

文章编号: 1671-1505(2024)05-1235-21 DOI:10.7605/gdxb.2024.05.065

汉南一米仓山地区东部寒武系仙女洞组 斑块白云岩特征及形成机制*

李 滢¹ 李 飞^{1,2} 鲁子野^{1,2} 李杨凡¹
王曾俊¹ 李雅兰¹ 谢 慧¹ 张天舒¹

1 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川成都 610500

2 西南石油大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 天然气地质四川省重点实验室, 四川成都 610500

摘 要 斑块白云岩具有非均质性强、内部结构复杂等特点, 发育特征和成因亟待理清。文中以汉南一米仓山地区东部杨家沟剖面为例, 在系统野外调查工作的基础上, 利用岩相学、沉积学和地球化学等方法, 在寒武系仙女洞组共识别出 13 个岩石微相类型以及 5 种白云岩类型, 并对不同组构碳、氧同位素和微量元素组成特征进行了分析。研究发现, 斑块白云岩的分布与垂向构造破碎带及其横向延伸带的位置有关, 斑块白云岩及其与围岩之间的构造缝中发育大量鞍形白云石; 斑块白云岩中氧同位素组成 ($\delta^{18}\text{O}$: $-8.17\text{‰} \sim -6.58\text{‰}$) 明显低于当时的海水, 原位微区技术揭示白云石晶体具有高 Mn/Sr 值 ($\text{Mn}/\text{Sr}_{\text{均}} = 14.8$)、Eu 正异常 ($\text{Eu}/\text{Eu}_{\text{均}} = 1.3$) 以及页岩化后的中稀土元素富集配型。在排除其他可能的成因后, 推测研究区斑块白云岩的形成与区域断层控制的热液流体活动有关。相关工作的开展对于查明汉南一米仓山周缘地区寒武系仙女洞组白云岩的分布和发育规律、理清斑块白云岩的特征和成因具有重要作用, 也可作为四川盆地北部白云岩储集层勘探提供参考。

关键词 岩相分析 斑块白云岩 鞍形白云石 热液流体 原位微区分析 仙女洞组 四川盆地

第一作者简介 李滢, 女, 2002 年生, 博士研究生, 主要从事碳酸盐岩沉积学方面研究。E-mail: 202414000003@stu.swpu.edu.cn。

通讯作者简介 李飞, 男, 1986 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事碳酸盐沉积学和沉积地球化学方面的教学和研究工作。E-mail: lifei@swpu.edu.cn。

中图分类号: P588.24⁺5 文献标志码: A

Characteristics and formation mechanism of patchy dolostone of the Cambrian Xiannüdong Formation in eastern Hannan-Micangshan area

LI Ying¹ LI Fei^{1,2} LU Ziye^{1,2} LI Yangfan¹ WANG Zengjun¹
LI Yalan¹ XIE Hui¹ ZHANG Tianshu¹

1 School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

2 State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Natural Gas Geology Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

* 国家自然科学基金项目 (编号: 42172136, 41872119), 西南石油大学本科课外开放实验重点项目 (编号: 2022KSZ02002) 共同资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42172136, 41872119), and Key Project of Undergraduate Extracurricular Open Experiment at Southwest Petroleum University (No. 2022KSZ02002)]

收稿日期: 2023-12-30 改回日期: 2024-03-01

Abstract Patchy dolostone, a common type of dolostone, is distinguished by its heterogeneity and complex internal structure, requiring a comprehensive investigation of its origins and formation mechanisms. In this study, the Yangjiagou section in the eastern Hannan-Micangshan area is selected as a representative example. Through comprehensive field observations and various methods including petrography, sedimentology and geochemistry, 13 types of lithofacies and five dolomite types were identified in the Xiannüdong Formation. Geochemical methods were employed to analyze the carbon and oxygen isotopes as well as trace element compositions of these dolostone. Our findings indicate that the occurrence of patchy dolostone is strongly associated with the location of vertical tectonic fractures and transverse extension zones. The fractures within the patchy dolostone and surrounding limestones are filled by coarse-grained saddle dolomite. Notably, the $\delta^{18}\text{O}$ values of the patchy dolomites ($\delta^{18}\text{O}$: -8.17% to -6.58%) are lower than those of the contemporaneous seawater-derived dolomites. Additionally, in-situ trace element measurements reveal that dolomite crystals exhibit high Mn/Sr ratios (mean of 14.8), a positive Eu anomalies (mean of 1.3), and a middle rare earth elements-enriched pattern when normalized to shale. After excluding other possibilities, it is inferred that the formation of patchy dolostone in the study area can be attributed to the influence of regional fault-controlled hydrothermal fluids. The significance of this study lies in its ability to identify the distribution and development of Cambrian dolomites within the Xiannüdong Formation in the surrounding area, as well as to clarify the identification markers and formation processes of hydrothermal dolomites. This study may provide valuable insights for oil and gas exploration in the northern Sichuan Basin.

Key words lithofacies analysis, patchy dolostone, saddle dolomite, hydrothermal fluids, in-situ microanalysis, Xiannüdong Formation, Sichuan Basin

About the first author LI Ying, born in 2002, is a Ph.D. candidate at Southwest Petroleum University. She is engaged in the research on carbonate sedimentology. E-mail: 202414000003@stu.swpu.edu.cn.

About the corresponding author LI Fei, born in 1986, is a professor and Ph.D. advisor at Southwest Petroleum University. His current research interests include carbonate sedimentology and sedimentary geochemistry. E-mail: lifei@swpu.edu.cn.

1 概述

白云岩是一种以白云石矿物为主要成分的碳酸盐岩,具有复杂的形成机制以及重要的油气储集价值 (Allan and Wiggins, 1993; Warren, 2000)。由于白云石矿物很难在地表或实验室常温条件下通过化学沉淀方法直接形成 (Land, 1985; Gregg *et al.*, 2015), 因此近 200 年来研究者提出了众多模型来解释其成因。广为大家熟悉的白云岩形成模式包括萨布哈—蒸发作用、渗透回流作用、混合水作用以及埋藏作用 (Hsü and Siegenthaler, 1969; Warren, 2000; 朱光有和李茜, 2023)。此外, 海水成因 (Saller, 1984; Budd, 1997)、微生物相关成因 (Vasconcelos *et al.*, 1995; Petrash *et al.*, 2017) 以及构造热液成因 (Qing and Mountjoy, 1992;

Koeshidayatullah *et al.*, 2021) 等白云岩形成模式近年来也逐渐受到重视。构造作用是规模性白云岩形成的关键因素之一, 其通过影响沉积格局和有利相带展布、提供利于白云石形成的流体运移通道等形式制约白云岩的发育 (何治亮等, 2020)。

通过构造活动形成的运移通道将深部热流体输送到相对浅层的断裂体系周缘和侧向毗邻区后以直接沉淀或交代基质方式形成的白云岩, 称为构造热液成因白云岩 (Braithwaite *et al.*, 2004; Davies and Smith, 2006; 陈代钊, 2008)。近年来, 在全球不同盆地和地层中均有发现大型构造热液成因的白云岩, 例如西加拿大盆地泥盆系和密西西比亚系 (Al-Aasm *et al.*, 2019)、密歇根和阿巴拉契亚盆地奥陶系 (Smith Jr and Davies, 2006)、西班牙白垩

系 (Shah *et al.*, 2012)、波斯湾二叠系—三叠系和侏罗系—白垩系 (Gregg and Sibley, 1984), 以及中国的四川盆地中二叠统 (陈轩等, 2012; 黎霆等, 2021) 和塔里木盆地下古生界 (焦存礼等, 2011)。与其他成因白云岩相比, 热液成因白云岩一般具有以下特征: (1) 特征的岩石学组构, 如鞍形白云石 (Radke and Mathis, 1980)、水力压裂角砾岩化 (hydro-brecciation) 和白云石化前缘带 (dolomitization front) 等 (Koeshidayatullah *et al.*, 2021); (2) 伴生热液矿物组合, 如密西西比河谷型硫化物 (Davies and Smith Jr, 2006; Shelton *et al.*, 2009; Wei *et al.*, 2015); (3) 与环境温度相比明显提高的流体温度 (Lu *et al.*, 2017) 以及受温度影响显著偏负的碳酸盐矿物 $\delta^{18}\text{O}$ 值 (Horita, 2014); (4) 与升温耦合的团簇同位素 (Δ_{47}) 和流体氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{fluid}}$) 协变趋势 (Lu *et al.*, 2024); (5) 显著高于围岩的放射性 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 信号 (Davies and Smith Jr, 2006); (6) 与高温活动有关的以 Eu 正异常为代表的稀土元素特征 (Bau, 1991; Bau and Möeller, 1992)。然而, 这些特征并不具有独特性和唯一性, 例如部分构造热液白云岩几乎不具备上述除流体温度以外的特征 (Hollis *et al.*, 2017; Hirani *et al.*, 2018); 同时, 上述特征也可以出现在受到热液改造的准同生白云岩中 (Lonnee and Machel, 2006)。因此, 准确识别构造控制的热液成因白云岩需要综合岩石学、沉积学和地球化学等多方面证据。

