

白云石重结晶作用及其地质意义

白璇, 钟怡江, 黄可可, 张述鹏, 邹晴, 刘刚

(成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059; 成都理工大学 沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 中石油集团碳酸盐岩储层重点实验室成都理工大学分室, 四川 成都 610059)

摘要: 重结晶作用是白云石形成多期次动态系统中一种常见的成岩后生作用。白云石的成因问题, 即“白云岩问题”一直困扰着地质学者, 其中一个重要原因是白云岩中白云石的重结晶作用导致白云石形成的原始信息被掩盖, 主要包括其结构和地球化学特征的变化。本文在调研国内外有关白云石重结晶作用文献基础上, 系统梳理了地质历史时期古老地层中白云石和现代沉积白云石的重结晶作用, 以及重结晶模拟实验中白云石岩石学及地球化学变化特征, 阐述白云石重结晶的主要条件、影响因素及成岩过程中白云石重结晶作用发生的多期次性及主要变化特征, 总结了白云石重结晶作用的研究意义, 旨在为“白云岩问题”及成岩作用方面的研究提供一定的借鉴和启示。

关键词: 白云石; 重结晶作用; 成岩作用

中图分类号: P578.6⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2022)04-0804-14

Recrystallization of dolomite and its geological significance

BAI Xuan, ZHONG Yi-jiang, HUANG Ke-ke, ZHANG Shu-peng, ZOU Qing and LIU Gang

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; Branch of Key Laboratory of Carbonate Reservoirs of CNPC, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Recrystallization is a ubiquitous diagenetic process during dolomite formation, which is always characterized as a multi-stage dynamic system. The origin of dolomite, which is referred to as the “dolomite problem”, has puzzled geologists. One of the most important reasons is that dolomite in dolomites recrystallization results in information, such as the petrological and geochemical characteristics, being covered during the process of dolomite formation. The recrystallization of dolomite in ancient strata of the geologic historical period and in modern sediment, the changes in petrological and geochemical characteristics observed in modern simulation experiments on dolomite recrystallization were systematically summarized through the investigation of previous national and international studies on recrystallization. Subsequently, the main conditions and factors influencing dolomite recrystallization are expounded, and the changes in the diagenetic environment during the diagenetic process, the stages of dolomite recrystallization, and the main variation character are analyzed. In addition, the significance of dolomite recrystallization is summarized. The purpose of this review is to provide an overview of and guidelines for research on dolomite recrystallization and benefit the study of the “dolomite problem” and carbonate diagenesis.

Key words: dolomite; recrystallization; diagenesis

收稿日期: 2021-11-18; 接受日期: 2022-05-26; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金项目(42072128, 41972102); 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目(2021DJ0503); 天然气成藏物质基础四川省青年科技创新研究团队(2CXTD0064)

作者简介: 白璇(1998-), 女, 硕士研究生; 通讯作者: 钟怡江(1983-), 男, 副教授, 主要从事碳酸盐岩沉积学研究, E-mail: zhongyijiang2012@cdut.edu.cn。

Fund support: National Natural Science Foundation of China (42072128, 41972102); PetroChina Scientific Research and Technology Development Project (2021DJ0503); Material Basis of Natural Gas Accumulation Sichuan Youth Scientific and Technological Innovation Research Team (2CXTD0064)

“重结晶”一词最早由 Sorby 在 19 世纪中期以一种相当宽泛的定义提出,主要阐述为“矿物或金属成分的重组”(Folk, 1965)。在碳酸盐岩中,重结晶也是一种常见的成岩作用。Folk (1965) 在关于碳酸盐沉积学的文献中引入了术语“新生变形作用”(neomorphism), 主要用于解释方解石的溶解再沉淀过程, 包括: 反转(文石转变为方解石, 即从一种碳酸盐多晶型转变为另一种)、重结晶(方解石重新结晶为方解石)和应变重结晶(应变方解石到未应变方解石)。而对于碳酸盐岩(特别是白云岩)中白云石的重结晶作用, 在碳酸盐岩成岩作用的相关报道中也屡见不鲜(Al-Aasm, 2000; Kaczmarek and Sibley, 2014; Lukoczki *et al.*, 2019; Guo *et al.*, 2020)。目前人们还不确定现存古老的白云石是初始形成的还是与原始白云石化事件无关的后期重结晶作用的产物(Kaczmarek and Sibley, 2014)。起初有学者认为, 白云石在埋藏过程中的不稳定性导致现在所有的白云石都是重结晶的产物, 并且通常经历了多期次的重结晶(Land, 1985)。Machel (1997) 梳理了前人文献中的问题, 拓宽了白云石重结晶的定义, 提出了“显著重结晶”(significant recrystallization) 的概念, 并用于描述具有以下情形之一的白云石: ① 结构变化(晶体尺寸和晶体形状的变化, 例如晶体大小变粗或非平直晶面增多); ② 构造变化(有序性和应变性); ③ 地球化学组分变化(包括同位素、微量元素、近化学计量比、流体包裹体和分带等); ④ 古地磁特性变化(虽然这些变化位于磁性矿物的混合物中, 但它们显然与整体白云岩有关)。在此之后, 国内外的学者大多据此作为判断白云石是否发生重结晶作用的依据(Al-Aasm, 2000; Breesch *et al.*, 2010; Rott and Qing, 2013; Fantle, 2015; Li *et al.*, 2019; Lukoczki *et al.*, 2019; Guo *et al.*, 2020)。

白云岩的形成机制和模式一直备受人们关注, 即著名的“白云岩问题(dolomite problem)”, 目前已经提出的白云岩成因模式主要有: ① 萨布哈模式: 风暴驱动富 Mg^{2+} 流体涌入潮上带下部蒸发环境, 并渗透到碳酸盐沉积物中, 在蒸发作用下浓缩, 发生准同生期的白云石化作用, 多形成泥-微晶白云石; ② 渗透回流模式: 随蒸发作用增强, 高盐度富 Mg^{2+}

流体密度增加, 渗入碳酸盐沉积物中, 发生白云石化, 多形成粉晶-中晶白云石; ③ 埋藏成因模式: 高温高压埋藏环境, 动力学屏障降低后引起的白云石化或早期形成的白云石在埋藏阶段的调整和加强; ④ 微生物模式: 微生物通过自身生命活动调节沉积微环境的酸碱度, 同时通过为白云石提供成核质点(胞外聚合物)等作用克服白云石形成的动力学屏障; ⑤ 热液模式: 受区域构造、岩浆侵入、火山以及变质作用等驱动的温度高于围岩环境温度 5°C 以上的富 Mg^{2+} 热液与围岩发生白云石化; ⑥ 混合水模式: 海水与淡水在混合带按一定比例混合后使白云石饱和度发生变化而发生的交代方解石白云石化作用。但近年来人们对混合水模式的典型实例威斯康星穹隆白云岩进行了重新研究, 发现该地区白云石化是热水成岩作用的实例, 并且不断有研究表明通过混合水模式造成大规模白云石化是不太可能的, 因此该模式逐渐受到学者们的质疑(Tucker and Wright, 1990; 梅冥相等, 1997; Warren, 2000; Machel and Lonnee, 2002; Wright and Wacey, 2004; 王勇, 2006; 张学丰等, 2006, 2010; 陈代钊, 2008; McKenzie and Vasconcelos, 2009; 赫云兰等, 2010; 李波等, 2010; 柳益群等, 2010; 王宁, 2011; 梅冥相, 2012; 何治亮等, 2020)。虽然以上白云岩成因模式被广泛运用于解释古老白云岩成因, 但是许多白云岩成因存在不确定性, 其中一个重要原因是古老白云石的结构特征以及地球化学特征和现代白云石差别较大(Kupecz *et al.*, 1993)。在后期成岩过程中, 重结晶作用将改变其原始的结构和地球化学信息, 使原始白云石形成时的地质信息被掩盖, 因此重结晶作用的发生阻碍了人们揭开白云岩成因问题的谜底(Machel, 2004; 黄思静, 2010)。

