

白云岩与白云岩储层成因:回顾、进展与展望

沈安江^{1,2,3}, 胡安平^{1,2,3}, 谭秀成^{1,2,4}, 乔占峰^{1,2,3}, 郑剑锋^{1,2,3}, 潘立银^{1,2,3}, 余敏^{1,2,3}

[1. 国家能源碳酸盐岩油气重点实验室(杭州地质研究院), 浙江 杭州 310023; 2. 中国石油天然气集团有限公司 碳酸盐岩储层重点实验室(杭州地质研究院), 浙江 杭州 310023; 3. 中国石油 杭州地质研究院, 浙江 杭州 310023; 4. 西南石油大学, 四川 成都 610500]

摘要:本文系统回顾和总结白云岩与白云岩储层成因研究的历史和进展,展望了未来的研究方向。白云岩的研究已有两百多年的历史,白云岩储层研究起始于20世纪50年代。研究认为:①前人建立了以渗透回流和埋藏-压实为代表的不同地质条件的白云石化模式,解释自然界不同特征和产状的白云岩(白云石)成因,认为白云岩孔隙主要是白云石化作用的产物。②近10年进展是通过现代沉积观察和模拟实验,提出了低温有机沉淀白云石、低温交代白云石、高温交代白云石和高温无机沉淀白云石4种成因类型,建立了白云岩(白云石)的地质-地球化学特征识别图版。③不能将白云岩的成因简单地等同于白云岩储层的成因。白云岩孔隙主要是对原岩孔隙的继承和调整,相控性、继承性大于改造性。部分来自埋藏溶蚀作用,但早期白云石化有利于孔隙的保持。④建立了白云岩保持型和灰岩埋藏白云石化型2种白云石化路径,白云岩保持型的成储效应最佳。⑤实验技术的进步深化了对白云岩成因的认识,模拟实验技术则为深化白云岩储层成因认识提供了手段。⑥油气勘探开发要求未来应加强白云岩储层精细表征和建模、基于储层地质模型的测井储层识别和地震储层预测等工作。

关键词:白云岩成因类型;白云石化模式;孔隙;白云岩储层;白云岩

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Geneses of dolomites and dolomite reservoirs: Review, advances, and prospects

SHEN Anjiang^{1,2,3}, HU Anping^{1,2,3}, TAN Xiucheng^{1,2,4}, QIAO Zhanfeng^{1,2,3}, ZHENG Jianfeng^{1,2,3},
PAN Liyin^{1,2,3}, SHE Min^{1,2,3}

(1. State Energy Key Laboratory for Carbonate Oil and Gas, Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;
2. Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, CNPC, Hangzhou Geological Research Institute, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;
3. Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 4. Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: This study systematically reviews and summarizes the history and advances of research on the geneses of dolomites and dolomite reservoirs, and outlines the prospects for future research orientations. The study of dolomites has had a history of over 200 years, while research on dolomite reservoirs has been kicked off since the 1950s. Previous studies established dolomitization models under varying geological conditions represented by seepage reflux and burial-compaction, and explained the geneses of dolomites with varying characteristics and occurrences in nature. Accordingly, the dolomite pores may mainly result from dolomitization as concluded. Over the past decade, progress has been made by incorporating modern sedimentary observations and simulation experiments, and four genetic types of dolomites have been identified, that is, the low-temperature organic precipitation type, the low- and high-temperature metasomatism types, and the high-temperature inorganic precipitation type. Based on this, the plot for identifying the geological and geochemical characteristics of dolomites is developed. It has been revealed that the genesis of dolomites cannot be simply equated with that of dolomite reservoirs. The porosity in dolomite reservoirs is mainly inherited from original porosity followed by modification, featuring more significant facies control and inheritance rather than modification. Although some dolomite pores are the products of burial dissolution, early-stage dolomitization is favorable

收稿日期:2025-02-07;修回日期:2025-04-21。

第一作者简介:沈安江(1965—),男,教授、博士研究生导师,海相碳酸盐岩成储成藏研究和实验技术研发。E-mail: shenaj_hz@petrochina.com.cn。

通信作者简介:胡安平(1982—),女,教授、硕士研究生导师,碳酸盐岩储层实验技术研发与储层成因研究。E-mail: huap_hz@petrochina.com.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(U23B20154,42372169)。

for pore preservation. Two dolomitization pathways, i. e., dolomitization with protolith texture preserved and burial-based limestone dolomitization, have been identified, with the former exhibiting the optimal reservoir-forming effects. The advancements in experimental techniques have deepened the understanding of the geneses of dolomites, while simulation experiments provide deep insights into the geneses of dolomite reservoirs. In response to hydrocarbon exploration and production, future research should intensify the fine characterization and modeling of dolomite reservoirs, as well as logging-based reservoir identification and seismics-based reservoir prediction using the geological models of reservoirs.

Key words: dolomite genetic types, dolomitization model, pore, dolomite reservoir, dolostone

引用格式:沈安江,胡安平,谭秀成,等. 白云岩与白云岩储层成因:回顾、进展与展望[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(3): 740–758. DOI: 10. 11743/ogg20250304.

SHEN Anjiang, HU Anping, TAN Xiucheng, et al. Geneses of dolomites and dolomite reservoirs: Review, advances, and prospects[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(3): 740–758. DOI: 10. 11743/ogg20250304.

Déodat de Dolmieu 首次对白云岩进行了描述,指意大利北部山脉中发现的一种由白云石矿物构成的岩石,随后 De Saussure (1792 年)将其命名为“dolomie”。严格有序白云石的化学成分为 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 离子摩尔比为 1:1, Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 离子层被 CO_3^{2-} 离子层分割。

白云岩作为重要的油气储层,一直备受关注,但依然存在以下白云岩(白云石)之迷^[1]:①为何古代有大量的白云岩,而现代的白云岩却很少,白云岩体积随时间迁移为何会发生如此巨大的变化;②自然界绝大多数白云石被认为是交代作用的产物,流体中 Mg^{2+} 的来源和 Mg^{2+} 交代方解石晶格中 Ca^{2+} 的动力学机制还不清楚;③在实验室里,化学沉淀的白云石仅形成于 50 °C 以上或有细菌参与条件下,其沉淀的动力学机制以及是否存在低温(< 50 °C)无机或有机沉淀的白云石还不清楚;④为何绝大多数高温沉淀白云石都是低有序度的,而且化学成分是多变的(从 $\text{Ca}_{48}\text{Mg}_{52}$ 到 $\text{Ca}_{62}\text{Mg}_{38}$)。

在梳理前人地质认识的基础上,结合作者团队近 10 多年在岩矿学、元素和同位素地球化学、现代沉积考察以及沉淀-溶蚀模拟实验等方面的研究成果,系统总结了从地表至深层白云岩(白云石)的成因类型,包括低温有机沉淀白云石、低温交代白云石、高温交代白云石和高温无机沉淀白云石 4 种类型,不同类型白云岩(白云石)的产状、岩矿学以及元素和同位素地球化学特征各不相同。同时指出不能将白云岩成因简单地等同于白云岩储层的成因,白云岩孔隙并不是简单地形成于白云石的沉淀或白云石化作用,主要是对原岩孔隙的继承,部分来自埋藏溶蚀作用,甚至局部富集,但早期白云石化有利于孔隙的保持,建立了白云岩保持型和灰岩埋藏白云石化型 2 种白云石化路径,其中白云岩保持型的成储效应最佳。研究成果深化了对

白云岩成因的认识,使白云石化模式走进了大自然和实验室,而且白云岩孔隙成因与分布认识创新对白云岩储层分布预测具重要指导意义。

1 白云岩问题历史回顾

白云岩在自然界广泛分布,有呈层状-准层状连续分布的白云岩,也有呈斑块状不连续分布的白云岩,甚至还有充填于断裂系统、不整合面及相关溶蚀孔隙中的白云岩(白云石)。

1.1 白云岩成因

实验表明,在地表温度小于 50 °C 的条件下,经过长达 32 年的沉淀反应,也未能从高 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 摩尔比的 CO_3^{2-} 溶液中通过无机途径生成白云石^[2],因此,前人建立了大量的白云石化模式用于解释白云岩的成因(表 1),且不断地被后来学者提出的各种白云石化模式所刷新,但主流和被普遍接受的白云石化模式主要有以下 10 种^[3–12](图 1)。

基于上述白云石化模式及产物特征,认为白云石化作用不外乎发生于准同生和埋藏 2 个阶段(表 2),一般存在 4 种方式^[13]:①高盐度条件下特殊类型细菌(如嗜盐古菌、硫酸盐还原菌、产甲烷菌和厌氧细菌等)诱导白云石沉淀(图 2a, b),白云岩层状-准层状规模分布;②地表温-压条件下流体中 Mg^{2+} 交代先期沉淀的方解石(灰岩)中的 Ca^{2+} ,使灰岩发生白云石化,保留或残留原岩结构^[14](图 2c, d),白云岩层状-准层状规模分布;③深部高温条件下灰岩与富 Mg^{2+} 地层水或深部地幔热液发生离子交换,流体中 Mg^{2+} 交代方解石(灰岩)中的 Ca^{2+} ,使灰岩发生白云石化,难以保留原岩结构或残留部分原岩结构的幻影^[14](图 2e, f),白云岩

表1 主流白云石化模式及其内涵

Table 1 Predominant dolomitization models and their connotations

序号	模式名称	内涵	提出者
1	渗透回流白云石化 (seepage-reflux dolomitization)	①蒸发潟湖石膏沉淀导致富 Mg^{2+} 的重卤水形成; ②重卤水密度大,渗透-回流至海底或障壁导致碳酸盐沉积物被这种富镁重卤水交代白云石化	Adams 和 Rhodes(1960)
2	毛细管浓缩白云石化 (capillary concentration dolomitization)	炎热、干旱气候条件下,海水通过毛细管泵汲到强蒸发潮上带蒸发,使潮上带碳酸盐沉积物孔隙中的海水盐度、 Mg^{2+}/Ca^{2+} 摩尔比和 CO_3^{2-}/Ca^{2+} 摩尔比增高,导致碳酸盐沉积物白云石化	Friedman 和 Sanders(1967)
3	蒸发泵白云石化 (evaporative pumping dolomitization)	①海水由于萨布哈上面的蒸发泵作用从潟湖一侧被抽吸至潮上带碳酸盐沉积物内蒸发,导致石膏沉淀; ②石膏沉淀导致粒间水 Mg^{2+}/Ca^{2+} 摩尔比升高,从而导致文石的白云石化	Mckenzie 等(1980)
4	库龙白云石化 (coorong model)	蒸发量超过降雨量的干-湿季节交替气候下,富镁的大陆地下水不断补给海岸带暂时性湖泊并交代碳酸盐沉积物,使其白云石化	Von der Borch(1975)
5	混合水白云石化 (diorag dolomitization)	通过理论计算,5%~30%的海水和70%~95%的淡水混合,降低了盐度和 Mg^{2+}/Ca^{2+} 摩尔比,减少了竞争离子,放慢了结晶速度,更有利于白云石化和规则有序白云石的形成	Badiozamani(1973)
6	海水热对流白云石化 (kohout dolomitization)	远洋冷水和碳酸盐台地温水密度差导致海水循环,海水流动补偿 Mg^{2+} 带走 Ca^{2+} ,导致台缘碳酸盐沉积物白云石化	Kohout 等(1977)
7	调整白云石化 (adjustment dolomitization)	在大气淡水淋滤作用下,碳酸盐沉积物或岩石中的富镁成分发生调整,使沉积物或岩石某些部分发生白云石化	Hardie 等(1987)
8	埋藏-压实白云石化 (burial dolomitization)	埋藏高温条件下,泥岩压实脱水,镁离子析出并运移至石灰岩地层中,导致地层水 Mg^{2+}/Ca^{2+} 摩尔比增大,地层水中的 Mg^{2+} 替换灰岩中的 Ca^{2+} ,导致石灰岩白云石化	Mattes 和 Monntjoy(1980)
9	断裂控制的热液白云石化 (fault-controlled hydrothermal dolomitization)	地幔深部热液流体沿着深部断裂运移至中-浅层灰岩中,由于灰岩上部致密隔挡层的阻隔,热液流体发生侧向运移,使灰岩发生白云石化或沿断裂、不整合面及相关的溶蚀孔洞中直接沉淀白云石	Davies 和 Smith(2006)
10	微生物诱导白云石化 (microbial-mediated dolomitization)	在特殊类型的微生物(如硫酸盐还原菌、嗜盐古菌和产甲烷菌等)、特定的盐度(100%~200‰)和碱度、特定的温度(30~50℃)以及低 SO_4^{2-} 、高 CO_3^{2-} 和高 Mg^{2+} 浓度等条件可以诱导原白云石沉淀	Vasconcelos 等(1995)

