

白云岩成因分析综述

吴承炀¹, 刘波¹, 于家鑫², 张文超², 陈兆旭³

¹桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

²中国冶金地质总局青岛地质勘查院, 山东 青岛

³辽宁省第十地质大队有限责任公司, 辽宁 抚顺

收稿日期: 2023年5月18日; 录用日期: 2023年6月22日; 发布日期: 2023年6月30日

摘要

白云石是地球上最神秘的沉积矿物之一, 它过去的大量沉积, 在当代却几乎没有类似的产物, 而今天, 科学家们仍然无法就全球前寒武纪的百米厚白云质矿床是如何形成的达成共识。白云岩在过去是碳循环的主要调节器, 同时也是正在进行的CO₂地下储存和封存项目中的主要岩石, 对原生资源的需求不断增长, 导致人们对白云石的兴趣有所增加, 而有关白云岩成因的问题一直是众说纷纭, 目前尚未定论, 本文就白云岩成因相关问题进行了探讨。

关键词

白云岩, 岩石成因, 白云岩化模式

A Review of Dolomite Genesis Analysis

Chengyang Wu¹, Bo Liu¹, Jiaxin Yu², Wenchao Zhang², Zhaoxu Chen³

¹School of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

²Qingdao Geological Survey Institute, China Metallurgical Geological Administration, Qingdao Shandong

³Liaoning Province Tenth Geological Brigade Limited Liability Company, Fushun Liaoning

Received: May 18th, 2023; accepted: Jun. 22nd, 2023; published: Jun. 30th, 2023

Abstract

Dolomite is one of the most enigmatic sedimentary minerals on Earth, its massive past deposition has few contemporary analogs, and today scientists still cannot agree on how the 100-meter-thick dolomitic deposits of the global Precambrian were formed. While dolomite has been a major regulator of the carbon cycle in the past, as well as a major rock in ongoing CO₂ underground storage and sequestration projects, the growing demand for primary resources has led to increased interest in dolomite, and questions about its genesis have been widely debated and are still inconclu-

sive. In this paper, we discuss issues related to dolomite genesis.

Keywords

Dolomite, Petrogenesis, Dolomitization Patterns

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

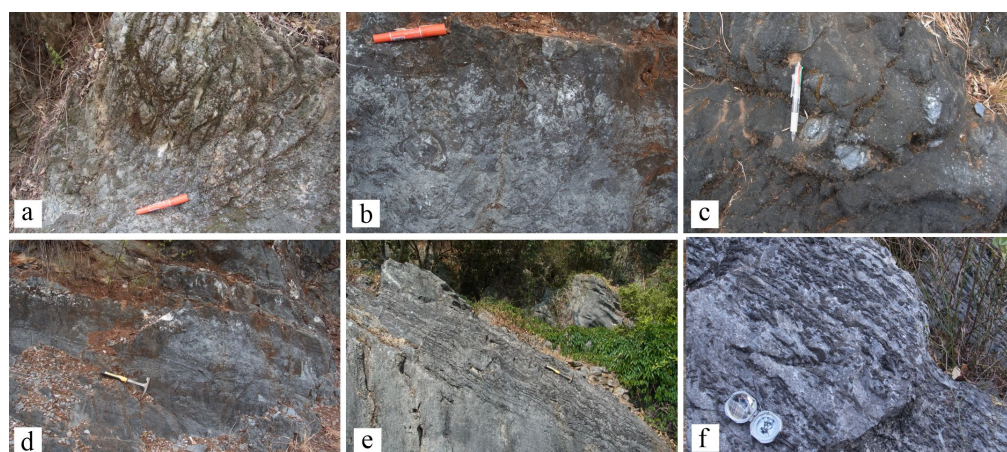
1. 引言

碳酸盐岩的研究在理论和实践上都具有重要意义。它广泛分布并含有丰富的矿产资源，是重要的生油岩和储集岩，同时也是有价值的矿产资源[1]。

中国是世界上少数几个在几乎所有地质时期都有白云岩的国家之一。从元古宇到第四纪的所有地层系统中都有不同类型的白云岩，但层位和区域分布却非常不均匀，类型上差异明显。其中，白云岩在下古生代最为丰富，在上古生代、中生代和新生代仅局部发育[2]，在野外白云岩风化面黑色，常发育刀砍纹，且岩石特征多样(图 1)。白云岩的油气勘探具有独特的特点，白云岩作为一种成岩相，具有多样的产状变化，即使呈现层状结构，其储集性能也展现出显著的非均质性，油气也并非仅聚集在构造高部位[3]。