因此, 对白云石重结晶作用的研究有助于了解白云石形成后经历的成岩环境, 为还原古代白云石形成的条件和探索其成因提供有利信息。本文通过调研和分析国内外有关重结晶模拟实验、重结晶作用研究实例, 梳理了白云石重结晶作用导致的矿物学及地球化学变化特征, 阐述了影响白云石重结晶的因素、条件及发生的期次性, 总结了白云石重结晶现象的地质意义, 旨在为白云岩成因及成岩作用

方面的研究提供一定的借鉴和启示。

1 重结晶白云石的特征

分析白云石重结晶作用过程中晶体结构和地球化学特征的变化是反演重结晶过程和分析白云石形成初始信息的重要研究内容。通过系统梳理前人对白云石重结晶作用的研究(表 1),总结出以下结构和地球化学变化的共性特征。

1.1 岩相学变化特征

重结晶后的白云石主要显微特征是原本细小的晶体重新结晶成较大的晶体,从而形成新的结构和构造,如含泥微晶白云石发生重结晶后,泥质会相对集中保存在新形成的大晶体中心区域,形成“雾心亮边”结构(Flügel and Munnecke, 2010; 黄思静, 2010)。可参照图 1 总结的主要结构和组构类型,进一步描述重结晶白云石的结构和组构特征。

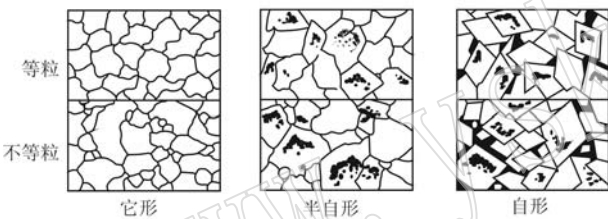


图 1 重结晶白云石的结构和组构类型(Flügel and Munnecke, 2010)

Fig. 1 Various structures and fabric types of recrystallized dolomite(Flügel and Munnecke, 2010)

Nielsen 等(1994)总结了白云石重结晶后阴极发光的特征(图 2),并且在近年来报道的相关实例中,也可观察到下述的几种特征(图 2、图 3): ① 白云石显示均匀到半均匀发光; ② 无暗发光区域,有较亮的发光斑块。这些斑块的大小从几微米到几十微米不等,取代了大部分原始白云石晶体。但是这些斑块只局限于白云石晶体的某些区域; ③ 在白云石晶体内呈不规则的(截断)接触。

1.2 结构变化特征

白云石重结晶作用通常导致前驱白云石结构完全改变,同时新形成白云石的综合结构特征记录了前驱白云石变化的过程(Gregg and Sibley, 1984; Kupecz *et al.*, 1993; Machel, 1997; 杨守业等, 1997; Marrone *et al.*, 2020)。白云石重结晶作用的结构证据包括: ① 晶体尺寸增大; ② 非平面晶体界面

	白云石的发光斑块		截断发光
	无选择性	结构选择性	
边缘			
内部			

图 2 白云石重结晶作用后阴极发光下可见的纹理示意图(Nielsen *et al.*, 1994)

Fig. 2 The texture after recrystallization under cathodoluminescence (Nielsen *et al.*, 1994)

数量增加; ③ 阴极发光下显示重结晶白云石对前驱白云石的替代(图 4)。除此之外,通过现代测试手段观察发现重结晶后的矿物具有独特的结构特征,如扫描电子显微镜下展现自形白云石取代微晶白云石的现象(图 5),透射电子显微镜显示伴随着大规模生长,形成了不一致的微结构等(Kupecz *et al.*, 1993; Kaczmarek and Sibley, 2014)。

1.2.1 晶体尺寸

重结晶作用的典型现象是晶体尺寸的增大,这主要与奥斯特瓦尔德熟化理论(Ostwald ripening theory)有关。奥斯特瓦尔德熟化现象是一种可在固溶体或液溶胶中观察到的现象,其描述了一种非均匀结构随时间流逝所发生的变化:溶质中较小型的结晶或溶胶颗粒溶解并再次沉积到较大型的结晶或溶胶颗粒上(Walton, 1969; Gregg *et al.*, 1992)。

在发生晶体成核的过饱和溶液中,晶体不断地形成,其中一些粒子达到了临界半径(r^*),它们被称为临界原子核。小于临界半径的粒子会溶解于溶液中,大于临界半径的粒子会继续生长,形成更大的晶体。临界半径的大小取决于体积自由能和表面自由能的函数——成核活化能。奥斯特瓦尔德熟化现象通常在初始成核和生长过程的末尾出现。接近平衡时, r^* 随着过饱和程度的减小而增大。随着临界半径的增大,半径小于临界半径的晶体会溶解,而且溶质会在半径大于或等于临界晶体的晶体表面析出并继续生长(Walton, 1969; Hohmann and Kahlweit, 1972; Gregg *et al.*, 1992)。在这个过程中,体积不会增加或减少,但是单位体积内单晶数量减少,因此孔隙率没有变化。当最终出现一个单晶体

表 1 研究实例中重结晶白云石的地球化学特征
Table 1 Geochemical characteristics of recrystallized dolomite in the case study

地点	地质年代	白云石类型	岩石学特征	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	重结晶后 $\delta^{18}\text{O}$ 变化	$x(\text{MgCO}_3)/\text{‰}$	温度	深度	重结晶环境	文献
阿拉伯联合 酋长国穆桑 丹半岛南端	晚侏罗 世至早 白垩世			0.708 113	-7.8~-0.6	-9.8~-2.7		52.2~56.6			构造诱导(热液卤 水沿新生代逆断 层运移的流体流 动体系)	Breesch <i>et al.</i> , 2010
				0.708 698	-8.5~-5.0	-9.5~-7.8	负偏	51.3~55.7	高温			
				0.708 737	-8.5~-6.7	-9.9~-7.8						
加拿大西部 沉积盆地密 西西比浅滩		早期微晶 白云石 普遍存在的 中晶白云石		0.707 65~0.709 58	-0.32~4.46	-8.6~0	负偏	52.5~60.3			开放的大气降水 系统	Al-Aasm, 2000
				0.708 26~0.710 30	0.85~3.38	-10.0~-0.38		51.3~61.4				
萨斯喀彻温 省东南部威 利斯顿盆地 北部	石炭 纪	极细-细晶 白云石 中晶白云石 隐晶白云石	4~30 μm 半 自形非平直 晶面	0.708 156~0.709 214	2.3~3.4	-9.31~-4.48	负偏				早期白云岩 重结晶作用 形成于“浅埋” (600~ 700 m)	Rott and Qing, 2013
									埋藏温度较 高(无具体 数值)			
塔里木盆地 西部(中国 西北部)	早中奥 陶世	极细-细晶 白云石 细-中晶白云石 细-粗晶 白云石	非平直晶面 半自形 自形-半自形 非平直晶面	0.709 009~0.709 569	-2.6~-0.5	-7.0~-5.1	负偏				深部流体与岩石的 相互作用	Guo <i>et al.</i> , 2020
				0.709 052~0.709 285	-2.3~-1.4	-8.6~-6.0						
				0.709 031~0.709 408 (细晶) 0.708 968~0.709 278 (中-粗晶)	-2.1~-0.5 (细晶) -1.5~-0.3 (中-粗晶)	-10.9~-6.1 (细晶) -11.3~-7.5 (中-粗晶)			60~140°C	1 000~ 4 000 m		
卡塔尔	始新 世				-1.98±1.92	-0.86±0.61		48.5~51.0			发生于淡水-海洋混 合带,与暴露事件 相关	Ryan <i>et al.</i> , 2021
					-4.62±2.12	-1.06±0.77						
梅塞克山脉 (匈牙利西 南部)	中三 叠世	极细-细晶 白云石 中-粗晶 白云石		0.708 13~0.708 19	1.4~2.9	-5.1~-2.0	负偏				中埋藏主要发生中 盐度原生流体的埋 藏重结晶;深埋藏 则受断层成因的流 体驱动	Lukoczki <i>et al.</i> , 2019
				0.707 80~0.707 97	0.1~4.2	-11.2~-2.2			中埋藏: 50~67°C 深埋藏: 107~130°C	中埋藏: 1~2 km		