分布范围受地层水、深部地幔热液等流体活动范围限制,沿断裂系统、不整合面和高渗层呈斑块状不连续分布,规模不等;④从富 Mg^{2+} 的地层水或深部地幔热液中直接沉淀白云石,往往富含盐水包裹体,具有较高的均一温度,并以充填裂缝、不整合面及相关溶蚀孔洞的晶粒结构的白云石充填(或胶结物)形式产出(图2g)^[14],围岩既可以是灰岩也可以是白云岩(表2)。目前已有的白云岩成因模式虽然对自然界发现的绝大多数白云岩(白云石)的成因做了较为合理的解释,但毕竟仍处于模式阶段,尤其是地表温度和深部高温条件下的交代白云岩和微生物诱导下直接沉淀的原白云石,流体中 Mg^{2+} 的来源和 Mg^{2+} 替换方解石晶格中 Ca^{2+} 的动力学机制仍然是岩石学家们需解决的科学问题^[15]。

1.2 白云岩储层成因

关于白云石化在孔隙建造中的作用,长期以来都

是争论的焦点^[16-18]。勘探实践证实白云岩比灰岩似乎具有更佳的储层发育潜力,尤其是古老的深层碳酸盐岩。塔里木盆地、四川盆地和鄂尔多斯盆地发现的大油气田几乎均分布于孔隙型白云岩储层和岩溶缝洞型灰岩储层中^[19-21],在一般情况下,深层几乎不发育孔隙型灰岩储层,除非有异常超压、早期油气充注和长期浅埋等特殊地质背景。灰岩比白云岩更容易发生压实和压溶,压实减孔和压溶产物对孔隙的充填导致孔隙被破坏,这是目前被普遍接受的深层不发育孔隙型灰岩储层的解释方案^[22],孔隙型灰岩储层主要发育于中-浅层或中-新生代弱改造碳酸盐岩地层中^[23-25]。

储集空间主要发育于各类白云岩中,即使是礁滩储层,储集空间也主要发育于白云石化的礁滩相沉积中。前人认为白云石化是重要的孔隙建造作用,尤其是中国古老的深层碳酸盐岩,没有白云石化就没有储层。Weyl^[26]根据质量守恒原理,研究了白云石化过程中,通过方解石的溶蚀提供 CO_3^{2-} 的局限来源,并形成

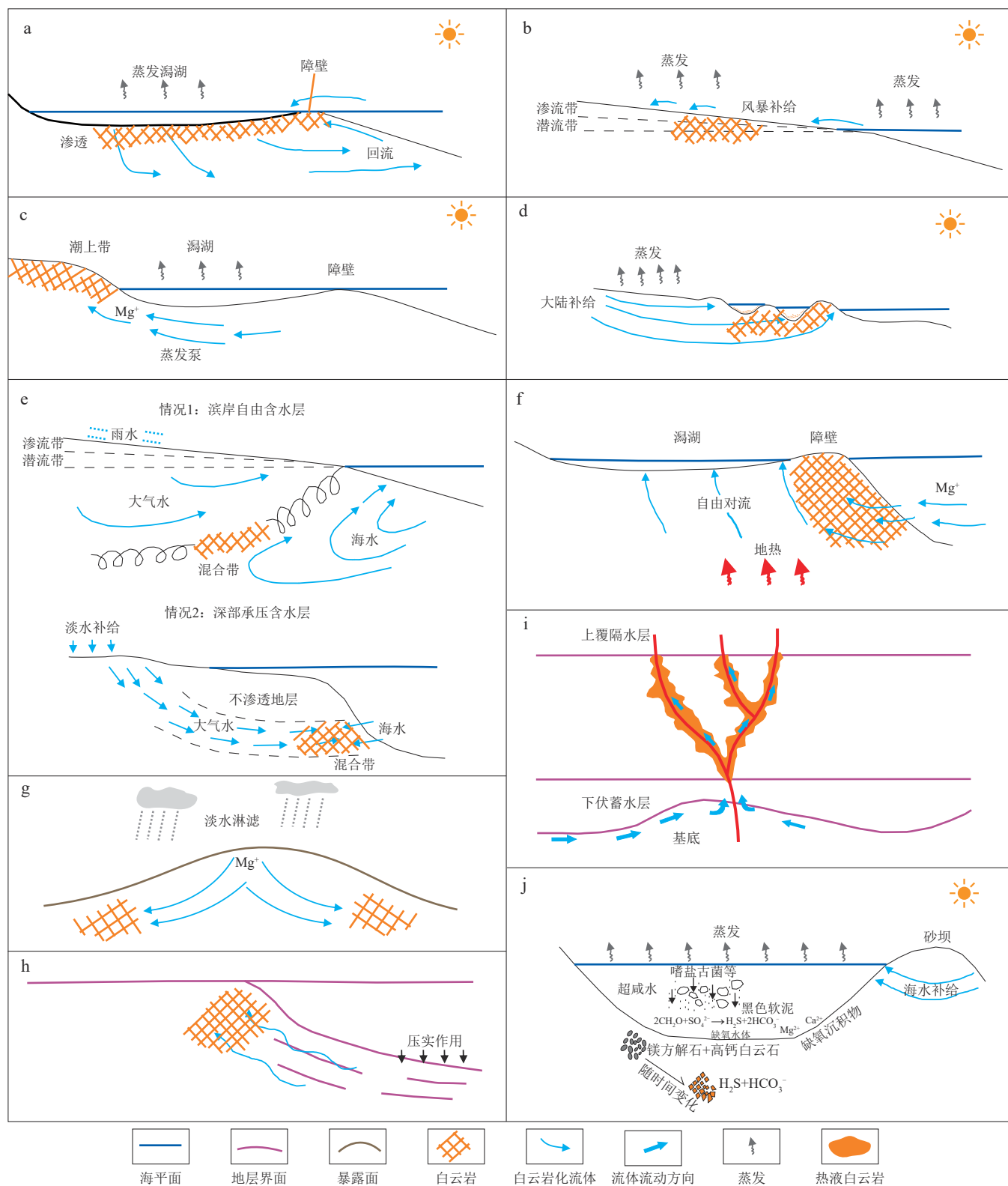


图1 主流白云石化模式示意图

Fig. 1 Schematic diagrams showing the predominant dolomitization models

a. 渗透回流白云石化; b. 毛细管浓缩白云石化; c. 蒸发泵白云石化; d. 库龙白云石化; e. 混合水白云石化; f. 海水热对流白云石化; g. 调整白云石化; h. 埋藏-压实白云石化; i. 断裂控制的热液白云石化; j. 微生物诱导白云石化

大量与白云石化作用相关的孔隙的案例。如果白云石化完全是分子对分子的交代, CO_3^{2-} 的来源也很局限,

由于原子叠置样式的差异, 白云石的细胞单元比方解石小, 当流体中的 Mg^{2+} 交换方解石晶格中的 Ca^{2+} 时

表2 白云岩(白云石)成因类型与地质特征

Table 2 Genetic types and geological characteristics of dolomites (dolostones)

成岩阶段	成岩流体	白云石化形式	白云石化模式	白云石化机理	白云岩(白云石)地质特征		
					产状	有序度	矿物学
准同生阶段	蒸发海水、海水、大气淡水和混合水等	低温有机沉淀白云石	微生物诱导白云石沉淀	特殊类型的细菌(如嗜盐古菌)+高盐度	层状-准层状	低	纹层状、叠层状微生物白云岩,由泥晶白云石构成
		低温交代白云石	渗透回流、毛细管浓缩、蒸发泵、库龙、混合水、海水热对流和调整白云石化	流体中 Mg^{2+} 交代先期沉淀的方解石(灰岩)中的 Ca^{2+} ,使灰岩发生白云石化	层状-准层状	低	(含膏盐)泥晶白云岩、保留或残留原岩颗粒结构白云岩,颗粒由泥-粉晶白云石构成
埋藏阶段	地层水和深部地幔热液等	高温交代白云石	埋藏-压实白云石化和断裂控制的热液白云石化	地层水或深部地幔热液中 Mg^{2+} 交代方解石(灰岩)中的 Ca^{2+} ,使灰岩发生白云石化	斑块状	中	晶粒(细晶及以上)白云岩,不保留或残留原岩结构,原岩为灰岩
		高温无机沉淀白云石	断裂控制的热液白云石化	从富 Mg^{2+} 的地层水或深部地幔热液中直接沉淀白云石	充填状	中-高	晶粒(细晶及以上)白云石,鞍状白云石常见,围岩为灰岩或白云岩

$[2CaCO_3 + Mg^{2+} = CaMg(CO_3)_2 + Ca^{2+}]$,灰岩发生白云石化,伴随着松散原子叠置样式的方解石向紧密原子叠置样式的白云石转变,理论上可以形成13%的孔隙度。然而,Lucia和Major^[27]指出:“分子对分子交代的白云石化理论不适用于所有碳酸盐岩孔隙形成机理的解释,白云岩孔隙度总是等于或小于其原岩(石灰岩)的值,这表明原岩特征可能是白云石化过程中影响孔隙变化的重要因素”。Purser等^[28]则持较为折中的观点,认为原岩(石灰岩)特征对白云岩孔隙度的影响固然很重要,但 CO_3^{2-} 来源与受限的成岩环境也很重要,只有在特定的成岩环境下,白云石化才会使孔隙度增加。与白云石化相关的孔隙丧失在埋藏成岩环境中非常常见,尤其是通过封堵孔隙的晶粒或鞍状白云石的沉淀^[17,29]。

总之,白云石化对白云岩孔隙形成的贡献尚无统一意见,存在3个难以解决的问题。①虽然白云石化是重要的孔隙建造作用,但事实上并非所有的白云岩都是储层,致密白云岩在自然界大量存在,为何同样是灰岩,白云石化后有的形成了白云岩储层,而有的却是致密白云岩;②灰岩向白云岩转换形成13%孔隙度的理论推导,其前提是灰岩-流体成岩体系之间除 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 外,没有或只存在极其有限的其他元素或离子(如 CO_3^{2-})的交换,这是个理想的假说,没有离子交换又如何发生白云石化;③白云岩储层规模性和可预测性评价,如果是白云石化形成储层,白云石化成岩域的规模和分布对白云岩储层规模评价和预测显得尤为重要,我们目前还没有评价白云石化成岩域规模和分布的手段。

2 白云岩与白云岩储层研究进展

白云岩是储层发育的重要载体,但并不是所有的白云岩都是储层,虽然白云石化对白云岩储层发育具重要控制作用,但不能简单地将白云岩成因等同于白云岩储层成因。

2.1 白云岩成因

2.1.1 低温有机沉淀白云岩(白云石)

基于现代咸化海岸沉积考察结果推断,在高盐度和有细菌参与条件下可以通过有机途径直接沉淀低温原白云石(表1,表2),这是继无机途径形成交代白云石理论之后的重要进展。

在现代海岸咸化环境,如阿布扎比的萨勃哈(Sabkha)潮坪、澳大利亚的库隆(Coorong)潟湖、拉戈阿韦梅利亚(Lagoa Vermelha)咸化海岸等,通过硫酸盐还原菌^[11,30-32]、嗜盐古菌^[33-34]和产甲烷菌^[35-36]的作用可以在35~50℃的条件下沉淀球形原白云石(表1;图2b)。Warthmann等(2005)^[31]在实验室通过有机途径成功沉淀了原白云石,并将原白云石与拉戈阿韦梅利亚咸化海岸的白云石进行比较,具有相似的球形和低有序度特征,揭示特殊类型的微生物(如硫酸盐还原菌、嗜盐古菌和产甲烷菌等)、特定的盐度(>35‰)和碱度、特定的温度(30~50℃)以及低硫酸根、高碳酸根和镁离子浓度等条件可以诱导原白云石沉淀。微生物活动产生的胞外聚合物(EPS)是诱导原白云石沉淀的主要