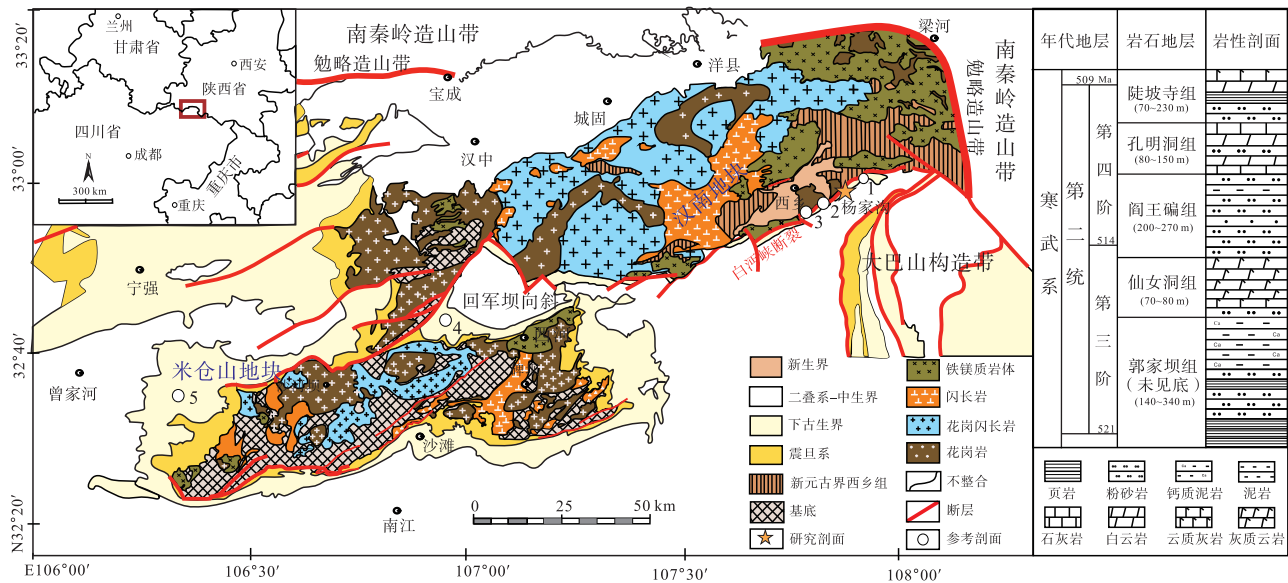
四川盆地白云岩类型多样, 其中一类白云岩表面以深色基质 (方解石或细晶白云石) 和浅色斑块 (细—粗晶白云石) 共生为特征, 被称为“斑状”、“豹斑”、“花斑”或者“瘤状”白云岩 (钱一雄等, 2016; 魏柳斌等, 2023)。这种非均质性斑块白云岩分布非常广泛, 为重要的储集岩类型。斑块白云岩的形成主要与生物扰动作用 (潜穴和钻孔促进富 Mg 流体注入) (Kendall, 1977)、扰动有关的微生物白云石化作用 (Gingras *et al.*, 2004)、回流渗透作用 (韩波等, 2017)、岩溶及叠合改造作用 (谭秀成等, 2015; 徐妍等, 2023) 等有关, 也有学者认为其形成与构造热液作用存在关联 (韩月卿等, 2023)。但是, 仅根据形貌特征划分的白云岩类型在成因和形成机制上可能具有多解性, 需要根据非均质白云岩具体特征进行判别。

四川盆地北部汉南一米仓山地区寒武系第二统出露广泛, 其中碳酸盐岩主要为仙女洞组 (与沧浪铺组一段大致同期) 灰岩和混积岩, 很少有厚层白云岩出露的报道。近年来, 笔者在该地区东部汉中西乡县堰口镇至白勉 (沔) 峡镇一带多个剖面 (杨家沟、盛家沟、牟 (穆) 家庄和石板沟剖面) 仙女洞组发现厚层结晶白云岩和斑块白云岩 (图 1; 图 2), 其中具斑块结构的白云岩和灰质白云岩由于非均质性强和内部结构复杂, 前人对其形成原因尚不清楚。因此, 准确识别这套具斑块结构的白云岩的成因是一个亟待解决的科学问题。鉴于此, 笔者通过对前人资料 (李耀西等, 1975; 杨友运和叶俭, 1996) 总结和野外实测 (2021 年 8 月, 2022 年 8 月以及 2024 年 2 月, 共 3 次), 对汉中西乡县杨家沟剖面开展了系统的岩相学和沉积学特征分析。在此基础上, 利用碳氧同位素和微量元素 (含溶液和原位分析) 数据, 对仙女洞组中—上部白云岩发育特点进行了详细研究, 发现了与其成因有关的多项证据。相关工作的开展对于查明陕南—川北地区寒武系第二统白云岩的分布范围、发育特征以及形成机制等具有重要价值, 也可为四川盆地北部海相碳酸盐岩油气勘探提供参考。

2 区域地质背景

汉南一米仓山地区位于上扬子板块与秦岭造山带之间的过渡带 (图 1), 西侧临近龙门山推覆构造带, 东部与大巴山褶皱带接壤 (Dong *et al.*, 2012)。其中, 汉南地块和米仓山地块是新元古代在上扬子板块北缘形成的 2 个相邻块体, 经历一系列构造活动后完成拼合 (Dong *et al.*, 2012), 形成汉南一米仓山地体 (图 1)。中生代以来, 受华北、华南板块碰撞以及秦岭造山带形成的影响, 汉南一米仓山地体显示出一系列近东西向构造变形特征 (魏显贵等, 1997; 刘树根等, 2006), 表现为在汉南一米仓山地体与大巴山前陆构造带褶皱叠加区域形成北东东向白沔峡断裂带 (图 1) (张岳桥等, 2010), 断裂带北侧以花岗闪长岩、闪长岩和铁镁质岩体为主, 南侧为寒武系至白垩系较为连续露头。

受海平面变化及区域隆升的影响, 汉南一米仓山地体在形成后遭受到多次淹没和暴露, 至寒武纪第二世第三期海平面下降过程中古陆逐步显现 (李红等, 2021)。从该古陆向其周缘水体逐渐加深, 形



参考剖面: 1—盛家沟; 2—牟(穆)家庄; 3—石板沟; 4—龙头山; 5—唐江河

图 1 汉南一米仓山地区构造纲要图及寒武系第二统岩石地层简表 (据李耀西等, 1975; Dong et al., 2012)

Fig. 1 Structural outline and lithostratigraphic units (Cambrian Series 2) of the Hannan-Micangshan area

(after Li et al., 1975; Dong et al., 2012)

成了潮坪至深水陆棚的古地理格局 (Li et al., 2021, 2023)。寒武系第二统自下而上依次包括郭家坝组 (未见底)、仙女洞组、阎王碛组、孔明洞组和陡坡寺组 (下部) (图 1): 郭家坝组岩性主要为黑色碳质页岩、深灰色钙质泥岩和灰绿色粉砂岩 (李耀西等, 1975; 龚峤林等, 2018); 仙女洞组底部岩性主要为灰绿色—浅灰色含钙 (钙质) 粉砂岩, 中—上部为浅灰色厚层鲕粒岩、生物礁灰岩、生物碎屑灰岩和微生物岩 (曾楷等, 2020; 邓嘉婷等, 2021; 李杨凡等, 2023; 李雅兰等, 2024); 阎王碛组底部以“红层”沉积与下伏仙女洞组区分, 岩性为紫红色砂岩、粉砂岩和黏土岩, 以及灰绿色粉砂岩 (程裕淇等, 1999; Li et al., 2023)。

本次研究选取陕西省汉中市西乡县堰口镇三郎村杨家沟采石场 (GPS: 32°59'31.7"N, 107°54'06.4"E) 为主要研究剖面, 周边盛家沟、牟(穆)家庄和石板沟为参考剖面 (图 1; 图 2)。这些剖面寒武系仙女洞组出露良好, 与下伏郭家坝组和上覆阎王碛组均呈整合接触。仙女洞组中上部斑块白云岩是本次研究的重点。