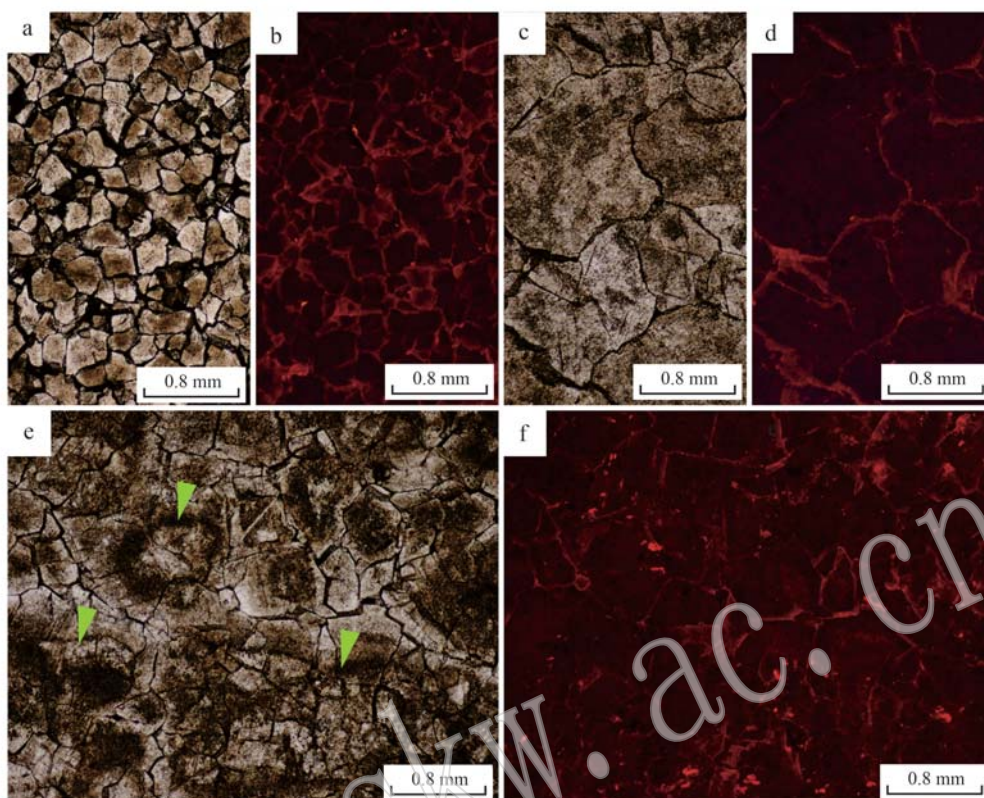


图3 典型的白云石阴极发光图像 (Guo *et al.*, 2020)

Fig. 3 Typical cathodoluminescence of dolomites (Guo *et al.*, 2020)

a、b—中晶白云石：白云石晶体核心为暗红色光，核心边缘不发光，但最外围呈明亮的红色光；c、d—粗晶白云石：为非平直晶面他形晶，晶体中间发暗红色光，具有不规则明亮的发光边界；e、f—中-粗晶白云石：非平直晶面半自形到他形晶，且保留有颗粒残余（箭头处），白云石晶体具有发暗红光的清晰的云雾状的中心以及不发光-极暗光的清晰的边缘

a, b—medium crystalline: cores of dolomite crystals are dull red luminescent, with non-luminescent rims followed by outmost zones of bright red luminescence; c, d—coarsely crystalline: showing nonplanar anhedral crystal. Cores of dolomite crystals are dull red luminescent, with irregular brightly luminescent boundaries; e, f—medium to coarsely crystalline: nonplanar subhedral to anhedral crystal, with local preservation of grain ghosts (arrows), the dolomite crystals have a weak cloudy center and clear rim, showing dull red luminescence and non- to very dull luminescence, respectively

或所有晶体大小相同时，达到理论平衡 (Hohmann and Kahlweit, 1972)。奥斯特瓦尔德成熟理论涉及3个动力学过程：溶解、转移和生长 (Gregg *et al.*, 1992)。其中，晶体生长通常被认为受速率限制，因为晶体表面生长的活性位点一般少于溶解的活性位点 (Baronet, 1982)。因此，会观察到发生过重结晶的白云石晶体具有更大的尺寸。

1.2.2 孔隙结构

埋藏过程中发生的重结晶对白云石的结构调整起到了关键的作用，因此对油气储层的孔隙发育具有一定的影响。重结晶会导致晶体质点重排，晶体变大，体积减小，白云石晶体之间形成大量晶间微孔，从而增加了孔隙度 (王爱等, 2020; 刘丽红等, 2021)。莫静等 (2013) 认为白云石的重结晶作用可

以改变晶粒的结构和孔隙的大小，能形成更多的晶间孔，并且贯通细小的晶间孔，以此提高有效孔隙度和渗透率。因此白云石的重结晶虽不能直接形成大的储集空间，但却能改变微观的孔隙结构，从而改善油气储集空间。

1.2.3 非平直晶面晶体

根据 Gregg 和 Sibley (1984) 的研究显示，在 50℃ 以下的温度，白云石晶体应该主要生长为平直晶面晶体。在所谓的“临界粗化温度” (CRT) 以上，非平直晶面则会频繁地出现。但是从理论上讲，非平直晶面白云石也可以在 CRT 以下的温度时，从高度过饱和流体中析出 (Nielsen, 1994)。重结晶过程一般伴随着温度升高或流体成分的改变，因此发生重结晶的白云石，非平直晶面增多主要与成岩环

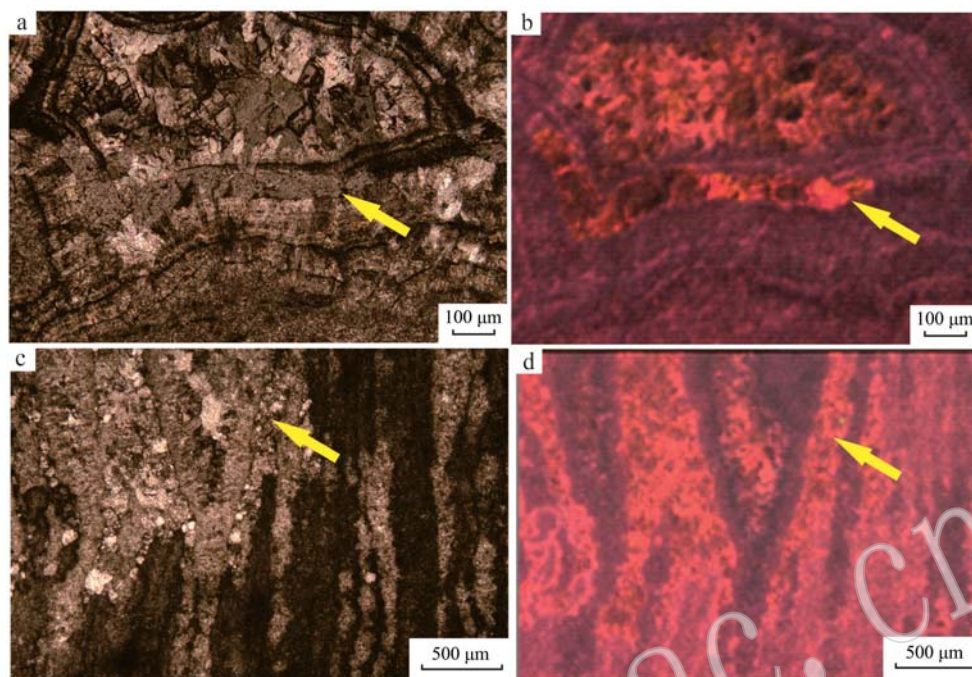


图4 阴极发光下白云石的重结晶证据

Fig. 4 Evidence of recrystallization of dolomite under cathodoluminescence

a—震旦系灯影组微生物岩中葡萄花边栉壳结构的重结晶现象(黄色箭头); b—阴极发光显示重结晶后亮红色白云石晶体对原始栉壳结构的保留性; c—震旦系灯影组微生物岩纹层组结构的重结晶现象(黄色箭头); d—阴极发光显示重结晶后亮红色白云石晶体对纹层结构的保留性

a—recrystallization of comb shell structures of microbial botryoidal lace of Sinian Dengying Formation (yellow arrow); b—the preservation of the bright red dolomite crystals to the comb shell structures following recrystallization is shown under cathodoluminescence; c—recrystallization of microbial lamellar fabric of Sinian Dengying Formation (yellow arrow); d—the preservation of the bright red dolomite crystals to the original lamellar fabric following recrystallization is shown under cathodoluminescence