在深层和古老海相层系中，相较于灰岩，白云岩具备多种类型和广泛的时间跨度。白云岩更容易形成高品质的油气储层，彰显其突出的重要性。但白云岩储层的成因复杂[4] [5] [6] [7] [8]，U-Pb 定年[6] [7] 与同位素地球化学分析[5]，在白云岩储层成因研究过程中有很大的潜力。白云岩不仅与油气矿床关系密切，与铅、锌等金属矿床和膏盐矿关系也十分密切。

目前，对于白云岩的成因研究，往往主要采用综合分析方法。由于其形成环境和条件不同，无论是通过构造背景、地球化学还是沉积环境，单一方法都会存在局限性，通过有机地结合各种资料，才能够更加深入地解某个地区白云岩的形成机制。这种方法不仅是目前主要的研究手段，而且是相当有效的[9]。



(a) 白云岩表面发育刀砍纹；(b) 叠层石白云岩；(c) 块状白云岩；(d) 条带状白云岩；(e) 白云岩表面风化呈瓣痢状；(f) 白云岩表面风化呈瓣痢状

Figure 1. Outcrop of dolomite

图 1. 白云岩野外露头

2. 白云岩化的成因

白云岩主要组成矿物为白云石, 被认为是接近于理想白云石 $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ 的方解石类质同象系列, 具有不同镁钙比的成分。在矿物学角度上来看, 理想白云石的镁钙比应为 1:1, 并且晶体结构中的钙离子和镁离子沿其结晶学 c 轴方向每隔一层 CO_3^{2-} 层交替排列, 从而形成阳离子有序超结构[10] (图 2)。

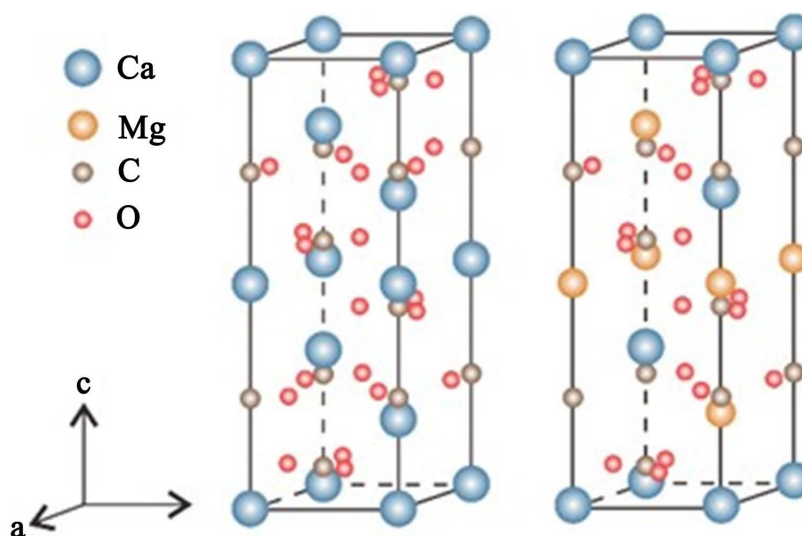


Figure 2. Crystal structure models of calcite and dolomite: (Left) Calcite; (Right) Dolomite
图 2. 方解石与白云石的晶体结构模型: (左) 方解石; (右) 白云石

