

文章编号: 1671-1505(2025)01-0085-24 DOI: 10.7605/gdxb.2025.02.009

## 前寒武系海相白云石胶结物研究现状及展望\*

甯 濛<sup>1,2,3,4</sup> 罗靖茹<sup>1,2</sup> 陈家乐<sup>1,2</sup> 钟怡江<sup>1,2,3,4</sup> 文华国<sup>1,2,3,4</sup>

1 成都理工大学沉积地质研究院, 四川成都 610059

2 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

3 自然资源部深时地理环境重建与应用重点实验室, 四川成都 610059

4 中国石油碳酸盐岩储层重点实验室成都理工大学研究分室, 四川成都 610059

**摘 要** 海相白云石胶结物在前寒武纪广泛发育, 因其多样的形态、复杂的成因及其对前寒武纪海水性质的指示意义, 近年来引起了广泛关注。目前对前寒武系海相白云石胶结物的研究主要集中在两个方面, 一是基于矿物学特征分析进行成因探讨, 二是探索其反映的前寒武纪海水性质。前人对海相白云石胶结物成因的认识包括原生沉淀与次生交代 2 种观点, 但因缺乏可靠的地球化学证据支撑而存在争议, 主要体现在对原生沉淀成因白云石胶结物的具体沉淀机理及其相应的海水化学条件仍不清楚, 对次生交代成因白云石胶结物的前驱矿物类型也存在较大分歧。为进一步推动海相白云石胶结物的研究, 文中首先系统总结了前寒武系海相白云石胶结物的时空分布特征、岩石学、矿物学及地球化学特征, 并从原生沉淀、次生交代、生长组合形态 3 个方面全面回顾和评述了关于海相白云石胶结物成因研究的现状。在此基础上, 对未来相关研究提出以下几点展望: (1) 基于矿物成核与生长原理, 结合微区或原位地球化学分析, 开展不同类型海相白云石胶结物成因研究; (2) 评估微生物在海相白云石胶结物形成过程中的具体作用; (3) 以前寒武系白云石胶结物为载体探索前寒武纪古海洋海水性质的演化, 需建立在厘清其成因的基础之上。

**关键词** 前寒武系 海相白云石胶结物 拟晶白云石化作用 原生沉淀白云石 文石—白云石海

**第一作者简介** 甯濛, 女, 1991 年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为碳酸盐岩沉积地球化学; E-mail: ningmeng@cdut.edu.cn。

**通讯作者简介** 文华国, 男, 1979 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为碳酸盐岩沉积学; E-mail: wenhuaguo08@cdut.edu.cn。

中图分类号: P588.24<sup>+</sup>5 文献标志码: A

## Precambrian marine dolomite cements: review and perspectives

NING Meng<sup>1,2,3,4</sup> LUO Jingru<sup>1,2</sup> CHEN Jiale<sup>1,2</sup> ZHONG Yijiang<sup>1,2,3,4</sup> WEN Huaguo<sup>1,2,3,4</sup>

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

2 State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

\* 国家自然科学基金项目 (编号: 42102136, 42472156), 油气藏地质及开发工程国家重点实验室 (成都理工大学) 基金项目 (编号: 油重 2019017), 四川省天然气成藏物质基础青年科技创新团队基金项目 (编号: 2022JDTD0004), 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目 (编号: 2021DJ0503) 联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42102136, 42472156), State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation Foundation (Chengdu University of Technology) (No. yd2019017), Sichuan Provincial Youth Science & Technology Innovative Research Group Fund (No. 2022JDTD0004), PetroChina Scientific Research and Technology Development Project (No. 2021DJ0503)]

收稿日期: 2024-06-11 改回日期: 2024-09-09

3 Key Laboratory of Deep Time Geographical Environment Reconstruction and Application,

Ministry of Natural Resources, Chengdu 610059, China

4 Branch of Key Laboratory of Carbonate Reservoirs of CNPC, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

**Abstract** Marine dolomite cement is widely developed in the Precambrian era, whereas its occurrence in the Phanerozoic is scarce. Precambrian marine dolomite cement has attracted extensive attention in recent years due to its diversity, complex origins, and potential implications for Precambrian seawater chemistry. Research on Precambrian marine dolomite cement mainly focuses on two aspects: one is the formation mechanism through mineralogical analysis, and the other is the investigation into the unique Precambrian ‘aragonite-dolomite sea’ conditions as reflected by marine dolomite cement. The origin of marine dolomite cement incorporates both primary precipitation and mimetic dolomitization. However, due to a lack of reliable geochemical evidence, there is ongoing controversy in this field. In addition, both the precipitation mechanism of the primary dolomite and the corresponding seawater chemical conditions remain unclear. The identification of precursor minerals for mimetic dolomite is controversial. Based on previous studies, it can be summarized the spatial and temporal distribution, petrological and mineralogical characteristics, and geochemical characteristics. Subsequently, the current research status on the formation mechanism of marine dolomite cements from three aspects, including primary precipitation, secondary replacement, and growth assemblage morphology. Finally, it can be proposed that three aspects should be enhanced: (1) The genesis of diverse types of marine dolomite cements should be investigated based on the principles of mineral nucleation and growth theory, combining with micro area or *in-situ* geochemical analysis; (2) the specific contribution of microorganisms to the formation of marine dolomite cements requires assessment; (3) To gain a comprehensive understanding of the evolution of Precambrian seawater properties, exploration of the origin of marine dolomite cement is imperative.

**Key words** Precambrian, marine dolomite cements, mimetic dolomitization, primary dolomite, aragonite-dolomite sea

**About the first author** NING Meng, born in 1991, researcher, Ph.D. supervisor, is engaged in research on carbonate geochemistry. E-mail: ningmeng@cdut.edu.cn.

**About the corresponding author** WEN Huaguo, born in 1979, a professor, Ph.D. supervisor, is engaged in research on carbonate sedimentology. E-mail: wenhuaguo08@cdut.edu.cn.

## 1 概述

胶结物是孔隙流体中溶解的物质因过饱和而在颗粒之间的孔隙中形成的化学沉淀物 (Flügel, 2010)。根据 Flügel (2010) 的描述, 碳酸盐胶结物在海水、大气淡水以及埋藏环境下均可沉淀。海相碳酸盐胶结物的主要形态有针状、纤维状、葡萄状、放射状等, 原始矿物可能以文石、高镁方解石或白云石为主, 而文石、高镁方解石因其在成岩作用域的热力学不稳定性, 可能在准同生期的早期成岩阶段发生拟晶白云石化 (Hood *et al.*, 2011; Hood and Wallace, 2012, 2015; 牟传龙等, 2015; 钱一雄等, 2017a, 2017b; Wood *et al.*, 2017; 林

孝先等, 2018; Shuster *et al.*, 2018; Ding *et al.*, 2019; Hu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2021)。在碳酸盐沉积—成岩环境持续富镁流体的作用下, 可能会沉淀白云石胶结物 (Lucia and Major, 1994; Melzer and Budd, 2008; 刘大卫等, 2020)。在前寒武纪碳酸盐岩中发育一种特殊的纤维状白云石胶结物, 笔者将其定义为海相白云石胶结物 (Marine dolomite cement), 它是在沉积—早期成岩过程中, 从海水环境中直接沉淀或在未完全脱离海水环境的准同生期交代形成的白云石。

地质历史时期, 海相碳酸盐胶结物在全球范围内广泛分布, 前寒武纪以文石 (Bartley *et al.*,

2000; Grotzinger *et al.*, 2000; Wood and Curtis, 2015)、高镁方解石 (Swett and Knoll, 1989; Bartley *et al.*, 2000; Fairchild *et al.*, 1990; Kah *et al.*, 2012) 及白云石胶结物最为常见 (Hood *et al.*, 2011; Wood *et al.*, 2017; Shuster *et al.*, 2018; Ding *et al.*, 2019; Hu *et al.*, 2020)。显生宙以来, 海相碳酸盐胶结物依然广泛发育, 虽然其形态与前寒武纪海相碳酸盐胶结物类似, 但成分多为方解石 (曾德铭等, 2006; 黄思静等, 2013; 祝海华和钟大康, 2013), 目前尚未见到显生宙海相白云石胶结物的报道。前寒武系海相白云石胶结物因其多样的形态、复杂的成因及其对前寒武纪海水性质的指示意义, 近十多年来引起了国内外学者的广泛关注 (Hood *et al.*, 2011, 2015; Hood and Wallace, 2012, 2015, 2018; 施泽进等, 2013; 张杰等, 2014; 郝毅等, 2015; 林孝先等, 2015; Wood *et al.*, 2017; Shuster *et al.*, 2018; Ding *et al.*, 2019; Hu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2021)。前人利用前寒武系的海相白云石胶结物作为有效载体, 通过分析其稀土元素、微量元素组成, 揭示古海洋氧化还原分层结构的演变 (Hood and Wallace, 2014; Wallace *et al.*, 2017; Stacey *et al.*, 2023; Lamothe *et al.*, 2024); Kalderson-Asael 等 (2021) 利用海相白云石胶结物的锂同位素组成反演地史时期的碳-硅循环。

海相白云石胶结物的成因一直是关注的焦点, 主要存在原生沉淀 (Hood *et al.*, 2011, 2015; Wood *et al.*, 2017; Shuster *et al.*, 2018; Hu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2021) 与次生交代 (林孝先等, 2015, 2018; 牟传龙等, 2015; 钱一雄等, 2017a; Peng *et al.*, 2018b; Cui *et al.*, 2019; Ding *et al.*, 2019) 2 种观点。近年来, 大量基于光性矿物学的研究认为, 具有正延性光学特性以及阴极发光下保存完好的菱形边缘生长带的海相白云石胶结物为原生沉淀白云石 (Hood *et al.*, 2011; Hood and Wallace, 2012, 2015, 2018; Wood *et al.*, 2017; Shuster *et al.*, 2018), 但对其具体形成机制并不清楚。尽管微生物白云石形成模式的提出证实了原生白云石沉淀的可能性 (Vasconcelos *et al.*, 1995), 但越来越多的矿物学分析表明, 微生物介导形成的白云石是无序的原白云石, 并非真正意义上的原生白云石 (Kaczmarek

and Sibley, 2011; Rodriguez-Blanco *et al.*, 2015; Kaczmarek and Thornton, 2017)。因此, 自然环境中能否形成原生白云石, 其具体形成机制和条件又是什么, 这些问题一直困扰着相关研究学者, 而对海相白云石胶结物的研究可能为揭示原生白云石沉淀机制提供一个新的窗口。此外, 前寒武系白云岩的大量发育可能指示当时的海水具有与现代海水完全不同的物理化学性质 (Tucker, 1982, 1983), 近年来也有学者提出前寒武纪发育“文石—白云石海” (Wood *et al.*, 2017), 具有缺氧—半氧化、高  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  值、低硫酸根离子 ( $SO_4^{2-}$ ) 浓度和高碱度等特征 (Meister, 2013; Hood and Wallace, 2018), 其中缺氧环境有利于微生物 (如硫酸盐还原菌和产甲烷菌) 活动, 进而介导白云石沉淀 (由雪莲等, 2011; Petrash *et al.*, 2017), 而高  $Mg^{2+}/Ca^{2+}$  值和高碱度可以提高前寒武纪海水中  $CaMg(CO_3)_2$  饱和度, 从而促进海相白云石胶结物的发育。

对前寒武系海相白云石胶结物成因与分布规律的研究, 不仅可以为揭示“白云岩问题”提供线索, 同时可为前寒武纪古海洋研究和古环境重建提供重要参考 (Hood and Wallace, 2015; Hu *et al.*, 2020, 2022; Wang *et al.*, 2020; Zhai *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2021)。此外, 前寒武系白云岩中海相白云石胶结物的发育对白云岩储集层孔隙的形成和保存具有重要意义 (Zhai *et al.*, 2020)。因此, 笔者对近十年来在前寒武系海相白云石胶结物研究中取得的进展进行了系统梳理, 首先从时空分布、矿物岩石学及地球化学等方面全面总结了海相白云石胶结物的特征, 然后评述了其成因机制及研究意义, 指出其中存在的问题, 并对未来研究方向进行了展望。旨在全面系统地综述关于海相白云石胶结物的现有研究成果, 为进一步深入探索海相白云石胶结物的成因提供参考, 推动其在前寒武纪古海洋、古环境领域的应用。

## 2 海相白云石胶结物的时空分布特征

在沉积—早期成岩阶段, 海相白云石胶结物从海水环境中直接沉淀或次生交代形成, 而白云石作为沉积岩中常见的富镁碳酸盐矿物, 广泛分布于前寒武纪地层中, 却在古生代以来的地层中逐渐减少, 在现代自然环境仅少量存在于盐湖、潟湖、微

咸水湖、深海沉积物、洞穴堆积物、地下水及钟乳石中(黄思静, 2010; 李红和柳益群, 2013)。目前已报道的以白云石为主要矿物类型的海相碳酸盐胶结物仅在前寒武系白云岩中发育, 在此对全球已报道的海相白云石胶结物的时空分布特征进行系统总结与对比, 旨在了解目前不同地区的研究程度, 为后续开展相关研究提供参考, 同时揭示不同地区和不同层位的分布差异, 为研究古海洋环境演化提供相关线索。

在空间展布方面, 海相白云石胶结物广泛分布在中国、印度、俄罗斯、挪威、丹麦、美国、加拿大、澳大利亚、纳米比亚、毛里塔尼亚等地, 以北半球为主要分布区, 北美洲和大洋洲报道较多, 亚洲、欧洲和非洲次之(图 1)。在地质历史时期, 海相白云石胶结物主要发育在新元古代, 中元古代有少量分布(图 1)。具体时空分布特征如下:

新元古代埃迪卡拉纪海相白云石胶结物集中分布在中国、美国、澳大利亚和纳米比亚, 俄罗斯次之, 印度有少量分布(图 1)。如, 中国四川盆地陡山沱组(Jiang *et al.*, 2003, 2006)、灯影组(Peng *et al.*, 2018a, 2018b; Cui *et al.*, 2019; Ding *et al.*,

2019; Hu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2021)和塔里木盆地齐格布拉克组(Hu *et al.*, 2022), 美国 Johnnie 组和 Noonday 白云岩(Corsetti *et al.*, 2006; Creveling *et al.*, 2016; Hood and Wallace, 2018), 澳大利亚 Mt. Doreen 组、Olympic 组和 Nuccaleena 组(Kennedy, 1996; Hood and Wallace, 2018), 纳米比亚 Nama 群、Maieberg 组和 Karibib 组(Grotzinger *et al.*, 2000; Hoffman and Macdonald, 2010; Wood and Curtis, 2015; Wallace *et al.*, 2017; Hood and Wallace, 2018), 俄罗斯 Aim 组(Wood *et al.*, 2017)和印度 Upper Krol 组(Tewari and Tucker, 2011)。在中国, 四川盆地震旦系灯影组因其特殊的油气地质意义而被研究得最为深入。灯影组白云岩蕴藏了中国最古老的天然气气藏, 相继发现了威远、安岳等大型气田, 展示了巨大的勘探潜力(金民东等, 2019)。海相白云石胶结物在灯影组二段葡萄花边构造中大量发育, 准同生期岩溶作用和胶结作用对孔隙的发育和保存产生了重大的影响。

新元古代成冰纪海相白云石胶结物多分布在澳大利亚与纳米比亚, 挪威有少量分布(图 1)。如, 澳大利亚 Yankaninna 组、Balcanoona 组和 Angepena

地层	年龄 /Ma	岩石年龄、层位与地区	原始矿物学	数据来源
古生界	寒武系	538.8		
新元界	埃迪卡拉系	545 Ma, Aim Formation, 俄罗斯	白云石、原生沉淀	Wood <i>et al.</i> , 2017
		545 Ma, Nama Group, 纳米比亚	文石, 部分发生拟晶白云石化	Wood and Curtis, 2015
		550 Ma, Upper Krol Formation, 印度	高镁方解石、拟晶白云石化	Tewari and Tucker, 2011
		551 Ma, 灯影组, 中国	文石、高镁方解石、白云石、原生沉淀与拟晶白云石化共存	Ding <i>et al.</i> , 2019; Hu <i>et al.</i> , 2020; Wang <i>et al.</i> , 2020; Zhao <i>et al.</i> , 2021
		570 Ma, Johnnie Formation, 美国	文石或高镁方解石, 拟晶白云石化	Corsetti <i>et al.</i> , 2006
		635 Ma, 陡山沱组, 中国	文石、方解石、拟晶白云石化	Jiang <i>et al.</i> , 2003, 2006
		635 Ma, 齐格布拉克组, 中国	高镁方解石、白云石、原生沉淀与拟晶白云石化共存	Hu <i>et al.</i> , 2022
		635 Ma, Noonday Dolomite, 美国	文石、拟晶白云石化	Creveling <i>et al.</i> , 2016; Hood and Wallace, 2018
		635 Ma, Mt. Doreen Formation, 澳大利亚	白云石或高镁方解石, 存在拟晶白云石化	Kennedy, 1996
		635 Ma, Olympic Formation, 澳大利亚	白云石或高镁方解石, 存在拟晶白云石化	Kennedy, 1996
中元界	成冰系	635 Ma, Nuccaleena Formation, 澳大利亚	白云石, 原生沉淀	Hood and Wallace, 2018
		635 Ma, Maieberg Formation, 纳米比亚	白云石, 原生沉淀	Hoffman and Macdonald, 2018; Wallace <i>et al.</i> , 2016; Hood and Wallace, 2018
		635 Ma, Karibib Formation, 纳米比亚	白云石, 原生沉淀	Hood and Wallace, 2018
		640 Ma, Elbobreen Formation, 挪威	高镁方解石或低有序度白云石, 拟晶白云石化	Fairchild and Hambrey, 1984; Fairchild and Spiro, 1987
		640 Ma, Yankaninna Formation, 澳大利亚	文石, 部分白云石化	Hood and Wallace, 2018
		650 Ma, Balcanoona Formation, 澳大利亚	高镁方解石、白云石、原生沉淀和拟晶白云石化共存	Hood <i>et al.</i> , 2017; Hood and Wallace, 2012, 2015, 2018
		650 Ma, Angepena Formation, 澳大利亚	高镁方解石、白云石、原生沉淀和拟晶白云石化共存	Hood <i>et al.</i> , 2017; Hood and Wallace, 2012, 2015, 2018
		650 Ma, Gause Formation, 纳米比亚	白云石、原生沉淀	Wallace <i>et al.</i> , 2017; Hood and Wallace, 2018
		660 Ma, Rasthof/Berg Aukas Formation, 纳米比亚	高镁方解石、白云石、原生沉淀和拟晶白云石化共存	Wallace <i>et al.</i> , 2017; Hood and Wallace, 2018
		古生界	拉申系	720
750 Ma, Backlundtoppen Formation, 丹麦	高镁方解石, 部分拟晶白云石化			Swett and Knoll, 1989
750 Ma, Beck Spring Dolomite, 美国	文石、高镁方解石、白云石、原生沉淀与拟晶白云石化共存			Tucker, 1982, 1983; Zempolich <i>et al.</i> , 1988; Zempolich and Baker, 1993; Shuster <i>et al.</i> , 2018
760 Ma, Devede Formation, 纳米比亚	高镁方解石、白云石, 原生沉淀与拟晶白云石化共存			Hood <i>et al.</i> , 2015
780 Ma, Draken Formation, 挪威	白云石、文石或高镁方解石, 拟晶白云石化			Fairchild <i>et al.</i> , 1991; Knoll <i>et al.</i> , 1993
中元界	狭带系	1000		
		780 Ma, Horse Thief Springs Formation, 美国	白云石, 原生沉淀	Hood and Wallace, 2018
		1100 Ma, Atar Formation, 毛里塔尼亚	高镁方解石, 部分拟晶白云石化	Fairchild <i>et al.</i> , 1990
		1200		
		1250 Ma, 洛峪口组、黄连梁组、龙家园组, 中国	文石, 拟晶白云石化	Xiao <i>et al.</i> , 1997
古元界	盖层系	1300 Ma, Sulky Formation, 加拿大	方解石, 拟晶白云石化	Bartley <i>et al.</i> , 2014
		1350 Ma, Kotuikan Formation, 俄罗斯	文石, 部分拟晶白云石化	Bartley <i>et al.</i> , 2000
		1400		
1600				