境的温度和成岩流体的饱和度有关。

1.2.4 微观形貌

Kaczmarek 和 Sibley (2014) 将白云石的形成过程分成了诱导期、置换期、一次重结晶以及二次重结晶4个阶段,并通过扫描电镜、原子力显微镜等展示高温合成白云石的纳米级表面结构,发现了在微观形貌上辨别白云石重结晶的直接证据(图5)。

如图5所示,在没有发生重结晶作用的置换期,白云石晶面光滑无凹坑(图5a),还可以观察到微米级台阶(图5b);而经历过三、四阶段的白云石,表面不光滑,出现凹蚀坑,菱形亚晶体合并生长(图5c、5d)。同时在原子力显微镜下两种不同阶段白云石的微观形貌具有相同的特征。置换期的白云石表面被纳米级的土堆型突起覆盖(Kaczmarek and Sibley, 2014)。而与之相反,经历过重结晶的白云石表面发育具有菱形尖底蚀坑的平面层。这种现象在天然白云石中也能观察到(Kaczmarek and Sibley, 2014)。

1.3 地球化学变化特征

重结晶后白云石的地球化学特征会发生一定变化,主要包括:化学计量和有序度增加; $\delta^{18}\text{O}$ 降低($\delta^{13}\text{C}$ 也有可能降低);扩散系数小于1的微量元素含量减少(如Sr和Na);扩散系数大于1的微量元素含量增加(如Fe和Mn); $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值也会发生改变,从而偏离原岩形成年龄的标准值(Kupez et al., 1993)。

1.3.1 碳、氧同位素

重结晶过程中氧同位素的分馏机制主要以矿物与流体之间、矿物与矿物之间的同位素交换反应为主。氧同位素交换反应的温度敏感性使得氧同位素组成是流体性质和温度的函数。氧同位素是流体缓冲系统,孔隙水比白云石晶格中氧含量高(吴静淑等, 1990; 黄思静, 2010)。因此,在重结晶过程中氧同位素系统最先流失(Kupez et al., 1993)。对氧同位素而言,孔隙流体 $\delta^{18}\text{O}$ 演化的可能途径包括:①埋深增加引起的温度变化;②流体-岩石相互作用引起的流体化学变化;③温度升高和流体-岩

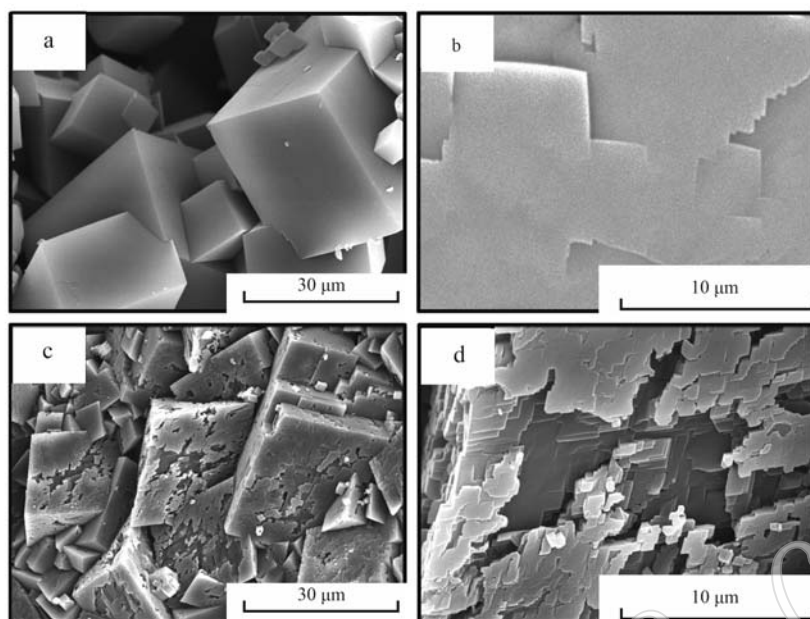


图5 合成白云石的扫描电镜图 (Kaczmarek and Sibley, 2014)

Fig. 5 Scanning electron microscopy of synthetic dolomite (Kaczmarek and Sibley, 2014)

a—非理想合成白云石(<97%白云石)的SEM图像显示出平滑的晶体生长面, 锋利的边缘和棱角没有溶解的迹象, 置换期; b—非理想合成白云石生长表面的SEM图像, 层状平坦, 层次化, 置换期; c—理想合成白云石(>97%白云石)的SEM图像显示其晶体表面非常不规则并且过度生长, 重结晶后; d—更高的放大率显示白云石表面是由一致方向的菱形亚晶体组成, 重结晶后

a—SEM image of non-ideal synthetic dolomite (<97% dolomite) exhibiting smooth crystal growth faces. Sharp edges and corners indicate that there is no evidence of dissolution during the replacement period; b—SEM image of non-ideal synthetic dolomite growth surface showing flat layers separated by steps during replacement period; c—SEM image of ideal synthetic dolomite (>97% dolomite) indicating that the growth surfaces of the ideal dolomite are very irregular and overgrown after secondary recrystallization, unlike the non-ideal dolomite; d—higher magnification indicates that the dolomite surfaces are composed of rhombic, consistently oriented sub-crystals after secondary recrystallization

石相互作用的综合作用 (Al-Aasm, 2000)。重结晶作用普遍认为是由于埋深加大、温度发生变化导致, 氧同位素作为温度的函数, 在重结晶过程中随温度的升高而负偏, 具有一定的指示性。

相对于氧同位素, 重结晶过程中碳同位素则更稳定, 极少数发生显著的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化的现象可能是由于不具有普遍性的碳同位素分馏机制引起的 (Gocke *et al.*, 2012; Lukoczki *et al.*, 2019; Ryan *et al.*, 2021)。

1.3.2 锶同位素

碳酸盐矿物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值的变化仅取决于沉淀时海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值 (Kupecz *et al.*, 1993)。重结晶作用通常使白云石有序度升高, 意味着理论上成岩过程中重结晶作用的发生会导致原岩锶含量降低 (Li *et al.*, 2019), 而实际重结晶作用普遍引起白云石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值升高, 说明重结晶过程中会有成岩流体引起锶同位素分馏, 而且锶同位素的最终组成大多能指示流体的性质。

1.3.3 钙同位素

碳酸盐岩早成岩阶段的成岩体系可视为海水和

沉积物两个端员的混合, 不同深度的成岩流体性质受海水和沉积物孔隙水不同程度的混合影响, 前人将两个端员分别描述为流体缓冲体系和沉积物缓冲体系 (Ahm *et al.*, 2018; Higgins *et al.*, 2018)。其中, 流体缓冲体系主要受海水对流和扩散控制, 理论上出现在离沉积物-水界面更近、深度较浅的位置。碳酸盐沉积物的地球化学信息受海水影响, 从而接近海水的地球化学信号。而沉积物缓冲端员的孔隙水性质主要受控于原始碳酸盐矿物溶解和次生碳酸盐矿物的沉淀, 理论上出现在离沉积物-水界面较远、深度较深的位置, 其记录的地化信号更大程度上反映了具体成岩过程。

研究表明由于海水的 $\delta^{44}\text{Ca}$ 值较高, 流体缓冲体系形成的白云石继承了海水的较高 $\delta^{44}\text{Ca}$ 值特征; 而形成于沉积物缓冲体系中的白云石, 继承原始碳酸盐矿物较低的 $\delta^{44}\text{Ca}$ 值特征 (Blättler *et al.*, 2015; Higgins *et al.*, 2018; Ahm *et al.*, 2018; Wei *et al.*, 2019)。白云石的重结晶作用离不开流体-岩石相互作用的影响, 不同缓冲模式下的重结晶作用对白云石地球化学信息的改造具有差异, 因此在研究重结

