔隙流体演化[J]. *沉积学报*, 2017, 35(4): 797-811.
- QIANG Shentao, SHEN Ping, ZHANG Jian, et al. The evolution of carbonate sediment diagenesis and pore fluid in Dengying Formation, central Sichuan Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(4): 797-811.
- [120] REZAEI GOMARI K A, HAMOUDA A A. Effect of fatty acids, water composition and pH on the wettability alteration of calcite surface [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2006, 50(2): 140-150.
- [121] 赵文智, 汪泽成, 王一刚. 四川盆地东北部飞仙关组高效气藏形成机理[J]. *地质论评*, 2006, 52(5): 708-718.
- ZHAO Wenzhi, WANG Zecheng, WANG Yigang. Formation mechanism of highly effective gas pools in the Feixianguan Formation in the NE Sichuan Basin [J]. *Geological Review*, 2006, 52(5): 708-718.
- [122] TIAN Hui, XIAO Xianming, WILKINS R W T, et al. New insights into the volume and pressure changes during the thermal cracking of oil to gas in reservoirs: Implications for the in-situ accumulation of gas cracked from oils [J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92(2): 181-200.
- [123] 朱东亚, 张殿伟, 张荣强, 等. 深层白云岩储层油充注对孔隙保存作用研究[J]. *地质学报*, 2015, 89(4): 794-804.
- ZHU Dongya, ZHANG Dianwei, ZHANG Rongqiang, et al. Role of oil charge in preservation of deep dolomite reservoir space [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(4): 794-804.
- [124] CHOQUETTE P W, PRAY L C. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates [J]. *AAPG Bulletin*, 1970, 54(2): 207-250.
- [125] MA Yongsheng, GUO Tonglou, ZHAO Xuefeng, et al. The formation mechanism of high-quality dolomite reservoir in the deep of Puguang Gas Field [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(Suppl 1): 53-64.
- [126] 黄思静, QING Hairuo, 胡作维, 等. 封闭系统中的白云石化作用及其石油地质学和矿床学意义——以四川盆地东北部三叠系飞仙关组碳酸盐岩为例[J]. *岩石学报*, 2007, 23(11): 2955-2962.
- HUANG Sijing, QING Hairuo, HU Zuowei, et al. Closed-system dolomitization and the significance for petroleum and economic geology: An example from Feixianguan carbonates, Triassic, NE Sichuan Basin of China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(11): 2955-2962.
- [127] 沈安江, 胡安平, 梁峰, 等. 碳酸盐岩储层模拟与地球化学实验技术进展及应用[J]. *中国石油勘探*, 2022, 27(4): 16-29.
- SHEN Anjiang, HU Anping, LIANG Feng, et al. Progress and application of carbonate reservoir simulation and geochemical experiment technology [J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27(4): 16-29.

- [128] SHE Min, LIANG Jintong, LV Yuzhen, et al. Dolomite dissolution and porosity enhancement simulation with acetic acid: Insights into the influence of temperature and Ionic effects [J]. Applied Geochemistry, 2024, 160: 105856.
- [129] DEVARAPALLI R S, ISLAM A, FAISAL T F, et al. Micro-CT and FIB-SEM imaging and pore structure characterization of dolomite rock at multiple scales [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2017, 10(16): 361.
- [130] FRIMMEL H E. Trace element distribution in Neoproterozoic carbonates as palaeoenvironmental indicator [J]. Chemical Geology, 2009, 258(3/4): 338–353.
- [131] BALDWIN G J, THURSTON P C, KAMBER B S. High-precision rare earth element, nickel, and chromium chemistry of chert microbands pre-screened with in-situ analysis [J]. Chemical Geology, 2011, 285(1/4): 133–143.
- [132] NING Meng, LANG Xianguo, HUANG Kangjun, et al. Towards understanding the origin of massive dolostones [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 545: 116403.
- [133] RIECHELMANN S, MAVROMATIS V, BUHL D, et al. Controls on formation and alteration of early diagenetic dolomite: A multi-proxy $\delta^{44/40}\text{Ca}$, $\delta^{26}\text{Mg}$, $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ approach [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2020, 283: 167–183.
- [134] GUO Bijun, ZHU Xiangkun, DONG Aiguo, et al. Mg isotopic systematics and geochemical applications: A critical review [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 176: 368–385.
- [135] HIGGINS J A, SCHRAG D P. The Mg isotopic composition of Cenozoic seawater-evidence for a link between Mg-clays, seawater Mg/Ca, and climate [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2015, 416: 73–81.
- [136] HUANG Kangjun, SHEN Bing, LANG Xianguo, et al. Magnesium isotopic compositions of the Mesoproterozoic dolostones: Implications for Mg isotopic systematics of marine carbonates [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2015, 164: 333–351.