图 1 前寒武系海相白云石胶结物全球时空分布特征

Fig. 1 Global spatial-temporal distribution of the Precambrian marine dolomite cements

组 (Hood *et al.*, 2011; Hood and Wallace, 2012, 2015, 2018), 纳米比亚 Gauss 组和 Rasthof/Berg Aukas 组 (Wallace *et al.*, 2017; Hood and Wallace, 2018) 以及挪威斯瓦尔巴特群岛 Elbobreen 组 (Fairchild and Hambrey, 1984; Fairchild and Spiro, 1987)。

新元古代拉伸纪海相白云石胶结物主要分布在美国与纳米比亚, 丹麦、挪威有少量分布(图 1)。如, 美国 Beck Spring 白云岩和 Horse Thief Springs 组 (Tucker, 1982, 1983; Zempolich *et al.*, 1988; Zempolich and Baker, 1993; Hood and Wallace, 2018; Shuster *et al.*, 2018), 纳米比亚 Devede 组 (Hood *et al.*, 2015), 挪威 Draken 组 (Fairchild *et al.*, 1991; Knoll *et al.*, 1993) 和丹麦 Backlundtoppen 组 (Swett and Knoll, 1989)。

中元古代海相白云石胶结物在中国、俄罗斯、加拿大和毛里塔尼亚零星分布(图 1)。如, 中国洛峪口组、黄连垛组和龙家园组 (Knoll *et al.*, 1993), 俄罗斯 Kotuikan 组 (Bartley *et al.*, 2000), 加拿大 Sulky 组 (Xiao *et al.*, 1997) 和毛里塔尼亚 Atar 组 (Fairchild *et al.*, 1990)。

综上, 中元古代与新元古代均有海相白云石胶结物发育, 当前对新元古代海相白云石胶结物的研究相对较多。新元古代经历了罗迪尼亚超大陆的裂解和冈瓦纳超大陆的聚合、“雪球地球”事件以及后生动物的演化等重要地质事件, 古海洋化学性质可能会发生剧烈的变化 (Anbar and Knoll, 2002; Knoll *et al.*, 2006; Lyons *et al.*, 2014; Planavsky *et al.*, 2014), 海相白云石胶结物的形成被认为与“文石—白云石海”密切相关 (Hood *et al.*, 2011; Wood *et al.*, 2017; Ding *et al.*, 2019; Hu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2021)。海相白云石胶结物的时空分布与大陆地壳变动、冰期—间冰期旋回以及海水性质演化之间可能有着千丝万缕的联系, 但目前收集到的数据尚不足以揭示它们之间的关联, 因此, 在未来有必要基于地质大数据统计进一步对海相白云石胶结物的时空分布规律开展系统研究。

### 3 岩石学、矿物学特征

#### 3.1 发育海相白云石胶结物的围岩沉积特征

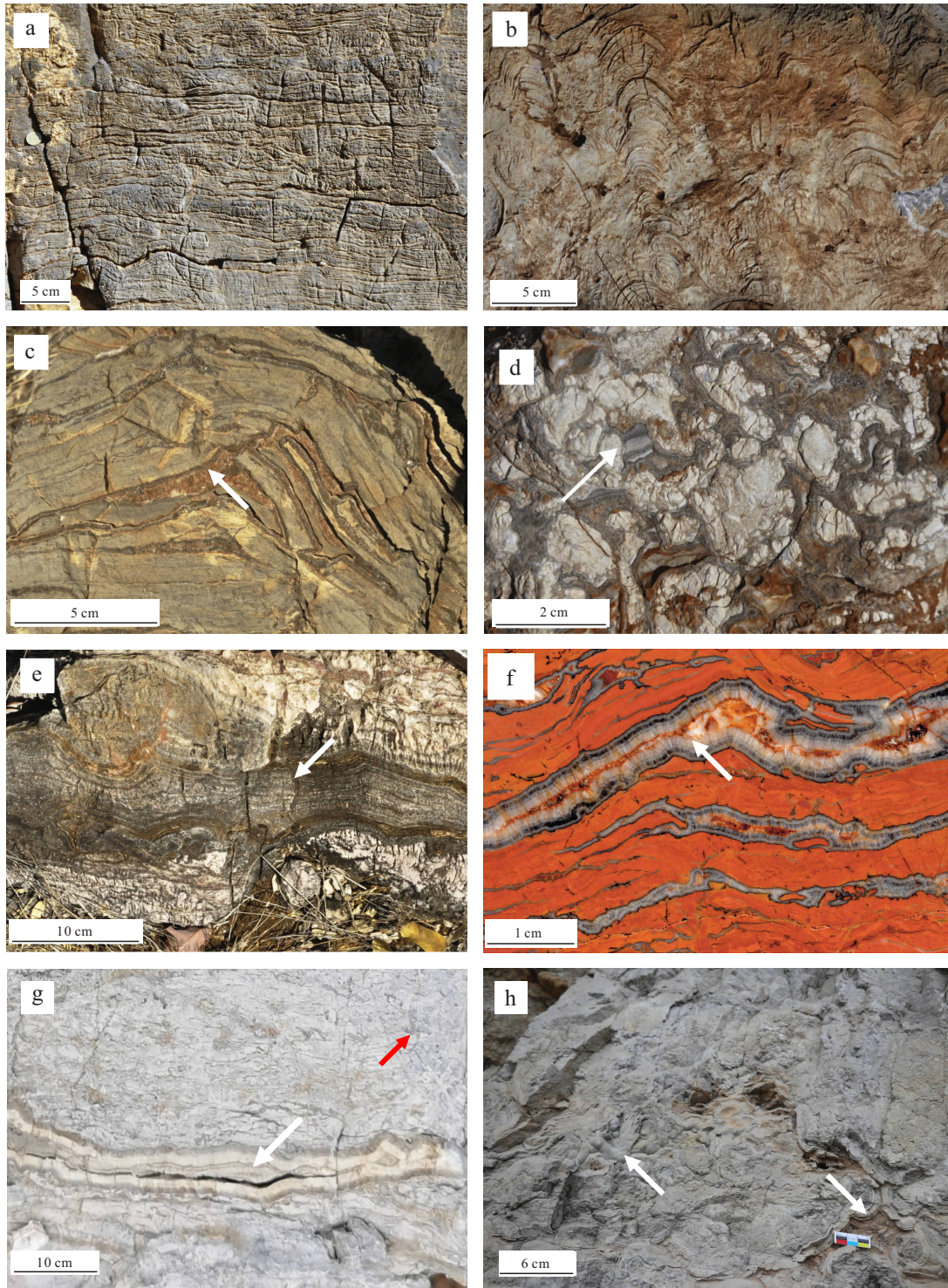
海相白云石胶结物大多发育在具有特殊沉积/

成岩构造的泥晶白云岩、细晶白云岩、微生物白云岩 (凝块、纹层、叠层)、角砾状白云岩中 (图 2), 沉积构造包括层状裂隙 (Sheet crack)、窗格构造 (Fenestrae)、平底晶洞 (Stromatactis) 以及葡萄状 (Botryoidal) 构造等 (Tucker, 1982, 1983; Hood *et al.*, 2011, 2015; Hood and Wallace, 2012, 2015; Wood *et al.*, 2017; Shuster *et al.*, 2018; Cui *et al.*, 2019; Ding *et al.*, 2019; Hu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2021)。对发育海相白云石胶结物的围岩沉积特征进行研究, 有助于判断其同期沉积环境。

纳米比亚 Devede 组旋回内的碳酸盐岩从底部到顶部依次为泥质白云岩、叠层石, 然后是具有帐篷构造的层状白云岩。胶结物—角砾岩相发育在下 Devede 组碳酸盐旋回中, 主要由碎屑或角砾岩组成, 层状白云岩层被广泛胶结(图 2-a), 偶尔发现含叠层石的碳酸盐岩(图 2-b)。岩石学分析表明, 胶结物—角砾岩相由碎屑组成, 这些碎屑通常由层理被破坏的卷曲层状白云岩“壳”组成, 形成圆锥形帐篷状(图 2-c)和角砾状(图 2-d), 常与纤维状白云石胶结的层状裂隙伴生, 这些裂隙数十厘米宽、数米长、平行于层理分布(图 2-e) (Hood *et al.*, 2015)。

层状裂隙构造(图 2-e, 2-f)是由等厚纤维状白云石胶结物充填的顺层分布平行孔洞 (Wallace *et al.*, 2019), 在微生物白云岩和盖帽白云岩中广泛分布 (Hoffman and Macdonald, 2010; Hood and Wallace, 2012, 2015; Wallace *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2021; Gan *et al.*, 2022)。层状裂隙通常归因于体积膨胀, 但造成体积膨胀的原因仍存在争议 (Wallace *et al.*, 2019), 包括冰川消融期间天然气水合物失稳 (Kennedy *et al.*, 2001)、相对海平面快速下降和冰盖消融引起的高孔隙流体压力 (Hoffman and Macdonald, 2010)、流体超压 (Gammon, 2012)、深水白云石过饱和和置换结晶作用 (Wallace *et al.*, 2019) 等。

窗格构造(图 2-g)的特征是在细粒或颗粒支撑的沉积物中具有拉长的水平状窗格, 与层理、交错层排列一致或者呈不规则分布, 可划分为纹层状窗格构造以及不规则的纹层状窗格构造 (Flügel, 2010)。窗格构造在现代潮间带至潮上带环境中很常见, 主要是由潮上带中碳酸盐泥周期性的潮湿和



a—不规则纹层状白云岩，纳米比亚 Devede 组；b—叠层状白云岩，纳米比亚 Devede 组；c—纹层状白云岩（帐篷构造），孔隙被纤维状白云石胶结物充填（白色箭头），纳米比亚 Devede 组；d—角砾状白云岩（白色箭头），被纤维状白云石胶结物包裹，纳米比亚 Devede 组；e—大型层状裂隙（白色箭头），胶结物—角砾岩相，纳米比亚 Devede 组（照片 a-e 来源于文献 Hood *et al.*, 2015）；f—层状裂隙（白色箭头），过渡相，澳大利亚 Balcanoona 组（Hood and Wallace, 2012）；g—泥晶白云岩，发育有窗格孔（红色箭头）和平底晶洞（白色箭头），四川盆地灯影组；h—泥微晶白云岩，葡萄状构造（白色箭头），四川盆地灯影组

图 2 前寒武系海相白云石胶结物围岩特征

Fig. 2 Characteristics of surrounding rock of the Precambrian marine dolomite cements

干燥环境导致 (Shinn, 1968), 或是由蓝藻细菌席表面干化后导致褶曲、隆升以及与邻近沉积物的分离作用造成 (Logan *et al.*, 1974; Hardie, 1977)。

平底晶洞(图 2-g) 以被拉长的具有不规则的顶面和平坦的底面为特征, 呈斑状分布, 或与主要由泥晶组成的灰岩呈互层状产出 (Flügel, 2010)。现代大多数学者均同意平底晶洞这个术语应指通常嵌在泥晶灰岩中的亮晶充填体 (有时是泥质充填的), 是由纤维状或放射状胶结物所形成的孔洞的向心胶结作用而形成 (Flügel, 2010)。平底晶洞孔洞内的胶结物常常是呈连续分布的放射状、纤维状海相白云石胶结物以及后期的埋藏结晶白云石胶结物。

葡萄状构造(图 2-h) 在国内又称“葡萄花边”构造, 对其研究颇为广泛 (向芳等, 1998; 施泽进等, 2011; 张杰等, 2014; 郝毅等, 2015; 林孝先等, 2015; 牟传龙等, 2015; 钱一雄等, 2017a, 2017b)。该构造与国外“胶结卷曲角砾”(Cemented curl breccia (Hood and Wallace, 2018)) 类似, 但“葡萄花边”可以沿孔洞甚至原始孔隙生长, “胶结卷曲角砾”只沿角砾环边生长。对“葡萄花边”构造的成因认识目前较为统一, 即其由准同生期岩溶作用后经早期海水胶结形成, 但对于其中的白云石胶结物的成因还存在一定争议 (Hood *et al.*, 2011, 2015; Hood and Wallace, 2012, 2015, 2018; Wood *et al.*, 2017; Shuster *et al.*, 2018; Ding *et al.*, 2019; Hu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2021)。

准同生期岩溶作用形成的孔洞常被认为是海相白云石胶结物发育的基础。在近地表暴露期间, 潮坪沉积物容易受到侵蚀和风化, 形成不规则的孔洞复合体, 因此孔洞优先发育在近地面暴露的构造中, 如帐篷构造(图 2-c)。孔洞系统包括 2 种主要类型, 即顺层平行孔洞 (长度分米级至米级) 和垂直 (或亚垂直) 孔洞 (一般深度 < 3 m), 它们可以穿过几个潮坪旋回 (Ding *et al.*, 2019)。顺层平行孔洞、层状裂隙和帐篷构造常常连接在一起, 形成在露头中可追踪数十米的连续孔洞系统。帐篷构造的核心常常发生破裂和角砾化, 并显示出类似叠层石的层状孔洞, 这些层状孔洞有时向上延伸到上覆的层状白云岩中; 侧翼由层状白云石组成 (图 2-c), 可能发育层状裂隙 (Jiang *et al.*,

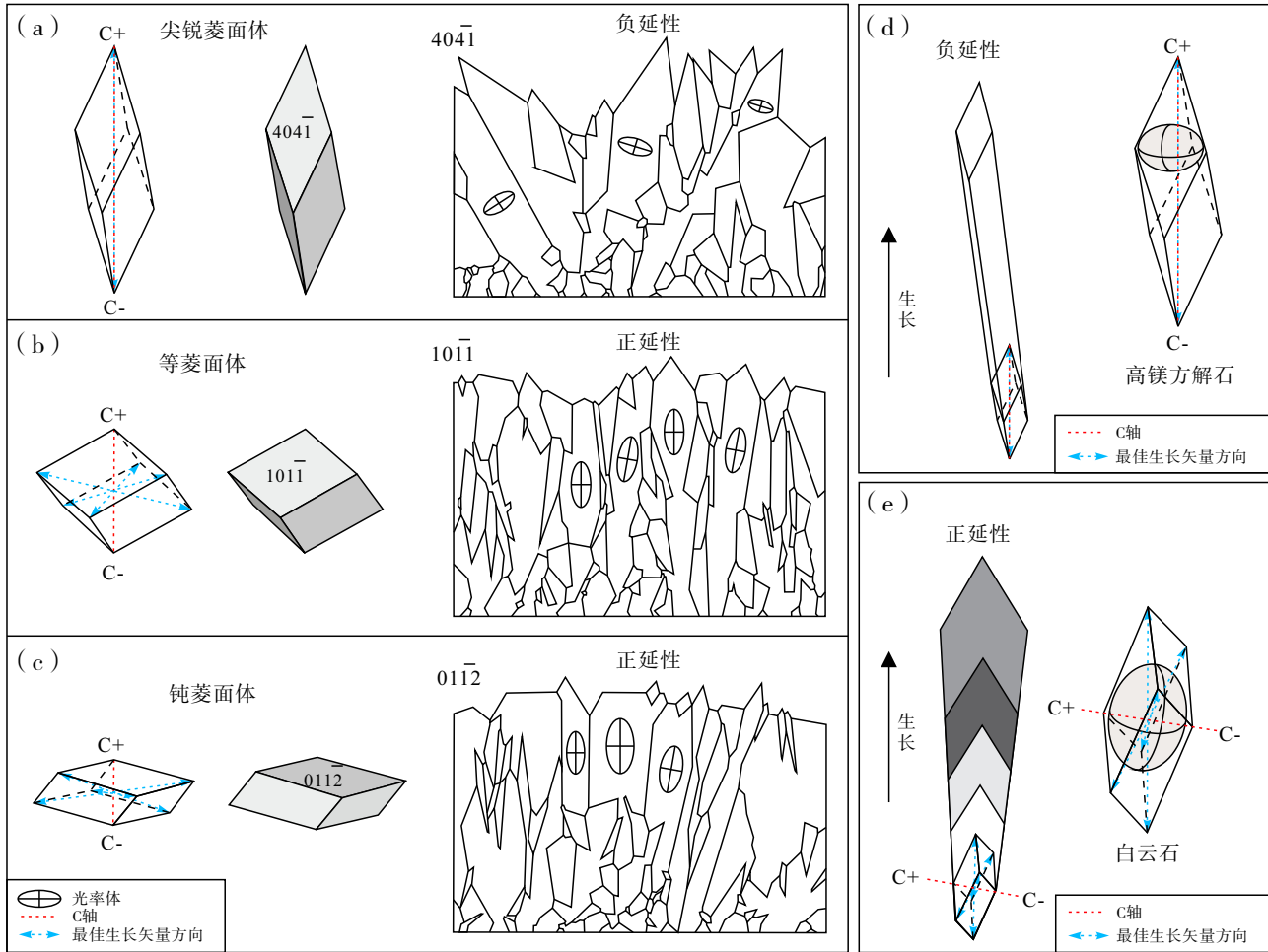
2006)。早期的孔洞填充物主要包括半球状突起、冰柱状悬垂物和破碎的柱状体, 它们分别类似于洞穴中的爆米花石、钟乳石和石笋, 具有微晶白云石特征; 之后的白云石胶结物主要是以等厚环边的纤维状形式沉淀, 源自亚稳定前驱体 (针状镁方解石) 在海侵期间的拟晶白云石化, 具有光滑的生长带和光学连续性 (Ding *et al.*, 2019)。