晶引起的白云石 $\delta^{44}\text{Ca}$ 值变化时,既要考虑重结晶前其母岩的成因模式,也要考虑发生重结晶作用时的成岩缓冲体系。

1.3.4 镁同位素

白云岩在全球 Mg 循环过程中起着重要作用,块状白云岩中的 Mg 同位素可以用来推断地质历史中海水化学性质的长期变化。Mg 作为组成白云石的核心元素,直接参与整个白云石化过程,并与“白云岩问题”的本质密切相关。研究表明,重结晶作用影响了白云石的元素组成和矿物学参数,但对白云石中的 Mg 同位素变化影响不明显。这是由于早期埋藏阶段的胶结和压实作用导致孔隙流体排出,孔隙度随之降低,使白云石与上覆海水之间的相互作用受到限制,最终孔隙流体中的 Mg 同位素由主要受流体缓冲(海水缓冲)转变为受沉积物缓冲(主要是白云岩缓冲)(Higgins *et al.*, 2018),而这时白云石的重结晶作用仍在继续。在这种情况下,随着孔隙流体与海水逐渐隔离,相较于沉积物白云石中 Mg 的含量,孔隙流体中的海水 Mg 供应有限,孔隙流体中的 Mg 同位素的含量不足以改变白云石中 Mg 同位素组成。因此,白云石重结晶过程中的矿物学和微量元素变化可能会发生显著变化,而 Mg 同位素的行为则较为保守(Geske *et al.*, 2015; Hu *et al.*, 2017; Li *et al.*, 2019)。早期成岩的泥晶白云石与埋藏期的鞍状白云石 Mg 同位素值相似,说明当温度在 200~350℃ 范围内或大于 350℃ 时,温度引起的 Mg 同位素分馏并不明显。因此,白云石重结晶导致的镁同位素的变化并不明显。

1.3.5 微量元素

重结晶过程引起微量元素浓度发生变化的程度主要取决于元素的分配系数,元素的分配系数获取具有一定的难度,并且分配系数存在一定的不确定性(黄思静, 2010)。在成岩过程中,碳酸盐岩中元素迁移的总体趋势是锶、钠、镁的丢失和锌、铁、锰的获取。一些研究认为,古老白云石中 Sr 含量低的原因是在白云石的重结晶过程中受到了提纯的影响(年轻的、非理想白云石的锶同位素比值必须大于理想白云石)(Machel *et al.*, 1996; Fantle and DePaolo, 2006; Fantle, 2015)。锶的排出会使白云石变得更符合化学计量,所以亚稳定白云石通过溶解-再沉淀的稳定化过程会导致锶浓度降低(Fantle and DePaolo, 2006),从而导致白云石矿物的有序度和 Sr 含量呈现负相关(Li *et al.*, 2019)。其他学者将

低 Sr 浓度归因于大气降水中白云石的重结晶(Malone *et al.*, 1996)。通过厘定白云石重结晶后锶浓度的变化可以推测古白云石锶分配系数,并进一步深入研究白云石的成因机理。

成岩过程中通过溶解-再沉淀的方式进行的碳酸盐矿物新生变形作用或其他重结晶作用是一个相对缓慢的过程,锰、铁在方解石中的分配系数会不同程度地升高(黄思静, 2010)。与之相反,温暖浅海环境中由化学或生物化学作用导致的 CaCO_3 直接沉淀的速度较快,因而分配系数会大大降低,这是造成沉积碳酸盐矿物铁、锰含量低,经重结晶作用改造的碳酸盐矿物铁、锰含量升高的原因之一(黄思静, 2010; Li *et al.*, 2019)。

2 白云石重结晶的影响因素及条件

在近地表环境中由海水或蒸发卤水形成的白云石具有亚稳定特征,随着埋藏过程中温度和压力的升高以及/或流体成分的变化,白云石容易发生重结晶(Lukoczki *et al.*, 2019)。经历了复杂的成岩环境,白云石重结晶作用会受到多种因素影响。

2.1 矿物自身特征

重结晶过程中,在热力学和动力学驱动下,晶体化学计量和有序度均会增加。前驱白云石的有序度以及化学计量[白云石的化学计量表达式为 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$]对重结晶有一定的影响,重结晶作用后形成的稳定白云石更接近化学计量(Kupez *et al.*, 1993)。Nielsen 等(1994)对于白云石重结晶的驱动力推测如下:① 稳定性的增加,即自由能的降低。无序的和非化学计量的白云石具有较高的自由能,易于溶解和形成新的形态,从而通过溶解-再沉淀过程形成“理想的”化学计量和有序的白云石(Katz and Matthews, 1977; Reeder, 1981; Gregg and Sibley, 1984; Sibley, 1990);② 表面能的减少,即较细的晶体有重结晶为较粗晶体的趋势(Gregg and Sibley, 1984; Gregg and Shelton, 1990; Gregg *et al.*, 1992);③ 晶体缺陷的减少(Sibley, 1990)。

前驱白云石的溶解度可能由晶体大小、形态和结构决定。白云石矿物学特征(化学计量、有序度、存在非平衡结晶域)、晶体大小、晶体内的杂质以及流体包裹体等与原来的白云石化环境和/或白云石化过程可能是白云石晶体是否容易发生重结晶的影响因素(Rott and Qing, 2013)。

2.2 环境因素

Malone 等(1996)的实验表明,白云石的重结晶反应速率最初是较快的,但随着实验时间的延长,反应速度明显减慢。反应速率高度依赖于温度。白云石在 200℃ 的条件下 286 小时内完全重结晶,而在 50℃ 条件下 336 天内重结晶不到 30%(图 6)。因此可以说明,成岩环境的温度变化对于白云石重结晶的速率以及程度均具有显著的影响。

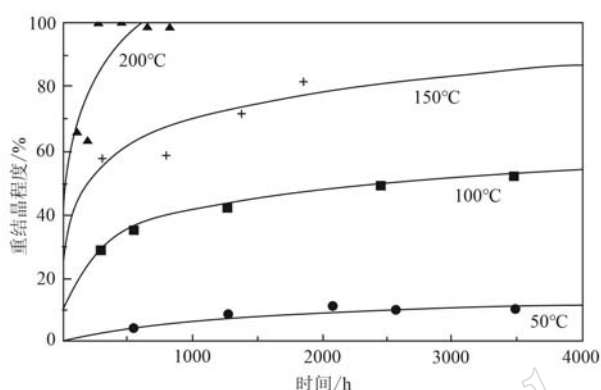


图 6 温度与白云石重结晶程度的关系 (Malone *et al.*, 1996)

Fig. 6 Relationship between temperature and recrystallization degree of dolomite (Malone *et al.*, 1996)

除了温度实验以外,也有学者进行了应力实验。在高有效应力作用下的细晶碳酸盐样品中,重结晶的机制明显涉及到晶粒间接接触的应变能的释放和通过减小表面积而降低的表面自由能。而在粗晶碳酸盐中,应变能的释放似乎是控制重结晶最重要的因素。然而,在热液实验中,表面自由能的降低是重结晶的唯一驱动力,有效应力提高了碳酸盐重结晶的速率 (Baker *et al.*, 1980)。

2.3 其他因素

在白云石重结晶过程中还受一个关键因素影响,即流体-岩石的相互作用。相关研究发现导致白云石发生重结晶的主要流体来源有:海水、大气-海水混合水、埋藏卤水以及构造诱导(以断层为主)的热液流体 (Al-Aasm, 2000; Breesch *et al.*, 2010; Ryan *et al.*, 2021)。其中构造诱导的热液流体引发的重结晶作用在地层记录中是非常普遍的,热液流体的大规模运移及由此引起的重结晶作用主要与断裂作用有关,并且以一些特定的构造为主 (陈代钊, 2008; Breesch *et al.*, 2010; Lukoczki *et al.*, 2019)。在重结晶过程中,低程度的水-岩相互作用可能导