- [137] PENG Yang, SHEN Bing, LANG Xianguo, et al. Constraining dolomitization by Mg isotopes: A case study from partially dolomitized limestones of the middle Cambrian Xuzhuang Formation, North China [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2016, 17(3): 1109–1129.
- [138] MURRAY S T, HIGGINS J A, HOLMDEN C, et al. Geochemical fingerprints of dolomitization in Bahamian carbonates: Evidence from sulphur, calcium, magnesium and clumped isotopes [J]. Sedimentology, 2021, 68(1): 1–29.
- [139] KIMMIG S R, NADEAU M D, SWART P K, et al. Mg and Sr isotopic evidence for basin wide alteration of early diagenetic dolomite in the Williston Basin by ascending crustal fluids [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2021, 311: 198–225.
- [140] 李茜, 朱光有, 李婷婷, 等. 塔里木盆地鹰山组白云岩成因与 Mg 同位素证据 [J]. 地学前缘, 2023, 30(4): 352–375.
- LI Xi, ZHU Guangyou, LI Tingting, et al. Genesis of dolostone of the Yingshan Formation in Tarim Basin and Mg isotope evidence [J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(4): 352–375.
- [141] WEI Guangyi, HOOD A V S, CHEN Xi, et al. Ca and Sr isotope constraints on the formation of the Marinoan cap dolostones [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2019, 511: 202–212.
- [142] GODEAU N, DESCHAMPS P, GUIHOU A, et al. U-Pb dating of calcite cement and diagenetic history in microporous carbonate reservoirs: Case of the Urgonian Limestone, France [J]. Geology, 2018, 46(3): 247–250.
- [143] XIONG Suofei, JIANG Shaoyong, ZHAO Jianxin, et al. Dating precambrian sedimentary carbonate strata by *in situ* U-Pb isotopes of dolomite [J]. Precambrian Research, 2023, 393: 107088.
- [144] ZHOU Jingao, YU Zhou, WU Dongxu, et al. Restoration of formation processes of dolomite reservoirs based on laser U-Pb dating: A case study of Ordovician Majiagou Formation, Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(2): 327–338.
- [145] GASPARRINI M, MORAD D, MANGENOT X, et al. Dolomite recrystallization revealed by $\Delta_{47}/\text{U-Pb}$ thermochronometry in the Upper Jurassic Arab Formation, United Arab Emirates [J]. Geology, 2023, 51(5): 471–475.
- [146] ISABEL MILLÁN M, MACHEL H, BERNASCONI S M. Constraining temperatures of formation and composition of dolomitizing fluids in the Upper Devonian Nisku Formation (alberta, Canada) with clumped isotopes [J]. Journal of Sedimentary Research, 2016, 86(1): 107–112.
- [147] 刘嘉庆, 李忠, 颜梦珂, 等. 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 [J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(1): 68–82.
- LIU Jiaqing, LI Zhong, YAN Mengke, et al. Diagenetic fluid evolution of dolomite from the Lower Ordovician in Tazhong area, Tarim Basin: Clumped isotopic evidence [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(1): 68–82.
- [148] LU Chaojin, SWART P K. The application of dual clumped isotope thermometer (Δ_{47} and Δ_{48}) to the understanding of dolomite formation [J]. Geology, 2024, 52(1): 56–60.
- [149] JIN Zhijun. Formation and accumulation of oil and gas in marine carbonate sequences in Chinese sedimentary basins [J]. Science China Earth Sciences, 2012, 55(3): 368–385.
- [150] SHEN Anjiang, HU Anping, CHENG Ting, et al. Laser ablation *in situ* U-Pb dating and its application to diagenesis-porosity evolution of carbonate reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(6): 1127–1140.
- [151] 胡安平, 沈安江, 陈亚娜, 等. 基于 U-Pb 同位素年龄和团簇同位素 (Δ_{47}) 温度约束的四川盆地震旦系灯影组构造—埋藏史重建 [J]. 石油实验地质, 2021, 43(5): 896–905, 914.
- HU Anping, SHEN Anjiang, CHEN Yana, et al. Reconstruction of tectonic-burial evolution history of Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin based on the constraints of *in-situ* laser ablation U-Pb date and clumped isotopic thermometer (Δ_{47}) [J]. Petroleum

- Geology and Experiment, 2021, 43(5): 896–905, 914.
- [152] SHEN Anjiang, ZHAO Wenzhi, HU Anping, et al. The dating and temperature measurement technologies for carbonate minerals and their application in hydrocarbon accumulation research in the paleo-uplift in central Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 555–568.
- [153] QI Ning, CHEN Guobin, PAN Lin, et al. Numerical simulation and analysis of fracture etching morphology during acid fracturing of dolomite reservoirs [J]. Chemical Engineering Science, 2021, 229: 116028.