海相白云石胶结物发育的围岩通常具有上述特殊的沉积构造特征, 对判断同期沉积环境有重要指示意义。在潮坪环境下, 尤其是潮间带至潮上带, 海平面频繁波动造成间歇性暴露, 发生准同生期溶蚀, 形成不同类型的孔洞, 这些孔洞可能成为窗格构造、葡萄状构造及平底晶洞等沉积构造的雏形, 在随后的早期成岩过程中被海相白云石胶结物充填。

### 3.2 海相白云石胶结物的特征及分类

前人已对前寒武系白云石胶结物的特征及分类命名开展了大量研究, 通常根据晶体组合形态、晶体大小、光学性质 (正延性、负延性) 划分胶结物类型。延性是指岩石薄片矿物切面的长方向与光率体长、短半径的关系。当矿物切面的长方向与光率体的长半径平行或夹角小于  $45^\circ$  时为正延性 (length-slow), 反之为负延性 (length-fast)。矿物的延性主要针对纤维状、针状、柱状等一向延长的矿物 (Dickson, 1993)。尖锐菱形体 (acute rhombohedra) 有 2 个生长最快的矢量平行于 c 轴 (图 3-a),  $[401]$  是生长优势最大的晶面, 因此, 尖锐菱形体生长速率高, 成熟后具有负延性光学特性 (图 3-d); 钝菱面体 (obtuse rhombohedra) 和等菱面体 (equant rhombohedra) 有 6 个生长最快的矢量, 均与 c 轴交角较大 (图 3-b, 3-c), 生长优势最大的晶面为  $[101]$  和  $[012]$ , 成熟后显示出正延性 (Dickson, 1993; Zhao *et al.*, 2021) (图 3-e)。对于碳酸盐矿物, 文石和方解石通常为斜面体或尖锐菱面体 (Berner, 1975; Folk, 1974), 而白云石为钝菱面体, 因此文石和方解石纤维状胶结物为负延性, 原生纤维状白云石胶结物为正延性 (Dickson, 1983, 1993; Hood *et al.*, 2011)。

据统计, 海相白云石胶结物按晶体形态可分为纤维状、针状、叶片状 (刃状)、鱼骨状 (Her-



a—尖锐菱面体生长方式；b—等菱面体生长方式；c—钝菱面体生长方式；d—文石或方解石常具有斜面体或尖锐菱面体形态，成熟后具有负延性光学特征；e—白云石具有钝菱面体形态，成熟后具有正延性光学特征

图 3 纤维状胶结物理论生长和成熟图解 (修改自 Dickson, 1993; Zhao *et al.*, 2021)

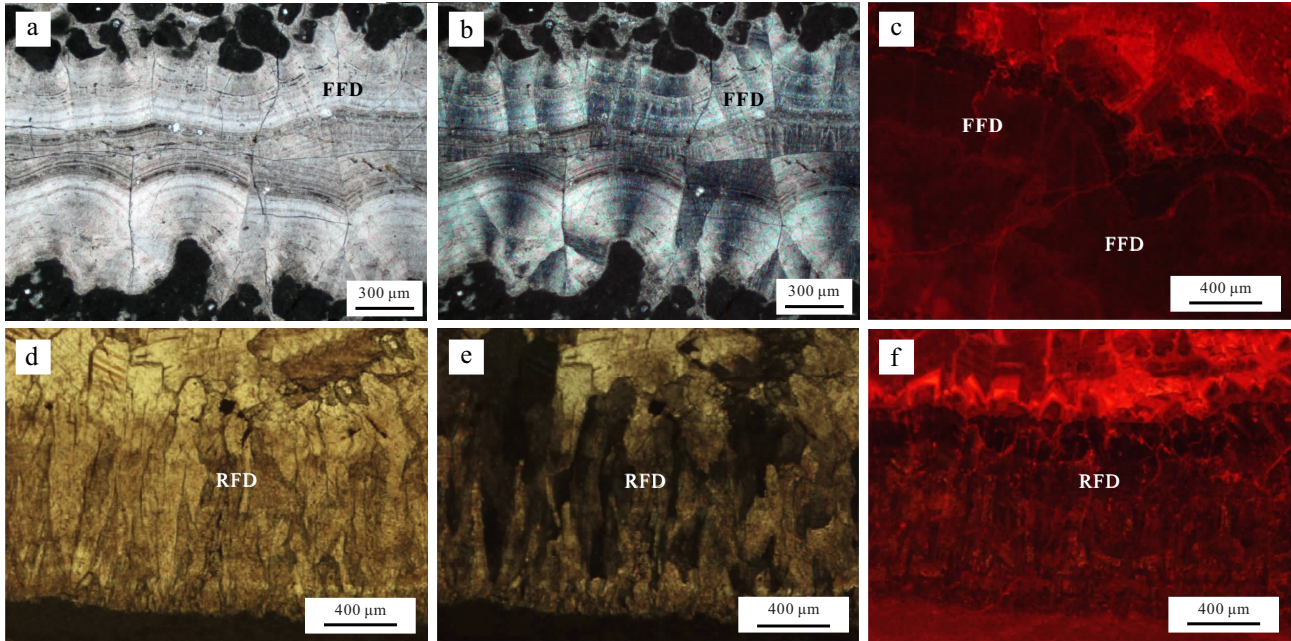
Fig. 3 Diagrams of theoretical growth and maturation of fibrous cements (modified from Dickson, 1993; Zhao *et al.*, 2021)

ringbone) 等 (施泽进等, 2013; Bartley *et al.*, 2015; Wood *et al.*, 2018; Ding *et al.*, 2019; 林雪梅等, 2019; Hu *et al.*, 2020); 根据晶体大小可分为细晶、中晶、粗晶等 (施泽进等, 2013; Jiang *et al.*, 2016; Ding *et al.*, 2019; 林雪梅等, 2019)。纤维状、针状、葡萄状、放射状等典型的海相白云石胶结物, 垂直于被胶结颗粒生长, 胶结物晶体长轴彼此平行或大致平行, 在文中统称为纤维状集合体, 根据其晶体组合形态及上述光学性质可分为丛生状负延性 (Fascicular fast, FFD)、丛生状正延性 (Fascicular slow, FSD)、放射状负延性 (Radial fast, RFD) 以及放射状正延性 (Radial/Radiaxial slow, RSD/RASD) 4 种 (Hood and Wallace, 2012, 2015, 2018; Hood *et al.*, 2011,

2015; Shuster *et al.*, 2018; Hu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2021) (图 4; 图 5)。研究表明, 晶体组合形态受沉淀速率控制, 通常在高沉淀速率下呈丛生状, 而在低沉淀速率下呈放射状 (Kendall, 1977; Dickson, 1983)。

### 3.2.1 丛生状负延性白云石胶结物 (FFD)

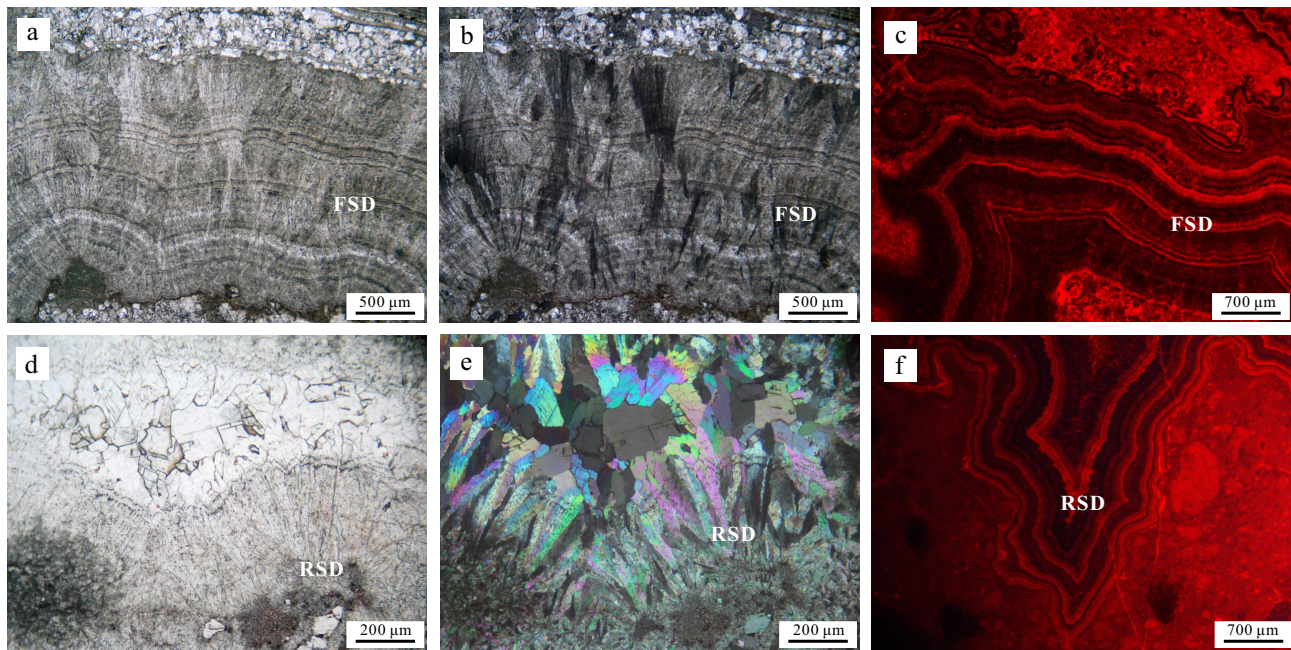
FFD 在全球范围内相比 FSD 与 RSD 分布较少, 在中国、美国以及纳米比亚均有分布 (Hood and Wallace, 2018; Hu *et al.*, 2020; Shuster *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2021)。在手标本中, FFD 呈浅灰色、灰色, 生长在基质白云岩中或孔洞底部, 作为第 1 代胶结物出现。在单偏光下, FFD 呈浅褐色、褐色, 表面浑浊, 通常形成等厚状结壳, 厚度为 100 ~ 500  $\mu\text{m}$ , 由针状晶体组



a, b, c—丛生状负延性白云石 (FFD) 胶结物, a 为单偏光, b 为正交偏光, c 为阴极发光, 四川盆地灯影组, 川北与陕南交界处; d, e, f—放射状负延性白云石 (RFD) 胶结物, d 为单偏光, e 为正交偏光, f 为阴极发光, 川北与陕南交界处, 来源于文献 Zhao 等 (2021)

图 4 负延性白云石胶结物岩石学与矿物学特征

Fig. 4 Petrological and mineralogical characteristics of length-fast dolomite cements



a, b, c—丛生状正延性白云石 (FSD) 胶结物, a 为单偏光, b 为正交偏光, c 为阴极发光, 四川盆地灯影组; d, e, f—放射状正延性白云石 (RSD) 胶结物, d 为单偏光, e 为正交偏光, f 为阴极发光, 四川盆地灯影组

图 5 正延性白云石胶结物岩石学与矿物学特征

Fig. 5 Petrological and mineralogical characteristics of length-slow dolomite cements

成, 宽度小于  $10\ \mu\text{m}$ , 具有负延性光学特征 (图 4-a)。FFD 一般由单个或多个结壳亚层组成, 每个胶结物结壳亚层都有一系列从底部扩展的亚晶

体扇, 亚晶体扇宽度  $50\sim 300\ \mu\text{m}$ , 可能呈现葡萄状形态。在正交偏光下, FFD 显示出强烈的左旋波状消光 (sweeping sinistral extinction) (图 4-b)。左

旋消光被定义为与显微镜载物台旋转方向相反的消光 (Mazzullo, 1980; Hood and Wallace, 2012)。阴极发光下, FFD 表现出均匀的暗红色发光, 没有生长带(图 4-c)。FFD 常以单代胶结物出现在基质白云岩中, 或垂直孔洞壁生长, 其上接替生长 FSD 与 RSD。

### 3.2.2 放射状负延性白云石胶结物 (RFD)

RFD 在全球范围内相对罕见, 仅在中国与美国有零星分布 (Shuster *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2021)。RFD 在手标本中呈灰黑色, 生长在基质白云岩中。在单偏光下, RFD 表现为棕色、褐色, 表面浑浊, 通常形成等厚状结壳, 厚度 100~400  $\mu\text{m}$ , 由单个或多个胶结物结壳亚层组成; 等厚状结壳亚层由放射状晶体组成, 单个晶体长 100~400  $\mu\text{m}$ , 宽 10~50  $\mu\text{m}$ , 晶体边缘较为平整, 具有负延性光学特征(图 4-d)。在正交偏光下, RFD 显示出均匀的直消光 (unit/straight)(图 4-e); 阴极发光下, RFD 表现为均匀的暗红色, 晶体边缘显示出强烈的亮红色发光 (Shuster *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2021)(图 4-f)。RFD 晶体常垂直于基底生长, 并与 FFD 过渡接触 (Shuster *et al.*, 2018)。

### 3.2.3 丛生状正延性白云石胶结物 (FSD)

FSD 在全球范围内广泛分布, 其中在中国、美国、澳大利亚和纳米比亚大量分布 (Hood *et al.*, 2011, 2015; Hood and Wallace, 2012, 2015, 2018; Shuster *et al.*, 2018; Hu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2021)。在手标本中, FSD 呈灰白色、深灰色, 多发育在孔洞中, 作为第 1 代胶结物出现。在单偏光下, FSD 呈浅褐色、浅棕色, 表面浑浊, 通常形成等厚状结壳, 厚度为 100~500  $\mu\text{m}$ , 在胶结物结壳相遇的地方, 晶体末端通常形成光滑的边界(图 5-a)。FSD 一般由单个或多个胶结物结壳亚层组成, 特征是扇形亚晶体束垂直孔洞壁或基底向上生长, 但可能沿其方向逐渐弯曲, 单个扇形亚晶体束长度可至 500  $\mu\text{m}$ , 宽度 50~200  $\mu\text{m}$ , 可以见到较明显的菱形晶体边缘, 具有正延性光学特征(图 5-a)。在正交偏光下, FSD 扇形亚晶体束显示出左旋波状消光(图 5-b); 阴极发光下, FSD 表现为暗红色发光, 具有保存完好的亮红色发光带, 发光带平滑或显示出微小的菱形形态(图 5-c)。FSD 晶体常接替 FFD 生长, 并与

RSD 过渡接触。

### 3.2.4 放射状正延性白云石胶结物 (RSD/RASD)

RSD 在全球范围内分布广泛, 集中分布在中国、美国、澳大利亚和纳米比亚 (Hood *et al.*, 2011, 2015; Hood and Wallace, 2012, 2015, 2018; Shuster *et al.*, 2018; Hu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2021)。在手标本中, RSD 呈灰黑色、灰色, 多发育在孔洞中, 作为第 2 代胶结物出现。在单偏光下, RSD 呈浅褐色、灰色, 表面浑浊, 以等厚状结壳形态出现, 厚度为 100~500  $\mu\text{m}$ (图 5-d)。RSD 一般由单个或多个胶结物结壳亚层组成, 特征是垂直孔洞壁或基底向上连续生长, 单个晶体长度可至 500  $\mu\text{m}$ , 宽度 50~200  $\mu\text{m}$ , 可以见到极明显的菱形晶体边缘, 与 FSD 一样, RSD 也具有正延性光学特征(图 5-d)。在正交偏光下, RSD 表现为直消光(图 5-e); 阴极发光下, RSD 表现为交替的亮红色与暗红色发光带, 暗红色发光带厚度明显大于亮红色发光带, 亮红色发光带具有明显的菱形形态(图 5-f)。RSD 在孔洞中通常接替 FSD 生长, 但也可能以单代胶结物的形式出现。RASD 岩石矿物学特征与 RSD 类似, 晶体大于 RSD, 消光方式略有区别, 其中 RSD 具有单位消光 (unitextinction) 特征, 而 RASD 则呈现与旋转方向相同的波状消光特征, 一般接替 RSD 生长, 因此笔者在这里将 RSD 与 RASD 均归于放射状正延性白云石胶结物。