白云岩在古代地质记录中具有广泛的时间和空间分布, 是地壳中最重要的岩石之一。1791 年, Deodat Dolomieu 初度发现白云岩, 并对其进行了详细的描述, 有关白云岩研究的相关问题从此成为地质学界的一大热点[11]。然而经过两百多年的研究, “白云石(岩)问题”始终是众说纷纭且暂无定论。“白云石(岩)问题”是指白云石在模拟自然界的正常的实验室条件(常温常压)下不会沉淀, 即使溶液中是处于过饱和状态也是如此。现代海水中 $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ 含量过高, 但白云石的沉积量非常有限。在最近的海洋沉积物中没有发现白云石的存在, 在正常的实验室条件下也不能形成白云石, 白云岩只有较高温压条件下(200℃)才能形成。在自然界中, 其形成条件与交代作用的时间有关, 新生界中的白云岩非常稀少, 而在老地层中更为常见[12]。关于白云石的成因问题, 百家争鸣, 至今仍是沉积学领域中的一个谜题。

2.1. 原生沉积与次生交代

白云岩与石灰岩的不同之处在于: 白云岩不仅与原生沉积有关, 次生交代在白云岩的形成过程中更为重要。原生沉积成因方面, 白云岩具有良好的成层性和稳定的产状, 经常与细粒沉积岩(如泥岩、灰岩或蒸发岩)形成层状互层产出[13]。而次生交代成因方面, 白云岩的产出并不总是与其他岩层平行, 常常与缝合线和断裂等后期流体作用有关。在灰岩中, 白云石常呈现斑状发育, 并可观察到雾心亮边等其他交代残余结构[14]。

2.2. 热力学与动力学

尽管 $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ 在现代海水中处于过饱和状态, 倘若根据热力学条件, 白云石的形成应该发生并早已沉淀。然而, 实际观察到的现象是在现代海水中很少发现白云石的沉淀。遗憾的是, 海水中 $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ 可在长时间内保持过饱和而不使其沉淀。Land (1998)在实验室标准状态下, 试图尝试人工

合成白云石,可是经过了长达 32 年的实验研究,仍未成功[15]。如果说热力学限制了反应上限和反应的准静态过程,那么动力学则决定了反应达到这个上限的时间以及在这段时间内的反应状态方程。在任何化学反应中,反应的发生都需要克服活化能。Lippman (1982)认为水的相对静电引力 Mg^{2+} 比 Ca^{2+} 约大 20%,而 Mg^{2+} 比 CO_3^{2-} 更大[16]。这意味着白云石形成所需克服的活化能较高,即使根据热力学原理可能是自发反应,实际发生的可能性也十分渺茫[17]。因此,白云石的形成更可能是由受动力学条件主导,需要考虑海水性质及其钙镁离子的浓度及成岩时间等因素的影响。

大量实验结果表明,人工合成理想白云石要想实现,就必须在高温条件下,且最低不小于 200℃。低温下白云石的合成受到动力学障碍的限制。在地表温度条件下或自然环境中,白云石的形成需要考虑动力学过程,并可能受到微生物活动和其他环境因素的影响[14]。

3. 白云石化的影响因素

3.1. 镁离子

Mg^{2+} 来源具有多样性,主要有三个途径:成岩流体来源、岩浆岩及其他固体矿物来源,以及生物来源[18]。如果环境中的 Mg 浓度较低,总量较少,那么在生物或细菌的作用下,可能只形成少量高钙低镁的白云石;如果环境中的 Mg 浓度较低但总量较高时,白云石化所需的过程可能会很长,通常具有雾心亮边和环带结构;如果环境中的 Mg 浓度较高但总量较少时,白云石会形成细小的单晶颗粒;而当 Mg 浓度高且总量也较多时,白云石可以形成大规模的成层白云岩,并且常常呈现出镶嵌结构和重结晶现象[14]。因此, Mg 浓度的变化对白云石形成过程和最终的岩石结构构造具有重要影响,不同的浓度条件会导致不同类型的白云石形成。

3.2. 水文环境

水文条件在白云石化过程中确实扮演着至关重要的角色。特定的环境下可以促使富含 Mg 的流体与钙质碳酸盐岩相互作用并发生白云石化[19]。

3.3. 流体的运移机制

白云石化过程中的流体取决于形成环境和条件不同,可以有多个来源,包括海水、地层水以及深部热液等,但主要来自海水[13]。

3.4. 生物活动

Vaacancelos (1995)利用硫酸盐还原细菌成功沉淀出与自然界潟湖特征类似的白云石,并首次明确提出了微生物白云岩[20]。此后众多学者对其进行了相关研究[21] [22] [23] [24] [25],微生物新陈代谢活动的广泛分布,例如:硫酸盐还原菌[20]、甲烷氧化菌[24]、甲烷生成菌[23]、喜氧喜盐菌[25]等,可以在多种环境中促进白云石的沉淀,而这些白云石多出现在有机质富集的层位[26]。微生物诱导白云石沉淀成为了白云石化在低温条件下的重要影响因素之一。