致白云石地球化学特征与其前驱体非常相似,即 Machel 提出的“非显著重结晶” (Machel, 1997)。Al-Aasm 和 Packard (2000) 也给出了类似的解释,即在相对封闭的水文埋藏环境中,早期形成的白云石在热力学驱动下的重结晶过程中基本上保留了其初始地球化学特征。水岩比更高的蚀变可能导致更显著的地球化学参数变化,特别是那些以流体缓冲体系为主的参数,如 $\delta^{18}\text{O}$ 值或 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值。而受岩石缓冲体系影响的碳同位素或某些微量元素等地球化学参数在白云石中的组成基本保持不变 (Machel, 1997; Coniglio *et al.*, 2003)。此外,有相关报道指出孔隙度和渗透率决定了成岩流体是否能在孔隙介质中流动并与白云石质点发生充分接触,并对微观和宏观尺度上流体与岩石相互作用的程度产生影响。即使不同的白云石晶体暴露于相同的成岩流体中,也会具有不同的重结晶潜力,或是会在不同的时间进行重结晶 (Nielsen *et al.*, 1994; Coniglio *et al.*, 2003; 李开开等, 2018)。

除上述影响因素外,粘土含量和 Mg^{2+} 也影响着白云石重结晶的程度。首先,曾允孚等 (1986) 指出当岩石中粘土含量大于 2% 时有利于微亮晶形成,也就利于重结晶过程的进行。而与之相反的,Flügel 等 (2010) 则提出当粘土含量小于 2% 时有利于碳酸盐岩的重结晶。Folk (1965) 曾指出,高镁方解石释放出的 Mg^{2+} 离子罩包围着泥晶方解石,从而不易形成微亮晶。但由于大气水的冲洗或粘土的吸附作用, Mg^{2+} 离子罩被移去,泥晶方解石可以自由地生长成为微亮晶,从而有利于白云石重结晶的进行。Liu 等 (2019) 进行的实验表明,高负电荷粘土矿物可以通过螯合作用催化白云石的形成。因此,粘土对白云石重结晶作用的影响体现在其对 Mg^{2+} 的吸附作用,而其中具体的机理和影响程度还需要进一步的研究。

3 白云石重结晶的期次性

研究认为白云石在一个动态系统中形成,如果白云石的重结晶作用是一种普遍现象,那么在分析白云石的地球化学特征时就必须考虑重结晶作用的影响 (Kupcz *et al.*, 1993)。白云石的重结晶可以分为两个过程:湿溶解和再沉淀,即相对不稳定的细晶白云石的部分或完全的溶解,以及紧接着沉淀为更稳定的白云石。根据岩相学(如显微镜下和阴

极发光)和地球化学特征等资料判断,大部分白云石起源于早期的亚稳态阶段,并经历了多期的结构和地球化学变化,通过多期溶解再沉淀重结晶作用逐步达到稳定状态(Kupez et al., 1993; Ryan et al., 2021)。

首先,由于白云石前驱体的热力学不稳定性,会“自发”地进行早期重结晶作用,逐步向稳定理想化的白云石转化,因此先驱白云石存在一个相对稳定状态(Katz and Matthews, 1977; Reeder, 1981; Gregg and Sibley, 1984; Sibley et al., 1993; Kupez et al., 1993; Nielsen et al., 1994)。对于白云石的前驱体有多种解释,既可能是原白云石,如近地表环境中从海水或蒸发盐水中形成的白云石前驱体,也有可能是方解石经过白云石化转变为的亚稳定状态白云石(Adam and Al-Aasm, 2017),都具有非化学计量和低有序度的特征。根据动力学基础理论,亚稳定状态的矿物必然有逐步向稳定变化的趋势,所以亚稳定状态的存在是这类白云石发生“非显著重结晶”的基础,这也是早期存在“稳定”事件的原因之一。

伴随着先驱白云石晶体埋藏深度的增加,除了矿物自身的不稳定性,不同的埋藏深度会导致成岩环境温度、压力和流体成分等出现差异,并且温度的提高有利于克服分子动力学障碍和提高Ca/Mg比,因此成岩环境的变化逐渐成为驱使白云石重结晶作用发生的重要因素。根据岩石的埋藏深度可以将岩石的成岩作用简单划分为中埋藏成岩作用和深埋藏成岩作用。进入中埋藏环境的白云石,由于环境温度和压力的升高,白云石结构更趋于化学计量,同时成岩环境的流体成分发生改变,主要以海水和大气淡水的混合水为主,先驱白云石会发生第一期显著的重结晶,引起氧同位素负偏,海水中锶不断富集,由于锶原子半径大于镁原子半径,锶含量降低,而⁸⁷Sr在流体中富集,最终导致白云石锶同位素比值升高(Land, 1985; Gregg and Shelton, 1990; Machel, 2004; 刘伟等, 2016; Kaczmarek and Sibley, 2014; Lukoczki et al., 2019)。

而进入深埋藏环境(600~1 000 m, 黄思静, 2010),由于成岩环境的复杂性,决定因素也不再局限于温度、压力及流体成分等,如在高温高压下长期的流体-岩石的相互作用形成的化学成分较复杂的盆地卤水或是构造诱导的沿断层活动的热液卤水可能导致白云石再次发生多期次的显著重结晶,这

时形成的白云石晶体大多自形程度较好,其同位素特征变化更显著(如对温度敏感的氧同位素)并且通常记录了可能的构造事件(陈代钊, 2008; Breesch et al., 2010; 刘伟等, 2016; Lukoczki et al., 2019)。

4 地质意义及展望

4.1 地质意义

“白云岩问题”的任何解决方案都依赖于是否可以推测出古老白云石形成时流体的温度和化学成分,而白云石的重结晶是一个十分普遍的现象,并且重结晶作用可以改变先驱白云石的地球化学和结构特征,反映白云石演化过程中成岩环境的变化,是研究白云石形成问题中值得重视的现象。白云石重结晶作用研究的地质意义主要体现在以下几个方面:

(1) 现今存在的古老白云石普遍遭受了重结晶作用,因此其地球化学属性相较先驱白云石发生一定的变化。因此,在对白云石进行地球化学分析时,对于样品的选择是至关重要的。例如在使用白云石建立海洋或原始地球化学基线或者作为古温度指标时,需谨慎选择样品,排除重结晶作用的干扰(Mahcel et al., 1996; Fantle, 2015)。

(2) 白云石重结晶作用带来结构和地球化学属性改变的烙印,反之通过分析发生重结晶后白云石的结构和地化属性,特别是同一母岩中未发生重结晶白云石与前驱白云石进行对比,能反演其经历的成岩环境和成岩演化过程,从而有助于我们更深入理解碳酸盐岩的形成和演化。

(3) 白云石重结晶作用的普遍性及其对前驱白云石性质的改变,进一步加大了白云石成因问题研究的难度。白云石重结晶作用特征和机理的深入分析,给我们开启了一个窥探“白云石形成问题”真相的窗口。

(4) 白云石的重结晶可以不同程度地影响储集空间的发育。白云石的重结晶作用可以形成晶间微孔隙,提高储层的孔隙度和渗透率,而强烈的重结晶作用会形成较大的晶粒直径,使晶间孔被进一步充填,降低储层的质量。因此重结晶作用对于储层质量的双面影响,容易造成对于储层研究的错误判断。

4.2 研究展望

确定白云岩的结构和组成是否代表它们的初始

形成条件,以及判断现今白云石经历的成岩演化过程是“白云岩问题”中最令人烦恼的问题之一。鉴于重结晶的普遍性和多期性,通常导致研究者关于其成岩环境变化有效信息获得的局限性。针对以上困难和问题,基于本文讨论的内容提出了如下研究展望:

(1) 在采用原有研究方法的基础之上,充分利用现代原位及高精度分析测试技术,如团簇同位素测温、单个包裹体测试等,通过进一步建立白云岩成岩演化过程中流体的演化模式,综合反演重结晶的过程和影响因素,有望建立重结晶作用方面反演成岩环境和成岩过程的指标体系。