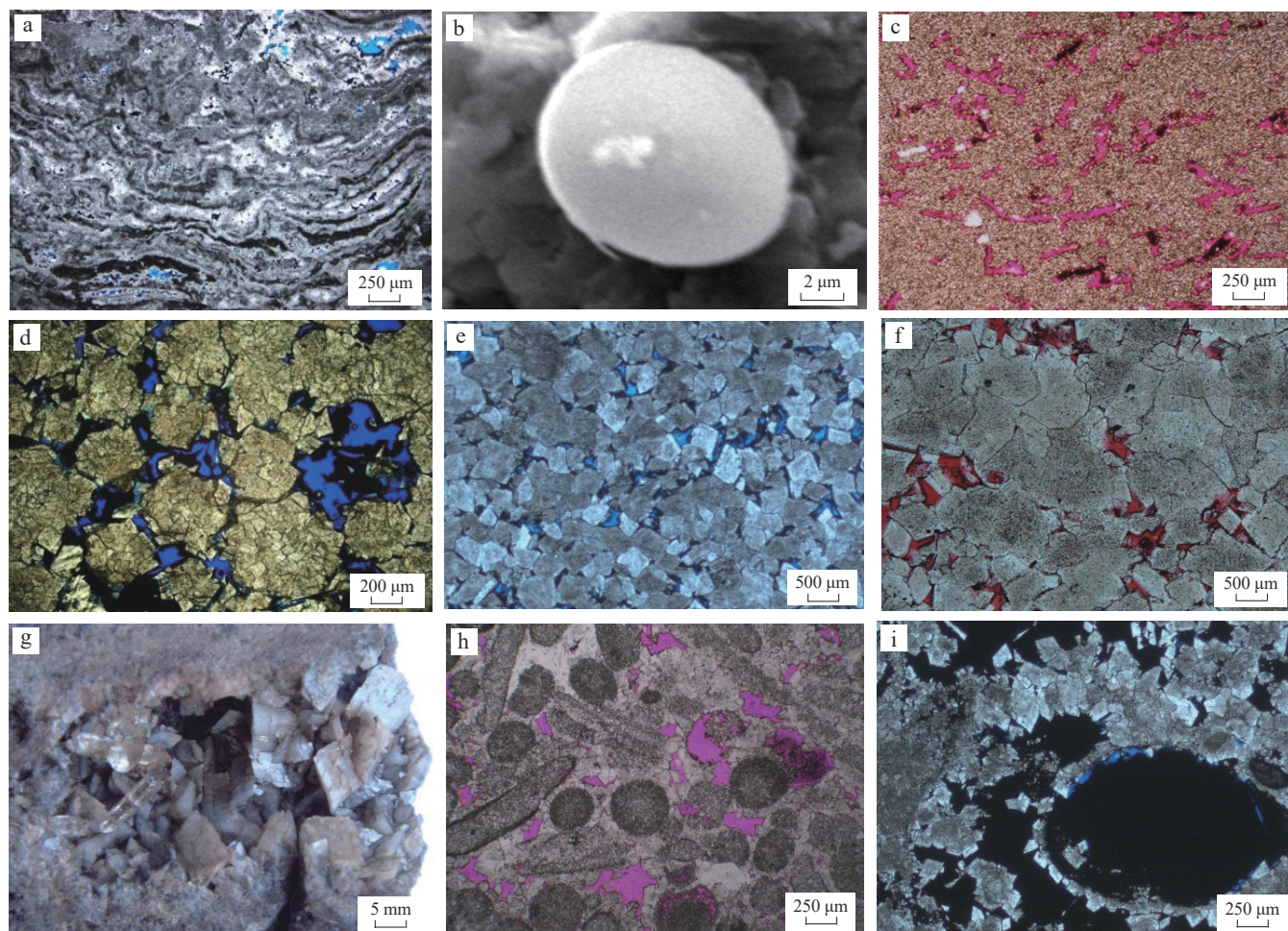


图2 不同成因白云石岩矿学特征显微照片

Fig. 2 Micrographs showing the petro-mineralogical characteristics of dolomites of varying geneses

a. 藻纹层或藻叠层白云岩,藻架孔发育,亮晶白云石胶结物,灯影组四段,四川盆地磨溪17井,铸体薄片,单偏光;b. 同a图,藻纹层及藻叠层白云岩中的球形白云石,证实为低温有机沉淀白云石;c. 泥晶白云岩,原岩为泥晶灰岩,低温交代白云岩,保留原岩结构,膏模孔,马家沟组五段4亚段,鄂尔多斯盆地靳6井,铸体薄片,单偏光;d. 颗粒白云岩,颗粒由细晶白云石构成,低温交代白云岩,埋藏白云石化叠加改造,保留原岩结构,粒间孔发育,蓬莱坝组,塔里木盆地巴楚地区永安坝水库剖面,普通薄片;e. 细-中晶白云岩,高温交代白云石,晶间孔发育,蓬莱坝组,塔里木盆地巴楚地区永安坝水库剖面,铸体薄片,单偏光;f. 中晶白云岩,高温交代白云石,发育少量晶间孔,白云石他形-半自形晶,奥陶系,塔里木盆地古城601井,铸体薄片,单偏光;g. 溶蚀孔洞中充填鞍状白云石,围岩为中-粗晶白云岩,高温无机沉淀白云石,栖霞组,四川盆地矿2井,岩心;h. 颗粒白云岩,粒间孔和鲕模孔,中寒武统,塔里木盆地牙哈7X-1井,铸体薄片,单偏光;i. 细晶残余颗粒白云岩,生物体腔孔、晶间孔和晶间溶孔为沥青充填,长兴组,四川盆地龙岗28井,铸体薄片,单偏光

因素^[32]。

微生物无处不在,微生物灰岩的存在足以说明并不是所有的微生物都能诱导白云石沉淀,而是可能与特殊类型的微生物和环境有关^[11,30-36]。本文通过嗜盐古菌诱导原白云石沉淀的模拟实验^[37],进一步深化了有机途径生成白云石的地质认识,为白云岩储层成因研究奠定了坚实基础。用于诱导原白云石沉淀的3株嗜盐古菌分别为 *Natrinema* sp. J7-1, J7-3 和 LJ7, 菌株培养时长 72 h。成矿条件: Ca^{2+} 浓度为 10.0 mmol/L, Mg^{2+} 浓度为 100.0 mmol/L, CO_3^{2-} 浓度为 20.0 mmol/L, SO_4^{2-} 浓度分别为 0, 1.0, 29.8 和 100.0 mmol/L, 温度为

45°C, 转速为 150 r/min。在相同盐度(200‰)条件下, *Natrinema* sp. J7-1, J7-3 和 LJ7 细胞浓度(用吸光度表示,测试波长为 600 nm, 即 OD_{600})分别为 0, 1.0, 1.5, 2.0 和 2.5。实验结果显示, *Natrinema* sp. J7-1, J7-3 和 LJ7 这 3 株嗜盐古菌诱导原白云石沉淀的细胞浓度下限分别为 1.5, 2.5 和 1.5(图 3a—c), 但盐度为 100‰ 时, 即使嗜盐古菌 *Natrinema* sp. J7-1 的细胞浓度达到 2.5, 结果只沉淀文石, 未见原白云石沉淀(图 3d)。这说明不同菌株沉淀原白云石的细胞浓度不同, 但盐度对原白云石沉淀具重要控制作用。

在嗜盐古菌细胞浓度相同的条件下, 研究了随盐

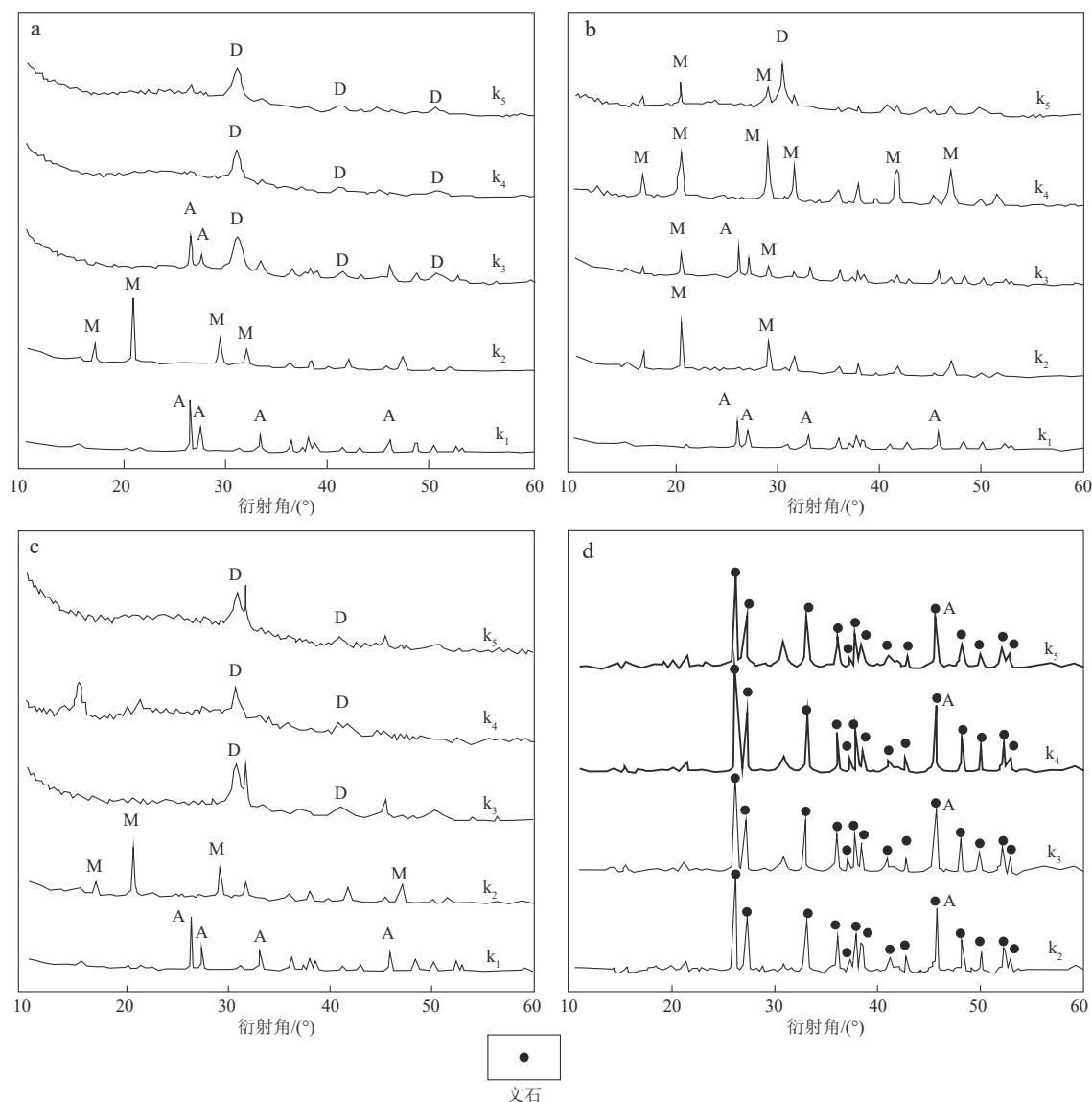


图3 嗜盐古菌种类与细胞浓度(OD_{600})诱导原白云石沉淀实验X射线衍射图谱^[37]

Fig. 3 X-ray diffraction patterns of protodolomite precipitates mediated by *Natrinema* sp. with varying species and at diverse cell concentrations (OD_{600})^[37]

a. 盐度 = 200 ‰、嗜盐古菌 J7-1 细胞浓度 > 1.5 时, 出现原白云石沉淀; b. 盐度 = 200 ‰、嗜盐古菌 J7-3 细胞浓度 > 2.5 时, 出现原白云石沉淀; c. 盐度 = 200 ‰、嗜盐古菌 LJ7 细胞浓度 > 1.5 时, 出现原白云石沉淀; d. 盐度 = 100 ‰, 即使嗜盐古菌 J7-3 细胞浓度 > 2.5 也未出现原白云石沉淀 (A 为文石; D 为白云石; M 为单水方解石。k₁, k₂, k₃, k₄, k₅ 分别代表嗜盐古菌细胞浓度为 0, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 时的实验结果。)

度变化的原白云石沉淀情况。给定 *Natrinema* sp. J7-1 的细胞浓度为 2.0, 盐度为 140 ‰ 时, 沉淀原白云石和单水方解石; 盐度为 200 ‰ 时, 沉淀原白云石和文石; 盐度为 280 ‰ 时, 全为原白云石沉淀 (图 4a—c)。而在没有嗜盐古菌参与的情况下, 盐度在 140 ‰, 200 ‰, 280 ‰ 时, 均为文石沉淀, 未见原白云石沉淀 (图 4d—f), 细胞浓度与盐度对原白云石沉淀的控制呈相互消长关系, SO_4^{2-} 浓度不影响原白云石沉淀。上述实验揭示高嗜盐古菌细胞浓度、高盐度和介质高 Ca^{2+}/Mg^{2+} 摩尔比是诱导低温原白云石沉淀的重要条件, SO_4^{2-} 浓度

不影响嗜盐古菌诱导原白云石沉淀。嗜盐古菌诱导沉淀的原白云石具球形、亚球形和低有序度特征, SO_4^{2-} 浓度对原白云石形态和有序度有影响 (图 5)。

2.1.2 低温交代白云岩 (白云石)

准同生阶段的白云石化模式 (渗透回流、毛细管浓缩、蒸发泵、库龙、混合水、海水热对流和调整白云石化) 解释了低温交代白云岩的成因, 通过对内蒙古吉布胡郎图诺尔、噶布金托呼各克和都兰油泥泉 3 个现代盐湖的考察, 证实了地表温度 (< 50 °C) 条件下低温交