微生物表面常存在大量带负电荷的官能团[27],能够局部大量富集 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 离子,其次细菌细胞分泌的聚合物(EPS)和某些特定官能团可以有效降低 Mg^{2+} 对水的相对静电引力,使得 CO_3^{2-} 能够突破水合壳层与 Mg^{2+} 结合,进而更容易捕获 Ca^{2+} 。

微生物活动能够影响局部水体的化学条件[28],并为白云石沉淀提供成核位点[29]。例如硫酸盐还原细菌会消耗溶液中大量的 SO_4^{2-} ,释放出原来与 SO_4^{2-} 紧密结合的 Mg^{2+} ,同时形成 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- ,提高溶液中的碱度和 pH 值[30],克服热动力学障碍,利于白云石沉淀。

4. 白云石化模式

4.1. 原生白云石化模式

虽然在理论上存在直接通过化学沉淀形成原生白云石的可能性，但是从白云石这个概念被提出至今，还没有任何一位地质学家找到具有地层学意义的原生白云石的确凿证据，因此它并不具有普遍意义。仅仅有 Alderman 等(1957)在澳大利亚南部考龙地区水体很深、PH 值很高、植物茂盛的潟湖环境中发现了原生白云石[31]。

4.2. 次生白云石化模式

尽管白云石化模式多种多样，但因其形成环境和条件不同但都会存在局限性，现今常结合多种模式(表 1)，综合判断白云石化成因[32] [33] [34]。

Table 1. Classification of dolomite genesis patterns

表 1. 白云岩成因模式分类

分类	模式名称	作者	应用地区
原生白云岩模式	直接沉淀的原生白云石	Alderman 等 (1957)	澳大利亚南部考龙地区
	埋藏白云石化	Illing 等 (1959)	加拿大西部地区
	蒸发泵白云石化	Hsu 等 (1969)	波斯湾撒布哈地区
	调整白云石化	Badiozamani (1973)	巴哈马安德罗斯岛
次生白云石模式	混合水白云石化	Saller 等 (1987)	美国威斯康星地区
	盐度变动白云石化	Anderson 等 (1984)	广西崇左江洲地区
	潮汐泵吸白云石化	Cevato 等 (1990)	佛罗里达岛链 Sugarlof 岛
	海水泵吸白云石化	Mountjoy 等 (1991)	太平洋 Enewetak 环礁带
	Kohout 对流白云石化	vasconcelos 等 (1997)	巴哈马台地边缘地区

Llling 等(1959)提出的埋藏白云石化模式，多用于解释在高温条件下，通过压实作用使镁离子运移到石灰岩中的白云石化[35]。浅埋藏期白云岩化作用易于形成大规模储集空间[36]，埋藏白云石化常作为后期阶段叠加其他模式来解释白云岩化[34] [37] [38]。Hsu 等(1969)提出蒸发泵白云石化模式，用于解释深度小于 500 m、气候干燥、强烈蒸发作用的高盐度条件的地区，潮上带的高镁粒间盐水或表面水交代文石发生的白云石化。该模式主要发生在准同生阶段[39]。Badiozamani (1973)提出混合水白云石化模式，但是该模式受到持续挑战，因其需要稳定的水文环境而不具有广泛意义[40]。Saller 等(1987)提出海水泵吸白云石化模式，用于解释在海水泵吸使大量海水集中通过具有合适渗透率的沉积物发生的白云石化，海水泵吸、热循环作用强，沉积物具有合适的渗透率，该模式受到了广泛关注[41]。