(2) 加强多因素综合分析的实验模拟和数字模拟,有望获得白云石重结晶形成机理方面的突出成果,为今后“白云岩问题”研究提供新的线索和思路。

致谢 感谢成都理工大学沉积地质研究院甯濛研究员在钙同位素和镁同位素方面的悉心指导,感谢匿名审稿专家们提出的宝贵意见。

References

- Adam J and Al-Aasm I S. 2017. Petrologic and geochemical attributes of calcite cementation, dolomitization and dolomite recrystallization: An example from the Mississippian Pekisko Formation, west-central Alberta[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 65(2): 235~261.
- Ahm A S C, Bjerrum C J, Blättler C L, *et al.* 2018. Quantifying early marine diagenesis in shallow-water carbonate sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 236(1): 140~159.
- Al-Aasm I S. 2000. Chemical and isotopic constraints for recrystallization of sedimentary dolomites from the western Canada sedimentary Basin [J]. *Aquatic Geochemistry*, 6(2): 227~248.
- Al-Aasm I S and Packard J J. 2000. Stabilization of early-formed dolomite: A tale of divergence from two Mississippian dolomites [J]. *Sedimentary Geology*, 131(3): 97~108.
- Baker P A, Kastner M, Byerlee J D, *et al.* 1980. Pressure solution and hydrothermal recrystallization of carbonate sediments—an experimental study[J]. *Marine Geology*, 38(1~3): 185~203.
- Baronnet A. 1982. Ostwald ripening in solution. The case of calcite and mica[J]. *Estudios Geologicos*, 38(3~4): 185~198.
- Blättler C L, Miller N R and Higgins J A. 2015. Mg and Ca isotope signatures of authigenic dolomite in siliceous deep-sea sediments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 419: 32~42.
- Breesch L, Swennen R, Vincent B, *et al.* 2010. Dolomite cementation and recrystallisation of sedimentary breccias along the Musandam Platform margin (United Arab Emirates) [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 106(1-3): 34~43.
- Chen Daizhao. 2008. Structure-controlled hydrothermal dolomitization and hydrothermal dolomite reservoirs[J]. *Oil & Gas Geology*, 29(5): 614~622(in Chinese with English abstract).
- Coniglio M, Zheng Q and Carter T R. 2003. Dolomitization and recrystallization of middle Silurian reefs and platform carbonates of the Guelph Formation, Michigan Basin, southwestern Ontario[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 51(2): 177~199.
- Fantle M S. 2015. Calcium isotopic evidence for rapid recrystallization of bulk marine carbonates and implications for geochemical proxies [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 148: 378~401.
- Fantle M S and DePaolo D J. 2006. Sr isotopes and pore fluid chemistry in carbonate sediment of the Ontong Java Plateau: Calcite recrystallization rates and evidence for a rapid rise in seawater Mg over the last 10 million years[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(15): 3 883~3 904.
- Flügel E and Munnecke A. 2010. Microfacies of carbonate rocks: Analysis, interpretation and application [M]. Berlin: Springer, 281~285.
- Folk R L. 1965. A very scientific gentleman. Major achievements of Henry Clifton Sorby [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 35(2): 520.
- Geske A, Goldstein R H, Mavromatis V, *et al.* 2015. The magnesium isotope ($\delta^{26}\text{Mg}$) signature of dolomites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 149: 131~151.
- Gocke M, Pustovoytov K and Kuzyakov Y. 2012. Pedogenic carbonate formation: Recrystallization versus migration—Process rates and periods assessed by ^{14}C labeling[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 26(1): 1~12.
- Gregg J M, Howard S A and Mazzullo S J. 1992. Early diagenetic recrystallization of Holocene (<3 000 years old) peritidal dolomites, Ambergris Cay, Belize[J]. *Sedimentology*, 39(1): 143~160.
- Gregg J M and Shelton K L. 1990. Dolomitization and dolomite neomorphism in the back reef facies of the Bonnetterre and Davis Formations (Cambrian), south-eastern Missouri [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 60(4): 549~562.
- Gregg J M and Sibley D F. 1984. Epigenetic dolomitization and the origin

- of xenotopic dolomite texture[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 54(3): 908~931.
- Guo Chuan, Chen Daizhao, Qing Hairuo, *et al.* 2020. Early dolomitization and recrystallization of the Lower-Middle Ordovician carbonates in western Tarim Basin (NW China) [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 111: 332~349.
- He Yunlan, Liu Bo and Qin Shan. 2010. Study on the dolomitization and dolostone genesis [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 46(6): 1 010~1 020 (in Chinese with English abstract).
- He Zhiliang, Ma Yongsheng, Zhang Juntao, *et al.* 2020. Distribution, genetic mechanism and control factors of dolomite and dolomite reservoirs in China[J]. *Oil and Gas Geology*, 41(1): 1~14 (in Chinese with English abstract).
- Higgins J A, Blättler C L, Lundstrom E A, *et al.* 2018. Mineralogy, early marine diagenesis, and the chemistry of shallow-water carbonate sediments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 220: 512~534.
- Hohmann H H and Kahlweit M. 1972. Ostwald ripening of crystalline precipitates in aqueous solutions at constant temperature and periodic temperature changes[J]. *Berichte der Bunsengesellschaft für Physikalische Chemie*, 76(9): 933~938.
- Hu Zhongya, Hu Wenxuan, Wang Xiaomin, *et al.* 2017. Resetting of Mg isotopes between calcite and dolomite during burial metamorphism: Outlook of Mg isotopes as geothermometer and seawater proxy[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 208(1): 24~40.
- Huang Sijing. 2010. Carbonate Diagenesis [M]. Beijing: Geological Publishing House, 27~58 (in Chinese).
- Kaczmarek S E and Sibley D F. 2014. Direct physical evidence of dolomite recrystallization[J]. *Sedimentology*, 61(6): 1 862.
- Katz A and Matthews A. 1977. The dolomitization of CaCO_3 : An experimental study at 252~295°C [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41: 297~308.
- Kupez J A, Montanez I P and Gao Guoqiu. 1993. Recrystallization of dolomite with time[J]. *Carbonate Microfabrics*, 187~193.
- Land L.S. 1985. The origin of massive dolomite[J]. *Journal of Geological Education*, 33(2): 112~125.
- Li Bo, Yan Jiaxin, Liu Xiting, *et al.* 2010. The organogenic doloite model Mechanism, progress and significance [J]. *Journal of Palaeogeography*, 12(6): 699~710 (in Chinese with English abstract).
- Li Kaikai, Zhang Xuefeng, He Xunyun, *et al.* 2018. Modification of dolomitization on pores in oolitic shoal reservoirs of the Feixianguan Formation in the northeastern Sichuan Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 39(4): 706~718 (in Chinese with English abstract).
- Li Weiqiang, Bialik O M, Wang Xiaoming, *et al.* 2019. Effects of early diagenesis on Mg isotopes in dolomite: The roles of Mn (IV)-reduction and recrystallization [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 250: 1~17.
- Liu Deng, Xu Yangyang, Papineau D, *et al.* 2019. Experimental evidence for abiotic formation of low-temperature proto-dolomite facilitated by clay minerals[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 247(1): 83~95.
- Liu Lihong, Gao Yongjin, Wang Dandan, *et al.* 2021. The impact of gypsum salt rock on Cambrian subsalt dolomite reservoir in Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 40(1): 109~120 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wei, Huang Qingyu, Wang Kun, *et al.* 2016. Dolomitization and influence on reservoir development in deep-burial stage: A case study of Lower Paleozoic in Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 27(5): 772~779 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yiqun, Li Hong, Zhu Yushuang, *et al.* 2010. Permian Lacustrine Eruptive Hydrothermal Dolomites, Santanghu Basin, Xinjiang Province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(5): 861~867 (in Chinese with English abstract).
- Lukoczki G, Haas J, Gregg J M, *et al.* 2019. Multi-phase dolomitization and recrystallization of Middle Triassic shallow marine-peritidal carbonates from the Mecsek Mts. (SW Hungary), as inferred from petrography, carbon, oxygen, strontium and clumped isotope data [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 101: 440~458.
- Machel H G. 1997. Recrystallization versus neomorphism, and the concept of "significant recrystallization" in dolomite research[J]. *Sedimentary Geology*, 113(3): 161~168.
- Machel H G. 2004. Concepts and models of dolomitization: A critical reappraisal [M]. Geological Society London, Special Publication, 235(1): 7~63.
- Machel H G, Cavell P A and Patey K S. 1996. Isotopic evidence for carbonate cementation and recrystallization, and for tectonic expulsion of fluids into the Western Canada Sedimentary Basin[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 108(9): 1 108~1 119.
- Machel H G and Lonnee J. 2002. Hydrothermal dolomite—a product of poor definition and imagination [J]. *Sedimentary Geology*, 152: 163.
- Malone M J, Baker P A and Burns S J. 1996. Recrystallization of dolomite: An experimental study from 50~200°C [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(12): 2 189~2 207.
- Marrone S, Monie P, Rossetti F, *et al.* 2020. The Pressure-Temperature-time-deformation history of the Beni Mzala unit (Upper Sebtides,