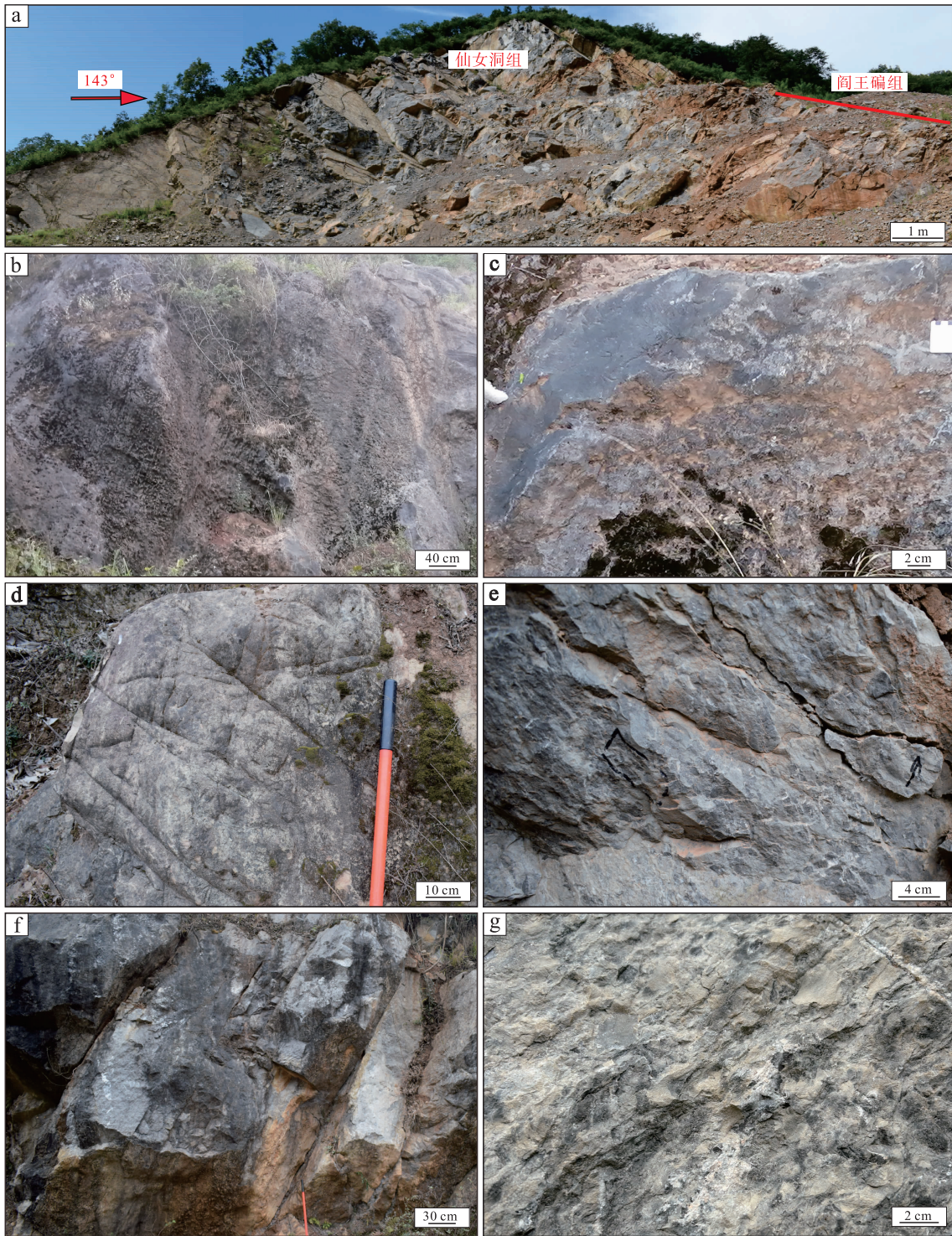
3 样品与方法

本次研究对杨家沟剖面仙女洞组开展了详细野

外观察、测量和样品采集工作。以 1~1.5 m 间距连续采集仙女洞组岩石标本 50 件, 其中对白云岩层段开展了针对性调研和加密采样。共制作标准薄片 (2.5 cm × 7.5 cm) 50 余张, 大薄片 (5 cm × 7.5 cm) 5 张, 光面 2 个, 手标本 8 块。

本次研究在西南石油大学天然气地质四川省重点实验室利用偏光显微镜 (Leica DM2700P 和 CO-IC UP200i) 对薄片进行了岩石微相特征观察。利用 ImageJ 软件对薄片镜下照片中白云石晶体粒径进行了统计 (共 1150 颗), 测量方法参考李红等 (2021), 粒径划分标准参考 Folk (1980) 方案。还利用阴极发光显微镜 (CITL CL8200 MK5) 对不同碳酸盐岩组构成岩改造情况进行观察, 电压为 ~10 kV, 电流为 20 mA。

为了解不同组构的同位素和元素构成, 笔者利用微钻分别钻取白云岩斑块和灰岩围岩组构, 并在成都微谱检测技术有限公司利用稳定同位素质谱仪 (Thermo Fisher MAT 253, GasBench II -IRMS) 和电感耦合等离子体质谱仪 (Agilent 7700 ICP-MS) 分别进行碳氧同位素和微量元素分析。在四川创源微谱技术有限公司, 利用激光剥蚀系统与电感耦合等离子体质谱仪联用技术 (LA-ICP-MS; ASI RESOLUTION LR 激光器与 Thermo iCAP TQ 质谱仪), 进行了原位微区微量元素 (含稀土元素) 含量分



a—杨家沟剖面宏观特征；b, c—盛家沟剖面仙女洞组顶部巨厚层白云岩；d, e—牟（穆）家庄剖面仙女洞组上部厚层白云岩，表面风化后具“刀砍纹”特征；f, g—石板沟剖面仙女洞组厚层斑块白云岩

图 2 陕西西乡杨家沟、盛家沟、牟家庄和石板沟剖面寒武系仙女洞组白云岩野外特征

Fig. 2 Field photographs showing dolostone characteristics of the Cambrian Xiannüdong Formation at Yangjiagou, Shengjiagou, Mujiagou and Shibangou sections, Xixiang County, Shaanxi Province

析（15 个样点）。LA-ICP-MS 碳酸盐岩微量元素测试流程和方法参考 Gong 等（2021），经质量监

控标样 OOID 检验，分析过程中微量元素相对误差均小于 10%。

4 结果

4.1 仙女洞组岩相学特征

通过对野外露头 and 室内薄片的详细观察, 笔者将杨家沟剖面仙女洞组分为 13 种岩石微相类型, 分别是: (含钙) 黏土岩—粉砂岩 (F1), (含钙) 粉砂岩 (F2), 漂浮岩 (F3), 含钙或钙质细砂岩 (F4), (含砂) 生屑、球团粒泥粒—颗粒灰 (云) 岩 (F5), 生屑—鲕粒—核形石泥粒灰 (云) 岩 (F6), 粘结—障积岩 (F7), 格架岩 (F8), 鲕粒颗粒灰 (云) 岩 (F9), 球团粒、生屑泥粒—颗粒灰 (云) 岩 (F10), 残余微生物球团粒白云岩 (F11), 鸟眼—窗格构造灰 (云) 岩 (F12), 含球团粒粉砂—黏土质泥晶灰岩 (F13)。各种岩石微相详细特征和分布情况见表 1 和图 3。其中, 仙女洞组底部和下部主要为中薄层细碎屑岩和混积岩, 水平层理和生物钻孔发育, 陆源碎屑组分含量从下向上整体逐渐降低 (图 3)。仙女洞组中上部以灰质白云岩和白云岩为主 (图 3), 鲕粒灰 (云) 岩、生物灰 (云) 岩以及钙质微生物主导的黏结岩、障积岩和格架岩均有发育。总体来看, 仙女洞组为一向上变浅序列, 沉积环境从外缓坡逐步过渡至潮上带 (图 3)。

4.2 白云岩的岩石学特征

根据野外露头和镜下综合特征, 杨家沟剖面仙女洞组白云岩主要分为 5 种类型 (图 3 至图 6): 构造破碎白云岩 (D1), 非组构选择性交代的白云岩斑块 (D2), 中—粗晶白云岩 (D3), 组构选择性交代的白云岩斑块 (D4) 以及选择性交代的颗粒白云岩 (D5)。

构造破碎白云岩 (D1): 主要分布于垂直岩层面 (地层产状 $160^\circ \angle 60^\circ$) 的破碎带内。多条破碎带 (走向 190°) 近平行分布 (图 4-a), 纵向上切割了仙女洞组中上部的大多数岩石微相类型 (图 3, 包括 F7、F8 和 F10)。在破碎带内部, 破碎角砾呈深灰色、棱角一次棱角状、直径 $0.5 \sim 6 \text{ cm}$ (图 4-b), 遭受到不同程度的白云石化, 遇稀盐酸微弱起泡; 角砾间充填物呈灰白色, 主要以白云石为主 (图 4-b)。

非组构选择性交代的白云岩斑块 (D2): 主要分布于构造破碎带的边缘并向相邻的地层顺层延伸。多条构造破碎带的发育造成剖面上 D2 呈横向

发育, 经追索后发现分布范围超过 200 m , 但单个横向延伸宽度一般不超过 2 m (图 4-c, 4-d)。靠近构造破碎带的一侧, D2 呈灰白色—土黄色, 远离构造破碎带的方向则变为浅灰白色 (图 4-c, 4-d)。在靠近构造破碎带的一侧, 残留灰岩被 D2 分隔呈孤立团块状, 直径以 $1 \sim 7 \text{ cm}$ 为主; 远离构造破碎带的方向, 灰岩逐渐增多, D2 的面积占比减小、连续性变弱 (图 4-c, 4-d)。纵向上, (含砂) 生屑、球团粒泥粒—颗粒灰 (云) 岩 (F5), 粘结—障积岩 (F7), 格架岩 (F8), 球团粒、生屑泥粒—颗粒灰 (云) 岩 (F10) 等岩相类型均可见 D2 存在 (图 3)。镜下观察发现, D2 与灰岩之间界限清晰 (图 5-a 至 5-e), 呈港湾状或缝合线接触 (图 5-a, 5-d, 5-e); 邻近 D2 的灰岩中, 也可见少量微生物球团粒以及钙质微生物 (葛万菌为主) 发生选择性白云石化, 但粒间方解石胶结物很少被白云石交代, 特别是颗粒环边型放射—纤维状方解石胶结物 (图 5-b, 5-d, 5-e); 同时, 可见粗晶鞍形白云石 ($300 \sim 1000 \mu\text{m}$) 分布于 D2 和灰岩部分的裂缝中, 具波状消光特征 (图 5-g 至 5-i; 图 6-a, 6-b)。阴极光下 D2 (图 5-f) 和鞍形白云石 (图 5-i) 整体相对灰岩组构呈亮红色, 白云石晶体核部呈暗红色。在靠近构造破碎带的灰白色—土黄色 D2 中, 白云石晶体以极细—细晶白云石为主 ($10 \sim 80 \mu\text{m}$), 通常呈半自形—自形 (图 5-e); 在远离构造破碎带的浅灰白色 D2 中, 白云石晶体以细—中晶为主 ($30 \sim 110 \mu\text{m}$), 密集分布, 镶嵌接触, 呈半自形—他形 (图 5-c)。

中—粗晶白云岩 (D3): 分布于仙女洞组近顶部, 已完全白云石化, 厚度不一。杨家沟剖面 D3 厚度约 1 m (图 4-g 上部), 其他剖面 D3 最厚可达 5 m 。该层分别与下伏球团粒、生屑泥粒—颗粒灰 (云) 岩 (F10) (图 4-g) 和上覆鸟眼—窗格构造灰 (云) 岩 (F12) 正常接触 (图 4-h)。镜下可见白云石晶体大小为 $120 \sim 300 \mu\text{m}$ 、镶嵌接触、呈他形 (图 6-d, 6-e), 也可见鞍形白云石存在。阴极光下整体发暗红色光, 可见大量残余球团粒、集合粒 (图 6-f)。

组构选择性交代的白云岩斑块 (D4): 分布于仙女洞组近顶部, 主要位于鸟眼—窗格构造灰 (云) 岩 (F12) 中 (图 4-h)。野外以纹层状和凝块状结构为典型识别特征, 其中, 凝块状结构白云