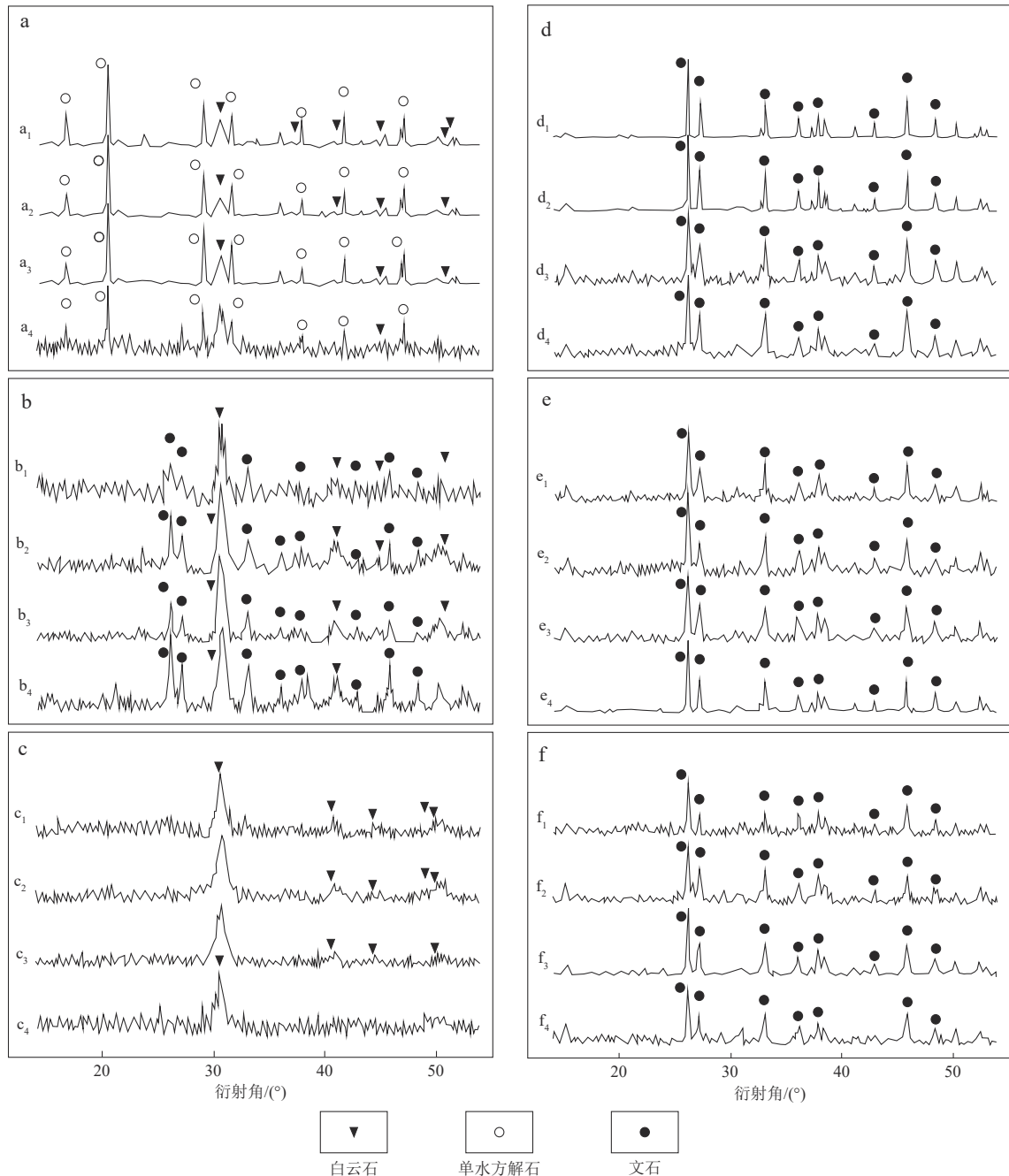


图4 嗜盐古菌细胞浓度(OD_{600})与盐度诱导原白云石沉淀实验X射线衍射图谱^[37]

Fig. 4 X-ray diffraction patterns of protodolomite precipitates mediated by *Natrinema* at varying cell concentrations (OD_{600}) and salinities^[37]
a—c. 嗜盐古菌J7-3细胞浓度 > 2.0 、盐度 $> 140\%$ 时,出现原白云石沉淀(a_1, b_1, c_1 代表 SO_4^{2-} 浓度为0; a_2, b_2, c_2 代表 SO_4^{2-} 浓度为1.0 mmol/L; a_3, b_3, c_3 代表 SO_4^{2-} 浓度为29.8 mmol/L; a_4, b_4, c_4 代表 SO_4^{2-} 浓度为100.0 mmol/L); d—f. 在没有嗜盐古菌参与的情况下,即使有与a—c同等的盐度,也没有原白云石沉淀($d_1—f_1$ 代表 SO_4^{2-} 浓度为0; $d_2—f_2$ 代表 SO_4^{2-} 浓度为1.0 mmol/L; $d_3—f_3$ 代表 SO_4^{2-} 浓度为29.8 mmol/L; $d_4—f_4$ 代表 SO_4^{2-} 浓度为100.0 mmol/L)

代白云石的客观存在,让白云石化模式走进了天然实验室^[37]。

3个盐湖的湖水盐度从湖盆边缘向湖盆中央从不到35%逐渐递增到120%,每个盐湖从边缘湖底和中央湖底各钻取2筒岩心(共6筒岩心),岩心长25 cm,取心段主体为灰泥沉积,几乎见不到微生物活动。X衍射结果显示,盐湖边缘3筒岩心沉积物矿物成分除

方解石和黏土外,还有石英和钠长石矿物,未见白云石和石盐矿物。盐湖中央3筒岩心上部(距顶0~8 cm)沉积物矿物成分与盐湖边缘3筒岩心相同,中-下部(距顶8~25 cm)沉积物出现了白云石和石盐矿物,白云石含量可达40%。这说明湖底中央中-下部沉积物中的白云石是交代成因的,高盐度可能是成岩流体中 Mg^{2+} 交代方解石晶格中 Ca^{2+} 的驱动力。如果是直接沉

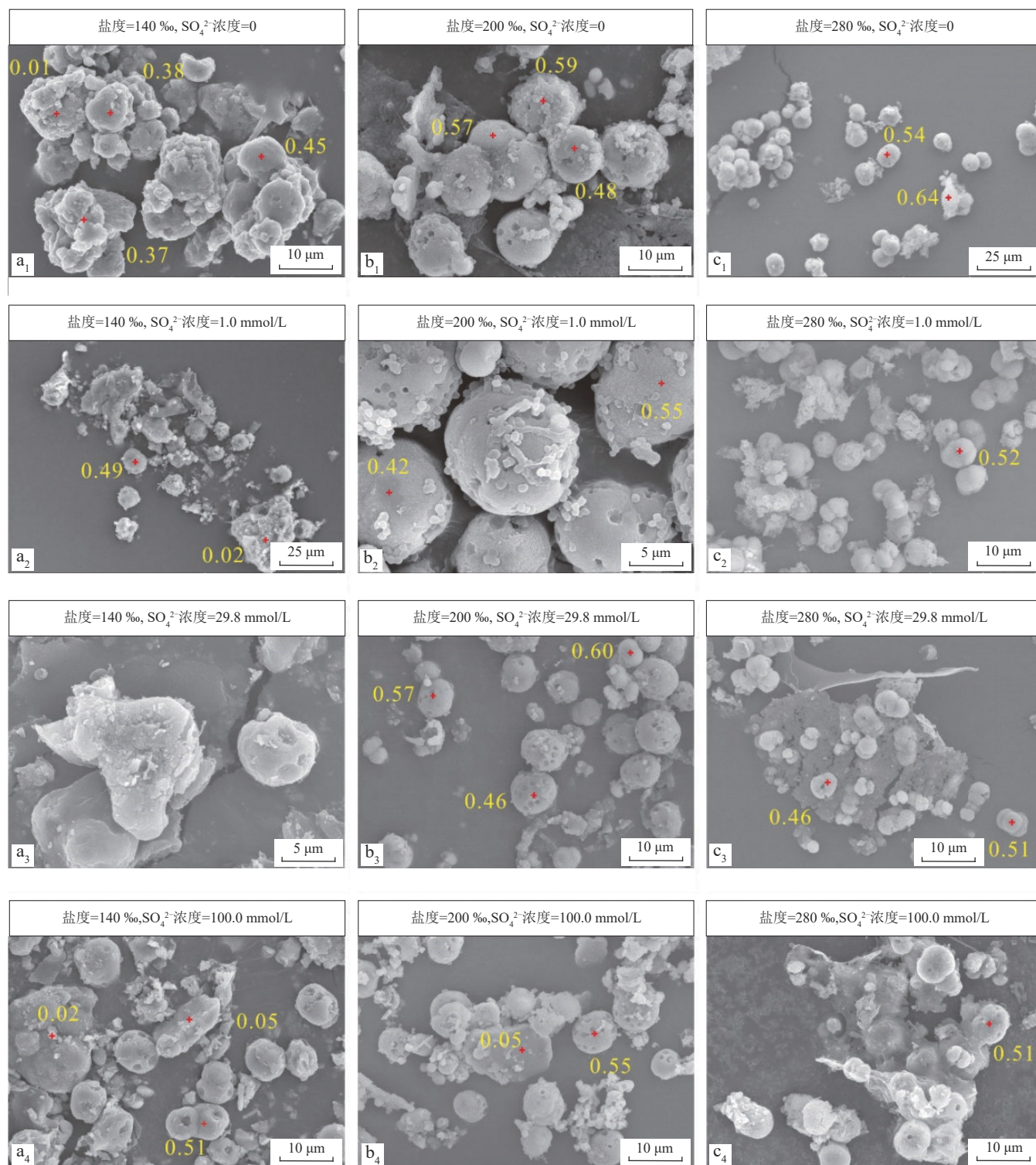


图5 嗜盐古菌诱导沉淀的原白云石特征扫描电镜照片(SEM)^[37]

Fig. 5 Characteristics of protodolomites precipitated under the mediation of *Natrinema* (SEM)^[37]

a₁—a₄. 嗜盐古菌J7-1细胞浓度 > 1.5、盐度 = 140 ‰时, 随 SO_4^{2-} 浓度变化的原白云石特征; b₁—b₄. 嗜盐古菌J7-3细胞浓度 > 2.5、盐度 = 200 ‰时, 随 SO_4^{2-} 浓度变化的原白云石特征; c₁—c₄. 嗜盐古菌LJ7细胞浓度 > 1.5、盐度 = 280 ‰时, 随 SO_4^{2-} 浓度变化的原白云石特征 (图中数据代表红点处白云石有序度。)

淀的原白云石, 上部沉积物也应该含白云石矿物。

实验验证在没有细菌参与下, 即使盐度大于 140 ‰, 也未见低温无机原白云石沉淀(图4d—f), 这进

一步证实了盐湖中央3筒岩心中-下部沉积物中的白云石是交代成因的, 而非直接沉淀的低温无机原白云石, 目前没有研究证实自然界低温无机沉淀白云石的存在。

2.1.3 高温交代白云岩(白云石)

埋藏阶段的白云石化模式(埋藏-压实白云石化和断裂控制的热液白云石化)解释了高温交代白云岩(白云石)的成因,其特点是成岩流体富 Mg^{2+} , Mg^{2+} 注入灰岩型白云石化。痕量 Mg^{2+} 示踪实验显示,成岩流体 Mg^{2+} 富集与深部地幔流体富 Mg^{2+} 和地层压实脱水析出 Mg^{2+} 有关,高温和高 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 摩尔比是流体中 Mg^{2+} 交代方解石晶格中 Ca^{2+} 的驱动力^[38-40]。

白云岩继承型和灰岩白云石化型2类高温交代白云石的识别是继埋藏-热液交代白云石之后的重要进展,更为白云石化路径和成储效应研究奠定了基础。近2年作者团队开展的高钙白云岩差异性溶蚀模拟实验揭示了埋藏环境可能存在新的埋藏白云石化机理。溶蚀模拟实验依托国家能源和中国石油碳酸盐岩储层重点实验室自主开发的超深层跨构造期高温高压可视化储层模拟实验装置,具备超高温-压(温度 $>400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、压

力 $>150\text{ MPa}$)、溶蚀过程可视化和溶蚀产物实时在线连续检测的功能。高钙白云岩柱塞样的孔隙度为 16.7% ,渗透率为 $9.3 \times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$, $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 摩尔比为 $1.3:0.7$,反应液为乙酸溶液或 CO_2 饱和溶液(浓度为 2.0 mol/L),岩石内部溶蚀,开放-流动体系,流速为 1 mL/min ,实验结果见图6a。中-浅层反应液无论是乙酸溶液还是 CO_2 饱和溶液,随着温-压的增加, Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 浓度均呈增长趋势,且 Ca^{2+} 浓度大于 Mg^{2+} 浓度, Ca^{2+} 似乎比 Mg^{2+} 更容易被溶解析出,可能与样品 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 摩尔大于1有关。深层反应液为 CO_2 饱和溶液(乙酸在超深层高温条件下不稳定易分解,故选用超压条件下具更高浓度的 CO_2 饱和溶液),随着温-压的增加, Mg^{2+} 浓度增加缓慢,甚至达到动态平衡,而 Ca^{2+} 浓度迅速降低,并与 Mg^{2+} 浓度趋于一致而进入动态平衡。达到动态平衡后,取出柱塞样品,测得 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 摩尔比 $\approx 1:1$,达到白云石的化学成分要求,但有序度仍然较低(<0.5)。这说明白云石晶格的有序度不仅受 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 摩尔比控