## 4 地球化学特征

目前对海相白云石胶结物地球化学特征的研究多集中于传统地球化学分析手段, 例如利用碳氧同位素、微量元素、稀土元素等恢复成岩环境及流体性质。近年来, 有少量 Mg 同位素 (Zhang *et al.*, 2022) 和原位 U-Pb 同位素定年 (沈安江等, 2019; 胡安平等, 2020, 2021) 数据报道。

### 4.1 碳氧同位素

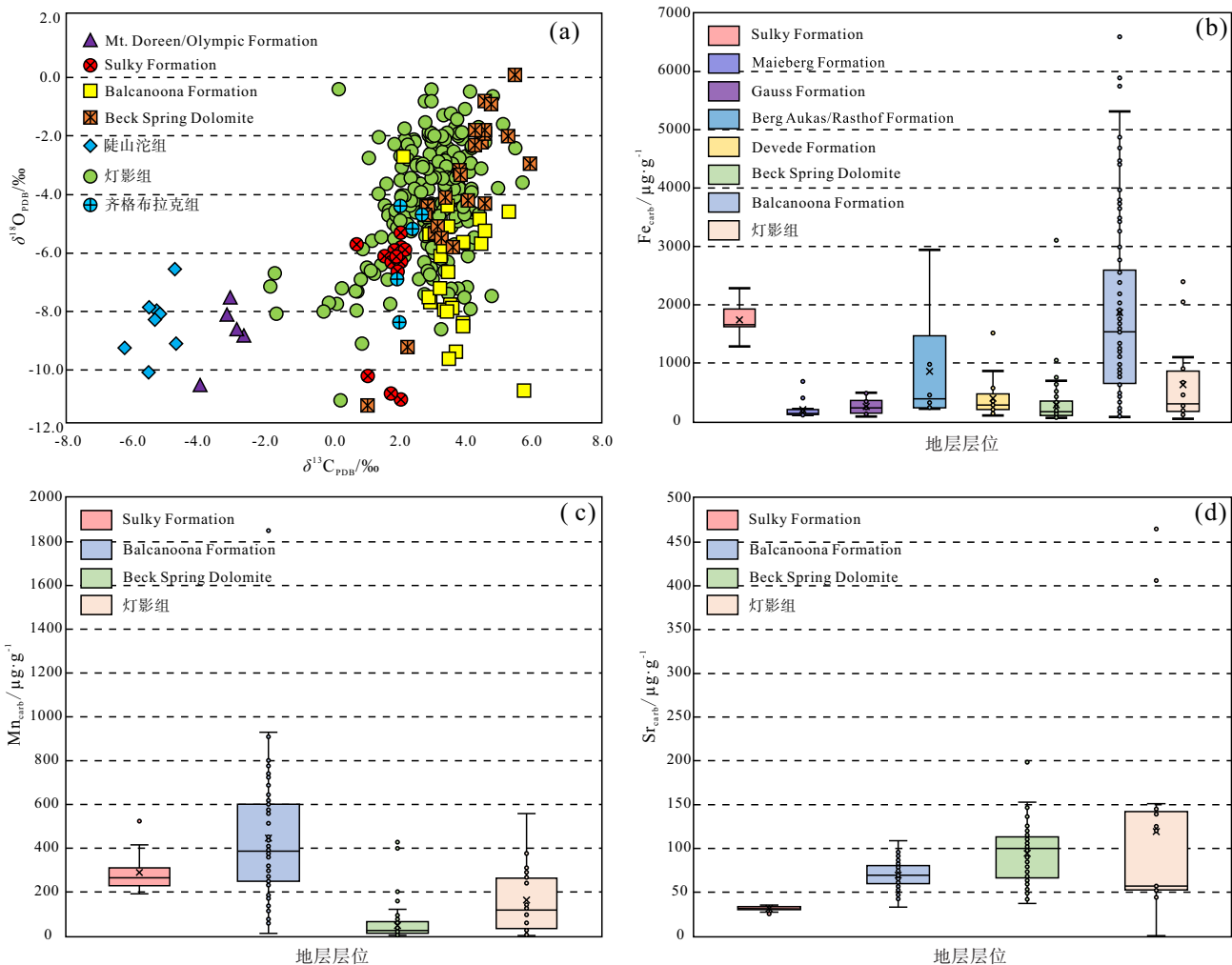
白云石的碳氧同位素对白云石化流体性质及其形成环境有一定指示意义。形成于高盐度蒸发环境中的白云岩具有较高的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值, 而在高温高压深埋藏环境中形成的白云岩则具有较低的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值 (贺训云等, 2014)。 $\delta^{13}\text{C}$ 值受有机质和硫酸盐热化学还原反应 (TSR) 影响较显著, 受温度

和大气淡水影响相对较小，因而其在后期成岩过程中一般变化较小而多体现原岩特征；而  $\delta^{18}\text{O}$  值则会因大气淡水或深埋环境高温影响而呈现较高的负值，其中受到热液影响的  $\delta^{18}\text{O}$  值大多小于  $-10.0\text{‰}$ （贺训云等，2014）。

据统计，全球不同时代、不同地区海相白云石胶结物的  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  值分布区间相似：绝大多数  $\delta^{18}\text{O}$  值分布在  $-10\text{‰} \sim 0\text{‰}$  之间，少量数据低于  $-10.0\text{‰}$ ，这可能是其在后期埋藏过程中受到了一定程度的热液影响； $\delta^{13}\text{C}$  值大多分布在  $0 \sim 6\text{‰}$  之间，少量  $\delta^{13}\text{C}$  值低于 0（图 6-a），例如来自澳大利亚 Mt. Doreen/Olympic 组的数据可能指示了冰期后海洋中富含  $^{12}\text{C}$  有机质埋藏率的下降以及深层缺氧、富含  $^{12}\text{C}$  海水的上涌（Kennedy, 1996）。

## 4.2 Fe、Mn、Sr 元素含量

在白云石成因研究中，常根据 Sr、Fe 和 Mn 等微量元素的含量判断白云石化流体的性质（Land, 1980; Warren, 2000）。在正常埋藏成岩过程中，碳酸盐矿物的 Sr 含量随矿物重结晶而降低。Fe 和 Mn 元素的行为与 Sr 相反，它们不是在成岩过程中受到损失，而是在成岩过程中被碳酸盐矿物吸收。其原因有二：（1）Fe 和 Mn 在海水中含量很低，而在孔隙流体中含量较高；（2）Fe 和 Mn 在溶液中的有效分配系数  $K_e$  值很高。近地表白云石化作用形成的白云石 Mn 和 Fe 含量很低，因为近地表流体处于氧化状态。埋藏成岩作用形成的白云石 Mn 和 Fe 含量相对较高，因为只有在还原环境中



数据来源于文献 Kennedy, 1996; Jiang *et al.*, 2006; Hood *et al.*, 2011; Bartley *et al.*, 2015; Hood and Wallace, 2015; Wallace *et al.*, 2017; Wood *et al.*, 2017; Shuster *et al.*, 2018; Ding *et al.*, 2019; Hu *et al.*, 2020, 2022; Wang *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022

图 6 前寒武系海相白云石胶结物地球化学数据统计

Fig. 6 Global geochemical characteristics of the Precambrian marine dolomite cements

Mn 和 Fe 才能以二价阳离子形式存在于流体中，从而进入白云石晶格。

海相白云石胶结物的 Fe 含量在 0~2000  $\mu\text{g/g}$  之间，而澳大利亚成冰系 Balcanoona 组 Fe 含量较高，为 2000~5000  $\mu\text{g/g}$  (图 6-b)，这可能与成冰纪海水极度缺氧、富铁有关 (Hood and Wallace, 2015)。Mn 含量多分布在 0~800  $\mu\text{g/g}$  之间，与其他地区相比较，澳大利亚成冰系 Balcanoona 组 Mn 含量相对较高(图 6-c)。Sr 含量较低，多分布在 50~150  $\mu\text{g/g}$  之间，其中来自中国灯影组白云石胶结物的 Sr 含量多为 50  $\mu\text{g/g}$  左右 (Hu *et al.*, 2020)，而加拿大中元古界 Sulky 组的 Sr 含量则低于 40  $\mu\text{g/g}$  (Bartley *et al.*, 2015)(图 6-d)。Mn 与 Sr 含量的变化可能反映了不同地区成岩蚀变程度的差异。

### 4.3 Mg 同位素及 U-Pb 同位素定年

Mg 同位素作为研究白云岩成因的新兴手段，已经引起国内外学者的广泛关注 (Azmy *et al.*, 2013; Mavromatis *et al.*, 2014; Geske *et al.*, 2015a, 2015b; Huang *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2016; Peng *et al.*, 2016; Hu *et al.*, 2019, 2021; Ning *et al.*, 2020; 朱光有等, 2023)。作为组成白云石的核心元素，Mg 直接参与了白云石化过程 (甯濛等, 2018)，利用 Mg 同位素可以指示 Mg 的来源 (甯濛等, 2018) 以及半定量一定量地模拟白云石化过程 (Geske *et al.*, 2012; Fantle and Higgins, 2014; Huang *et al.*, 2015; Peng *et al.*, 2016; Hu *et al.*, 2019; Ning *et al.*, 2020)。此外，Mg 同位素还具有识别碳酸盐岩原生矿物类型的潜力 (Kimmig and Holmden, 2017)。因此，利用 Mg 同位素可以对海相白云石胶结物的成因以及原生矿物类型进行判断。但是，目前针对前寒武系海相白云石胶结物的 Mg 同位素研究较少，仅见灯影组的报道 ( $\delta^{26}\text{Mg}$  为  $-1.64\text{‰} \sim -2.25\text{‰}$ ) (Zhang *et al.*, 2022)，并且尚未见到利用 Mg 同位素探索不同类型海相白云石胶结物形成过程的研究。

近年来，碳酸盐矿物的激光原位 U-Pb 同位素定年研究逐渐受到关注 (Li *et al.*, 2014; Coogan *et al.*, 2016; Roberts and Walker, 2016; Nuriel *et al.*, 2017; Roberts *et al.*, 2017; Coogan and Gillis, 2018; Hansman *et al.*, 2018)，该技术可用于确

定白云石化作用 (Pisapia *et al.*, 2018)、断层滑动 (Roberts and Walker, 2016)、区域构造及成岩流体活动 (Denniston *et al.*, 2008; Godeau *et al.*, 2018)、盆地热液演化史和成岩—孔隙演化事件的发生时间 (Godeau *et al.*, 2018; 沈安江等, 2019) 等。开展白云石胶结物 U-Pb 同位素测年研究，为古老海相碳酸盐岩储集层胶结物形成时间确定、成岩—孔隙演化研究和油气运移前有效孔隙评价提供了新方法 (沈安江等, 2019)。四川盆地灯影组白云岩 U-Pb 同位素测年研究表明，同心环边状白云石胶结物年龄为  $546 \pm 7.6 \text{ Ma}$ ，放射状白云石胶结物年龄为  $516 \pm 10 \text{ Ma}$ ，纹层状浅灰色—暗色白云石胶结物年龄为  $482 \pm 14 \text{ Ma}$  (沈安江等, 2019; 胡安平等, 2020, 2021)，据此推测灯影组白云岩储集层经历了原生孔隙 (藻格架孔、粒间孔) 和表生溶蚀孔洞逐渐被充填的埋藏成岩过程 (沈安江等, 2019)。

综上所述，前寒武系海相白云石胶结物的 C、O 同位素组成以及 Fe、Mn、Sr 元素含量并无明显差异(图 6)，不能很好地区分出不同的海相白云石胶结物类型，因此有必要利用全新的地球化学方法对海相白云石胶结物进行研究。现阶段研究中，针对海相白云石胶结物的地球化学数据相对较少，而且很多研究并未区分不同类型海相白云石胶结物，在以后的研究中需加强针对不同类型白云石胶结物的微区或原位地球化学特征研究。

## 5 海相白云石胶结物成因研究现状

目前，对于海相白云石胶结物成因的争议主要集中在原生沉淀 (Hood *et al.*, 2011; Hood and Wallace, 2012, 2015, 2018; Wood *et al.*, 2017) 和由文石或方解石前驱体经拟晶白云石化作用交代形成 (Cui *et al.*, 2019; Ding *et al.*, 2019; 林孝先等, 2015, 2018) 2 个方面。在国内，对海相白云石胶结物成因的研究主要集中在四川盆地陡山沱组、灯影组和塔里木盆地齐格布拉克组，其成因涉及原生沉淀和次生交代 2 类(表 1)。

### 5.1 原生沉淀

海相白云石胶结物的原生沉淀作用是指白云石胶结物直接从海水中沉淀出来。在实验室条件下 ( $20 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ )，无机合成有序白云石

表 1 中国前寒武纪海相白云石胶结物特征及成因

Table 1 Characteristic and origin of the Precambrian marine dolomite cement in China

地区	层位	胶结物特征	成因	数据来源
四川盆地	灯影组	纤维状和放射状,具菱形边缘的阴极发光生长带, FSD;单个或多个结壳亚层, RSD/RASD	原生沉淀	Hu <i>et al.</i> , 2020; Wang <i>et al.</i> , 2020; Zhao <i>et al.</i> , 2021
		纤维状,波状消光,阴极发光呈不发光至暗红色, FFD;平直消光,等厚状结壳,阴极发光呈暗红色,放射状晶体边缘显示强烈的亮红色发光, RFD	次生交代	Peng <i>et al.</i> , 2018b; Hu <i>et al.</i> , 2020; Wang <i>et al.</i> , 2020; Zhou <i>et al.</i> , 2020; Zhao <i>et al.</i> , 2021
	陡山沱组	细针状,等厚状结壳, FFD	次生交代	Jiang <i>et al.</i> , 2003, 2006
塔里木盆地	奇格布拉克组	纤维状,等厚环边,具菱形边缘,阴极发光呈暗红色,具有保存完好的亮红色发光带, FSD	原生沉淀	钱一雄等, 2017b; 石书缘等, 2017; 杨翰轩等, 2020a, 2020b; Tang <i>et al.</i> , 2022; 陈旭东等, 2023

实验的失败表明,白云石在自然环境中难以直接沉淀 (Land, 1998),  $Mg^{2+}$  的水合作用是白云石沉淀的动力学障碍 (Warren, 2000)。1995 年, 瑞士苏黎世联邦理工学院的研究团队利用硫酸盐还原菌首次在低温条件下成功合成了白云石, 由此提出微生物活动可以克服白云石形成的动力学障碍, 为原生白云石的沉淀提供了实验和理论依据 (Vasconcelos *et al.*, 1995)。尽管原生沉淀能否直接形成有序白云石的观点一直备受争议, 但是, Tucker (1982, 1983) 认为前寒武纪海水与现代海水性质有很大差异, 当时海水的高  $Mg/Ca$  值、高  $CO_2$  分压、较高的温度和低  $SO_4^{2-}$  浓度, 可能有利于直接沉淀出原生白云石。

Tucker (1982, 1983) 最早提出美国死亡谷 Beck Spring 白云岩中的颗粒组分 (如鲕粒) 和胶结物可能均属于原生白云石, 这在当时引起了巨大的争议。近十年来, 随着对前寒武系海相白云石胶结物矿物学特征研究的深入, 原生沉淀白云石再度引起人们的关注。Hood 等 (2011) 基于对成冰系 Balcanoona 组海相白云石胶结物矿物学特征的研究, 提出丛生状正延性及放射状正延性白云石胶结物 (FSD、RSD/RASD) 为原生沉淀成因, 其主要鉴定特征为在阴极发光下呈不发光、暗红色或亮红色, 同时存在保存良好的阴极发光生长带, 并且显示出非常明显的菱形边缘, 而这种具有菱形边缘的阴极发光生长带被认为是原生沉淀的直接证据 (Hood *et al.*, 2011, 2016; Hood and Wallace, 2012, 2015, 2018; Wood *et al.*, 2017; Shuster *et al.*, 2018; Hu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2021), 因为拟晶白云石化和重结晶作用会破坏化学生长带。

在四川盆地震旦系灯影组二段发现了大量 FSD 与 RSD/RASD 白云石胶结物, 形态多表现为纤维状和放射状, 具有正延性光学特征以及保存完好的阴极发光生长带, 同时显示出明显的菱形边缘, 被认为是原生沉淀白云石 (图 5) (Hu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2021)。尽管前寒武系海相白云石胶结物的原生沉淀成因被越来越多的学者所接受, 但是依然缺乏对其具体形成机制的研究, 尤其是在微生物广泛发育的前寒武纪海洋中, 微生物是否参与原生白云石的沉淀尚未得到有效评估。

## 5.2 次生交代

海相白云石胶结物的次生交代成因指文石或方解石前驱体经拟晶白云石化作用交代形成的白云石。Sibley (1991) 通过对比新生代与古生代白云岩的结构提出了拟晶白云石化作用, 它是指在交代过程中原始的异化颗粒 (allochem) 或胶结物的形态和内部结构完整保存。

等厚纤维状、针状是从海水中直接沉淀的文石的常见组构, 针状文石的晶体生长方向具有较好的一致性, 如果从不同球形颗粒的基底上向相反的方向生长并在粒间孔隙中相遇, 会形成一种多边形的妥协边界 (Flügel, 2010; 黄思静, 2010) (图 4-a, 4-b)。同时, 纤维状高镁方解石在理论上可细分为放射轴状方解石 (radial calcite)、丛生状方解石 (fascicular-optic calcite)、放射状方解石 (radial calcite) 3 种类型 (Schneidermann and Harris, 1985)。前寒武系海相白云石胶结物大多具有纤维状、针状以及葡萄状的外形, 实际观察到的 FFD 与 RFD 均保留了较完好的丛生状与放射状原始形