除了以上次生白云岩模式，以下两种模式作为新的研究视角，对于深入了解白云石形成机制和地球化学过程具有重要意义，并值得进一步研究和关注。

4.3. 热液白云石化模式

热液白云石化模式形成于后生成岩阶段。Anderson 等(1984)提出构造热液白云石化模式，适用于区

域构造运动,深大断裂带发育,且灰岩上部覆盖致密碎屑岩,深度大于 2500 米的地区[42]。Cevato 等(1990)提出火山热液白云石化模式,适用于火山活动,伴有区域构造运动的发生,深度大于 2500 米的地区[43]。Mountjoy 等(1991)提出变质热液白云石化模式,适用于变质作用强烈,产生大量的变质热液,深度大于 2500 米的地区[44]。

4.4. 微生物白云石化模式

Vasconcelos 等(1995)提出微生物白云石化模式,用于解释微生物的新陈代谢利用硫酸根离子克服动力学障碍,释放出镁离子,为白云石的沉淀提供了条件[20]。微生物活动在现代白云岩形成的解释已经得到了补充,但是对于研究其对古代白云岩的贡献尚不能有效评估,而在矿化过程中对微生物本身的利弊也尚未得知[45],目前很难独立解释厚度达数百甚至数千米的白云岩的地质历史尺度[46],微生物活动在白云岩形成中的作用仍需进一步研究。

5. 讨论与展望

众所周知,白云石的成分结构非常简单,但若深究其成因来源,经过上百年来历代沉积学家的探索,仍未有统一定论。目前尚有的白云岩成因模式或适用范围过于片面、或研究尚未成熟,但也有些成因模式得到了普遍认可,如蒸发泵白云石化模式等,而埋藏白云石化常作为后期阶段叠加其他模式来解释白云岩化。

关于白云岩成因研究,热液白云石化模式、微生物白云石化模式这两种模式作为新的研究视角,值得进一步研究和关注。目前有关有机成因的白云石模式,可以在古生代白云岩中寻找微生物活动证据。而深部热液白云岩的研究较为薄弱,可以运用一些新的研究方法开展有关研究,这对于深入了解白云石形成机制和地球化学过程具有重要意义。

参考文献

- [1] 郭峰. 碳酸盐岩沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
- [2] 何治亮, 马永生, 张军涛, 等. 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, 2020, 41(1): 1-14.
- [3] 李振宏, 杨永恒. 白云岩成因研究现状及进展[J]. 油气地质与采收率, 2005(2): 5-8, 81.
- [4] 郝毅, 王宇峰, 李荣容, 等. 四川盆地西北部地区中二叠统栖霞组肉红色白云岩成因浅析[J]. 天然气勘探与开发, 2022, 45(2): 1-6.
- [5] 潘立银, 郝毅, 梁峰, 等. 白云岩储层成因的激光原位 U-Pb 定年和同位素地球化学新证据——以四川盆地西北部中二叠统栖霞组白云岩储层为例[J]. 石油学报, 2022, 43(2): 223-233.
- [6] 钱一雄, 储呈林, 李曰俊, 等. 新疆若羌县红柳沟新元古界平洼沟组原生白云岩特征、沉积环境及年代厘定[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 570-586.
- [7] 乔占峰, 邵冠铭, 罗宪婴, 等. 埋藏白云岩成因类型与规模储层发育规律——基于元素面扫和激光 U-Pb 定年的认识[J]. 天然气工业, 2021, 41(9): 46-56.
- [8] 王珊, 曹颖辉, 杜德道, 等. 塔里木盆地古城地区奥陶系鹰山组白云岩特征及孔隙成因[J]. 岩石学报, 2020, 36(11): 3477-3492.
- [9] 蒋宜勤. 准噶尔盆地乌夏地区二叠系风城组云质岩类特征与成因及储层控制因素[D]: [博士学位论文]. 西安: 西北大学, 2012
- [10] 张亦凡, 马怡飞, 姚奇志, 等. “白云石问题”及其实验研究[J]. 高校地质学报, 2015, 21(3): 395-406.
- [11] Dolomieu, D.G. (1791) Sur un genre de pierres calcaires tres-peu effervescentes avec les acides, and phosphorescentes par la collision. *Jurnal de Physique*, 39, 3-10.
- [12] 张景廉, 曹正林, 于均民. 白云岩成因初探[J]. 海相油气地质, 2003, 8(1): 109-115.
- [13] 李智勇, 廖建波, 惠麒冰, 等. 白云岩形成机理综述[J]. 内蒙古石油化工, 2015, 41(4): 23-28.