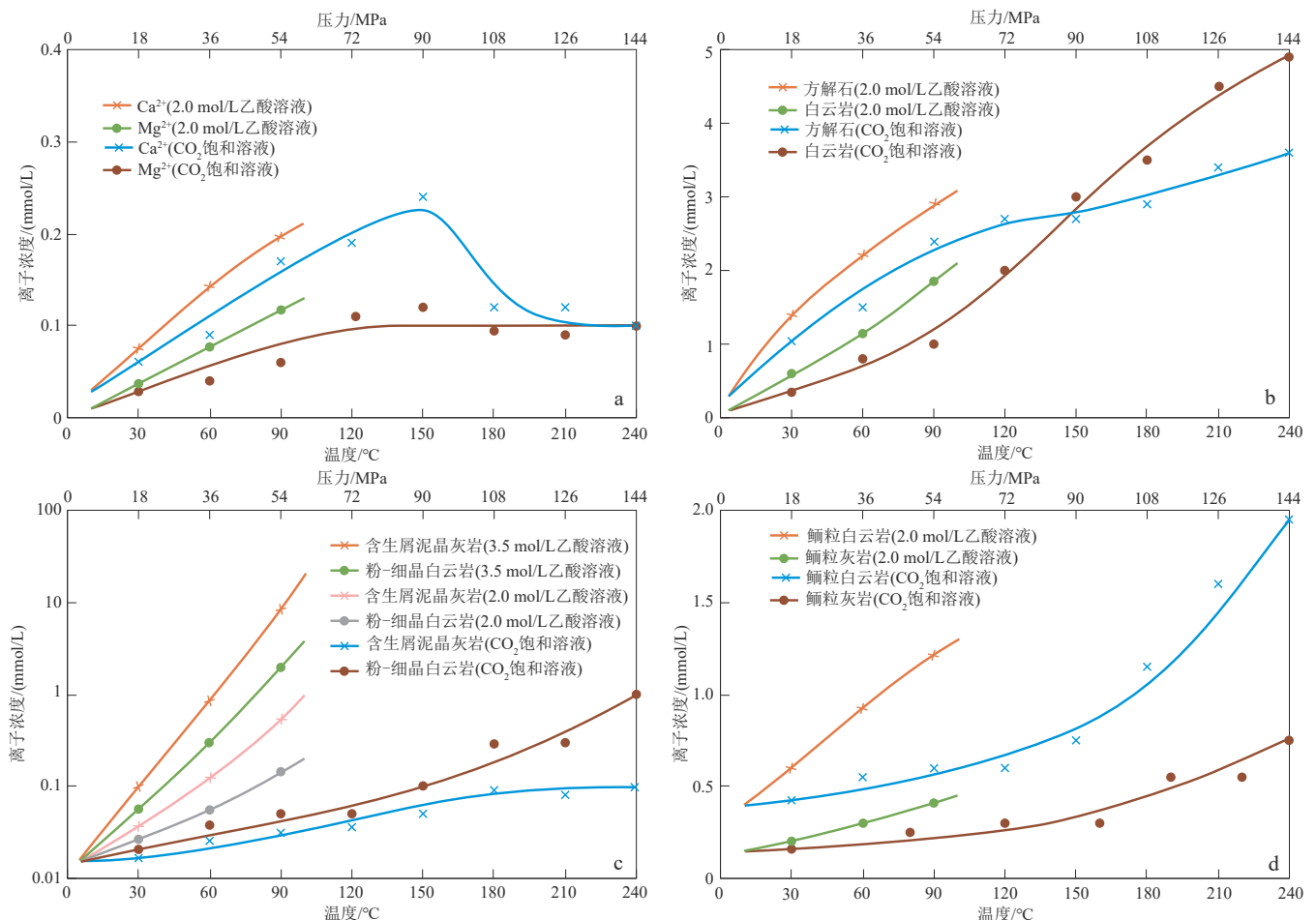


图6 碳酸盐矿物溶解速率影响主控因素模拟实验

Fig. 6 Simulation experimental results on major factors influencing the dissolution rates of carbonate minerals

a. 鲕粒白云岩差异性溶蚀; b. 碳酸盐矿物类型对溶解速率的影响; c. 流体类型和浓度对碳酸盐矿物溶解速率的影响; d. 岩性和物性对碳酸盐矿物溶解速率的影响

制,还需要有足够的时间来完成 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 在晶格内的调整,使有序度进一步提高,这很可能成为深层埋藏白云石化新的解释方案:前人的埋藏白云石化(埋藏-压实白云石化和断裂控制的热液白云石化模式)解释方案,以富 Mg^{2+} 成岩流体中的 Mg^{2+} 替代方解石晶格中的 Ca^{2+} 为特点,适用于中-浅层纯石灰岩地层,形成的白云石可以定义为灰岩白云石化型高温交代白云石;而该埋藏白云石化解释方案则以高钙白云岩中的 Ca^{2+} 析出为特点,成岩流体可以贫 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 过量析出,导致 $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 摩尔比 $\approx 1:1$ 的低钙白云岩形成,适用于深层高镁石灰岩/高钙白云岩地层。

埋藏环境2种白云石化模式(Mg^{2+} 注入灰岩型白云石化和 Ca^{2+} 析出白云石型白云石化模式)的存在,决定着埋藏环境存在2种成因类型的高温交代白云岩(白云石):①准同生期已经发生白云石化的白云岩,埋藏环境再次发生 Ca^{2+} 析出白云石型白云石化,形成白云岩继承型白云岩;②石灰岩在埋藏环境下发生 Mg^{2+} 注入灰岩型白云石化,形成灰岩白云石化型白云岩。2类高温交代白云岩(白云石)的地质-地球化学特征具有很大的差异,为2种白云石化路径的建立和成储效应研究奠定了理论基础。

2.1.4 高温无机沉淀白云石

虽然充填孔-洞-缝中的晶粒白云石(包括鞍状白云石)被认为是从埋藏-热液中直接沉淀的产物,断裂控制的热液白云石化模式解释了高温交代白云石成因,但至今没有一个沉淀模拟实验证实这些白云石为高温无机沉淀白云石。

产状、宿主矿物温度和U-Pb同位素年龄推断高温无机沉淀白云石的存在。从产状(充填孔-洞-缝)分析,这些白云石是直接沉淀的,围岩为灰岩或白云岩。通过大量的包裹体均一温度测试工作,发现充填孔-洞-缝中的晶粒白云石(包括鞍状白云石)往往富含烃类和气-液两相盐水包裹体,且均一温度明显高于地层温度,而晚期高温交代白云石是很难见到烃类和气-液两相盐水包裹体的,这应该是白云石直接沉淀的有力证据之一。另外,这些充填孔-洞-缝的白云石的U-Pb同位素年龄比围岩年龄年轻,如四川盆地灯影组孔-洞-缝中充填的晶粒白云石,其U-Pb同位素年龄仅为几十个百万年^[41-42],比围岩年龄年轻得多。

更为重要的是,通过沉淀实验证实了高温无机沉淀白云石的存在:①采用扩散-结晶法装置,在80℃温度下1周形成无机沉淀低有序度原白云石,微米级球

粒;②采用水热反应釜,溶胶-凝胶法在200℃加热条件下反应1周合成无机成因有序白云石,微米级和亚微米级的菱面体。证实白云石有序度与结晶温度和速度有关。

综上所述,除早期低温交代和有机沉淀2类白云石外,还存在晚期高温无机沉淀白云石和2类高温交代白云石,其识别标志见表3。由低温有机沉淀白云石—低温交代白云石—高温交代白云石—高温无机沉淀白云石,具有有序度逐渐变高、氧同位素值 $[\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})]$ 逐渐偏负和锶同位素含量比值($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)逐渐偏高的趋势。微量-稀土元素含量及其配分模式和异常可以很好地识别2类高温交代白云石:灰岩白云石化型白云石具低 Mg/Ca 元素含量比值、低 Mn/Fe 元素含量比值、低 ΣREE (稀土元素总量)和 Eu 元素含量正异常等特征,稀土元素配分模式有轻稀土(LREE)、中稀土(MREE)和重稀土(HREE)型;白云岩继承型白云岩具高 Mg/Ca 元素含量比值、高 Mn/Fe 元素含量比值、高 ΣREE 和 Ce 元素含量正异常等特征,稀土元素配分模式有 LREE, MREE 和 HREE 型。

2.2 白云岩储层成因

通过近10年大量的白云岩孔隙形成与保持机理方面的研究工作,取得3方面的创新认识,颠覆了白云石化建造孔隙和没有白云石化就没有储层的观点。

2.2.1 白云岩储层依然具有相控性,孔隙主要是对灰岩原岩孔隙的继承

自然界能见到的白云岩储层不外乎有2种:①保留或残留原岩结构的礁滩相白云岩储层或泥-粉晶白云岩储层;②晶粒(细晶及以上)白云岩储层。前者的相控性不容置疑,礁滩相白云岩储层的原岩为礁滩相灰岩,储集空间是对原岩格架孔、体腔孔、粒间孔和铸模孔等原生孔隙和早期组构选择性溶孔的继承(图2a,d,h);泥-粉晶白云岩储层的原岩为泥晶灰岩,储集空间形成于石膏、石盐和未云化灰泥的早期溶蚀(图2c)。后者的相控性向来受到质疑,近年来通过透射光对比度法原岩结构恢复技术^[12-13,23],揭示了四川盆地长兴组细晶白云岩储层的原岩为礁滩相砂屑生屑灰岩,储集空间是对原岩粒间孔、体腔孔、铸模孔和早期组构选择性溶孔的继承(图2i)。

保留或残留原岩结构的礁滩相白云岩(储层)或泥-粉晶白云岩(储层)往往与准同生阶段的白云石化作用有关,此时沉积物未完全固结成岩,结构组分之间还存在成分和结构上的差异,受蒸发海水、海水和大气

表3 不同成因白云石地质和地球化学特征

Table 3 Geological and geochemical characteristics of dolomites of varying geneses

结构组分	地质特征和产状	地球化学特征				均一温度/团簇同位素(Δ_{47})温度	U-Pb 同位素年龄
		有序度	碳/氧同位素	锶同位素($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)	微量和稀土元素		
低温有机沉淀白云石	微生物白云岩, 层状-准层状, 保留原岩结构	< 0.4, 低有序度	$\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$: -5‰ ~ 0, 低负值; $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$: -4‰ ~ -1‰, 低负值	< 0.709 0, 低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值	—	地表低温(< 50 °C)	近似于白云石沉淀年龄
低温交代白云石	颗粒白云岩、膏(盐)云岩, 层状-准层状, 保留原岩结构	0.4 ~ 0.6, 中-低有序度	$\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$: -8‰ ~ -5‰, 中-低负值; $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$: -5‰ ~ 0, 低负值	0.710 5 ~ 0.708 0, 中-低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值	—	地表低温(< 50 °C)	与地层年龄相当, 近似于白云石化年龄
高温交代白云石	灰岩白云石化型白云石	0.5 ~ 0.8, 中有序度	$\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$: -8‰ ~ -4‰, 中-低负值; $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$: -1‰ ~ 3‰, 低负-低正值	0.710 0 ~ 0.708 5, 中-低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值	微量元素: 低 Mg/Ca 元素含量比值、低 Mn/Fe 元素含量比值; 稀土元素总量: 低 ΣREE ; 稀土元素配分模式: LREE, MREE 和 HREE 型; 稀土元素异常: Eu 正异常	包裹体少见, Δ_{47} 温度高, 但不代表白云石形成温度	介于地层年龄和白云石化年龄之间, 晶粒越粗越自形, 越接近白云石化年龄
	白云岩继承型白云石	> 0.8, 高有序度	$\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$: -10‰ ~ -8‰, 中负值; $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$: -3‰ ~ -1‰, 低负值	0.710 0 ~ 0.711 0, 中-高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值	微量元素: 高 Mg/Ca 元素含量比值、高 Mn/Fe 元素含量比值; 稀土元素总量: 高 ΣREE ; 稀土元素配分模式: LREE, MREE 和 HREE 型; 稀土元素异常: Ce 正异常	包裹体少见, Δ_{47} 温度低, 但不代表白云石形成温度	
高温无机沉淀白云石	细晶-巨晶自形晶, 充填于孔-洞-缝中, 富含包裹体	> 0.8, 高有序度	$\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$: -20‰ ~ -10‰, 高负值; $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$: -2‰ ~ 2‰, 低负-低正值	0.710 5 ~ 0.712 0, 高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值	—	中-高温多期包裹体温度(> 80 °C), 代表白云石形成温度	代表白云石沉淀的年龄, 多期, 比围岩年轻