表 1 陕西西乡杨家沟剖面寒武系仙女洞组岩石微相特征

Table 1 Micro-lithofacies of the Cambrian Xiannüdong Formation in the Yangjiagou section, Xixiang County, Shaanxi Province

编号	名称	分布层位	特征描述	沉积环境
F1	(含钙)黏土岩—粉砂岩	底部	以薄层黏土质粉砂岩与粉砂质黏土岩互层为主要特征,水平层理发育,偶见生物钻孔	外缓坡
F2	(含钙)粉砂岩	下部	以中—薄层细粉砂岩为主,零星可见生物碎屑。间歇性可见风暴作用改造形成的低缓穹窿状生物碎屑堆积体(以古杯类、三叶虫和小壳动物为主)	中缓坡
F3	漂浮岩	中一下部	主要为中—薄层粉砂岩和粉砂质黏土岩,粒径超过2 mm 的生物碎屑呈分散漂浮状分布,含量10%~30%。生屑类型以古杯类为主,其他为小壳类和三叶虫等	中缓坡上部
F4	含钙或钙质细砂岩	中一下部	以细砂岩为主,少量粗粉砂岩。可见含量10%~30%的生物碎屑和内碎屑,以钙质微生物、古杯类、三叶虫等碎片为主,球团粒等非骨屑颗粒较为常见	内缓坡潮下低能带
F5	(含砂)生屑、球团粒泥粒—颗粒灰(云)岩	中一下部	以中—厚层状产出。颗粒类型包括古杯类、钙质微生物和三叶虫等碎片,以及似球粒、集合粒等。颗粒支撑结构,部分亮晶胶结。陆源碎屑颗粒主要为细砂级石英和岩屑。灰质颗粒部分发生白云石化作用	潮下带上部
F6	生屑—鲕粒—核形石泥粒灰(云)岩	上部	厚层,块状构造。鲕粒与核形石常见,且大部分鲕粒被白云石交代;核形石含量20%~30%,粒径0.7~1.5 cm;鲕粒粒径0.2~1 mm,内部结构保存较差。钙质微生物组构为管壁清晰的丝状葛万菌;三叶虫、小壳类和古杯类等生物碎片常见,亦可作为核形石核心。部分亮晶胶结	潮下带上部
F7	粘结—障积岩	中部	厚层,块状结构,常发生白云石化。以葛万菌为主的钙质微生物以丝状缠绕方式形成层状和网状结构;共生的生物化石类型丰富,包括古杯类、棘皮类、三叶虫和小壳类等	生物礁
F8	格架岩	中部	厚层,块状结构,部分组构发生白云石化。镜下可见蓝细菌为主的微生物组构以网状和分枝状形式构成格架,格架间孔洞被栉壳状和粒状(2期)亮晶方解石胶结物充填。生物碎屑非常丰富,包括三叶虫、小壳类和古杯类等	生物礁
F9	鲕粒颗粒灰(云)岩	上部	中—厚层,块状结构。鲕粒分选良好,粒径0.5~1.5 mm,同心放射状纹层结构为主,鲕粒核心以棘皮或三叶虫碎片为主;鲕粒含量占60%~70%,含少量陆源石英颗粒,亮晶胶结。受成岩作用影响,部分鲕粒发生白云石交代、重结晶和压溶改造	鲕粒滩
F10	球团粒、生屑泥粒—颗粒灰(云)岩	中—上部	厚层,块状结构。颗粒以钙质微生物(几乎全部为葛万菌)黏结形成的团块、集合粒为主,含少量三叶虫、小壳类和古杯动物碎屑,亮晶胶结。非骨屑颗粒易被白云石交代	潮下带上部—潮间带
F11	残余微生物球团粒白云岩	近顶部	形貌上以灰白色为主,可见少量不均匀斑块特征。镜下以中—粗晶白云石为主,鞍形白云石具波状消光特征。阴极光下可见大量残余球团粒和集合粒	潮间带
F12	鸟眼—窗格构造灰(云)岩	近顶部	中层状,鸟眼、窗格构造非常发育。大量隐晶质微生物组构以层状、网状结构产出,亦可见少量生屑被微生物组构黏结。纹层状组构少部分被极细晶白云石交代;凝块状组构大部分被细晶白云石交代	潮上带
F13	含球团粒粉砂—黏土质泥晶灰岩	顶部	中—薄层状,与上覆阎王庙组紫红色粉砂质黏土岩呈整合接触。颗粒为隐晶质破碎条带状球团粒,含量约10%。陆源碎屑组分含量20%~30%,其余为泥晶基质	潮上带

石化程度最高,呈灰白色—土黄色斑块状集合体(图 4-h)。镜下可见纹层状结构部分被极细晶(4~16 μm)白云石所交代(图 6-g),凝块状结构大部分被细晶(30~90 μm)白云石交代(图 6-h),白云石晶体呈半自形—他形;鸟眼—窗格结构间方解石胶结物发育良好,未遭受白云石化(图 6-h)。

阴极光下 D4 整体发亮红色光,早期方解石胶结物基本不发光(图 6-i)。

选择性交代的颗粒白云岩(D5):分布于仙女洞组上部(图 4-f),主要位于鲕粒颗粒灰(云)岩(F9)和生屑—鲕粒—核形石泥粒灰(云)岩(F6)中。野外多个露头的 D5 内部均未见白云岩斑块,

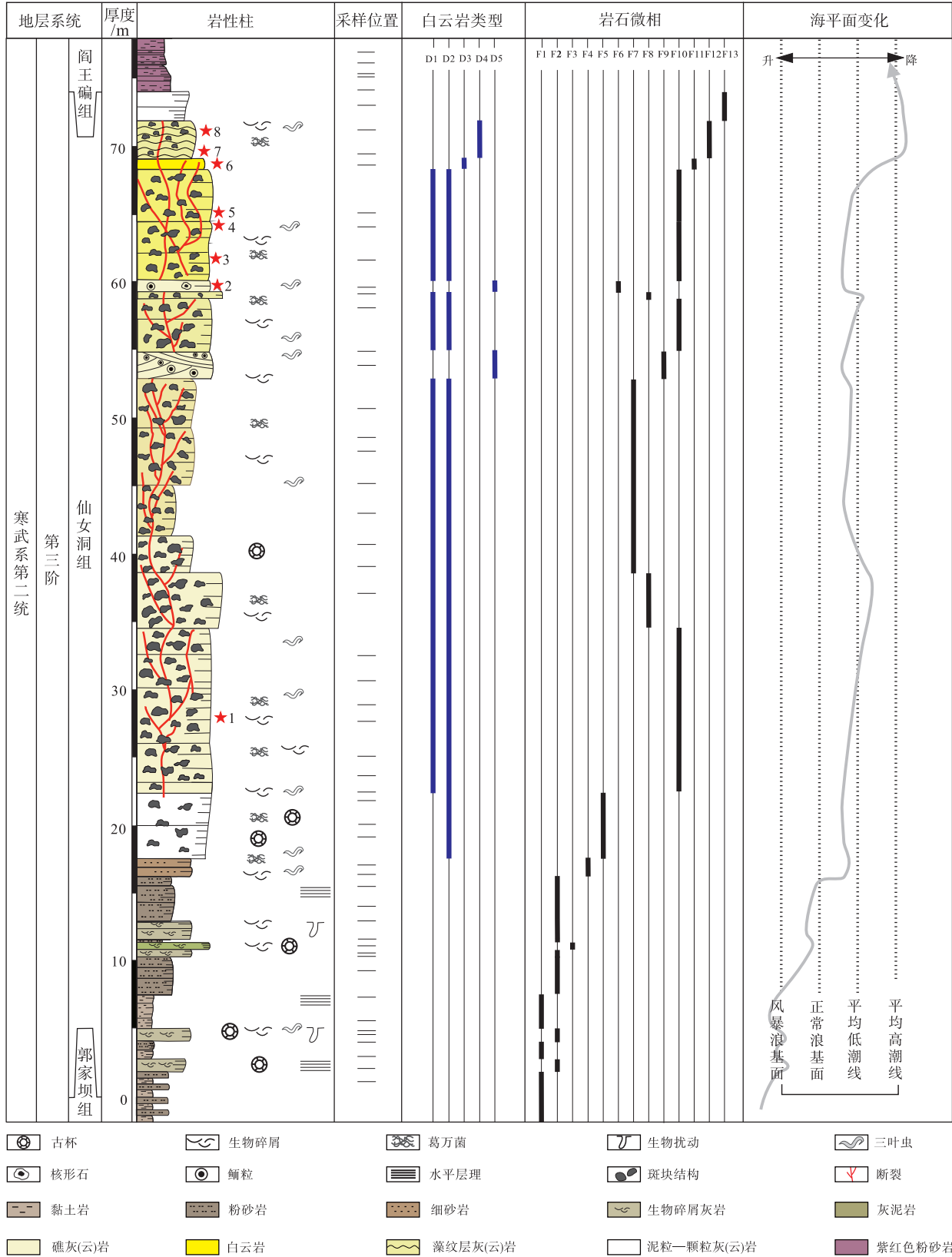
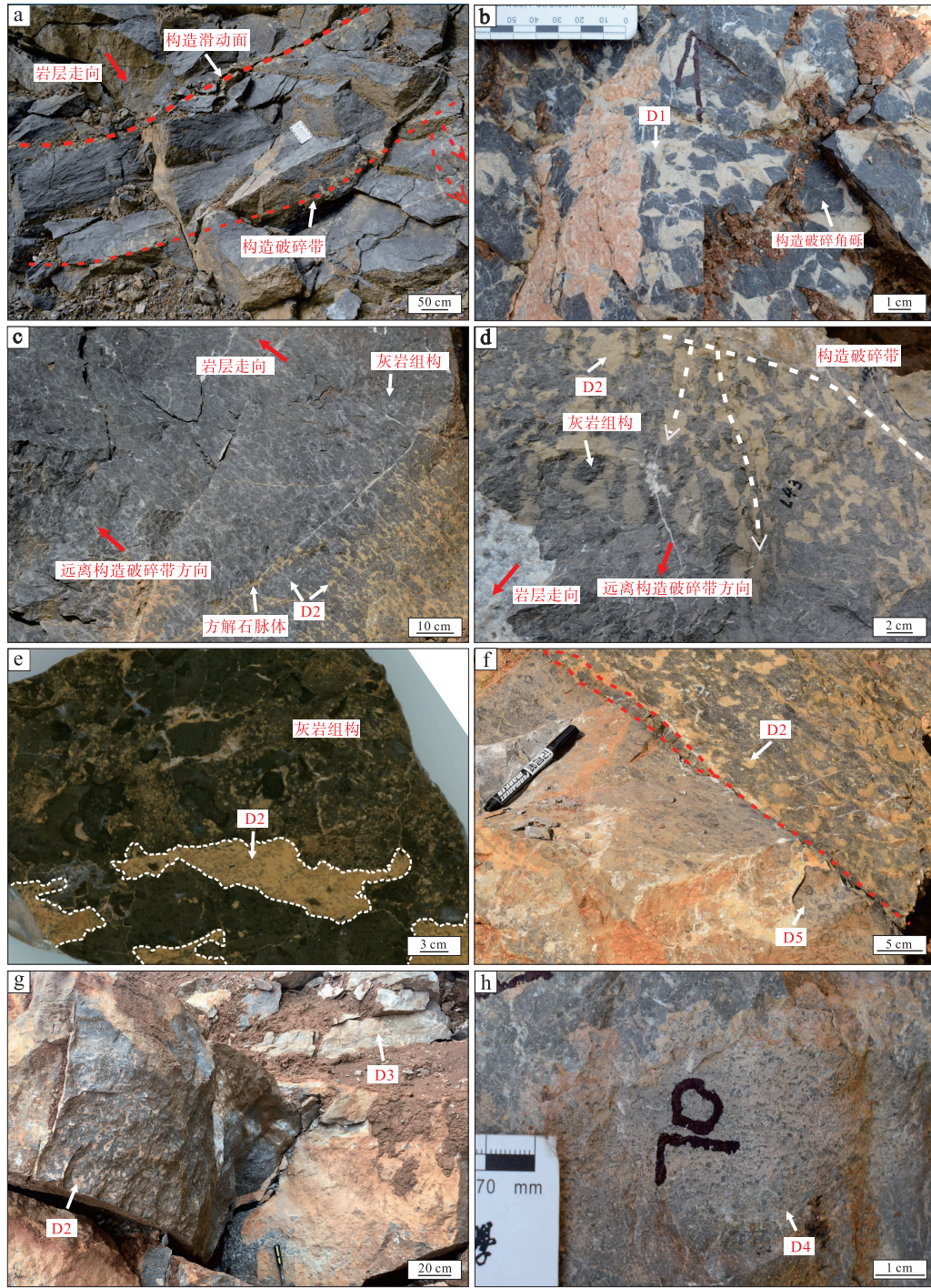