态, 这为拟晶白云石化提供了证据。

理论上, 纤维状白云石胶结物应为正延性 (Hood *et al.*, 2011) (图 3), 但 FFD 与 RFD 实际上表现为负延性, 这意味着纤维状负延性白云石胶结物是次生成因 (Zhao *et al.*, 2021)。研究表明, 方解石 (高镁方解石和低镁方解石) 和白云石属于三方晶系, 二者之间通常会发生共轴交代 (Putnis, 2009; Putnis and Austrheim, 2010; Hu *et al.*, 2020), 而文石属于斜方晶系, 通常不会与白云石发生共轴交代 (Coniglio *et al.*, 1988)。通常情况下, 共轴白云石化能够更好地保存高镁方解石的原始结构 (Coniglio *et al.*, 1988; Vousdoukas *et al.*, 2007), 但 FFD 的原始结构保存较差, 表明可能是非共轴白云石化破坏了原始结构 (Zhao *et al.*, 2021), 而 RFD 的一些原始结构并未被破坏, 如原始放射状纤维方解石的直双晶面 (Schneidermann and Harris, 1985) 保留了下来, 这是共轴白云石化的有力证据 (Zhao *et al.*, 2021), 因此, FFD 和 RFD 的前驱矿物可能分别为文石或高镁方解石 (Zhao *et al.*, 2021)。此外, 少量 FFD 形态呈葡萄状, 或具有方形晶体边缘, 可能指示 FFD 的前驱矿物为文石 (Ginsburg and James, 1976; Grammer *et al.*, 1993; Tucker and Wright, 2009; Cui *et al.*, 2019)。

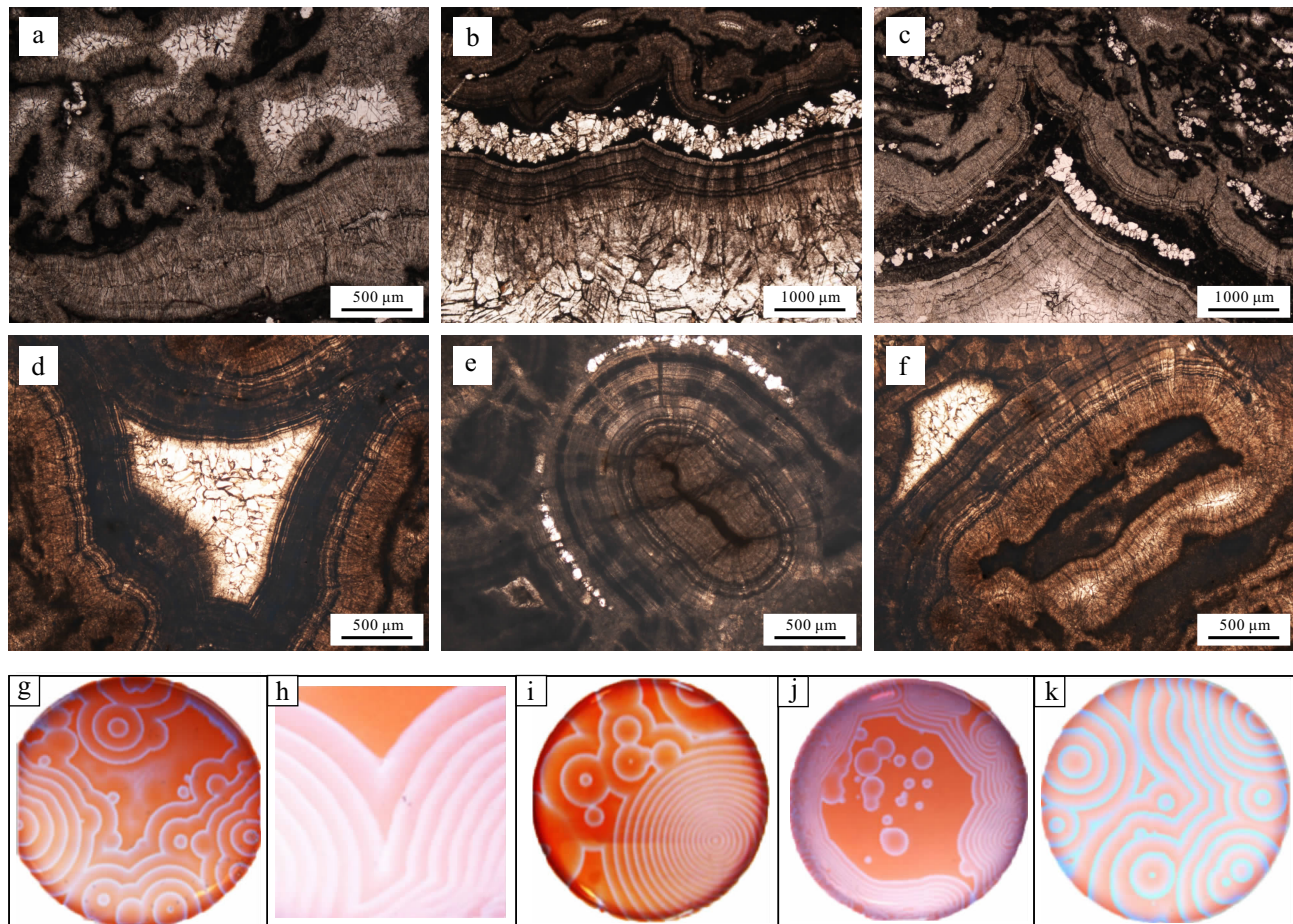
目前对于中国发育的海相白云石胶结物成因, 不同学者的观点不尽一致。对四川盆地灯影组的研究较为深入, 基于其岩石学、矿物学特征划分了不同的海相白云石胶结物类型: Hu 等 (2020)、Wang 等 (2020)、Zhao 等 (2021) 分别识别出了原生沉淀和次生交代 2 种成因类型, 认为呈纤维状和放射状形态且具备保存完好的菱形边缘阴极发光生长带的 FSD 和 RSD/RASD 为原生沉淀成因 (表 1), 而具有纤维状和波状消光、阴极发光呈不发光至暗红色的 FFD 则为次生交代成因 (表 1)。Peng 等 (2018b) 和 Zhou 等 (2020) 也识别出了具有类似特征的 FFD。Zhao 等 (2021) 进一步研究发现一种具有厚状结壳或由等厚状亚结壳组成的 RFD, 其晶体边缘平整, 呈放射状排列, 正交偏光下呈直消光, 阴极发光下显示均匀的暗红色, 且晶体边缘显现强烈的亮红色发光, 并将其归因于次生交代成因 (表 1)。前人对陡山沱组海相白云石胶结物的成因研究相对较少, 缺乏对不同胶结物类型的

进一步划分, 但 Jiang 等 (2003, 2006) 基于其微观形态分析, 认为其普遍是文石、方解石前驱体拟晶白云石化交代形成的, 具有等厚状结壳, 由针状晶体组成 (表 1)。在塔里木盆地塔北地区的震旦系奇格布拉克组中共识别出 3 期主要的白云石胶结物, 其中第 1 期为原生沉淀的海相白云石 (钱一雄等, 2017b; 石书缘等, 2017; 杨翰轩等, 2020a, 2020b; Tang *et al.*, 2022; 陈旭东等, 2023) (表 1)。

总的来说, 正延性胶结物在阴极发光下保存完好的具有菱形边缘的化学生长带被认为是原生沉淀的重要证据 (Hood *et al.*, 2011; Hood and Wallace, 2012; Wood *et al.*, 2017; Shuster *et al.*, 2018; Hu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2021), 负延性白云石胶结物则可能是在同沉积期由文石或高镁方解石经拟晶白云石化作用形成 (Shuster *et al.*, 2018; Ding *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2021)。目前对原生沉淀与次生交代成因海相白云石胶结物的判断主要基于矿物学特征的差异, 缺乏地球化学证据的支持。同时, 对原生沉淀白云石胶结物的具体沉淀机理研究仍不清楚, 对次生交代成因白云石胶结物的前驱矿物类型研究也存在争议。

### 5.3 胶结物的生长组合形态

海相白云石胶结物大多发育在顺层分布的层状裂隙及孔洞中, 呈等厚纤维状/纹层状, 纹层平直或不规则, 形成独特的生长组合形态 (图 7)。等厚纹层可以呈线状展布在基质白云岩中或垂直孔洞壁向心连续生长, 等厚纹层相接触时会形成破坏性干扰纹层, 形似一本打开的书 (open book structure), 此外等厚纹层也可以表现为同心圆状或只向一侧展布生长的半同心圆状 (图 7-a 至 7-f)。尽管对海相白云石胶结物成因已经开展了大量研究, 但对其特殊的生长组合形态却始终没有合理的解释。前人研究发现, 前寒武纪地层中发育与海相白云石胶结物组合形态极为相似的硅质胶结物 (Papineau *et al.*, 2016, 2017, 2021; Dodd *et al.*, 2018; Papineau, 2020; Gabriel *et al.*, 2021)。近年, Papineau 等 (2021) 基于对这些葡萄状、纤维状硅质胶结物形态特征的研究, 提出可利用化学振荡反应来解释这些特殊的生长组合形态 (Papineau *et al.*, 2021; Varkouhi *et al.*, 2022)。



a—胶结物在泥晶白云岩中线状展布，灯影组，四川盆地乐山先锋剖面；b, c—胶结物垂直孔洞壁向心生长，灯影组，四川盆地乐山先锋剖面；d—破坏性干扰纹层，翻开的书状结构（open-book structure），灯影组，四川盆地；e—胶结物同心圆状生长，灯影组，四川盆地乐山先锋剖面；f—胶结物半同心圆状生长，灯影组，四川盆地乐山先锋剖面；g-k—化学振荡反应实验，自重复模式（Papineau *et al.*, 2021）

图 7 海相白云石胶结物生长组合形态

Fig. 7 Growth assemblage pattern of marine dolomite cements

化学振荡反应（chemically oscillating reaction）是在有机酸脱羧过程中产生自重复圆形同心圆形的非生物过程（Papineau *et al.*, 2021; Varkouhi *et al.*, 2022）。化学振荡反应的实验原液多是经典 Belousov-Zhabotinsky (B-Z) 反应的反应物，由不同量的  $H_2SO_4$ 、 $NaBrO_3$ 、丙二酸、 $NaBr$  溶液组成，并加入硫酸亚铁氧化还原指示剂以及表面活性剂。研究表明，硅质矿物以及有机质的分布特征表明自重复形貌可能来源于早期的羧酸脱羧基反应（Varkouhi *et al.*, 2022），当铈、锰离子或铁被用作催化剂时，这种脱羧基化过程可以在溶液中随机定位的点扩展产生氧化波，在几分钟的时间尺度内通过液体介质径向传播，并显示同心等距环（Kipri-janov, 2016）。自重复形貌一般被描述为具有梯度的圆形同心波，在它们相交的地方，产生一个被消

除或部分消除的痕迹，最终导致孔洞、同心圆状纹层、孤立的玫瑰花结（isolated rosette）以及破坏性干扰纹层（Open-Book）等结构的形成（Papineau *et al.*, 2021; Varkouhi *et al.*, 2022）（图 7-g 至 7-k）。

尽管葡萄状、纤维状硅质胶结物特殊的生长组合形态被视为非生物成因，但这些非生物结构的形成与生物相关的羧酸密切相关（Varkouhi *et al.*, 2022）。微生物新陈代谢产生的丙二酸、琥珀酸和  $\alpha$ -酮戊二酸等羧酸可在成岩过程中促进化学振荡反应的发生，例如在陡山沱组或灯影组沉积时期，活跃的微生物活动可能产生大量羧酸，而含氧和富含氧化剂的孔隙水是发生化学振荡反应和形成葡萄状结构的理想场所（Papineau *et al.*, 2021）。通过对比发现，前寒武系海相白云石胶结物（如灯影组）的生长组合形态与化学振荡反应产生的自相

似形貌极为相似(图 7),同时,前寒武纪微生物席的广泛发育也可为化学振荡反应的发生提供充足的羧酸以及适宜的孔隙水条件。化学振荡反应为解释前寒武系海相白云石胶结物特殊的生长组合形态提供了一种可能性,未来可以围绕这一方向开展深入研究。

## 6 海相白云石胶结物研究的地质意义

目前针对前寒武系海相白云石胶结物的研究主要集中在 2 个方面,分别是白云石本身的成因和其记录的前寒武纪特殊的古海洋性质。因此,对海相白云石胶结物开展研究主要有两方面的地质意义,一是可以为解决“白云岩问题”提供新的研究视角,二是对前寒纪古海洋性质研究提供有效载体。

### 6.1 对“白云岩问题”的启示

困扰沉积学界 200 多年的“白云石/岩问题”(Van Tuyl, 1916a, 1916b)主要涉及两方面的内容:一是矿物问题,即低温白云石矿物的实验室合成;二是岩石问题,即白云岩在前寒武纪和古生代地层中极其发育,多呈台地尺度分布,但在对白云石过饱和的现代海水中却十分罕见。20 世纪末,随着微生物因素的引入(Vasconcelos *et al.*, 1995),白云岩研究领域迎来了新的篇章(McKenzie and Vasconcelos, 2009; 李波等, 2010; 由雪莲等, 2011)。过去几十年里,微生物诱导白云石形成的机理不断得到完善(Petrash *et al.*, 2017; 许杨阳等, 2018),并且受其启发,国内外各研究团队在加入各类有机或无机催化剂的条件下,如微生物细胞壁或胞外聚合物(EPS)(Krause *et al.*, 2012; Kenward *et al.*, 2013)、溶解硫化物(Zhang *et al.*, 2012a)、多糖(Zhang *et al.*, 2012b)、黏土矿物(Liu *et al.*, 2019)、溶解硅( $\text{Si}(\text{OH})_4$ )(Fang and Xu, 2022)、乙醇(Fang *et al.*, 2021)、溶解  $\text{Mn}^{2+}$ (Han *et al.*, 2024)等,对低温白云石的沉淀实验进行了许多成功尝试,进一步明确了低温条件下各类催化剂的催化机制,包括如何促进  $\text{Mg}^{2+}$  去水合及白云石晶体的成核。因此,低温合成白云石的难题已不再是制约解决“白云石/岩问题”的关键。近期,刊登在 Science 的封面文章通过原子模拟和实验室原位观测,从微观原子尺度提出了一种新的白云石晶体生长理论,认为溶液在过

饱和一欠饱和状态之间的循环波动,可以促使白云石生长加速高达 7 个数量级(Kim *et al.*, 2023)。不可否认,该项研究丰富了白云石矿物的生长机理,但是如何从微观原子级别的晶体生长机制拓展到宏观地质尺度白云岩的形成及分布,依然是亟待解决的问题。

地质学家已经认识到,仅在晚期/埋藏成岩过程中的白云石化作用似乎并不能有效解释地质历史时期白云岩的非均匀分布(Peters *et al.*, 2017)。海水作为地球表面分布范围最广、体积最大的水体,其性质的演变很可能对白云岩的非均匀分布具有重要影响(Chang *et al.*, 2020)。海相白云石胶结物在前寒武纪全球范围内大量发育,既有原生成因(FSD、RSD/RASD),又有次生交代成因(FFD、RFD)。前人研究发现,前寒武纪海水缺氧(Hood *et al.*, 2011; Hood and Wallace, 2012, 2015; Hood *et al.*, 2016; Wood *et al.*, 2017; Shuster *et al.*, 2018; Hu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020)、高 Mg/Ca 值(Tucker, 1982, 1983; Shuster *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2021)、高碱度(Cui *et al.*, 2016, 2019; Shuster *et al.*, 2018)、低硫酸盐(Hurtgen *et al.*, 2002; Frank and Fielding, 2003; Algeo *et al.*, 2015)以及活跃的微生物活动(Shuster *et al.*, 2018; Hu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; 钟怡江等, 2022)等特殊条件,可能为拟晶白云石化作用的发生以及原生白云石的沉淀提供有利条件,从而促进前寒武系白云岩的大规模形成。从前寒武纪特殊的海水物理、化学性质入手,结合微生物等催化剂在白云石沉淀过程中所起到的重要作用,加强对海相白云石胶结物成因以及生长组合形态形成过程的研究,可以为解决“白云岩问题”提供一个新的视角。

### 6.2 对前寒武系海水性质的启示

前寒武系白云岩广泛的发育本身可能反映了前寒武纪特殊的海水性质(Hood and Wallace, 2014; Wallace *et al.*, 2017; Kalderon-Asael *et al.*, 2021; Stacey *et al.*, 2023; Lamothe *et al.*, 2024)。显生宙以来海水性质呈现“文石海”和“方解石海”的交替演化。一般使用  $\text{Mg}/\text{Ca}=2$  作为“文石海”与“方解石海”的划分标准(Hardie, 1996; Stanley and Hardie, 1998),海水  $\text{Mg}/\text{Ca}>2$  称为“文石海”,  $\text{Mg}/\text{Ca}$  比  $\leq 2$  称为“方解石海”(Hardie,

2003)。Hood 等 (2011) 基于对澳大利亚南部成冰系 Balcanoonna 组 (650 Ma) 的 Oodnaminta 和 Arkaroola 礁体中发育的海相白云石胶结物的研究, 认为成冰纪海水化学性质完全不同于显生宙海水, 并提出了“文石—白云石海”这一概念 (Tucker, 1982, 1983; Hood *et al.*, 2011, 2016; Hood and Wallace, 2012, 2015; Wood *et al.*, 2017; Shuster *et al.*, 2018; Ding *et al.*, 2019; Hu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2021)。近年来, 这一观点被越来越多的学者所接受 (Ding *et al.*, 2019; Hu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2021), 并将其发育时间拓展到埃迪卡拉纪。成冰纪“文石—白云石海”的出现可能与新元古代极端冰川事件和海洋缺氧相关。成冰纪晚期的海洋存在明显的化学分层, 海水富  $Mg^{2+}$ , 同时  $\delta^{238}U$  和微量元素特征反映了一个富  $Fe^{2+}$ 、极端缺氧的海洋环境 (Hood and Wallace, 2012, 2015; Hood *et al.*, 2016)。Wood 等 (2017) 根据俄罗斯东西伯利亚地台生物化石记录和海相碳酸盐岩胶结物的分布情况, 认为在约 545 Ma 之前, 是铁质缺氧的“文石—白云石海”, 出现铁质海相白云石胶结物; 约 545 Ma 之后, 海水转变为“文石海”, 发育海相文石和高镁方解石胶结物; 直到早寒武世 Stage 3, 海水进一步转变为“方解石海”, 出现第 1 批海相低镁方解石胶结物。通过对上扬子地区灯影组海相原生白云石胶结物的研究, 有学者提出埃迪卡拉纪末期可能广泛存在“文石—白云石海” (Wang *et al.*, 2020) 或区域性短期存在“白云石海” (Zhao *et al.*, 2021)。有研究表明, 埃迪卡拉纪末期海相白云石胶结物的形成可能与微生物活动有关 (Hu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020), 微生物活动促进了从硫化 (euxinic) 孔隙水中直接沉淀出白云石 (Hu *et al.*, 2020)。埃迪卡拉末期泛大陆与非洲大陆碰撞拼接, 大陆风化速率较高 (Li *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2018), 营养物质输入的增加提高了海洋初级生产力, 进而促进海洋中微生物活动的活跃 (Wang *et al.*, 2020)。海相白云石胶结物的岩石学、矿物学特征及现有地球化学研究表明, “文石—白云石海”具有极度缺氧、高  $Mg/Ca$  值、微生物活跃等特征 (Hood *et al.*, 2011; Hu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Wood *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2021), 但这种特殊性质的海水