注: “—”代表无数据。“ ΣREE ”代表稀土元素总量。“LREE”“MREE”“HREE”分别代表轻稀土、中稀土和重稀土。数据来自塔里木盆地和四川盆地不同类型白云石测试数据的统计规律^[14,43]。

淡水等流体作用发生白云石化, 也往往具有组构选择性, 这是灰岩白云石化后仍能保留或残留原岩结构的主要原因。晶粒白云岩(储层)往往与埋藏阶段的白云石化作用有关, 此时沉积物已完全固结成灰岩(或准同

生期白云石化成白云岩), 结构组分归一化, 受地层水和深部地幔热液等流体作用发生的白云石化往往不再具有组构选择性, 这是灰岩(或白云岩)白云石化后不保留原岩结构的主要原因。值得讨论的是透射光对比

度法原岩结构恢复技术对细晶白云岩具有很佳的原岩结构恢复效果,而对于中-粗晶或更粗粒级的晶粒白云岩则几乎难以恢复原岩结构,有以下2方面的原因:①充填裂缝、不整合面和相关溶蚀孔洞的晶粒白云岩,本身就不存在原岩恢复的问题(图2g);②原岩颗粒粒级和白云石晶粒粒级的关系,当白云石晶粒粒级大于原岩颗粒粒级时(多个原岩颗粒构成一个白云石晶粒)(图2e,f),原岩结构难以恢复,当白云石晶粒粒级小于原岩颗粒粒级时(多个白云石晶粒构成一个原岩颗粒)(图2d),原岩结构易于恢复。

塔里木盆地上震旦统奇格布拉克组、寒武系、蓬莱坝组和鹰山组下段^[43-47],四川盆地上震旦统灯影组、寒武系、二叠系和三叠系^[48-51],以及鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组^[52]广泛发育保留或残留原岩结构的白云岩(礁滩白云岩和泥-粉晶白云岩)和晶粒白云岩储层。

2.2.2 深层-超深层白云岩比灰岩具有更大的埋藏溶孔发育潜力,分布具继承性

依托国家能源和中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室的超深层跨构造期高温-高压可视化储层模拟实验装置,开展了白云岩孔隙形成和保持模拟实验(表4),进一步揭示了深层-超深层白云岩储层的成因。白云岩储层的储集空间除来自原岩孔隙的继承外,埋藏溶蚀孔洞也是重要的贡献者,而并非来自白云石化作用。

模拟实验的最大压力可达150 MPa、最高温度可达300 °C,反应体系的流体组分与含量实现了在线检测,减少了流体采集转移过程中带来的污染,为溶蚀机理解释提供准确参数。考虑到烃类成熟生成有机酸的温度和乙酸(有机酸)在高温-高压条件下的不稳定性(热解)以及深-特深层CO₂饱和溶液(无机酸)所占的主导地位,中-浅层反应液采用乙酸溶液和CO₂饱和溶液,深-特深层反应液仅采用CO₂饱和溶液。实验结果见表4和图6。

碳酸盐矿物类型对溶解速率影响模拟实验揭示(图6b),在中-浅层,灰岩通过溶蚀作用形成次生溶孔的潜力大于白云岩,但进入深-特深层,白云岩通过溶蚀作用形成次生溶孔的潜力大于灰岩,这很好地解释了深-特深层次生溶孔主要发育于白云岩中,而深-特深层灰岩往往很致密,次生溶孔主要发育于中-浅层或中-新生代碳酸盐岩中的地质现象。流体类型和浓度对碳酸盐矿物溶解速率影响模拟实验揭示(图6c),乙酸溶液比CO₂饱和溶液(无机酸)具有更大的侵蚀性,流体浓度与碳酸盐矿物溶解速率呈正比,流体类型、浓度和溶蚀时长主控埋藏溶孔发育的丰度,紧邻烃源岩的碳酸盐岩,烃源岩生排烃过程中伴生并运移至碳酸盐岩中的有机酸浓度最高、数量最多,碳酸盐岩次生溶孔的发育潜力最大,同时也揭示了图6b同样的溶蚀规律,即深-特深层白云岩通过溶蚀作用形成次生溶孔的潜力大于灰岩。岩性和物性对碳酸盐矿物溶解速率影响模拟实验(图6d)在中-浅层中似乎显示出了

表4 碳酸盐矿物溶解速率主控因素和溶蚀规律模拟实验条件与实验结果

Table 4 Conditions and results of simulation experiments on major factors controlling the dissolution rates of carbonate minerals and on the dissolution patterns of the minerals

序号	模拟实验名称	样品特征	实验条件	实验结果	
				中-浅层(压力 < 70 MPa、温度 < 120 °C)	深-特深层(压力 > 70 MPa、温度 > 120 °C)
1	碳酸盐矿物类型对溶解速率影响模拟实验	孔隙型白云岩和孔隙型灰岩柱塞样,孔隙度和渗透率分别为6.78%和5.56%以及 $1.43 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $1.27 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	浓度2 mol/L乙酸溶液和CO ₂ 饱和溶液,岩石内部溶蚀,开放-流动体系,流速1 mL/min	乙酸对方解石溶解速率远大于白云石,随温-压增加,方解石和白云石溶蚀能力均呈上升趋势	随温-压增加,CO ₂ 饱和溶液对白云石的溶解速率迅速增大,并明显大于方解石
2	流体类型和浓度对碳酸盐矿物溶解速率影响模拟实验	孔隙型白云岩和孔隙型灰岩柱塞样,孔隙度和渗透率分别为6.78%和5.56%以及 $1.43 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $1.27 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	浓度2 mol/L乙酸溶液、3.5 mol/L乙酸溶液和CO ₂ 饱和溶液,岩石内部溶蚀,内部溶蚀,开放-流动体系,流速1 mL/min	随温-压增加,碳酸盐矿物的溶蚀速率增加,乙酸对碳酸盐矿的溶解速率大于CO ₂ 饱和溶液,乙酸流体浓度越高溶解速率越大	随温-压增加,CO ₂ 饱和溶液对白云石的溶解速率迅速增大,并明显大于方解石
3	岩性和物性对碳酸盐矿物溶解速率影响模拟实验	白云岩和灰岩柱塞样,孔隙度和渗透率分别为19.80%和4.40%以及 $1.70 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $3.60 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$	浓度2 mol/L乙酸溶液和CO ₂ 饱和溶液,岩石内部溶蚀,开放-流动体系,流速1 mL/min	随温-压增加,乙酸溶液和CO ₂ 饱和溶液对白云岩的溶解量(离子浓度)大于灰岩	随温-压增加,CO ₂ 饱和溶液对白云岩溶解量(离子浓度)大于灰岩

与图 6b、图 6c 不同的溶蚀规律,但考虑到白云岩的孔隙度远大于灰岩,反应液在线检测得到的是离子浓度,而离子浓度受溶解速率和溶蚀的比表面积 2 个因素控制。显然白云岩的溶蚀比表面积远大于灰岩,这是导致白云岩的离子浓度大于灰岩的真正原因,但并不代表中-浅层的白云岩的溶解速率大于灰岩,而恰恰揭示了除溶解速率之外,初始孔隙度和渗透率(孔-渗)也是控制离子浓度和次生溶孔发育潜力的重要因素,而且其控制作用甚至比矿物成分的控制作用更强。初始孔-渗、不整合面和断裂系统主控了埋藏溶孔的平面分布,该类孔隙具有继承性,沿先存孔-渗带分布。

2.2.3 白云石化路径主控白云岩储层发育,白云岩保持型成储效应最佳

前已述及,白云石化作用发生于 2 个阶段(准同生阶段和埋藏阶段),存在 4 种产出形式。其中地表温度和深部高温条件下灰岩地层与富 Mg^{2+} 流体发生离子交换形成的白云岩以层状-准层状和斑块状产出,从富 Mg^{2+} 的地层水或深部地幔热液中直接沉淀白云石以充填裂缝、不整合面及相关溶蚀孔洞的晶粒白云石形式产出,围岩既可以是灰岩也可以是白云岩。准同生期形成的白云岩还可以被埋藏期白云石化叠加改造,包括晶粒变粗、变大、原岩结构进一步被破坏以及缝洞体被直接沉淀的晶粒白云石充填等,据此建立了 3 种白云石化路径(表 5)。

在白云石化前,灰岩原岩受初始孔隙(包括原生孔和早表生期组构选择性溶孔)和白云石化路径控制白云岩储层的发育,因白云岩储层的孔隙主要是对原岩孔隙的继承,白云石化自身的增孔意义不大,但早期白云石化导致岩石具有较强的抗压实和压溶能力,有利于先存孔隙的保存^[12-13,23],深层-超深层白云岩比灰岩具有更大的埋藏溶孔发育潜力,对储集空间有重要贡献,这是白云岩保持型和叠加改造型路径成储效应最佳的原因。灰岩埋藏白云石化型往往因埋藏白云石化前,灰岩比白云

岩更容易被压实和压溶,压溶产物充填邻近的孔隙,导致原岩的初始孔隙消失殆尽,即使再发生埋藏白云石化,也没有更多的初始孔隙供其继承和调整,加上白云石化自身的增孔意义不大,难以形成有效储层(图 7)。

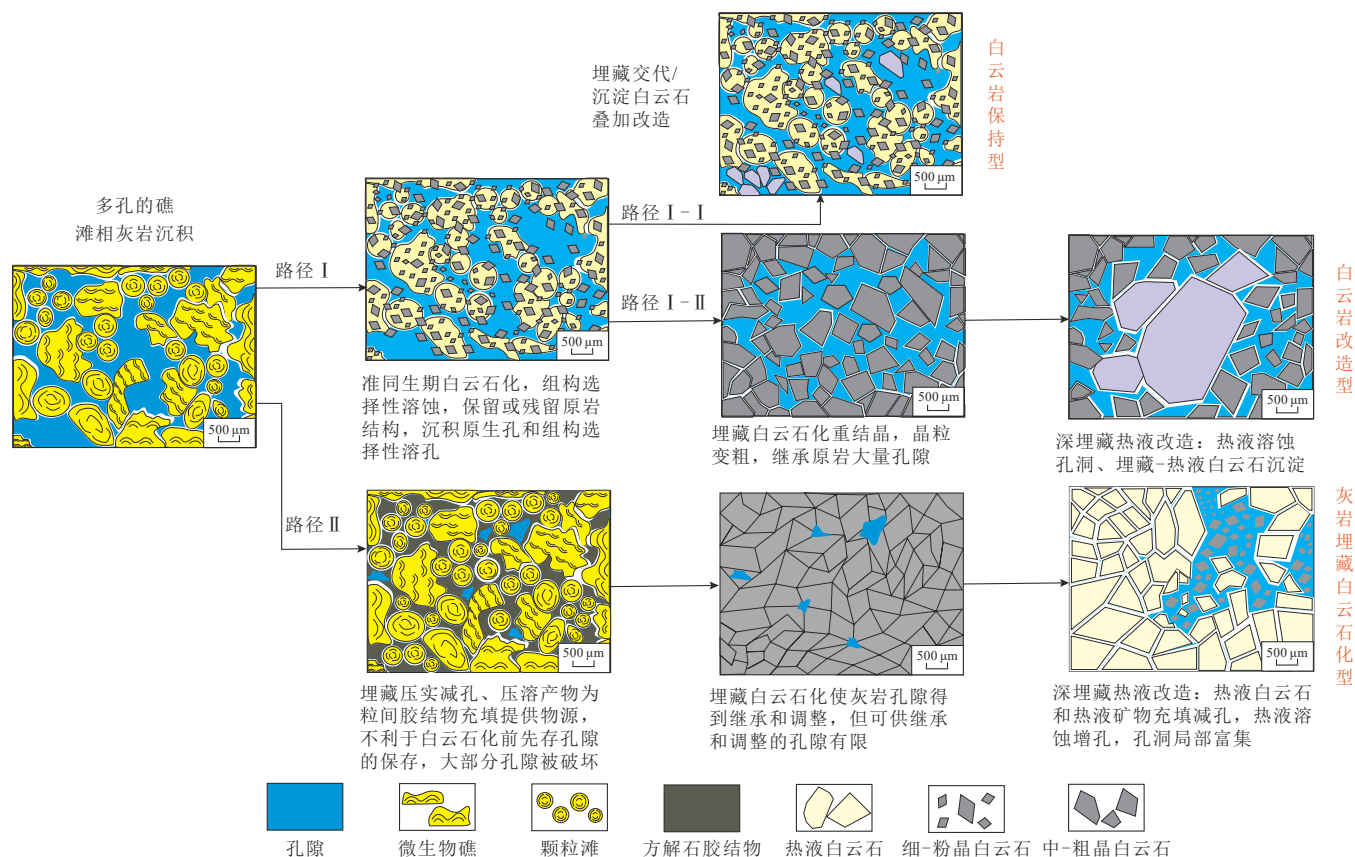
白云岩保持型储层的典型代表有四川盆地灯影组、塔里木盆地寒武系肖尔布拉克组和鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组上组合,这类储层保留了灰岩原岩结构,基本未见埋藏交代白云石化的叠加改造,孔隙以原生孔和早表生期组构选择性溶孔为主。白云岩改造型储层的典型代表有塔里木盆地蓬莱坝组、四川盆地栖霞组和长兴组—飞仙关组以及鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组中-下组合,虽然经历了埋藏交代白云石化的叠加改造,形成细-中晶白云岩以及晶间孔和晶间溶孔,但这些孔隙主要是对原岩初始孔隙的继承和调整。灰岩埋藏白云石化型储层的典型代表有塔里木盆地塔东地区鹰山组下段和四川盆地茅口组,与白云岩改造型储层的最大区别是经历埋藏交代白云石化叠加改造前,灰岩已被压实和压溶,原岩的初始孔隙已基本消失殆尽,没有可被继承的初始孔隙,难以形成有效储层。缝洞中直接沉淀的白云石总是破坏孔隙的,可以叠加改造白云岩保持型、改造型和灰岩埋藏白云石化型 3 类白云岩(储层),甚至是灰岩。