- Rif belt, Morocco): Refining the Alpine tectono-metamorphic evolution of the Alboran Domain of the Western Mediterranean[J]. *J. Metam. Geol.*, 39(5): 591~615.
- Mckenzie J A and Vasconcelos C. 2009. Dolomite Mountains and the origin of the dolomite rock of which they mainly consist: Historical developments and new perspectives[J]. *Sedimentology*, 56(1): 205~219.
- Mei Mingxiang. 2012. Brief introduction of "dolostone problem" in sedimentology according to three scientific ideas[J]. *Journal of palaeogeography*, 14(1): 1~12(in Chinese with English abstract).
- Mei Mingxiang, Ma Yongsheng, Zhou Pikang, *et al.* 1997. Introduction to Carbonate Rock Deposition[M]. Beijing: Seismological Press: 1~306(in Chinese with English abstract).
- Mo Jing, Wang Xingzhi, Xie Lin, *et al.* 2013. Diagenesis and pore evolution of carbonate in Sinian Dengying Formation in central Sichuan Province[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 35(8): 32~38 (in Chinese with English abstract).
- Nielsen P, Swennen R and Keppens E. 1994. Multiple-step recrystallization within massive ancient dolomite units: An example from the Dinantian of Belgium[J]. *Sedimentology*, 41(3): 567~584.
- Reeder R J. 1981. Electron optical investigations of sedimentary dolomites[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 76: 148~157.
- Rott C M and Qing Hairuo. 2013. Early dolomitization and recrystallization in shallow marine carbonates, Mississippian Alida Beds, Williston Basin (Canada): Evidence from petrography and isotope geochemistry[J]. *Journal of Sedimentary Research*, (11/12): 928.
- Ryan B H, Kaczmarek S E and Rivers J M. 2021. Multi-episodic recrystallization and isotopic resetting of early-diagenetic dolomites in near-surface settings[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 91(1): 146~166.
- Sibley D F. 1990. Unstable to stable transformations during dolomitization[J]. *Journal of Geology*, 98(5): 739~748.
- Sibley D F, Gregg J M, Brown R G, *et al.* 1993. Dolomite Crystal Size Distribution[M]. Springer, New York, NY, 195~204.
- Tucker M and Wright V P. 1990. Carbonate Sedimentology[M]. Oxford: Blackwell, 1~482.
- Walton A G. 1969. Nucleation in liquids and solutions[A]. Nucleation[C]. Marcel Dekker, New York, 225~307.
- Wang Ai, Zhong Dakang, Liu Zhongqun, *et al.* 2020. Diagenesis and porosity evolution of calcareous sandstone reservoirs of Xu-3 member in Western Yuanba of Northeastern Sichuan Basin, China[J]. *Geoscience*, 34(6): 1 193~1 204(in Chinese with English abstract).
- Wang Ning. 2011. The advances in the study of microbial dolomite[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(4): 683~690 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yong. 2006. Dolomite problem and Precambrian enigma[J]. *Advances in Earth Science*, 21(8): 857~862(in Chinese with English abstract).
- Warren J. 2000. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations[J]. *Earth Science Reviews*, 52(1): 1~81.
- Wei Guangyi, Hood A V S, Chen Xi, *et al.* 2019. Ca and Sr isotope constraints on the formation of the Marinoan cap dolostones[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 511: 202~212.
- Wright D T and Wacey D. 2004. Sedimentary dolomite: A reality check[M]. Geological Society, London, Special Publications, 235(1): 65~74.
- Wu Jingshu, Li Jincheng and Zhu Jingquan. 1990. The successive determination of carbon and oxygen isotopes in calcite and dolomite: Its method and significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 9(2): 174~180(in Chinese with English abstract).
- Yang Shouye, Huang Zhicheng and Chen Zhina. 1997. Microstructural correlation between primary and replacement dolomites[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 16(4): 362~366 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Yunfu and Xia Wenjie. 1986. Sedimentary Petrology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 177~178(in Chinese).
- Zhang Xuefeng, Hu Wenxuan and Zhang Juntao. 2006. Critical problems for dolomite formation and dolomitization models[J]. *Geological Science and Technology Information*, 25(5): 32~40 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xuefeng, Liu Bo, Cai Zhongxian, *et al.* 2010. Dolomitization and carbonate reservoir formation[J]. *Geological Science and Technology Information*, 29(3): 79~85 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈代钊. 2008. 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*, 29(5): 614~622.
- 赫宇兰, 刘波, 秦善. 2010. 白云石化机理与白云岩成因问题研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 46(6): 1 010~1 020.
- 何治亮, 马永生, 张军涛, 等. 2020. 中国的白云岩与白云岩储层: 分布、成因与控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 41(1): 1~14.
- 黄思静. 2010. 碳酸盐岩的成岩作用[M]. 北京: 地质出版社, 27~58.
- 李波, 颜佳新, 刘喜停, 等. 2010. 白云岩有机成因模式: 机制、进展与意义[J]. *古地理论*, 12(6): 699~710.

- 李开开, 张学丰, 贺训云, 等. 2018. 川东北飞仙关组白云岩化作用对鲕粒滩储层的孔隙改造效应[J]. 石油与天然气地质, 39(4): 706~718.
- 刘丽红, 高永进, 王丹丹, 等. 2021. 塔里木盆地寒武系膏盐岩对盐下白云岩储层的影响[J]. 岩石矿物学杂志, 40(1): 109~120.
- 刘伟, 黄擎宇, 王坤, 等. 2016. 深埋藏阶段白云岩化作用及其对储层的影响——以塔里木盆地下古生界白云岩为例[J]. 天然气地球科学, 27(5): 772~779.
- 柳益群, 李红, 朱玉双, 等. 2010. 白云岩成因探讨: 新疆三塘湖盆地发现二叠系湖相喷流型热水白云岩[J]. 沉积学报, 28(5): 861~867.
- 梅冥相. 2012. 从3个科学理念简论沉积学中的“白云岩问题”[J]. 古地学报, 14(1): 1~12.
- 梅冥相, 马永生, 周丕康, 等. 1997. 碳酸盐岩沉积学导论[M]. 北京: 地震出版社: 1~306.
- 莫静, 王兴志, 谢林, 等. 2013. 川中震旦系灯影组碳酸盐岩成岩作用及储层孔隙演化[J]. 石油天然气学报, 35(8): 32~38.
- 王爱, 钟大康, 刘忠群, 等. 2020. 川东北元坝西地区须三段钙屑致密砂岩储层成岩作用与孔隙演化[J]. 现代地质, 34(6): 1193~1204.
- 王宁. 2011. 微生物成因白云石研究进展[J]. 岩石矿物学杂志, 30(4): 683~690.
- 王勇. 2006. “白云岩问题”与“前寒武纪之谜”研究进展[J]. 地球科学进展, 21(8): 857~862.
- 吴静淑, 李金城, 朱井泉. 1990. 连续测定方解石和白云石中碳、氧同位素比值的方法及其意义[J]. 岩石矿物学杂志, 9(2): 174~180.
- 杨守业, 黄志诚, 陈智娜. 1997. 原生白云石与交代白云石晶体的微结构对比研究[J]. 岩石矿物学杂志, 16(4): 362~366.
- 曾允孚, 夏文杰. 1986. 沉积岩石学[M]. 北京: 地质出版社.
- 张学丰, 胡文瑄, 张军涛. 2006. 白云岩成因相关问题及主要形成模式[J]. 地质科技情报, 25(5): 32~40.
- 张学丰, 刘波, 蔡忠贤, 等. 2010. 白云岩化作用与碳酸盐岩储层物性[J]. 地质科技情报, 29(3): 79~85.