如何促进原生白云石的沉淀及拟晶白云石化的发生, 以及“文石—白云石海”产生的原因和演化依然不清楚。

此外, 海相白云石胶结物由于从海水中直接沉淀并且保留了原始海水化学信号 (Hood and Wallace, 2014), 被认为是重建地质历史时期海水性质的可靠载体 (Hood and Wallace, 2014; Wallace *et al.*, 2017; Kalderon-Asael *et al.*, 2021; Stacey *et al.*, 2023; Lamothe *et al.*, 2024)。Hood 和 Wallace (2014) 基于对澳大利亚南部成冰系 Balcanoonna 组 (650 Ma) Oodnaminta 礁体中发育的海相白云石胶结物的氧化还原敏感元素 (Fe、Mn、稀土元素等) 分析, 构建了从浅水到深水的古海洋氧化还原结构, 此外, 深海和浅海胶结物表现出与现代缺氧盆地相似的稀土元素 (REE) 分布特征, 证实了成冰纪缺氧环境的存在。Stacey 等 (2023) 基于对纳米比亚 Devede 组碳酸盐岩旋回中海相白云石胶结物的微量元素和稀土元素分析, 认为 Devede 组沉积在以缺氧为主的浅海环境中, 可能经历了短暂的氧化作用, 这与前人基于沉积学研究得出的结论一致, 即从 Nosib 组和 Beesvlakte 组沉积期间的氧化环境 (由蒸发岩假体和富铁氧化物碎屑指示) 转变为 Devede 组沉积期间逐渐缺氧的环境 (由原生海相白云石沉淀指示) (Jennings and Bell, 2010; Hood *et al.*, 2015)。Lamothe 等 (2024) 研究了南澳大利亚阿德莱德盆地埃迪卡拉系 Nuccaleena 组盖帽白云岩和基底 BraChina 组, 以确定这些地层沉积时期的古海洋氧化还原状况, 其中对盖帽白云岩层状裂隙中的纤维状白云岩胶结物的阴极发光和原位微量元素分析表明, 古海洋性质从南部的富氧环境 (高铁、锰和 Ce 异常) 过渡到北部的缺氧环境 (高铁、锰和无 Ce 异常), 表明埃迪卡拉纪早期海洋具有氧化还原分层结构, 含氧水仅在一定深度发育, 而较深的水体仍然是缺氧、铁化的, 其化学成分与早 Tonian 期和成冰纪海水相似。Wallace 等 (2017) 利用前寒武系海相白云石胶结物的稀土元素分析, 发现在埃迪卡拉纪海洋含氧量仅适度增加, 进一步证实了前寒武纪古海洋的缺氧环境。Kalderon-Asael 等 (2021) 利用锂同位素系统示踪长期碳和硅循环, 以保存完好的早期海相碳酸盐胶结物 (包括白云石和方解石) 为载体和标准, 筛选有效数据, 反演古海洋的元素

循环机制,认为前寒武纪低  $\delta^7\text{Li}_{\text{sw}}$  值与早期陆地和海洋锂循环的变化相关,这些变化可能源于河流和海洋锂埋藏过程中的不同分馏机制,陆生植物的出现、黏土矿物的形成以及生物控制硅循环在这一过程中发挥了重要作用,这些因素共同推进了地球碳循环模式从前寒武纪到现代的渐进转变。

## 7 总结与展望

海相白云石胶结物仅在前寒武纪地层中发育,根据晶体组合形态和光学性质可将其划分为 4 种类型,包括丛生状负延性 (FFD)、丛生状正延性 (FSD)、放射状负延性 (RFD) 以及放射状正延性 (RSD/RASD) 白云石胶结物,其成因包括原生沉淀与次生交代。原生沉淀白云石 (FSD、RSD/RASD) 具有正延性光学特征以及阴极发光下保存完好的具有菱形边缘的生长带,次生交代白云石 (FFD、RFD) 则以文石或高镁方解石原始形态的保存而被认为由拟晶白云石化作用形成。对海相白云石胶结物开展研究主要有两方面的重要意义,一是海相白云石胶结物因其独特的结构和成因,可以为解决“白云岩问题”提供新的研究视角,二是海相白云石胶结物仅在前寒纪发育,可能反映了当时特殊的海水性质。尽管目前对海相白云石胶结物的特征及成因研究已经取得一定进展,然而仍存在若干问题。针对这些问题,笔者提出了未来需加强研究的几方面内容。

1) 目前对海相白云石胶结物成因的研究主要基于对其矿物学特征的分析,原生沉淀和拟晶白云石化作用 2 种观点共存,缺乏独立的地球化学证据约束。因此,在未来的研究中建议基于矿物的成核与生长原理,开展更加精细的原生与次生白云石胶结物岩石学、矿物学对比研究,同时结合微区或原位地球化学分析方法探索不同类型海相白云石胶结物的成因,并加强对其不同生长组合形态的成因与控制因素的研究。

2) 前寒武纪海洋中微生物广泛发育,前寒武系白云岩的形成多被认为与微生物作用密切相关。然而,在海相白云石胶结物形成过程中,微生物是否参与以及其作用机制仍不明确。此外,现有的岩石学及地球化学分析手段并不能很好地阐明微生物活动的影响。因此,迫切需要开发新的有机或无机地球化学指标以评估微生物活动的影响,同时可与

现代微生物白云石开展对比研究,以揭示前寒武纪活跃的微生物活动在海相白云石胶结物形成过程中起到的具体作用。

3) 前寒武纪“文石—白云石海”产生的根本原因仍不清楚,这种特殊的海水化学条件如何促进白云石的形成亟需进一步研究。只有在对前寒武系白云石胶结物成因有清晰认识的基础上,才能对其记录的原始地球化学信息进行恢复,进而揭示“文石海”转变为“白云石海”的触发机制,以深入探索前寒武纪古海洋性质的演化。

## 参考文献 (References)

- 陈旭东,许启鲁,郝芳,陈永权,易艳,胡方杰,王晓雪,田金强,王广伟. 2023. 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. 中国科学: 地球科学, 66(10): 2311-2331. [Chen X D, Xu Q L, Hao F, Chen Y Q, Yi Y, Hu F J, Wang X X, Tian J Q, Wang G W. 2023. Dolomite reservoir formation and diagenesis evolution of the UpperEidacaran Qigebrak Formation in the Tabei area, Tarim Basin. *Scientia Sinica (Terrae)*, 66(10): 2311-2331]
- 郝毅,周进高,陈旭,潘立银,胡圆圆,胡安平. 2015. 四川盆地灯影组“葡萄花边”状白云岩成因及地质意义. 海相油气地质, 20(4): 57-64. [Hao Y, Zhou J G, Chen X, Pan L Y, Hu Y Y, Hu A P. 2015. Genesis and geological significance of Upper Sinian Dengying dolostone with grape-lace shaped cement, Sichuan Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 20(4): 57-64]
- 贺训云,寿建峰,沈安江,吴兴宁,王永生,胡圆圆,朱玮,韦东晓. 2014. 白云岩地球化学特征及成因: 以鄂尔多斯盆地靖西马五段中组为例. 石油勘探与开发, 41(3): 375-384. [He X Y, Shou J F, Shen A J, Wu X N, Wang Y S, Hu Y Y, Zhu Y, Wei D X. 2014. Geochemical characteristics and origin of dolomite: a case study from the middle assemblage of Majiagou Formation Member 5 of the west of Jingbian Gas Field, Ordos Basin, North China. *Petroleum Exploration and Development*, 41(3): 375-384]
- 胡安平,沈安江,王永生,潘立银,梁峰,罗宪婴,余敏,陈薇,秦玉娟,王慧,韦东晓. 2020. 海相碳酸盐岩储层实验分析技术进展及应用. 海相油气地质, 25(1): 1-11. [Hu A P, Shen A J, Wang Y S, Pan L Y, Liang F, Luo X Y, She M, Chen W, Qin Y J, Wang H, Wei D X. 2020. The progress and application of experimental analysis technology for marine carbonate reservoir. *Marine Origin Petroleum Geology*, 25(1): 1-11]
- 胡安平,沈安江,陈亚娜,张建勇,梁峰,王永生. 2021. 基于 U-Pb 同位素年龄和团簇同位素 ( $\Delta 47$ ) 温度约束的四川盆地震旦系灯影组构造—埋藏史重建. 石油实验地质, 43(5): 896-905, 914. [Hu A P, Shen A J, Chen Y N, Zhang J Y, Liang F, Wang Y S. 2021. Reconstruction of tectonic-burial evolution history of Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin based on the constraints of in-situ laser ablation U-Pb date and clumped isotopic thermometer ( $\Delta 47$ ). *Petroleum Geology and Experiment*, 43(5): 896-905, 914]
- 黄思静. 2010. 碳酸盐岩的成岩作用. 北京: 地质出版社, 117-123. [Huang S J. 2010. Carbonate Diagenesis. Beijing: Geological Pub-

- lishing House, 117-123]
- 黄思静, 李小宁, 兰叶芳, 成欣怡. 2013. 海水胶结作用对碳酸盐岩组构的影响: 以四川盆地东北部三叠系飞仙关组为例. 中南大学学报: 自然科学版, 44(12): 5007-5018. [Huang S J, Li X N, Lan Y F, Cheng X Y. 2013. Influences of marine cementation on carbonate textures: a case of Feixianguan carbonates of Triassic, NE Sichuan Basin. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 44(12): 5007-5018]
- 金民东, 谭秀成, 李毕松, 朱祥, 曾伟, 连承波. 2019. 四川盆地震旦系灯影组白云岩成因. 沉积学报, 37(3): 443-454. [Jin M D, Tan X C, Li B S, Zhu X, Zeng W, Lian C B. 2019. Genesis of dolomite in the Sinian Dengying Formation in the Sichuan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 37(3): 443-454]
- 李波, 颜佳新, 刘喜停, 薛武强. 2010. 白云岩有机成因模式: 机制、进展与意义. 古地理学报, 12(6): 699-710. [Li B, Yan J X, Liu X T, Xue W Q. 2010. The organogenic dolomite model: mechanism, progress and significance. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 12(6): 699-710]
- 李红, 柳益群. 2013. “白云石(岩)问题”与湖相白云岩研究. 沉积学报, 31(2): 302-314. [Li H, Liu Y Q. 2013. “Dolomite Problem” and research of ancient lacustrine dolostones. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(2): 302-314]
- 林孝先, 彭军, 闫建平, 侯中健. 2015. 四川盆地震旦系灯影组葡萄状白云岩成因讨论. 古地理学报, 17(6): 755-770. [Lin X X, Peng J, Yan J P, Hou Z J. 2015. A discussion about origin of botryoidal dolomite of the Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 17(6): 755-770]
- 林孝先, 彭军, 侯中健, 韩浩东, 李旭杰, 马春疆. 2018. 四川汉源—峨边地区上震旦统灯影组藻白云岩特征及成因研究. 沉积学报, 36(1): 57-71. [Lin X X, Peng J, Hou Z J, Han H D, Li X J, Ma C J. 2018. Study on characteristics and geneses of algal dolomite of the Upper Sinian Dengying Formation in the Hanyuan-Ebian area of Sichuan Province, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 36(1): 57-71]
- 林雪梅, 王旭, 朱联强. 2019. 川西南峨边先锋剖面震旦系灯影组储层特征. 自然科学, 7(3): 237-246. [Lin X M, Wang X, Zhu L Q. 2019. Characteristics of the Sinian Dengying Formation reservoir in Ebianxianfeng section, southwestern Sichuan Basin. *Open Journal of Nature Science*, 7(3): 237-246]
- 刘大卫, 蔡春芳, 扈永杰, 姜磊, 岳燕燕, 于瑞, 覃勤. 2020. 深层白云岩多期白云石化及其对孔隙演化的影响: 以川中地区下寒武统龙王庙组为例. 中国矿业大学学报, 49(6): 1150-1165. [Liu D W, Cai C F, Hu Y J, Jiang L, Peng Y Y, Yu R, Qin Q. 2020. Multi-stage dolomitization process of deep burial dolostones and its influence on pore evolution: a case study of Longwangmiao Formation in the Lower Cambrian of central Sichuan Basin. *Journal of China University of Mining & Technology*, 49(6): 1150-1165]
- 牟传龙, 王秀平, 梁薇, 王远翮, 门欣. 2015. 上扬子区灯影组白云岩葡萄体特征及成因初探: 以南江杨坝地区灯影组一段为例. 沉积学报, 33(6): 1097-1110. [Mou C L, Wang X P, Liang W, Wang Y C, Men X. 2015. Characteristics and genesis of grape-like stone of dolomite in Sinian Dengying Formation in Yangtze region: a case from the First section of Dengying Formation in Yangba, Nanjiang, Sichuan Province. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33(6): 1097-1110]
- 甯濛, 黄康俊, 沈冰. 2018. 镁同位素在“白云岩问题”研究中的应用及进展. 岩石学报, 34(12): 3690-3708. [Ning M, Huang K J, Shen B. 2018. Applications and advances of the magnesium isotope on the ‘dolomite problem’. *Acta Petrologica Sinica*, 34(12): 3690-3708]
- 钱一雄, 冯菊芳, 何治亮, 张克银, 金婷, 董少峰, 尤东华, 张永东. 2017a. 从岩石学及微区同位素探讨四川盆地灯影组皮壳—葡萄状白云石成因. 石油与天然气地质, 38(4): 665-676. [Qian Y X, Feng J F, He Z L, Zhang K Y, Jin T, Dong S F, You D H, Zhang Y D. 2017a. Applications of petrography and isotope analysis of micro-drill samples to the study of genesis of grape-like dolomite of the Dengying Formation in the Sichuan Basin. *Oil & Gas Geology*, 38(4): 665-676]
- 钱一雄, 何治亮, 李慧莉, 陈跃, 金婷, 沙旭光, 李洪全. 2017b. 塔里木盆地北部上震旦统葡萄状白云岩的发现及成因探讨. 古地理学报, 19(2): 197-210. [Qian Y X, He Z L, Li H L, Chen Y, Jin T, Sha X G, Li H Q. 2017b. Discovery and discussion on origin of botryoidal dolomite in the Upper Sinian in North Tarim Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 19(2): 197-210]
- 沈安江, 胡安平, 程婷, 梁峰, 潘文庆, 俸月星, 赵建新. 2019. 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. 石油勘探与开发, 46(6): 1062-1074. [Shen A J, Hu A P, Cheng T, Liang F, Pan W Q, Feng Y X, Zhao J X. 2019. Laser ablation in situ U-Pb dating and its application to diagenesis-porosity evolution of carbonate reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 46(6): 1062-1074]
- 施泽进, 梁平, 王勇, 胡修权, 田亚铭, 王长城. 2011. 川东南地区灯影组葡萄石地球化学特征及成因分析. 岩石学报, 27(8): 2263-2271. [Shi Z J, Liang P, Wang Y, Hu X Q, Tian Y M, Wang C C. 2011. Geochemical characteristics and genesis of grapestone in Sinian Dengying Formation in south-eastern Sichuan basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(8): 2263-2271]
- 施泽进, 王勇, 田亚铭, 王长城. 2013. 四川盆地东南部震旦系灯影组藻白云岩胶结作用及其成岩流体分析. 中国科学: 地球科学, 43(2): 317-328. [Shi Z J, Wang Y, Tian Y M, Wang C C. 2013. Cementation and diagenetic fluid of algal dolomites in the Sinian Dengying Formation in southeastern Sichuan Basin. *Scientia Sinica (Terrae)*, 43(2): 317-328]
- 石书缘, 刘伟, 黄擎宇, 王铜山, 周慧, 王坤, 马奎. 2017. 塔里木盆地北部震旦系齐格布拉克组白云岩储层特征及成因. 天然气地球科学, 28(8): 1226-1234. [Shi S Y, Liu W, Huang Q Y, Wang T S, Zhou H, Wang K, Ma K. 2017. Dolomite reservoir characteristic and its formation mechanism in Qigebulake Formation, Sinian, north Tarim Basin. *Natural Gas Geoscience*, 28(8): 1226-1234]
- 向芳, 陈洪德, 张锦泉. 1998. 资阳地区震旦系灯影组白云岩中葡萄花边的成因研究. 矿物岩石, 18(S1): 150-152. [Xiang F, Chen H D, Zhang J Q. 1998. Studying on the origin of botryoidal lace in dolomite of Dengying Formation, Sinian from Ziyang, Sichuan. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 18(S1): 150-152]
- 许杨阳, 刘邓, 于娜, 邱轩, 王红梅. 2018. 微生物(有机)白云石成因模式研究进展与思考. 地球科学, 43(S1): 63-70 [Xu Y Y, Liu D, Yu N, Qiu X, Wang H M. 2018. Advance and review on microbial/organogenic dolomite model. *Earth Science*, 43(S1): 63-70]
- 杨翰轩, 胡安平, 郑剑锋, 梁峰, 罗宪婴, 俸月星, 沈安江. 2020a. 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. 石油勘探与开发,