图 3 陕西西乡杨家沟剖面寒武系仙女洞组综合柱状图

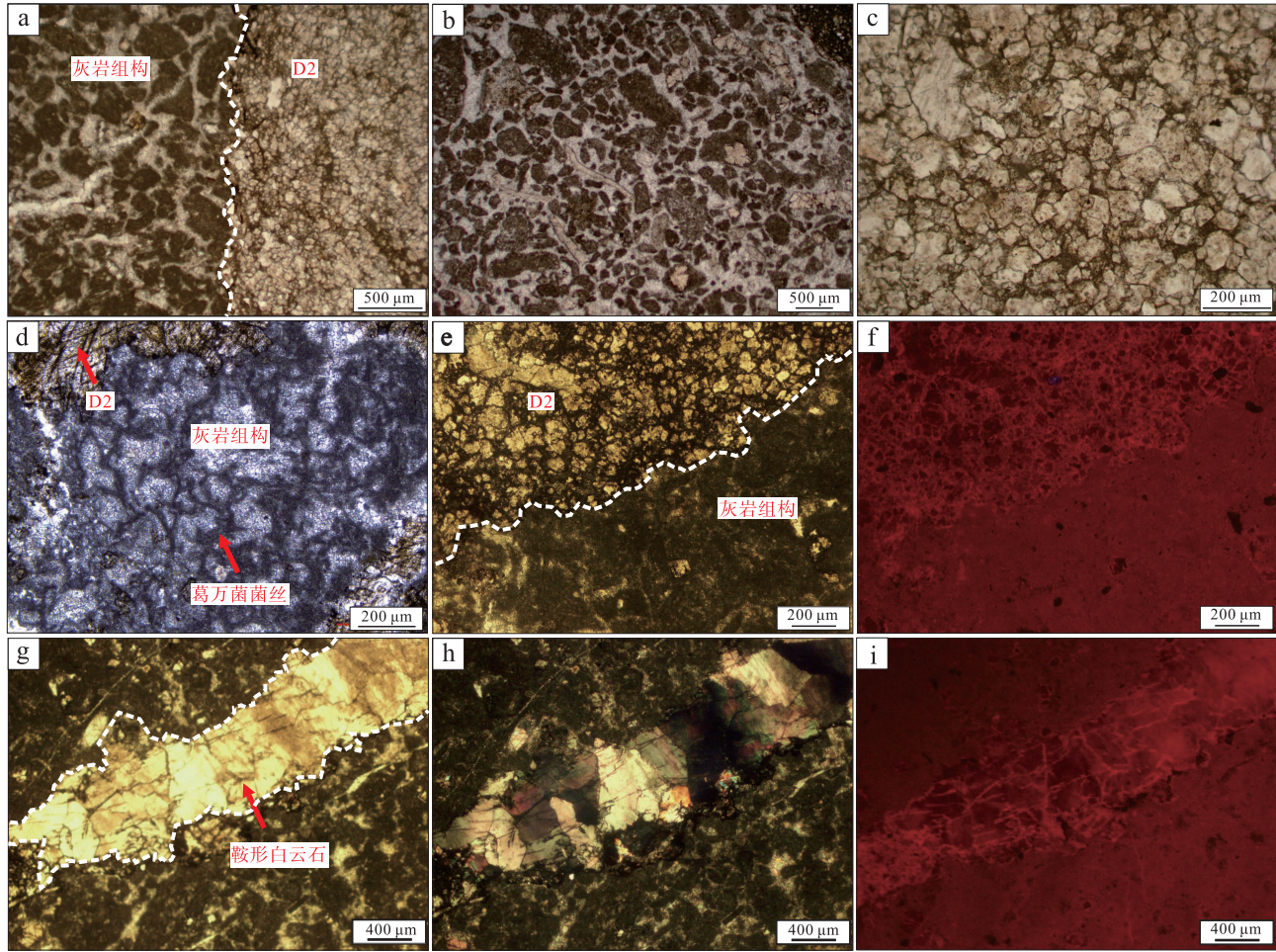
Fig. 3 Integrated column of the Cambrian Xiannüdong Formation in the Yangjiagou section, Xixiang County, Shaanxi Province



a—仙女洞组中上部构造作用面、破碎带，以及垂直和平行层面的流体运移通道，见构造破碎白云岩（D1），距仙女洞组底部 30.5 m 处；b—构造破碎白云岩（D1）细节特征，点 4；c—非组构选择性交代的白云岩斑块（D2），随着远离构造破碎带，颜色由灰白色—土黄色逐渐过渡为浅灰白色，可见方解石脉体平行于构造作用面，距仙女洞组底部 48.5 m 处；d—非组构选择性交代的白云岩斑块（D2）细节特征，点 3；e—非组构选择性交代的白云岩斑块（D2）和围岩光面特征，点 1；f—选择性交代的颗粒白云岩（D5）和上覆非组构选择性交代的白云岩斑块（D2）界限，点 2；g—非组构选择性交代的白云岩斑块（D2）与上覆中粗晶白云岩（D3）界限附近特征，点 6；h—组构选择性交代的白云岩斑块（D4），凝块石组构被白云石选择性交代，点 7。样品位置来源见图 3 中红色星号标志

图 4 陕西西乡杨家沟剖面寒武系仙女洞组白云岩类型及野外特征

Fig. 4 Field photographs showing types and characteristics of dolostone from the Cambrian Xiannüdong Formation in the Yangjiagou section, Xixiang County, Shaanxi Province



a—浅灰白色非组构选择性交代的白云岩斑块(D2)与围岩,围岩部分为灰岩组构,两者界限清晰,单偏光,点3;b—灰岩组构,主要为微生物球团粒生屑泥粒—颗粒灰岩,单偏光,点3;c—浅灰白色非组构选择性交代的白云岩斑块(D2),单偏光,点3;d—非组构选择性交代的白云岩斑块(D2)与围岩灰岩组构,灰岩以葛万菌菌丝为主,单偏光,点1;e—土黄色非组构选择性交代的白云岩斑块(D2)与其围岩灰岩组构,单偏光,点3;f—阴极发光特征,与e视域一致;g—构造裂隙中的鞍形白云石,单偏光,点3;h—鞍形白云石,正交偏光,与g视域一致;i—阴极发光特征,与g视域一致。样品位置来源见图3中红色星号标志

图5 陕西西乡杨家沟剖面寒武系仙女洞组不同组构镜下特征(I)

Fig. 5 Characteristics of different components from the Cambrian Xiannüdong Formation in the Yangjiagou section, Xixiang County, Shaanxi Province (I)

胶结致密,与上覆D2发育岩层接触部位可见D2被顺层阻隔(图4-f)。镜下可见部分鲕粒和核形石颗粒被白云石交代,核形石粒径一般大于2 mm,以生屑碎片为核心,保存情况较好(图6-c)。