- [14] 张学丰, 胡文瑄, 张军涛. 白云岩成因相关问题及主要形成模式[J]. 地质科技情报, 2006(5): 32-40.
- [15] Land, L.S. (1998) Failure to Precipitate Dolomite at 25°C from Dilute Solution despite 1000-Fold Oversaturation after 32 Years. *Aquatic Geochemistry*, **4**, 361-368. <https://doi.org/10.1023/A:1009688315854>
- [16] Lippmann, F. (1982) Stable and Metastable Solubility Diagrams for the System CaCO₃-MgCO₃-H₂O at Ordinary Temperature. *Bulletin de Mineralogie*, **105**, 273-279. <https://doi.org/10.3406/bulmi.1982.7616>
- [17] 陈永权, 周新源, 杨文静. 白云石形成过程中的热力学与动力学基础及白云岩形成环境划分[J]. 海相油气地质, 2009, 14(1): 21-25.
- [18] 赫云兰, 刘波, 秦善. 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), 2010, 46(6): 1010-1020.
- [19] Warren, J. (2000) Dolomite: Occurrence, Evolution and Economically Important Associations. *Earth Science Reviews*, **52**, 1-81. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00022-2)
- [20] Vasconcelos, C., Bernasconi, S., Grujic, D., et al. (1995) Microbial Mediation as a Possible Mechanism for Natural Dolomite Formation at Low Temperatures. *Nature*, **377**, 220-222. <https://doi.org/10.1038/377220a0>
- [21] Krause, S., Liebetau, V., Gorb, S., et al. (2012) Microbial Nucleation of Mg-Rich Dolomite in Exopolymeric Substances under Anoxic Modern Seawater Salinity: New Insight into an Old Enigma. *Geology*, **40**, 987-990. <https://doi.org/10.1130/G32923.1>
- [22] Sánchez-Román, M., et al. (2008) Aerobic Microbial Dolomite at the Nanometer Scale: Implications for the Geologic Record. *Geology*, **36**, 879-882. <https://doi.org/10.1130/G25013A.1>
- [23] Roberts, J.A., Bennett, P.C., González, L.A., et al. (2004) Microbial Precipitation of Dolomite in Methanogenic Groundwater. *Geology*, **32**, 277-280. <https://doi.org/10.1130/G20246.2>
- [24] Lu, Y., Sun, X., Xu, H., et al. (2018) Formation of Dolomite Catalyzed by Sulfate-Driven Anaerobic Oxidation of Methane: Mineralogical and Geochemical Evidence from the Northern South China Sea. *American Mineralogist*, **103**, 720-734. <https://doi.org/10.2138/am-2018-6226>
- [25] Thompson, J.B. and Ferris, F.G. (1990) Cyanobacterial Precipitation of Gypsum, Calcite, and Magnesite from Natural Alkaline Lake Water. *Geology*, **18**, 995-998. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1990\)018<0995:CPOGCA>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1990)018<0995:CPOGCA>2.3.CO;2)
- [26] 李波, 颜佳新, 刘喜停, 等. 白云岩有机成因模式: 机制、进展与意义[J]. 古地理学报, 2010, 12(6): 699-710.
- [27] Braissant, O., Decho, A.W., Dupraz, C., et al. (2007) Exopolymeric Substances of Sulfate-Reducing Bacteria: Interactions with Calcium at Alkaline pH and Implication for Formation of Carbonate Minerals. *Geobiology*, **5**, 401-411. <https://doi.org/10.1111/j.1472-4669.2007.00117.x>
- [28] Petrash, D.A., et al. (2017) Microbially Catalyzed Dolomite Formation: From Near-Surface to Burial. *Earth-Science Reviews*, **171**, 558-582. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.06.015>
- [29] Mckenzie, J.A., Lith, Y.V., Warthmann, R., et al. (2003) Sulphate-Reducing Bacteria Induce Low-Temperature Ca-Dolomite and High Mg-Calcite Formation. *Geobiology*, **1**, 71-79. <https://doi.org/10.1046/j.1472-4669.2003.00003.x>
- [30] Dupraz, C., Reid, R.P., Braissant, O., et al. (2009) Processes of Carbonate Precipitation in Modern Microbial Mats. *Earth Science Reviews*, **96**, 141-162. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.10.005>
- [31] Alderman, A.R. and Skinner, H. (1957) Dolomite Sedimentation in the South-East of South Australia. *American Journal of Science*, **255**, 561-567. <https://doi.org/10.2475/ajs.255.8.561>
- [32] 金民东, 谭秀成, 李毕松, 等. 四川盆地震旦系灯影组白云岩成因[J]. 沉积学报, 2019, 37(3): 443-454.
- [33] 马慧, 苏中堂, 梁茹, 等. 川西地区栖霞组白云岩成因新证据: 稀土元素地球化学特征[J]. 天然气工业, 2021, 41(12): 49-59.
- [34] 梁茹, 苏中堂, 马慧, 等. 川西地区中二叠统栖霞组白云岩成因分析[J]. 沉积学报, 2021, 39(6): 1506-1516.
- [35] Illing, L.V. (1959) Deposition and Diagenesis of Some Upper Paleozoic Carbonate Sediments in Western Canada. *Proceedings of the 5th World Petroleum Congress, Section I*, New York, 1-5 June 1959, 23-52.
- [36] 李蓉, 胡昊, 石国山, 等. 川东北阆中地区二叠系茅口组白云岩成因[J]. 新疆石油地质, 2020, 41(2): 127-132.
- [37] 高飞. 白云岩成因类型识别特征——以鄂尔多斯盆地东南部延长探区为例[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(16): 172-174, 177.
- [38] 张永利, 苗卓伟, 巩恩普, 等. 右江盆地都安组白云岩成因及其地质意义[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(4): 550-560.
- [39] Jinghwa Hsü, K. and Siegenthaler, C. (2010) Preliminary Experiments on Hydrodynamic Movement Induced by Evaporation and Their Bearing on the Dolomite Problem. *Sedimentology*, **12**, 11-25. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1969.tb00161.x>