- 47(5): 935-946. [Yang H X, Hu A P, Zheng J F, Liang F, Luo X Y, Feng Y X, Shen A J. 2020a. Application of mapping and dating techniques in the study of ancient carbonate reservoirs: a case study of Sinian Qigebrak Formation in northwestern Tarim Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 47(5): 935-946]
- 杨翰轩, 沈安江, 郑剑锋, 胡安平. 2020b. 塔里木盆地西北缘震旦系奇格布拉克组微生物白云岩发育特征及储集意义. *海相油气地质*, 25(1): 44-54. [Yang H X, Shen A J, Zheng J F, Hu A P. 2020b. Sedimentary characteristics and reservoir significance of the microbial dolomite of Sinian Qigebrak Formation in the northwest margin of Tarim Basin. *Marine Origin Petroleum Geology*, 25(1): 44-54]
- 由雪莲, 孙枢, 朱井泉, 刘玲, 何凯. 2011. 微生物白云岩模式研究进展. *地学前缘*, 18(4): 52-64. [You X L, Sun S, Zhu J Q, Liu L, He K. 2011. Progress in the study of microbial dolomite model. *Earth Science Frontiers*, 18(4): 52-64]
- 曾德铭, 王兴志, 康保平. 2006. 川西北雷口坡组储层原生孔隙内胶结物研究. *天然气地球科学*, 17(4): 459-462. [Zeng D M, Wang X Z, Kang B P. 2006. A study on cement in primary pore of the Leikoupo Formation reservoir in the northwest of Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 17(4): 459-462]
- 张杰, Brian Jones, 潘立银, 周进高, 秦玉娟, 郝毅, 武明德. 2014. 四川盆地震旦系灯影组葡萄状白云岩成因. *古地理学报*, 16(5): 715-725. [Zhang J, Jones B, Pan L Y, Zhou J G, Qin Y J, Hao Y, Wu M D. 2014. Origin of botryoidal dolostone of the Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 16(5): 715-725]
- 钟怡江, 文华国, 陈洪德, 刘磊, 陈安清, 王兴龙, 王志伟, 白璇. 2022. 胞外聚合物在蓝细菌钙化过程中的作用及其地质意义. *沉积学报*, 40(1): 88-105. [Zhong Y J, Wen H G, Chen H D, Liu L, Chen A Q, Wang X L, Wang Z W, Bai X. 2022. The role of extracellular polymeric substances in cyanobacterial calcification and its geological significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(1): 88-105]
- 朱光有, 李茜, 李婷婷, 周磊, 吴雨轩, 沈冰, 甯濛. 2023. 镁同位素示踪白云石化流体迁移路径: 以四川盆地石炭系黄龙组为例. *地质学报*, 97(3): 753-771. [Zhu G Y, Li X, Li T T, Zhou L, Wu Y X, Shen B, Ning M. 2023. Magnesium isotope trace dolomitization fluid migration path: a case study of the Carboniferous Huanglong Formation in the Sichuan Basin. *Acta Geologica Sinica*, 97(3): 753-771]
- 祝海华, 钟大康. 2013. 四川盆地龙岗气田三叠系飞仙关组储集层特征及成因机理. *古地理学报*, 15(2): 275-282. [Zhu H H, Zhong D K. 2013. Characteristics and formation mechanism of the Triassic Feixianguan Formation reservoir in Longgang Gas Field, Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 15(2): 275-282]
- Algeo T J, Luo G M, Song H Y, Lyons T W, Canfield D E. 2015. Reconstruction of secular variation in seawater sulfate concentrations. *Biogeosciences*, 12(7): 2131-2151.
- Anbar A D, Knoll A H. 2002. Proterozoic ocean chemistry and evolution: a bioinorganic bridge? *Science*, 297(5584): 1137-1142.
- Azmy K, Lavoie D, Wang Z R, Brand U, Al-Aasm I, Jackson S, Girard I. 2013. Magnesium-isotope and REE compositions of Lower Ordovician carbonates from eastern Laurentia; implications for the origin of dolomites and limestones. *Chemical Geology*, 356: 64-75.
- Bartley J K, Kah L C, Frank T D, Lyons T W. 2015. Deep-water microbialites of the Mesoproterozoic Dismal Lakes Group: microbial growth, lithification, and implications for coniform stromatolites. *Geobiology*, 13(1): 15-32.
- Bartley J K, Knoll A H, Grotzinger J P, Sergeev V N. 2000. Lithification and fabric genesis in precipitated stromatolites and associated peritidal carbonates Mesoproterozoic billyakh Group, Siberia. *Carbonate Sedimentation and Diagenesis in the Evolving Precambrian World. SEPM (Society for Sedimentary Geology)*: 59-73.
- Berner R A. 1975. The role of magnesium in the crystal growth of calcite and aragonite from sea water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39(4): 489-504.
- Chang B, Li C, Liu D, Foster I, Tripathi A, Lloyd M K, Maradiaga I, Luo G M, An Z H, She Z B, Xie S C, Tong J N, Huang J H, Algeo T J, Lyons T W, Immenhauser A. 2020. Massive formation of early diagenetic dolomite in the Ediacaran Ocean: constraints on the "dolomite problem". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(25): 14005-14014.
- Coniglio M, James N, Aissaoui D. 1988. Dolomitization of Miocene carbonates, Gulf of Suez, Egypt. *Journal of Sedimentary Research*, 58(1): 100-119.
- Coogan L A, Parrish R R, Roberts N M. 2016. Early hydrothermal carbon uptake by the upper oceanic crust: insight from in situ U-Pb dating. *Geology*, 44(2): 147-150.
- Coogan L A, Gillis K M. 2018. Low-temperature alteration of the seafloor: impacts on ocean chemistry. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 46(1): 21-45.
- Corsetti F A, Kidder D L, Marengo P J. 2006. Trends in oolite dolomitization across the Neoproterozoic-Cambrian boundary: a case study from Death Valley, California. *Sedimentary Geology*, 191(3-4): 135-150.
- Creveling J R, Bergmann K D, Grotzinger J P. 2016. Cap carbonate platform facies model, Noonday Formation, SE California. *Geological Society of America Bulletin*, 128(7-8): 1249-1269.
- Cui H, Kaufman A J, Xiao S, Peek S, Cao H, Min X, Cai Y, Siegel Z, Liu X M, Peng Y, Schiffbauer J D, Martin A J. 2016. Environmental context for the terminal Ediacaran biomineralization of animals. *Geobiology*, 14(4): 344-363.
- Cui H, Xiao S H, Cai Y P, Peek S, Plummer R E, Kaufman A J. 2019. Sedimentology and chemostratigraphy of the terminal Ediacaran Dengying Formation at the Gaojiashan section, South China. *Geological Magazine*, 156(11): 1924-1948.
- Denniston R F, Asmerom Y, Polyak V Y, McNeill D F, Klaus J S, Cole P, Budd A F. 2008. Caribbean chronostratigraphy refined with U-Pb dating of a Miocene coral. *Geology*, 36(2): 151-154.
- Dickson J. 1983. Graphical modelling of crystal aggregates and its relevance to cement diagnosis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 309: 465-502.
- Dickson J. 1993. Crystal growth diagrams as an aid to interpreting the fabrics of calcite aggregates. *Journal of Sedimentary Research*, 63(1): 1-17.
- Ding Y, Chen D Z, Zhou X Q, Guo C, Huang T Y, Zhang G J. 2019. Cavity-filling dolomite speleothems and submarine cements in the Edia-

- caran Dengying microbialites, South China: responses to high-frequency sea-level fluctuations in an 'aragonite-dolomite sea'. *Sedimentology*, 66(6): 2511–2537.
- Dodd M S, Papineau D, She Z B, Fogel M L, Nederbragt S, Pirajno F. 2018. Organic remains in late Palaeoproterozoic granular iron formations and implications for the origin of granules. *Precambrian Research*, 310: 133–152.
- Fairchild I J, Hambrey M J. 1984. The Vendian succession of northeastern Spitsbergen; petrogenesis of a dolomite-tillite association. *Precambrian Research*, 26(2): 111–167.
- Fairchild I J, Spiro B. 1987. Petrological and isotopic implications of some contrasting Late Precambrian carbonates, NE Spitsbergen. *Sedimentology*, 34(6): 973–989.
- Fairchild I, Marshall J, Bertrand-Sarfati J. 1990. Stratigraphic shifts in carbon isotopes from Proterozoic stromatolitic carbonates (Mauritania): influences of primary mineralogy and diagenesis. *American Journal of Science*, 290: 46–79.
- Fairchild I J, Knoll A H, Swett K. 1991. Coastal lithofacies and biofacies associated with syndepositional dolomitization and silicification (Draken Formation, Upper Riphean, Svalbard). *Precambrian Research*, 53(3–4): 165–197.
- Fang Y H, Zhang F F, Farfan G A, Xu H F. 2021. Low-temperature synthesis of disordered dolomite and high-magnesium calcite in ethanol-water solutions; the solvation effect and implications. *ACS Omega*, 7(1): 281–292.
- Fang Y H, Xu H F. 2022. Dissolved silica-catalyzed disordered dolomite precipitation. *American Mineralogist*, 107(3): 443–452.
- Fantle M S, Higgins J. 2014. The effects of diagenesis and dolomitization on Ca and Mg isotopes in marine platform carbonates; implications for the geochemical cycles of Ca and Mg. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 142: 458–481.
- Flügel E. 2010. *Microfacies and Archaeology*. In: *Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 903–915.
- Folk R L. 1974. The natural history of crystalline calcium carbonate: effect of magnesium content and salinity. *Journal of Sedimentary Research*, 44(1): 40–53.
- Frank T D, Fielding C R. 2003. Marine origin for Precambrian, carbonate-hosted magnesite? *Geology*, 31(12): 1101–1104.
- Gabriel N W, Papineau D, She Z B, Leider A, Fogel M L. 2021. Organic diagenesis in stromatolitic dolomite and chert from the late Palaeoproterozoic McLeary Formation. *Precambrian Research*, 354: 106052.
- Gammon P R. 2012. An organodiagenetic model for Marinoan-age cap carbonates. *Sedimentary Geology*, 243: 17–32.
- Gan T, Zhou G H, Luo T Y, Pang K, Zhou M Z, Luo W J, Wang S J, Xiao S H. 2022. Earliest Ediacaran speleothems and their implications for terrestrial life after the Marinoan snowball Earth. *Precambrian Research*, 376: 106685.
- Geske A, Zorlu J, Richter D K, Buhl D, Niedermayr A, Immenhauser A. 2012. Impact of diagenesis and low grade metamorphism on isotope ( $\delta^{26}\text{Mg}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) and elemental (Ca, Mg, Mn, Fe and Sr) signatures of Triassic sabkha dolomites. *Chemical Geology*, 332: 45–64.
- Geske A, Goldstein R H, Mavromatis V, Richter D K, Buhl D, Kluge T, John C M, Immenhauser A. 2015a. The magnesium isotope ( $\delta^{26}\text{Mg}$ ) signature of dolomites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 149: 131–151.
- Geske A, Lokier S, Dietzel M, Richter D K, Buhl D, Immenhauser A. 2015b. Magnesium isotope composition of sabkha porewater and related (Sub-) recent stoichiometric dolomites, Abu Dhabi (UAE). *Chemical Geology*, 393: 112–124.
- Ginsburg R N, James N P. 1976. Submarine botryoidal aragonite in Holocene reef limestones, Belize. *Geology*, 4(7): 431–436.
- Godeau N, Deschamps P, Guihou A, Leonide P, Tendil A, Gerdes A, Hamelin B, Girard J P. 2018. U-Pb dating of calcite cement and diagenetic history in microporous carbonate reservoirs: Case of the Urgonian limestone, France. *Geology*, 46(3): 247–250.
- Grammer G M, Ginsburg R N, Swart P K, McNeill D F, Jull A T, Prezbindowski D R. 1993. Rapid growth rates of syndepositional marine aragonite cements in steep marginal slope deposits, Bahamas and Belize. *Journal of Sedimentary Research*, 63(5): 983–989.
- Grotzinger J P, Watters W A, Knoll A H. 2000. Calcified metazoans in thrombolite-stromatolite reefs of the terminal Proterozoic Nama Group, Namibia. *Paleobiology*, 26(3): 334–359.
- Han Z Z, Li J, Zhao Y Y, Chen Q Y, Gao X, Hu K M, Guo N, Wei X Y, Meng R R, Zhu C L, Tucker M E, Han C. 2024. Dissolved  $\text{Mn}^{2+}$  promotes microbially-catalyzed protodolomite precipitation in brackish oxidized water. *Chemical Geology*, 650: 121986.
- Hansman R J, Albert R, Gerdes A, Ring U. 2018. Absolute ages of multiple generations of brittle structures by U-Pb dating of calcite. *Geology*, 46(3): 207–210.
- Hardie L. 1977. Layering: the origin and environmental significance of lamination and thin bedding. *Sedimentation on the modern carbonate tidal flats of Northwest Andros Island, Bahamas*.
- Hardie L A. 1996. Secular variation in seawater chemistry: an explanation for the coupled secular variation in the mineralogies of marine limestones and potash evaporites over the past 600 m.y. *Geology*, 24(3): 279–283.
- Hardie L A. 2003. Secular variations in Precambrian seawater chemistry and the timing of Precambrian aragonite seas and calcite seas. *Geology*, 31(9): 785–788.
- Hoffman P F, MacDonald F A. 2010. Sheet-crack cements and early regression in Marinoan (635 Ma) cap dolostones: regional benchmarks of vanishing ice-sheets? *Earth and Planetary Science Letters*, 300(3–4): 374–384.
- Hood A S, Wallace M W, Drysdale R N. 2011. Neoproterozoic aragonite-dolomite seas? widespread marine dolomite precipitation in Cryogenian reef complexes. *Geology*, 39(9): 871–874.
- Hood A S, Wallace M W. 2012. Synsedimentary diagenesis in a Cryogenian reef complex: ubiquitous marine dolomite precipitation. *Sedimentary Geology*, 255: 56–71.
- Hood A S, Wallace M W. 2014. Marine cements reveal the structure of an anoxic, ferruginous Neoproterozoic ocean. *Journal of the Geological Society*, 171(6): 741–744.
- Hood A S, Wallace M W. 2015. Extreme ocean anoxia during the Late Cryogenian recorded in reefal carbonates of Southern Australia. *Precambrian Research*, 261: 96–111.
- Hood A S, Wallace M W, Reed C, Hoffmann K H, Freyer E. 2015. Enig-