综上所述,可以对白云岩成因与白云岩储层成因之间的因果关系做出系统的总结。低温有机沉淀白云石对应微生物白云岩储层,如四川盆地灯影组白云岩储层;低温交代白云石对应保留原岩结构的(含膏/盐)泥晶白云岩和颗粒白云岩,如鄂尔多斯盆马家沟组含膏泥-粉晶白云岩储层和塔里木盆地寒武系肖尔布拉克组颗粒白云岩储层;高温交代白云石对应晶粒(细晶及以上)白云岩储层,可以残留原岩结构,原岩可以是白云岩(白云岩继承型),也可以是灰岩(灰岩白云石化型),原岩为表生期白云石化或原白云石沉淀形成的白云岩时,往往能发育成优质白云岩储层,如四川盆地长兴组白云

表 5 白云石化成岩路径及成储效应评价

Table 5 Diagenetic pathways of dolomitization and the assessment of their reservoir-forming effects

白云石化路径	白云岩特征与成因	白云岩储层特征与成因	储层评价
白云岩保持型	原岩为礁(丘)滩灰岩和蒸发潟湖周缘含膏(盐)的泥晶灰岩,经历准同生期白云石化,保留原岩结构	原生孔和早表生期组构选择性溶孔,是对原岩孔隙的继承,早期白云石化有利于孔隙的保存	I 类
白云岩叠加改造型	准同生期白云石化形成的白云岩经历埋藏-热液交代白云石化叠加改造,形成晶粒白云岩,残留部分原岩结构	原生孔和早表生期组构选择性溶孔,是对原岩孔隙的继承,早期白云石化有利于孔隙的保存,埋藏交代白云石化是孔隙的调整过程,对孔隙增减的意义不大,但进一步提升了孔隙保持能力	I-II 类
灰岩埋藏白云石化型	埋藏环境灰岩白云石化,埋藏交代白云石化的产物,中-粗晶和粗晶白云岩为主,残留部分原岩结构	埋藏交代白云石化前,灰岩发生了强烈的压实-压溶作用,压实减孔和压溶产物对邻近孔隙的充填使初始孔隙几乎消失殆尽,少量的原生孔隙被继承	III-IV 类

图7 白云石化路径及成储效应模式^[13-14]Fig. 7 Schematic diagram showing the diagenetic pathways of dolomitization and their reservoir-forming effects^[13-14]

岩储层和塔里木盆地蓬莱坝组白云岩储层,原岩为石灰岩时,储层发育潜力远不如继承型白云岩,中国三大海相盆地致密晶粒白云岩常见;高温无机沉淀白云石以充填孔-洞-缝的形式产出,自身不构成岩石或地层。

3 白云岩与白云岩储层研究展望

白云岩研究已有两百多年的历史,但白云岩储层的研究与石油工业的需求密切相关,起始于20世纪50年代,虽然在白云岩和白云岩储层成因方面积累了丰富的地质认识,尤其是21世纪以来,取得的很多认识都是颠覆性的,但随着技术的进步和油气勘探需求的增加,研究的深度和广度均存在很大的拓展空间,主要包括以下2个方面。

3.1 实验技术进步将进一步推动白云岩和白云岩储层研究的深化

3.1.1 “四定”技术为白云岩成因的认识深化提供了保障

自21世纪以来,“四定”技术(定年、定温、定压和

定流体属性)的进步为白云岩成因的认识深化提供了保障。激光U-Pb同位素测年技术可以对粒径或环带宽度小于100 μm、U含量低至 5×10^{-9} 的白云石开展测年,检测成功率由溶液法的10%提高至激光法的90%;除包裹体均一温度外,还可对不含气-液两相盐水包裹体的白云石开展团簇同位素(Δ_{47})测试,获取其形成温度;除主量元素外,还可对白云石环带开展微量/稀土元素激光面扫成像,形成微量/稀土或其比值的平面分布图,图像空间分辨率达到1 μm,1 cm × 1 cm扫描面积处理时间仅需1.5 h;同时还建立了激光微区碳/氧、铍传统同位素和溶液法痕量镁/钙/铜/钴/钼/铬/钼等非传统同位素测试技术,可高精度获取白云石微区组构的痕量同位素组分。这些技术为白云石沉淀或交代作用发生时间、温度和流体属性的确定提供了重要的参数,如前述的4种成因类型白云石识别图版的建立^[14]、白云岩储层的相控性以及白云石化路径与成储效应^[14]等地质认识的提出,都得益于“四定”技术。

已建测试技术由溶液法向激光法、微量元素(10^{-6} 级)向痕量元素(10^{-9} 级)、点检测向面成像升级,且不断提升测试成功率、精度和效率是元素和同位素测试技术的发展方向,同时还需开发一系列的新技术,如白

云石激光 Lu-Hf/Sm-Nd/Rb-Sr 同位素测年技术、单个烃类包裹体元素和同位素测试技术等。技术升级和新技术开发将为白云石成因研究提供更强的支持,如流体中 Mg^{2+} 的来源和 Mg^{2+} 替换方解石晶格中 Ca^{2+} 的动力学机制等。

3.1.2 模拟实验技术为白云岩储层成因的认识深化提供保障

如果说“四定”技术是从“反演”的角度研究白云岩(白云石)和白云岩储层的成因,“模拟实验技术(包括数值模拟)”则是从正演的角度研究白云岩(白云石)和白云岩储层的成因。

如前文所述,除现代沉积考察外,模拟实验技术已经对低温有机沉淀白云岩(白云石)和高温交代成因白云岩(白云石)成因以及白云岩埋藏溶孔发育主控因素和分布规律等地质认识的提出发挥了重要的作用。现有的模式实验装置虽然通过技术升级,具备了高温-高压(温度 $> 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、压力 $> 150\text{ MPa}$)、“升温升压”和“退火退压”多阶段-连续流、溶蚀-沉淀过程二维可视化以及渗透率实时在线检测功能^[53],基本满足了多旋回叠合盆地深层-超深层逼近真实地质背景模拟实验的需求,但仍存在孔隙度和流体组分无法实时在线检测以及溶蚀-沉淀过程无法三维可视化的局限性,目前的研究只局限于对沉淀-溶蚀模拟现象的表征,还无法为沉淀-溶蚀模拟实验结果的化学驱动机理解释提供真实可靠的连续在线实时检测参数,制约了白云石成因、孔隙形成与保持以及埋藏溶孔分布化学驱动机理的理解。

现有沉淀-溶蚀模拟实验装置的升级,尤其是“跨构造期高温高压可视化成储成藏一体化模拟实验装置”的研制,让白云石化模式走进实验室,走进大自然,为白云岩埋藏溶蚀孔洞发育主控因素、规模和分布规律认识提供实验装备保障。

3.2 勘探开发需求将进一步推动白云岩的研究广度

3.2.1 非均质白云岩储层多尺度表征、评价和建模技术开发

前已述及,4种成因类型的白云岩(白云石)可以形成于不同的地质场景,呈现不同的岩石学特征和产状,储集空间(基质孔+溶蚀孔洞)具明显的相控性和继承性,导致了储层的非均质性,多尺度的储层表征、评价和建模在勘探阶段将为优质储层分布预测和探井部署提供支撑,在开发阶段将为开发方案编制和调整、

产能评估提供支撑。

数字露头建模技术的兴起为相控白云岩储层宏观尺度非均质性表征和评价提供了解决方案^[54-55]。基于露头储层地质模型约束井-震融合的油藏尺度储层精细表征和建模,明确渗透层和隔挡层的时-空分布,为白云岩油藏开发方案编制提供支撑,同时通过油藏数值模拟和多次迭代,不断调整油藏尺度储层地质模型,为开发方案调整提供支撑^[56]。工业CT和场发射扫描电镜等装置可以对白云岩储层毫米-纳米级的孔喉结构进行表征,为单井产能评估提供依据。沉积相、沉积微相和不同级次层序界面的识别是储层建模的关键^[57]。

借助3D打印技术将储层地质模型实体化,通过实体储层地质模型开展驱油效率物理模拟实验,与油藏数值模拟相比,可为开发方案编制和调整提供更为准确的参数。

3.2.2 基于地质模型的白云岩储层地球物理预测技术开发

从白云岩成因可知,白云岩储层发育的地质场景主要有台缘带白云岩、台内礁滩白云岩、碳酸盐岩-膏盐岩组合白云岩以及沿断裂带和不整合面分布的白云岩。建立不同地质场景的白云岩储层地质模型,基于储层地质模型约束的测井储层识别和评价以及地震储层预测,提高地震储层预测的吻合度是发展趋势,尤其是薄层白云岩储层。

4 结论与建议

前人建立了以渗透回流、埋藏-压实为代表的不同地质场景的白云石化模式,解释了自然界不同产状和特征白云岩(白云石)的成因,而是否存在早期低温沉淀的白云石、交代白云石和高温沉淀白云石 Mg^{2+} 的来源和 Mg^{2+} 替换方解石晶格中 Ca^{2+} 的动力学机制等均处于模式认知阶段,尤其是白云岩储层成因问题,简单地将白云岩成因等同于白云岩储层成因。

21世纪,尤其是近10多年以来,通过现代沉积观察和模拟实验,使白云石化模式走进了大自然和实验室,提出了4种成因类型的白云岩(白云石),分别为低温有机沉淀白云石、低温交代白云石、高温交代白云石和高温无机沉淀白云石,目前没有研究证实自然界低温无机沉淀白云石的存在。提出了高温交代白云石的2种成因类型,即灰岩白云石化型白云石和白云岩继承型白云石,为白云石化路径的建立和成储效应研究奠定了理论基础。建立了白云岩(白云石)的地质-地

球化学特征识别图版,并提出白云岩孔隙主要是对原岩孔隙的继承,相控性、继承性大于改造性,部分来自埋藏溶蚀作用,甚至可局部富集,而并非为白云石化作用的产物,但早期白云石化有利于孔隙的保持。建立了白云岩保持型和灰岩埋藏白云石化型2种白云石化路径,其中白云岩保持型的成储效应最佳。

实验技术进步将进一步推动白云岩问题的认识深化,如“四定”技术为白云岩成因问题的认识深化提供保障、模拟实验技术为白云岩储层成因的认识深化提供保障。勘探开发需求将进一步推动白云岩储层研究的广度,包括白云岩储层(油气藏)精细表征和建模、基于储层地质模型的测井储层识别和地震储层预测等。