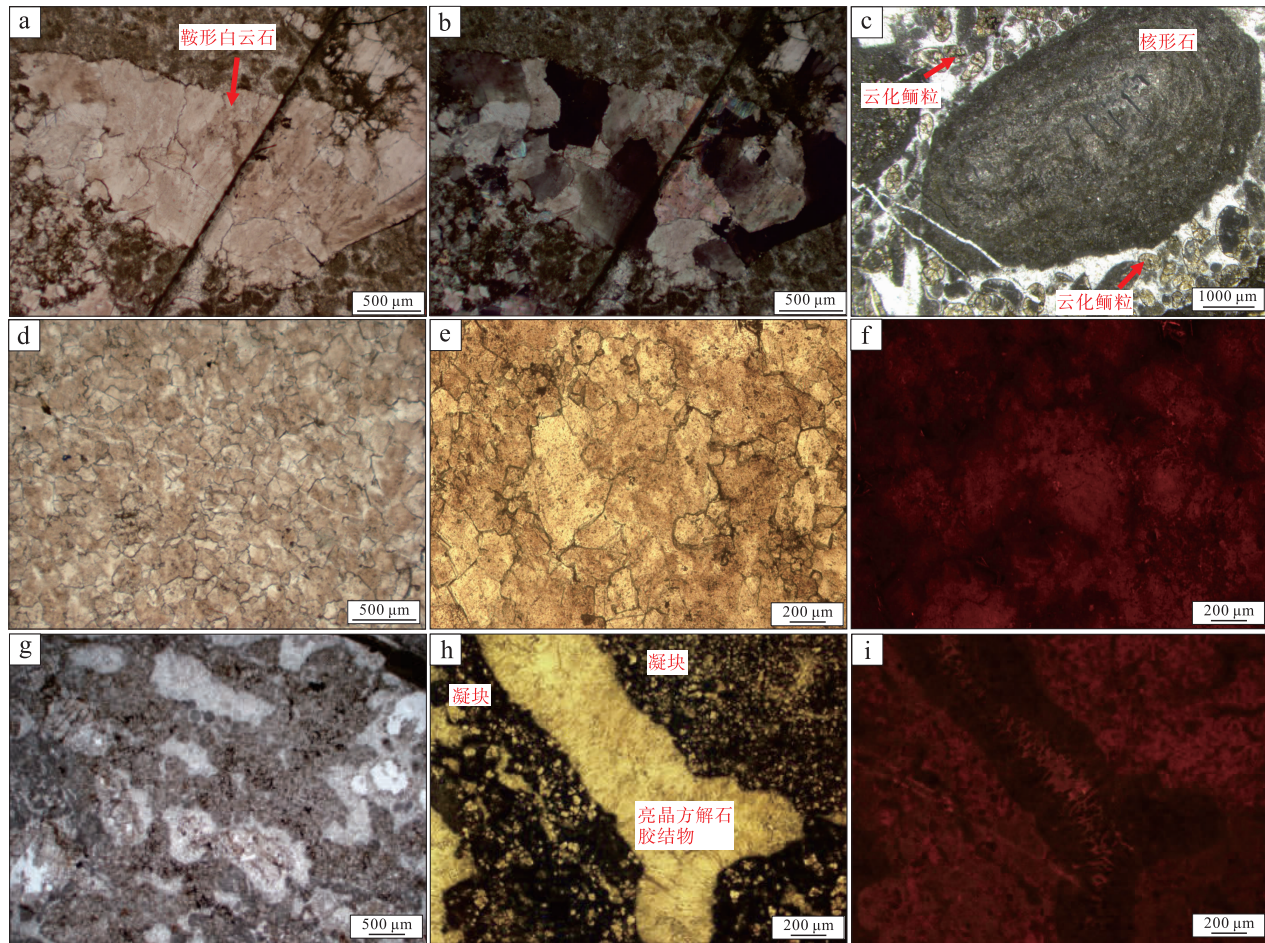
4.3 碳氧同位素特征

非组构选择性交代的白云岩斑块(D2)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(VPDB,下同)在 -0.46‰ ~ 0.27‰ 之间, $\delta^{18}\text{O}$ 值在 -8.17‰ ~ -6.58‰ 之间;D2灰岩组构的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -0.33‰ ~ -0.26‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -8.45‰ ~ -8.39‰ (表2)。切穿D2的方解石脉体 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -1.01‰ ,

$\delta^{18}\text{O}$ 值为 -8.19‰ 。另外,中—粗晶白云岩(D3)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -0.64‰ , $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -8.14‰ (表2)。测试结果与前人报道的同时期未受到显著改造的海相方解石和白云石碳氧同位素相比均明显偏负(图7)。

4.4 微量元素地球化学特征

对具斑块结构白云岩的不同组构开展的微量元素含量分析结果见表3和图8。结果显示,所有分析组构的稀土元素含量经页岩标准化后具中稀土元素相对于轻、重稀土元素富集的特征,与前人报道的同时期胶结物和现代鲕粒稀土元素特征均不相似(图8-a)。经全消解溶液法获得的微量元素结果



a—构造裂隙中的鞍形白云石，单偏光，来源于点 4；b—鞍形白云石，正交偏光，与 a 视域一致；c—生屑—鲕粒—核形石灰（云）岩，组构选择性交代形成颗粒白云岩（D5），单偏光，来源于点 2；d，e—中—粗晶白云岩（D3），单偏光，来源于点 6；f—阴极发光特征，与 e 视域一致；g，h—鸟眼—窗格构造灰（云）岩，组构选择性交代形成白云岩斑块（D4），单偏光，其中 g 来源于点 7，h 来源于点 8；i—阴极发光特征，与 h 视域一致。样品位置来源见图 2 红色星号标志

图 6 陕西西乡杨家沟剖面寒武系仙女洞组不同组构镜下特征（II）

Fig. 6 Characteristics of different components from the Cambrian Xiannüdong Formation in the Yangjiagou section, Xixiang County, Shaanxi Province (II)

显示，非组构选择性交代的白云岩斑块（D2）稀土元素页岩标准化配型与灰岩组构相似，但 D2 总稀土元素浓度高于灰岩组构，且两者均未见明显的 Eu 正异常（ $Eu/Eu^*_{均值} = 1.1$ ）（图 8-b，8-c）；灰岩组构 Y/Ho 均值为 30（图 8-c）。

对不同组构展开的原位微区元素含量分析结果显示，白云石晶体具有中稀土元素相对于轻、重稀土元素富集的特征，可见较为明显的 Eu（ $Eu/Eu^*_{均值} = 1.3$ ）和 Y（ $Y/Ho_{均值} = 32$ ）正异常。同时，白云石晶体还具有极低的 Sr 含量（58 $\mu\text{g/g}$ ）、较高的 Mn 含量（836 $\mu\text{g/g}$ ）（表 3）。D2 围岩中钙质微生物组构的稀土元素经页岩标准化后显示出相对平坦的稀土配型，但具有 Eu 正异常信

号（ $Eu/Eu^*_{均值} = 1.3$ ），Y/Ho 值在 30~35 之间（图 8-d）。D2 围岩中环带状方解石胶结物稀土元素特征与钙质微生物组构具有一定的相似性，但总稀土元素浓度更低（ $\Sigma\text{REE}_{均值} = 3.81 \mu\text{g/g}$ ）（图 8-d）。为了避免测试分析过程中氧化物（BaO）对 Eu 正异常信号的干扰，本次研究对所有原位数据的 Ba 含量与 Eu 异常关系进行了相关性分析，结果显示两者并无显著相关性（ $p > 0.05$ ， $r^2 = 0.14$ ）（表 3）。

5 讨论

5.1 白云岩成因和形成机制分析

在杨家沟剖面仙女洞组中上部，构造破碎白云

表 2 陕西西乡杨家沟剖面寒武系仙女洞组非组构造选择性交代白云岩斑块 (D2) 和围岩稳定碳、氧同位素测试结果

Table 2 Stable carbon and oxygen isotopic compositions of patchy dolomite (D2) from the Cambrian Xiannüdong Formation in Yangjiagou section, Xixiang County, Shaanxi Province

样品编号	样品来源	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$
3-1		-0.46	-6.58
5-1		0.00	-7.94
5-2		0.22	-7.06
5-3	白云岩斑块 (D2)	0.19	-7.09
5-4		0.22	-8.17
5-5		0.18	-6.86
5-6		0.27	-6.60
4-1	D2灰岩组构	-0.26	-8.45
5-8		-0.33	-8.39
6-1	中一粗晶白云岩 (D3)	-0.64	-8.14
4-2	方解石脉体	-1.01	-8.19

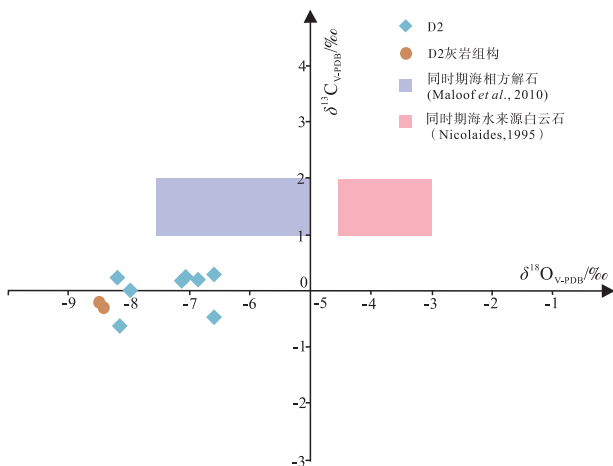


图 7 陕西西乡杨家沟剖面寒武系仙女洞组非组构造选择性交代白云岩斑块 (D2) 中稳定碳、氧同位素组成
Fig. 7 Stable carbon and oxygen isotope compositions of patchy dolostone (D2) from the Cambrian Xiannüdong Formation in Yangjiagou section, Xixiang County, Shaanxi Province