- matic carbonates of the Ombombo Subgroup, Otavi Fold Belt, Namibia: a prelude to extreme Cryogenian anoxia? *Sedimentary Geology*, 324: 12–31.
- Hood A S, Planavsky N J, Wallace M W, Wang X L, Bellefroid E J, Gueguen B, Cole D B. 2016. Integrated geochemical-petrographic insights from component-selective  $\delta^{238}\text{U}$  of Cryogenian marine carbonates. *Geology*, 44(11): 935–938.
- Hood A S, Wallace M W. 2018. Neoproterozoic marine carbonates and their paleoceanographic significance. *Global and Planetary Change*, 160: 28–45.
- Hu Y J, Cai C F, Liu D W, Pederson C L, Jiang L, Shen A J, Immenhauser A. 2020. Formation, diagenesis and palaeoenvironmental significance of upper Ediacaran fibrous dolomite cements. *Sedimentology*, 67(2): 1161–1187.
- Hu Y J, Cai C F, Li Y, Zhou R, Lu F C, Hu J F, Ren C B, Jia L Q, Zhou Y Q, Lippert K, Immenhauser A. 2022. Upper Ediacaran fibrous dolomite versus Ordovician fibrous calcite cement: origin and significance as a paleoenvironmental archive. *Chemical Geology*, 609: 121065.
- Hu Z Y, Hu W X, Liu C, Sun F N, Liu Y L, Li W Q. 2019. Conservative behavior of Mg isotopes in massive dolostones: from diagenesis to hydrothermal reworking. *Sedimentary Geology*, 381: 65–75.
- Hu Z Y, Li W Q, Zhang H, Krainer K, Zheng Q F, Xia Z G, Hu W X, Shen S Z. 2021. Mg isotope evidence for restriction events within the Paleotethys ocean around the Permian–Triassic transition. *Earth and Planetary Science Letters*, 556: 116704.
- Huang K J, Shen B, Lang X G, Tang W B, Peng Y, Ke S, Kaufman A J, Ma H R, Li F B. 2015. Magnesium isotopic compositions of the Mesoproterozoic dolostones: implications for Mg isotopic systematics of marine carbonates. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 164: 333–351.
- Hurtgen M T, Arthur M A, Suits N S, Kaufman A J. 2002. The sulfur isotopic composition of Neoproterozoic seawater sulfate: implications for a snowball Earth? *Earth and Planetary Science Letters*, 203(1): 413–429.
- Jennings S, Bell R C. 2010. Technical Report on Recent Exploration at the Kaoko Copper-Silver Property in Northwest Namibia. INV Metals Report, 88.
- Jiang G Q, Kennedy M J, Christie-Blick N. 2003. Stable isotopic evidence for methane seeps in Neoproterozoic postglacial cap carbonates. *Nature*, 426(6968): 822–826.
- Jiang G Q, Kennedy M J, Christie-Blick N, Wu H, Zhang S. 2006. Stratigraphy, sedimentary structures, and textures of the late Neoproterozoic Doushantuo cap carbonate in South China. *Journal of Sedimentary Research*, 76(7): 978–995.
- Jiang L, Cai C F, Worden R H, Crowley S F, Jia L Q, Zhang K, Duncan I J. 2016. Multiphase dolomitization of deeply buried Cambrian petroleum reservoirs, Tarim Basin, north-west China. *Sedimentology*, 63(7): 2130–2157.
- Kaczmarek S E, Sibley D F. 2011. On the evolution of dolomite stoichiometry and cation order during high-temperature synthesis experiments: an alternative model for the geochemical evolution of natural dolomites. *Sedimentary Geology*, 240(1–2): 30–40.
- Kaczmarek S E, Thornton B P. 2017. The effect of temperature on stoichiometry, cation ordering, and reaction rate in high-temperature dolomitization experiments. *Chemical Geology*, 468: 32–41.
- Kah L C, Bartley J K, Teal D A. 2012. Chemostratigraphy of the Late Mesoproterozoic Atar Group, Taoudeni Basin, Mauritania: muted isotopic variability, facies correlation, and global isotopic trends. *Precambrian Research*, 200: 82–103.
- Kalderon-Asael B, Katchinoff J A R, Planavsky N J, Hood A V S, Dellinger M, Bellefroid E J, Jones D S, Hofmann A, Ossa F O, MacDonald F A, Wang C J, Isson T T, Murphy J G, Higgins J A, West A J, Wallace M W, Asael D, Pogge von Strandmann P A E. 2021. A lithium-isotope perspective on the evolution of carbon and silicon cycles. *Nature*, 595(7867): 394–398.
- Kendall A C. 1977. Fascicular-optic calcite: a replacement of bundled acicular carbonate cements. *Journal of Sedimentary Research*, 47(3): 1056–1062.
- Kennedy M J. 1996. Stratigraphy, sedimentology, and isotopic geochemistry of Australian Neoproterozoic postglacial cap dolostones: deglaciation,  $\delta^{13}\text{C}$  excursions, and carbonate precipitation. *Journal of Sedimentary Research*, 66(6): 1050–1064.
- Kennedy M J, Christie-Blick N, Sohl L E. 2001. Are Proterozoic cap carbonates and isotopic excursions a record of gas hydrate destabilization following Earth's coldest intervals? *Geology*, 29(5): 443–446.
- Kenward P A, Fowle D A, Goldstein R H, Ueshima M, González L A, Roberts J A. 2013. Ordered low-temperature dolomite mediated by carboxyl-group density of microbial cell walls. *AAPG Bulletin*, 97(11): 2113–2125.
- Kim J, Kimura Y, Puchala B, Yamazaki T, Becker U, Sun W H. 2023. Dissolution enables dolomite crystal growth near ambient conditions. *Science*, 382(6673): 915–920.
- Kimmig S R, Holmden C. 2017. Multi-proxy geochemical evidence for primary aragonite precipitation in a tropical-shelf calcite sea during the Hirnantian glaciation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 206: 254–272.
- Kiprijanov K S. 2016. Chaos and beauty in a beaker: the early history of the Belousov-Zhabotinsky reaction. *Annalen der Physik*, 528(3–4): 233–237.
- Knoll A H, Fairchild I J, Swett K. 1993. Calcified microbes in Neoproterozoic carbonates: implications for our understanding of the Proterozoic/Cambrian transition. *Palaio*, 8: 512–525.
- Knoll A H, Javaux E J, Hewitt D, Cohen P. 2006. Eukaryotic organisms in Proterozoic oceans. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 361(1470): 1023–1038.
- Krause S, Liebetrau V, Gorb S, Sánchez-Román M, McKenzie J A, Treude T. 2012. Microbial nucleation of Mg-rich dolomite in exopolymeric substances under anoxic modern seawater salinity: new insight into an old enigma. *Geology*, 40(7): 587–590.
- Lamothe K G, Wallace M W, Hood A V, Rose C V. 2024. An earliest Ediacaran oxygenation episode in the Wilpena Group, Adelaide Superbasin, South Australia. *Precambrian Research*, 409: 107433.
- Land L S. 1980. The isotopic and trace element geochemistry of dolomite: the state of the art. *Concepts and Models of Dolomitization*. SEPM (Society for Sedimentary Geology): 87–110.
- Land L S. 1998. Failure to precipitate dolomite at 25 °C from dilute solution despite 1000-fold oversaturation after 32 years. *Aquatic Geochemistry*, 4(3): 361–368.
- Li F B, Teng F Z, Chen J T, Huang K J, Wang S J, Lang X G, Ma H R,

- Peng Y B, Shen B. 2016. Constraining ribbon rock dolomitization by Mg isotopes: implications for the 'dolomite problem'. *Chemical Geology*, 445: 208–220.
- Li Q, Parrish R R, Horstwood M S A, McArthur J M. 2014. U-Pb dating of cements in Mesozoic ammonites. *Chemical Geology*, 376: 76–83.
- Li Z X, Evans D A, Halverson G P. 2013. Neoproterozoic glaciations in a revised global palaeogeography from the breakup of Rodinia to the assembly of Gondwanaland. *Sedimentary Geology*, 294: 219–232.
- Liu D, Xu Y Y, Papineau D, Yu N, Fan Q G, Qiu X, Wang H M. 2019. Experimental evidence for abiotic formation of low-temperature protodolomite facilitated by clay minerals. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 247: 83–95.
- Logan B W, Hoffman P, Gebelein C D. 1974. Algal mats, cryptalgal fabrics, and structures, Hamelin Pool, Western Australia. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 22: 140–194.
- Lucia F, Major R. 1994. Porosity evolution through hypersaline reflux dolomitization. In: Purser B, Tucker M, Zenger D (eds). *Dolomites: A Volume in Honor of Dolomieu*. The International Association of Sedimentologists, Special Publication 21: 325–341.
- Lyons T W, Reinhard C T, Planavsky N J. 2014. The rise of oxygen in Earth's early ocean and atmosphere. *Nature*, 506(7488): 307–315.
- Mavromatis V, Meister P, Oelkers E H. 2014. Using stable Mg isotopes to distinguish dolomite formation mechanisms: a case study from the Peru margin. *Chemical Geology*, 385: 84–91.
- Mazzullo S. 1980. Calcite pseudospar replacive of marine acicular aragonite, and implications for aragonite cement diagenesis. *Journal of Sedimentary Research*, 50(2): 409–422.
- McKenzie J A, Vasconcelos C. 2009. Dolomite mountains and the origin of the dolomite rock of which they mainly consist: historical developments and new perspectives. *Sedimentology*, 56(1): 205–219.
- Meister P. 2013. Two opposing effects of sulfate reduction on carbonate precipitation in normal marine, hypersaline, and alkaline environments. *Geology*, 41(4): 499–502.
- Melzer S E, Budd D A. 2008. Retention of high permeability during shallow burial (300 to 500 m) of carbonate grainstones. *Journal of Sedimentary Research*, 78(8): 548–561.
- Ning M, Lang X G, Huang K J, Li C, Huang T Z, Yuan H L, Xing C C, Yang R Y, Shen B. 2020. Towards understanding the origin of massive dolostones. *Earth and Planetary Science Letters*, 545: 116403.
- Nuriel P, Weinberger R, Kylander-Clark A R C, Hacker B R, Craddock J P. 2017. The onset of the Dead Sea transform based on calcite age-strain analyses. *Geology*, 45(7): 587–590.
- Papineau D. 2020. Chemically oscillating reactions in the formation of botryoidal malachite. *American Mineralogist*, 105(4): 447–454.
- Papineau D, De Gregorio B, Fearn S, Kilcoyne D, McMahon G, Purohit R, Fogel M. 2016. Nanoscale petrographic and geochemical insights on the origin of the Palaeoproterozoic stromatolitic phosphorites from Aravalli Supergroup, India. *Geobiology*, 14(1): 3–32.
- Papineau D, She Z B, Dodd M S. 2017. Chemically-oscillating reactions during the diagenetic oxidation of organic matter and in the formation of granules in late Palaeoproterozoic chert from Lake Superior. *Chemical Geology*, 470: 33–54.
- Papineau D, Yin J Y, Devine K G, Liu D, She Z B. 2021. Chemically oscillating reactions during the diagenetic formation of Ediacaran siliceous and carbonate botryoids. *Minerals*, 11(10): 1060.
- Peng B, Li Z X, Li G R, Liu C L, Zhu S F, Zhang W, Zuo Y H, Guo Y C, Wei X J. 2018a. Multiple dolomitization and fluid flow events in the Precambrian Dengying Formation of Sichuan Basin, southwestern China. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 92(1): 311–332.
- Peng J, Zhang H B, Lin X X. 2018b. Study on characteristics and genesis of botryoidal dolostone of the Upper Sinian Dengying Formation: a case study from Hanyuan region, Sichuan, China. *Carbonates and Evaporites*, 33: 285–299.
- Peng Y, Shen B, Lang X G, Huang K J, Chen J T, Yan Z, Tang W B, Ke S, Ma H R, Li F B. 2016. Constraining dolomitization by Mg isotopes: a case study from partially dolomitized limestones of the middle Cambrian Xuzhuang Formation, North China. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 17(3): 1109–1129.
- Peters S E, Husson J M, Wilcots J. 2017. The rise and fall of stromatolites in shallow marine environments. *Geology*, 45(6): 487–490.
- Petrash D A, Bialik O M, Bontognali T R, Vasconcelos C, Roberts J A, McKenzie J A, Konhauser K O. 2017. Microbially catalyzed dolomite formation: from near-surface to burial. *Earth-Science Reviews*, 171: 558–582.
- Pisapia C, Deschamps P, Battani A, Buschaert S, Guilhou A, Hamelin B, Brulhet J. 2018. U/Pb dating of geodic calcite: new insights on Western Europe major tectonic events and associated diagenetic fluids. *Journal of the Geological Society*, 175(1): 60–70.
- Planavsky N J, Reinhard C T, Wang X L, Thomson D, McGoldrick P, Rainbird R H, Johnson T, Fischer W W, Lyons T W. 2014. Low Mid-Proterozoic atmospheric oxygen levels and the delayed rise of animals. *Science*, 346(6209): 635–638.
- Putnis A. 2009. Mineral replacement reactions. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 70(1): 87–124.
- Putnis A, Austrheim H. 2010. Fluid-induced processes: metasomatism and metamorphism. *Geofluids*, 10(1-2): 254–269.
- Roberts N M, Walker R J. 2016. U-Pb geochronology of calcite-mineralized faults: absolute timing of rift-related fault events on the north-east Atlantic margin. *Geology*, 44(7): 531–534.
- Roberts N M, Rasbury E T, Parrish R R, Smith C J, Horstwood M S, Condon D J. 2017. A calcite reference material for LA-ICP-MS U-Pb geochronology. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(7): 2807–2814.
- Rodriguez-Blanco J D, Shaw S, Benning L G. 2015. A route for the direct crystallization of dolomite. *American Mineralogist*, 100(5-6): 1172–1181.
- Schneidermann N, Harris P M. 1985. Carbonate cements: based on a symposium sponsored by the society of economic paleontologists and mineralogists. SEPM Society for Sedimentary Geology.
- Shinn E A. 1968. Burrowing in recent lime sediments of Florida and the Bahamas. *Journal of Paleontology*, 42: 879–894.
- Shuster A M, Wallace M W, van Smeerdijk Hood A, Jiang G Q. 2018. The Tonian Beck Spring dolomite: marine dolomitization in a shallow, anoxic sea. *Sedimentary Geology*, 368: 83–104.
- Sibley D F. 1991. Secular changes in the amount and texture of dolomite. *Geology*, 19(2): 151–154.
- Stacey J, Hood A S, Wallace M W. 2023. Persistent late Tonian shallow marine anoxia and euxinia. *Precambrian Research*, 397: 107207.

- Stanley S M, Hardie L A. 1998. Secular oscillations in the carbonate mineralogy of reef-building and sediment-producing organisms driven by tectonically forced shifts in seawater chemistry. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 144(1-2): 3-19.
- Swett K, Knoll A H. 1989. Marine pisolites from upper Proterozoic carbonates of East Greenland and Spitsbergen. *Sedimentology*, 36(1): 75-93.
- Tang P, Chen D Z, Wang Y Z, Ding Y, El-Shafey M, Yang B. 2022. Diagenesis of microbialite-dominated carbonates in the Upper Ediacaran Qigebrak Formation, NW Tarim Basin, China: implications for reservoir development. *Marine and Petroleum Geology*, 136: 105476.
- Tewari V C, Tucker M E. 2011. Ediacaran Krol carbonates of the Lesser Himalaya, India: stromatolitic facies, depositional environment and diagenesis. *Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology*. Dordrecht: Springer Netherlands: 133-156.
- Tucker M E. 1982. Precambrian dolomites: petrographic and isotopic evidence that they differ from Phanerozoic dolomites. *Geology*, 10(1): 7-12.
- Tucker M E. 1983. Diagenesis, geochemistry, and origin of a Precambrian dolomite: the Beck Spring Dolomite of eastern California. *Journal of Sedimentary Research*, 53(4): 1097-1119.
- Tucker M E, Wright V P. 2009. *Carbonate Sedimentology*. John Wiley & Sons.
- Van Tuyl F M. 1916a. New points on the origin of dolomite. *American Journal of Science*, 42(249): 249-260.
- Van Tuyl F M. 1916b. The origin of dolomite, 26. Henderson, State Printer.
- Varkouhi S, Papineau D, Guo Z X. 2022. Botryoidal quartz as an abiotic signature in Palaeoarchean cherts of the Pilbara Supergroup, Western Australia. *Precambrian Research*, 383: 106876.
- Vasconcelos C, McKenzie J A, Bernasconi S, Grujic D, Tiens A J. 1995. Microbial mediation as a possible mechanism for natural dolomite formation at low temperatures. *Nature*, 377(6546): 220-222.
- Vousdoukas M I, Velegarakis A F, Plomaritis T A. 2007. Beachrock occurrence, characteristics, formation mechanisms and impacts. *Earth-Science Reviews*, 85(1-2): 23-46.
- Wallace M W, Hood A S, Shuster A, Greig A, Planavsky N J, Reed C P. 2017. Oxygenation history of the Neoproterozoic to early Phanerozoic and the rise of land plants. *Earth and Planetary Science Letters*, 466: 12-19.
- Wallace M W, Hood A S, Fayle J, Hordern E S, O'Hare T F. 2019. Neoproterozoic marine dolomite hardgrounds and their relationship to cap dolomites. *Precambrian Research*, 328: 269-286.
- Wang J B, He Z L, Zhu D Y, Liu Q Y, Ding Q, Li S J, Zhang D W. 2020. Petrological and geochemical characteristics of the botryoidal dolomite of Dengying Formation in the Yangtze Craton, South China: constraints on terminal Ediacaran "dolomite seas". *Sedimentary Geology*, 406: 105722.
- Warren J. 2000. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations. *Earth-Science Reviews*, 52(1-3): 1-81.
- Wood R, Curtis A. 2015. Extensive metazoan reefs from the Ediacaran Nama Group, Namibia: the rise of benthic suspension feeding. *Geobiology*, 13(2): 112-122.
- Wood R, Zhuravlev A Y, Sukhov S, Zhu M Y, Zhao F C. 2017. Demise of Ediacaran dolomitic seas marks widespread biomineralization on the Siberian Platform. *Geology*, 45(1): 27-30.
- Wood R, Bowyer F, Penny A, Poulton S W. 2018. Did anoxia terminate Ediacaran benthic communities? evidence from early diagenesis. *Precambrian Research*, 313: 134-147.
- Xiao S H, Knoll A H, Kaufman A J, Yin L M, Zhang Y. 1997. Neoproterozoic fossils in Mesoproterozoic rocks? chemostratigraphic resolution of a biostratigraphic conundrum from the North China Platform. *Precambrian Research*, 84(3-4): 197-220.
- Zempolich W G, Wilkinson B H, Lohmann K C. 1988. Diagenesis of late Proterozoic carbonates: the Beck Spring Dolomite of eastern California. *Journal of Sedimentary Research*, 58(4): 656-672.
- Zempolich W G, Baker P A. 1993. Experimental and natural mimetic dolomitization of aragonite ooids. *Journal of Sedimentary Research*, 63(4): 596-606.
- Zhai X F, Luo P, Gu Z D, Jiang H, Zhang B M, Wang Z C, Wang T S, Wu S T. 2020. Microbial mineralization of botryoidal laminations in the Upper Ediacaran dolostones, western Yangtze Platform, SW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 195: 104334.
- Zhang F F, Xu H F, Konishi H, Kemp J M, Roden E E, Shen Z Z. 2012a. Dissolved sulfide-catalyzed precipitation of disordered dolomite: implications for the formation mechanism of sedimentary dolomite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 97: 148-165.
- Zhang F F, Xu H F, Konishi H, Shelobolina E S, Roden E E. 2012b. Polysaccharide-catalyzed nucleation and growth of disordered dolomite: a potential precursor of sedimentary dolomite. *American Mineralogist*, 97(4): 556-567.
- Zhang F F, Xiao S H, Kendall B, Romaniello S J, Cui H, Meyer M, Gilleaudeau G J, Kaufman A J, Anbar A D. 2018. Extensive marine anoxia during the terminal Ediacaran Period. *Science Advances*, 4(6): eaan8983.
- Zhang P, Huang K J, Luo M, Cai Y P, Bao Z A. 2022. Constraining the terminal Ediacaran seawater chemistry by Mg isotopes in dolostones from the Yangtze Platform, South China. *Precambrian Research*, 377: 106700.
- Zhao D F, Tan X C, Hu G, Wang L C, Wang X F, Qiao Z F, Luo S C, Tang H. 2021. Characteristics and primary mineralogy of fibrous marine dolomite cements in the end-Ediacaran Dengying Formation, South China: implications for aragonite-dolomite seas. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 581: 110635.
- Zhou Y, Yang F L, Ji Y L, Zhou X F, Zhang C H. 2020. Characteristics and controlling factors of dolomite karst reservoirs of the Sinian Dengying Formation, central Sichuan Basin, southwestern China. *Precambrian Research*, 343: 105708.

(责任编辑 张西娟; 英文审校 刘贺娟)