参 考 文 献

- [1] WARREN J. Dolomite: Occurrence, evolution and economically important associations[J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 52(1/3): 1-81.
- [2] 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.
- [3] ADAMS J E, RHODES M L. Dolomitization by seepage refluxion [J]. *AAPG Bulletin*, 1960, 44(12): 1912-1920.
- [4] FRIEDMAN G M, SANDERS J E. Origin and occurrence of dolostones[M]//CHILINGAR G V, BISSELL H J, FAIRBRIDGE R W. *Developments in Sedimentology: Volume 9, Part A: Carbonate Rocks Origin, Occurrence and Classification*. Amsterdam: Elsevier, 1967: 267-348.
- [5] MCKENZIE J A, HSÜ K J, SCHNEIDER J F. Movement of subsurface waters under the Sabkha, Abu Dhabi, UAE, and its relation to evaporative dolomite genesis [M]//ZENER D H, DUNHAM J B, ETHINGTON R L. *Concepts and Models of Dolomitization*. Broken Arrow, OK: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1980: 11-30.
- [6] VON DER BORCH C C, LOCK D E, SCHWEBEL D. Ground-water formation of dolomite in the Coorong region of South Australia [J]. *Geology*, 1975, 3(5): 283-285.
- [7] BADIOZAMANI K. The Dorag dolomitization model, application to the middle Ordovician of Wisconsin[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1973, 43(4): 965-984.
- [8] KOHOUT E A, HENRY H R, BANKS J E. Hydrogeology related to geothermal conditions of the Floridan Plateau [M]//SMRFH K L, GRIFFIN G M. *The Geothermal Nature of the Floridan Plateau*. [S. l.]: Florida Department of Natural Resources Bureau, Geology Special Publications, 1977: 1-34.
- [9] HARDIE L A. Dolomitization; a critical view of some current views [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1987, 57(1): 166-183.
- [10] MATTES B W, MOUNTJOY E W. Burial dolomitization of the Upper Devonian Miette buildup, Jasper National Park, Alberta [M]//ZENER D H, DUNHAM J B, ETHINGTON R L. *Concepts and Models of Dolomitization*. Broken Arrow, OK: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1980: 259-297.
- [11] DAVIES G R, SMITH L B, Jr. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11): 1641-1690.
- [12] VASCONCELOS C, MCKENZIE J A, BERNASCONI S, et al. Microbial mediation as a possible mechanism for natural dolomite formation at low temperatures [J]. *Nature*, 1995, 377(6546): 220-222.
- [13] 赵文智, 沈安江, 乔占峰, 等. 白云岩成因类型、识别特征及储集空间成因[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(6): 923-935.
ZHAO Wenzhi, SHEN Anjiang, 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): 923-935.
- [14] 沈安江, 罗宪雯, 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.
- [15] VAHRENKAMP V C, SWART P K. Late Cenozoic dolomites of the Bahamas: Metastable analogues for the genesis of ancient platform dolomites [M]//PURSER B, TUCKER M, ZENER D. *Dolomites: A Volume in Honour of Dolomieu*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1994: 133-153.
- [16] FAIRBRIDGE R W. The dolomite question [M]//LE BLANC R J, BREEDING J G. *Regional Aspects of Carbonate Deposition*. Broken Arrow, OK: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1957: 125-178.
- [17] MOORE C H. *Carbonate diagenesis and porosity* [M]. Amsterdam: Elsevier, 1989.
- [18] LUCIA F J. *Carbonate reservoir characterization* [M]. Berlin: Springer, 1999: 226.
- [19] 杜金虎, 邹才能, 徐春春, 等. 川中古隆起龙王庙组特大型气田战略发现与理论技术创新[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(3): 268-277.
DU Jinhu, ZOU Caineng, XU Chunchun, et al. Theoretical and technical innovations in strategic discovery of a giant gas field in Cambrian Longwangmiao Formation of central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(3): 268-277.
- [20] 马永生, 蔡勋育, 云露, 等. 塔里木盆地顺北超深层碳酸盐岩油气田勘探开发实践与理论技术进展[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(1): 1-17.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, YUN Lu, et al. Practice and theoretical and technical progress in exploration and development of Shunbei ultra-deep carbonate oil and gas field, Tarim Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(1): 1-17.
- [21] 杨雨, 姜鹏飞, 张本健, 等. 龙门山山前复杂构造带双鱼石构造栖霞组超深层整装大气田的形成[J]. *天然气工业*, 2022, 42(3): 1-11.
YANG Yu, JIANG Pengfei, ZHANG Benjian, et al. Formation of ultra-deep integrated giant gas field in Qixia Formation of Shuangyushi structure in the foothill complex structural belt of

- Longmen Mountain [J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42 (3): 1–11.
- [22] 韩剑发, 王彭, 朱光有, 等. 塔里木盆地超深层千吨井油气地质与高效区分布规律[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(5): 735–748.
- HAN Jianfa, WANG Peng, ZHU Guangyou, et al. Petroleum geology and distribution law of high efficiency areas in ultra-deep kiloton wells in Tarim Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(5): 735–748.
- [23] 沈安江, 赵文智, 胡安平, 等. 海相碳酸盐岩储集层发育主控因素[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(5): 545–554.
- SHEN Anjiang, ZHAO Wenzhi, HU Anping, et al. Major factors controlling the development of marine carbonate reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42 (5): 545–554.
- [24] 王大鹏, 白国平, 徐艳, 等. 全球古生界海相碳酸盐岩大油气田特征及油气分布[J]. *古地理学报*, 2016, 18(1): 80–92.
- WANG Dapeng, BAI Guoping, XU Yan, et al. Characteristics and hydrocarbon distribution of the Paleozoic giant marine carbonate rock oil-gas fields in the world [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2016, 18(1): 80–92.
- [25] 余宽宏, 金振奎, 潘怡, 等. 全球显生宙碳酸盐岩储层及油气资源量分布特征[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(4): 748–755.
- YU Kuanhong, JIN Zhenkui, PAN Yi, et al. Phanerozoic carbonate reservoir characteristics and petroleum resource distribution in the world [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23 (4): 748–755.
- [26] WEYL P K. Porosity through dolomitization--Conservation-of-mass requirements [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1960, 30(1): 85–90.
- [27] LUCIA F J, MAJOR R P. Porosity evolution through hypersaline reflux dolomitization [M]//PURSER B, TUCKER M, ZENGER D. *Dolomites: A Volume in Honour of Dolomieu*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1994: 325–341.
- [28] PURSER B H, BROWN A, AISSAOUI D M. Nature, origins and evolution of porosity in dolomites [M]//PURSER B, TUCKER M, ZENGER D. *Dolomites: A Volume in Honour of Dolomieu*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1994: 281–308.
- [29] MOORE C H, HEYDARI E. Burial diagenesis and hydrocarbon migration in platform limestones: A conceptual model based on the Upper Jurassic of the Gulf Coast of the USA [M]//HORBURY A D, ROBINSON A G. *Diagenesis and Basin Development*. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1993: 213–229.
- [30] VAN LITH Y, VASCONCELOS C, WARTHMAN R, et al. Bacterial sulfate reduction and salinity: Two controls on dolomite precipitation in Lagoa Vermelha and Brejo do Espinho (Brazil) [J]. *Hydrobiologia*, 2002, 485(1): 35–49.
- [31] WARTHMAN R, VASCONCELOS C, SASS H, et al. *Desulfovibrio brasiliensis* sp. nov., a moderate halophilic sulfate-reducing bacterium from Lagoa Vermelha (Brazil) mediating dolomite formation [J]. *Extremophiles*, 2005, 9(3): 255–261.
- [32] BONTIGNALI T R R, VASCONCELOS C, WARTHMAN R J, et al. Dolomite-mediating bacterium isolated from the sabkha of Abu Dhabi (UAE) [J]. *Terra Nova*, 2012, 24(3): 248–254.
- [33] SÁNCHEZ-ROMÁN M, MCKENZIE J A, DE LUCA REBELLO WAGENER A, et al. Presence of sulfate does not inhibit low-temperature dolomite precipitation [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 285(1/2): 131–139.
- [34] 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.
- [35] ROBERTS J A, BENNETT P C, GONZALEZ L A, et al. Microbial precipitation of dolomite in methanogenic groundwater [J]. *Geology*, 2004, 32(4): 277–280.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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 Petrolei Sinica*, 2022, 43(11): 1585–1603.
- [40] 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.
- 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.
- [41] 沈安江, 赵文智, 胡安平, 等. 碳酸盐矿物定年和定温技术及其在川中古隆起油气成藏研究中的应用[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(3): 476–487.
- 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): 476–487.
- [42] 沈安江, 胡安平, 程婷, 等. 激光原位U-Pb同位素定年技术及其在碳酸盐岩成岩-孔隙演化中的应用[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(6): 1062–1074.
- 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): 1062–1074.
- [43] 杨翰轩, 胡安平, 郑剑锋, 等. 面扫描和定年技术在古老碳酸盐岩储集层研究中的应用——以塔里木盆地西北部震旦系奇格布拉克组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(5): 935–946.

- YANG Hanxuan, HU Anping, ZHENG Jianfeng, et al. Application of mapping and dating techniques in the study of ancient carbonate reservoirs: A case study of Sinian Qigebra Formation in northwestern Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(5): 935-946.
- [44] 陈旭东, 许启鲁, 郝芳, 等. 塔里木盆地塔北地区上震旦统奇格布拉克组白云岩储层形成与成岩演化[J]. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53(10): 2348-2369.
- CHEN Xudong, XU Qilu, HAO Fang, et al. Formation and diagenetic evolution of dolomite reservoir of Upper Sinian Qigebulak Formation in Tabei area, Tarim Basin [J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, 53(10): 2348-2369.
- [45] 刘媛媛, 王子晨, 明鑫雨, 等. 震旦系一下寒武统白云岩优势成岩—成储效应——深层白云岩成因及差异成储[J]. *沉积学报*, 2024, 42(6): 2159-2173.
- LIU Yuanyuan, WANG Zichen, MING Xinyu, et al. Profitable diagenetic path and reservoir formation efficiency of the Sinian-Lower Cambrian dolostone: Origins of deep dolomites and differential reservoir formation [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(6): 2159-2173.
- [46] 乔占峰, 张天付, 贺训云, 等. 塔里木盆地蓬莱坝组层状白云岩储层发育规律[J]. *地球科学*, 2023, 48(2): 673-689.
- QIAO Zhanfeng, ZHANG Tianfu, HE Xunyun, et al. Development and exploration direction of bedded massive dolomite reservoir of Lower Ordovician Penglaiba Formation in Tarim Basin [J]. *Earth Science*, 2023, 48(2): 673-689.
- [47] 刘大卫, 李映涛, 韩俊, 等. 塔里木盆地顺北地区奥陶系鹰山组超深层白云岩类型及成储潜力评价[J]. *古地理学报*, 2025, 27(1): 126-140.
- LIU Dawei, LI Yingtao, HAN Jun, et al. Ultra-deep dolomite types and their reservoirs potential of the Ordovician Yingshan Formation in Shunbei area, Tarim Basin [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2025, 27(1): 126-140.
- [48] 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. The genesis and controlling factors of ultra deep dolomite reservoirs: A case study of the Dengying Formation and Longwangmiao Formation of the Cambrian in the Sichuan Basin [J]. *Science China Earth Sciences*, 2024, 54(7): 2389-2418.
- [49] 陈娅娜, 张建勇, 李文正, 等. 四川盆地寒武系龙王庙组岩相古地理特征及储层成因与分布[J]. *海相油气地质*, 2020, 25(2): 171-180.
- CHEN Yana, ZHANG Jianyong, LI Wenzheng, et al. Lithofacies paleogeography, reservoir origin and distribution of the Cambrian Longwangmiao Formation in Sichuan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2020, 25(2): 171-180.
- [50] 狄贵东, 陈亚军, 陈康, 等. 四川盆地高石梯地区走滑断裂的分布及活动对二叠系栖霞组白云岩储层发育的控制作用与意义[J]. *石油学报*, 2024, 45(12): 1761-1782.
- DI Guidong, CHEN Yajun, CHEN Kang, et al. Distribution and activity of strike-slip faults in Gaoshiti area of Sichuan Basin and their control and significance for the development of dolomite reservoirs in Permian Qixia Formation [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2024, 45(12): 1761-1782.
- [51] 甯濛, 刘殊, 龚文平. 川西坳陷三叠系雷口坡组顶部白云岩储层分布预测[J]. *中国石油勘探*, 2015, 20(3): 30-37.
- NING Meng, LIU Shu, GONG Wenping. Prediction of dolomite reservoir distribution on top of Triassic Leikoupo Formation in Chuanxi Depression [J]. *China Petroleum Exploration*, 2015, 20(3): 30-37.
- [52] 牛小兵, 吴东旭, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组中-下组合岩相古地理演化及储层分布规律[J]. *地质科学*, 2024, 59(3): 625-636.
- NIU Xiaobing, WU Dongxu, LIU Xinshe, et al. Paleogeographic evolution of the middle and lower assemblages of the Majiagou Formation in the Ordos Basin and the pattern of reservoir distribution [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2024, 59(3): 625-636.
- [53] 胡安平, 余敏, 沈安江, 等. 深层—超深层碳酸盐岩储层可视化模拟实验与孔隙演化机理[J]. *石油勘探与开发*, 2025, 52(2): 334-346.
- HU Anping, SHE Min, SHEN Anjiang, et al. Visualization simulation experiments and porosity evolution mechanisms of deep to ultra-deep carbonate reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2025, 52(2): 334-346.
- [54] JANSOON X, KERANS C, BELLIAN J A, et al. Three-dimensional geological and synthetic seismic model of Early Permian redeposited basinal carbonate deposits, Victorio Canyon, west Texas [J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(10): 1405-1436.
- [55] 乔占峰, 沈安江, 郑剑锋, 等. 基于数字露头模型的碳酸盐岩储集层三维地质建模[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(3): 328-337.
- QIAO Zhanfeng, SHEN Anjiang, ZHENG Jianfeng, et al. Three-dimensional carbonate reservoir geomodeling based on the digital outcrop model [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(3): 328-337.
- [56] 宋新民, 李勇, 李峰峰, 等. 中东巨厚复杂碳酸盐岩油藏分层系均衡注水开发技术[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(3): 578-587.
- SONG Xinmin, LI Yong, LI Fengfeng, et al. Separate-layer balanced waterflooding development technology for thick and complex carbonate reservoirs in the Middle East [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(3): 578-587.
- [57] 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.

(编辑 许诺)