-
- [40] Badiozamani, K. (1973) The Dorag Dolomitization Model, Application to the Middle Ordovician of Wisconsin. *Journal of Sedimentary Research*, **43**, 965-984. <https://doi.org/10.1306/74D728C9-2B21-11D7-8648000102C1865D>
- [41] Saller, A.H. (1984) Petrologic and Geochemical Constraints on the Origin of Subsurface Dolomite, Enewetak Atoll: An Example of Dolomitization by Normal Seawater. *Geology*, **12**, 217-220. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1984\)12<217:PAGCOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1984)12<217:PAGCOT>2.0.CO;2)
- [42] Leach, D.L. (1984) Mississippi Valley-Type Lead-Zinc Deposits. *Geological Association of Canada Special Paper*, **40**, 108-117.
- [43] Cervato, C. (1990) Hydrothermal Dolomitization of Jurassic-Cretaceous Limestones in the Southern Alps (Italy): Relation to Tectonics and Volcanism. *Geology*, **18**, 458-461. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1990\)018<0458:HDOJCL>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1990)018<0458:HDOJCL>2.3.CO;2)
- [44] Mountjoy, E.W. and Halim-Dihardja, M.K. (1991) Multiple Phase Fracture and Fault-Controlled Burial Dolomitization, Upper Devonian Wabamun Group, Alberta. *Journal of Sedimentary Research*, **61**, 590-612. <https://doi.org/10.1306/D426776C-2B26-11D7-8648000102C1865D>
- [45] 王金艺, 金振奎. 微生物白云岩形成机理、识别标志及存在的问题[J]. 沉积学报, 2022, 40(2): 350-359.
- [46] 赵东方, 谭秀成, 罗冰, 等. 微生物诱导白云石沉淀研究进展及面临的挑战[J]. 沉积学报, 2022, 40(2): 335-349.