- [154] YANG Leilei, ZHU Guangyou, LI Xinwei, et al. Influence of crystal nucleus and lattice defects on dolomite growth: Geological implications for carbonate reservoirs [J]. Chemical Geology, 2022, 587: 120631.
- [155] ABARCA E, IDIART A, GRANDIA F, et al. 3D reactive transport modeling of porosity evolution in a carbonate reservoir through dolomitization [J]. Chemical Geology, 2019, 513: 184–199.
- [156] PEREIRA NUNES J P, BLUNT M J, BIJELJIC B. Pore-scale simulation of carbonate dissolution in micro-CT images [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2016, 121(2): 558–576.
- [157] QIN Fangqi, BECKINGHAM L E. The impact of mineral reactive surface area variation on simulated mineral reactions and reaction rates [J]. Applied Geochemistry, 2021, 124: 104852.
- [158] STARCHENKO V, LADD A J C. The development of wormholes in laboratory-scale fractures: Perspectives from three-dimensional simulations [J]. Water Resources Research, 2018, 54(10): 7946–7959.
- [159] LI Wenhao, WANG Weiming, LU Shuangfang, et al. Quantitative characterization on shale-hosted oil reservoir: A case study of argillaceous dolomite reservoir in the Jiangnan Basin [J]. Fuel, 2017, 206: 690–700.
- [160] TAVOOSI IRAJ P, MEHRABI H, RAHIMPOUR-BONAB H, et al. Quantitative analysis of geological attributes for reservoir heterogeneity assessment in carbonate sequences; a case from Permian-Triassic reservoirs of the Persian Gulf [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 200: 108356.
- [161] PIRES L O, WINTER A, TREVISAN O V. Dolomite cores evaluated by NMR [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 176: 1187–1197.
- [162] 张天付, 倪新锋, 黄理力, 等. 白云岩储层溶蚀过程中孔隙演化的核磁共振和频谱激发极化试验 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(6): 70–79.
- ZHANG Tianfu, NI Xinfeng, HUANG Lili, et al. Experimental research based on NMR and SIP for pore evolution during dissolution of dolomite reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(6): 70–79.
- [163] CHEN Xudong, XU Qilu, HAO Fang, et al. Dolomite reservoir formation and diagenesis evolution of the Upper Ediacaran Qigebrak Formation in the Tabei area, Tarim Basin [J]. Science China Earth Sciences, 2023, 66(10): 2311–2331.
- [164] HAINES T J, NEILSON J E, HEALY D, et al. The impact of carbonate texture on the quantification of total porosity by image analysis [J]. Computers & Geosciences, 2015, 85 (Part A): 112–125.
- [165] SHAH S B A, ABDULLAH W H. Structural interpretation and hydrocarbon potential of Balkassar oil field, eastern Potwar, Pakistan, using seismic 2D data and petrophysical analysis [J]. Journal of the Geological Society of India, 2017, 90(3): 323–328.
- [166] ANDRIAMIHAJA S, PADMANABHAN E, BEN-AWUAH J, et al. Static dissolution-induced 3D pore network modification and its impact on critical pore attributes of carbonate rocks [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(2): 374–383.
- [167] MENKE H P, ANDREW M G, BLUNT M J, et al. Reservoir condition imaging of reactive transport in heterogeneous carbonates using fast synchrotron tomography—Effect of initial pore structure and flow conditions [J]. Chemical Geology, 2016, 428: 15–26.
- [168] 田兴旺, 杨岱林, 钟佳倚, 等. 基于CT成像技术的白云岩储层微观表征——以川中磨溪—龙女寺台内地区震旦系灯影组四段为例 [J]. 沉积学报, 2021, 39(5): 1264–1274.
- TIAN Xingwang, YANG Dailin, ZHONG Jiayi, et al. Microscopic characterization of dolomite reservoirs by CT imaging: A case study of the Dengsi Formation in Moxi-Longnvsi area, central Sichuan [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(5): 1264–1274.
- [169] 乔占峰, 吕玉珍, 陈薇, 等. 白云岩埋藏溶蚀孔洞的形成机理与演化——来自高温高压溶蚀模拟的证据 [J]. 海相油气地质, 2021, 26(4): 326–334.
- QIAO Zhanfeng, LYU Yuzhen, CHEN Wei, et al. Origin and evolution of burial dissolved vugs in dolomite: Evidence from high-temperature and high-pressure dissolution kinetic simulation [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2021, 26(4): 326–334.
- [170] PENG Jun, WANG Xuelong, HAN Haodong, et al. Simulation for the dissolution mechanism of Cambrian carbonate rocks in Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 431–441.

(编辑 许诺)