岩 (D1) 主要分布在垂直岩层面的构造破碎带内 (图 4-a, 4-b); 非组构造选择性交代的白云岩斑块 (D2) 分布于构造破碎带的边缘并向与其相邻的岩层方向顺层延伸 (图 4-c, 4-e)。随着距离构造破碎带越来越远, D2 从灰白色—土黄色极细晶—细晶白云石为主并具有少量粗晶鞍形白云石, 转变为以浅灰白色细晶—中晶白云石为主 (图 4-c, 4-d; 图 9-a, 9-b)。D2 围岩部分 (灰岩) 相对较好地

保留了原始沉积组构, 岩相类型包括 F5、F7、F8 和 F10 (图 5-b, 5-d; 图 9-c, 9-d)。另外在鸟眼—窗格构造灰 (云) 岩 (F12) 中可见凝块组构被选择性交代为白云岩斑块 (D4) (图 4-h; 图 9-g, 9-h)。不同的是, 中一粗晶白云岩 (D3) (图 4-g; 图 9-e, 9-f) 与选择性交代的颗粒白云岩 (D5) (图 4-f; 图 9-i, 9-j) 所处岩层中几乎未见斑块结构; 在偏光显微镜下, D3 中很难辨认出原始沉积组构, 但在阴极光下, 残余颗粒组构较为清晰, 并且与相邻岩层的围岩特征相似 (图 6-e, 6-f)。这些特征揭示了研究区斑块白云岩类型的多样性和岩相特征的复杂性。

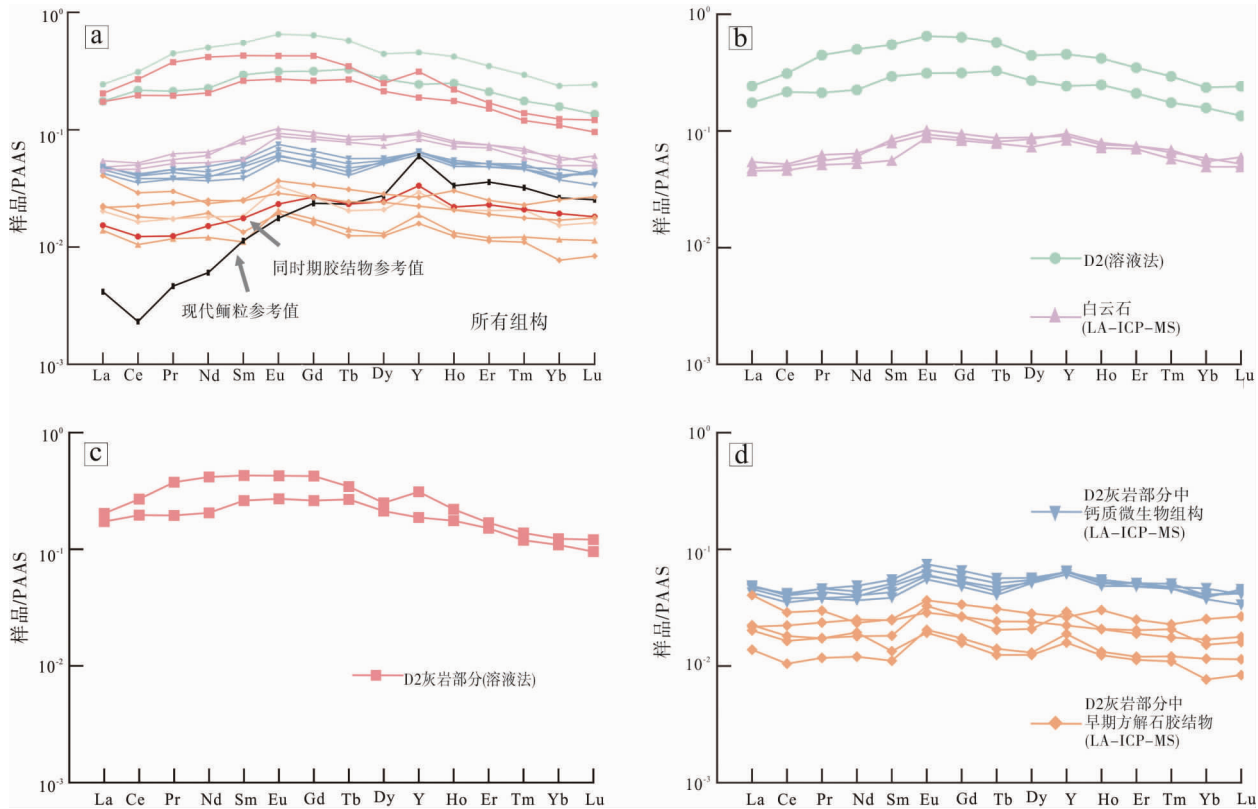
生物扰动作用被认为是斑块结构白云岩形成的一种主要机制, 其在寒武系—奥陶系豹斑白云岩形成过程中具有控制作用 (齐永安等, 2014; 刘梦瑶等, 2020)。虽然研究区斑块结构与豹斑白云岩中的花斑状和网格状形貌具有一定相似性, 但是两者成因可能存在较大差异, 这是因为研究区仙女洞组的斑块结构是沿构造破碎断裂带周缘分布 (图 4-a), 并且斑块特征从构造破碎带向远端逐渐减弱 (图 4-c), 与豹斑白云岩层状均匀分布且横向发育延伸性好的特征不符 (齐永安等, 2014; 刘梦瑶等, 2020)。此外, 研究区白云岩斑块主要切割原始生屑泥粒—颗粒灰岩和生物礁灰岩 (图 9-a 至 9-d), 而原岩沉积环境水体能量强, 不适合生物扰动构造的大量发育。因此笔者推测研究区各类白云岩的成因与生物扰动作用无直接关联。

岩溶作用及随后叠加的埋藏成岩改造可以形成斑块结构的白云岩, 并且淡水主导的疏导体系通过溶蚀改造先形成的破碎带、裂缝和粒间孔等也可形成非均质性斑块结构 (谭秀成等, 2015; 徐妍等, 2023)。早期岩溶作用形成的斑块结构一般发生在地貌高部位的浅埋藏阶段, 属于淡水流体对原始相对易溶组构的改造 (谭秀成等, 2015)。同时, 受淡水极低稀土元素浓度稀释效应影响, 交代形成的白云石稀土元素浓度常低于灰岩组构, 且稀土元素配型特征与母岩较为相似 (胡忠贵等, 2009; 胡文瑄等, 2010)。此外, 溶蚀改造的残余黏土组构稀土元素性质会趋向于页岩稀土配型 (雷国良等, 1994)。但是, 研究区白云岩的发育并未明显受到地貌高部位的影响, 比如潮上带的云化程度较潮间带弱 (图 9)。此外, 灰岩组构与白云岩斑块呈直接

表 3 陕西西乡杨家沟剖面寒武系仙女洞组斑块白云岩和围岩中不同组微量元素测试结果 (单位: $\mu\text{g/g}$)
 Table 3 Trace element compositions of different components in patchy dolostone and country rock from the Cambrian Xiannüdong Formation
 in the Yangjiagou section, Xixiang County, Shaanxi Province (Unit: $\mu\text{g/g}$)

样品 编号	样品 来源	Mn	Sr	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	Eu/Eu*	Y/Ho	Mn/Sr
2-1	D2 灰岩组			0.727	1.964	4.077	0.458	1.874	0.452	0.099	0.474	0.073	0.383	2.582	0.081	0.217	0.032	0.202	0.032	10.42	1.1	32	
3-1			1.241	1.722	3.568	0.390	1.662	0.409	0.094	0.094	0.441	0.072	0.365	2.210	0.077	0.212	0.030	0.183	0.029	9.254	1.1	29	
2-2	白云岩			1.416	2.348	4.700	0.544	2.257	0.580	0.151	0.709	0.121	0.681	3.779	0.155	0.447	0.068	0.388	0.064	13.21	1.2	24	
3-2	斑块(D2)			2.379	1.741	3.947	0.425	1.819	0.459	0.109	0.531	0.088	0.465	2.865	0.109	0.295	0.044	0.265	0.041	10.34	1.1	26	
1-1	白云岩 (D4) 中白云石	754	66	6.074	1.835	4.003	0.492	2.050	0.472	0.110	0.693	0.067	0.413	2.450	0.076	0.212	0.026	0.165	0.023	10.64	1.2	32	11.4
1-2		882	53	1.322	1.739	3.671	0.455	1.780	0.311	0.095	0.594	0.060	0.342	2.252	0.071	0.200	0.023	0.140	0.021	9.503	1.4	32	16.6
1-3		873	53	1.504	2.076	4.135	0.551	2.187	0.439	0.101	0.773	0.063	0.399	2.566	0.079	0.211	0.028	0.154	0.026	11.22	1.2	32	16.5
1-1	D2 灰岩组 中钙质微生物	327	383	12.54	1.751	3.046	0.359	1.335	0.269	0.065	0.371	0.034	0.252	1.724	0.051	0.137	0.019	0.109	0.020	7.800	1.3	34	0.9
1-2		382	403	15.00	1.866	3.284	0.406	1.652	0.306	0.081	0.389	0.044	0.266	1.731	0.054	0.145	0.019	0.115	0.019	8.647	1.3	32	1.0
1-3		400	374	5.807	1.816	3.341	0.406	1.486	0.282	0.072	0.363	0.040	0.256	1.734	0.050	0.147	0.021	0.114	0.018	8.412	1.3	35	1.1
1-4		350	393	6.564	1.627	2.806	0.335	1.241	0.214	0.060	0.362	0.032	0.240	1.655	0.048	0.138	0.019	0.106	0.015	7.242	1.4	34	0.9
1-5		402	442	5.516	1.867	3.214	0.381	1.372	0.239	0.064	0.411	0.036	0.243	1.772	0.052	0.146	0.019	0.131	0.018	8.193	1.3	34	0.9
1-6	D2 灰岩组 中早期方解石 胶结物	476	210	23.37	1.550	2.307	0.264	0.797	0.140	0.040	0.200	0.024	0.133	0.713	0.030	0.071	0.009	0.071	0.012	5.648	1.4	24	2.3
1-7		773	119	52.44	0.833	1.779	0.209	0.847	0.137	0.031	0.175	0.019	0.112	0.601	0.021	0.054	0.007	0.048	0.008	4.281	1.2	29	6.5
1-8		260	453	193.3	0.529	0.835	0.104	0.409	0.062	0.022	0.099	0.011	0.061	0.509	0.013	0.034	0.005	0.033	0.005	2.222	1.7	39	0.6
1-9		228	499	34.35	0.860	1.445	0.153	0.661	0.074	0.021	0.116	0.010	0.058	0.429	0.012	0.032	0.004	0.022	0.004	3.472	1.5	35	0.5
1-10		300	338	13.75	0.774	1.307	0.154	0.613	0.101	0.035	0.178	0.016	0.098	0.792	0.021	0.058	0.008	0.043	0.007	3.414	1.7	38	0.9

备注: 前 2 个组的数据(2-1、3-1、2-2 和 3-2)为全消解溶液法测试结果,其他数据为原位微区 LA-ICP-MS 元素含量测试结果。Eu/Eu* 计算方法来自 Lawrence 等(2006)。



a—所有组构经后太古代澳大利亚页岩 (PAAS) 标准化后稀土元素和钇 (REY) 配分模式图, 研究区同时期 (寒武纪第二世第三期) 海水胶结物 REY 特征来自 Gong 等(2021), 指示海水 REY 特征的现代鲕粒数据来自 Li 等(2019); b—全溶解溶液法获得的非组构选择性交代的白云岩斑块 (D2) 和原位微区法获得的白云石晶体的 PAAS 标准化 REY 配分模式图, 白云石晶体具中稀土元素相对轻、重稀土元素富集和 Eu 正异常特征, D2 富含稀土元素且中稀土元素配型同样具相对富集特征; c—全溶解溶液法获得的 D2 围岩 (灰岩) 组构 PAAS 标准化 REY 配分模式图, 中稀土元素配型具富集特征; d—原位微区 LA-ICP-MS 法获得的 D2 围岩组构中钙质微生物和早期方解石胶结物 PAAS 标准化 REY 配分模式图, 具有 Eu 正异常特征。注: 由于稀土元素 Pm 具放射性, 在自然环境很难存在, 因此本文中未标注其位置

图 8 陕西西乡杨家沟剖面寒武系仙女洞组斑状白云岩不同组构经页岩标准化后稀土元素配分模式
Fig. 8 Shale-normalized REY patterns of different components of patchy dolostone from the Cambrian Xiannüdong Formation in the Yangjiagou section, Xixiang County, Shaanxi Province

接触关系 (图 5-a), 并且白云岩斑块具有高于灰岩部分的总稀土元素浓度和页岩标准化后中稀土元素配型上拱特征 (图 8-b, 8-c)。由于研究区白云岩发育层位陆源碎屑组分含量极低, 缺乏长石等富 Eu 正异常信号的溶蚀叠加, 但白云石晶体和灰岩部分原位微区分析结果均具有 Eu 正异常特征 (图 8-b, 8-d), 说明这些特征是单纯的岩溶作用模式不能解释的。

萨布哈蒸发作用以及渗透回流作用一般发生在潮坪环境和沉积不久的浅埋藏环境 (Manche and Kaczmarek, 2019; 朱光有和李茜, 2023), 但是研究区白云石化程度最高的是潮间带沉积物。虽然潮上带微生物凝块结构受到选择性白云石化程度相对于纹层状结构较高 (D4), 但两者白云石化程度均

低于原始潮间带沉积物 (图 4-h; 图 9)。白云岩斑块的碳氧同位素值与当时海水信号相比并没有发生蒸发浓缩后的正偏特征 (图 7)。此外, 系统岩相学工作约束下的潮下低能环境和鲕粒滩环境的白云石化 (D5) 具非均质性, 且白云石化程度有很大差别 (图 9-i, 9-j), 这与萨布哈蒸发作用以及渗透回流作用模式的特征很难匹配。

由于稀土元素配位行为的差异, Ho 随沉积物从海水中被移除的速率是 Y 的 2 倍, 因此在保留原始海水信息的碳酸盐沉积物中一般具有明显的 Y 正异常 (即高 Y/Ho) (Nozaki et al., 1997), 并且这种信号较为稳定, 能够在未受到明显外源流体信号改造的情况下保存下来 (Webb et al., 2009)。但是研究区斑块白云岩中 Y/Ho (23~39) 明显低于海

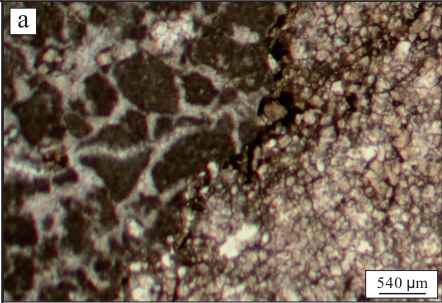
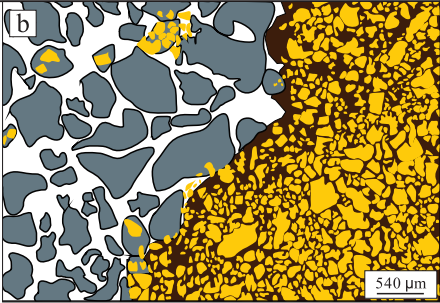
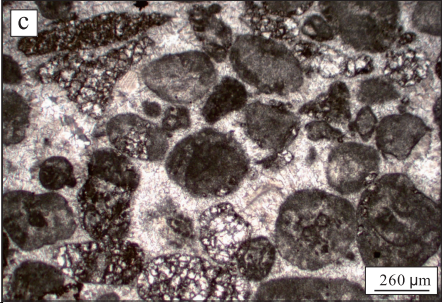
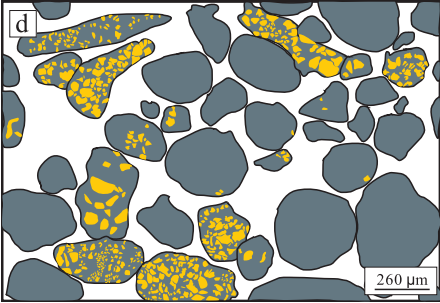
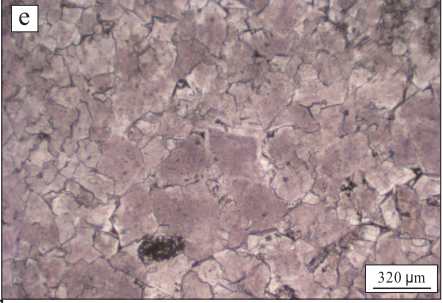
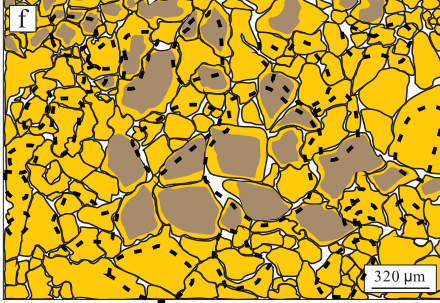
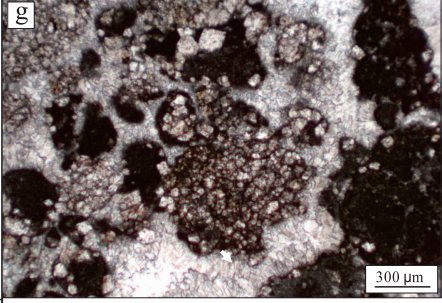
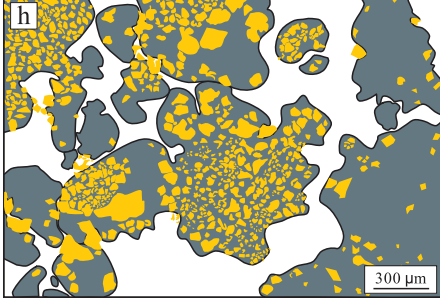
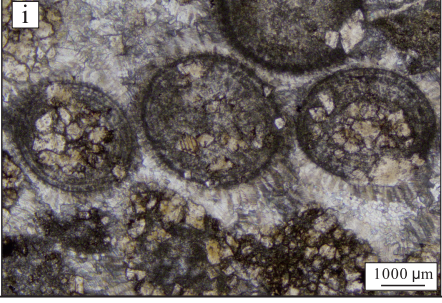
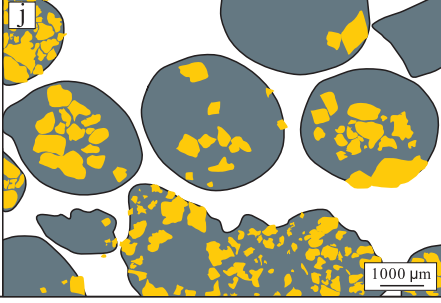
白云岩类型	镜下特征+素描图		结构特征	沉积环境
D2			非结构选择性交代的白云岩斑块 白云石晶体一类以极细—细晶为主，另一类以细—中晶为主；D2与灰岩结构间界限清楚，以缝合线分隔，在部分缝合线附近有鞍形白云石发育	潮下带 上部— 潮间带
			D2围岩(灰岩结构) 以亮晶胶结为主，具有期次性；部分发生选择性白云石化，白云石晶体以细—中晶为主	
D3			中—粗晶白云岩 白云石晶体之间呈镶嵌接触，半自形—他形；阴极光下具有残余球团粒、集合粒特征；可见鞍形白云石发育	潮间带
D4			结构选择性交代的白云岩斑块 白云石晶体以细晶为主，可见中晶白云石；主要分布于凝块内部，可完全或部分交代凝块结构；具期次性亮晶方解石胶结物，鸟眼—窗格构造发育	潮上带
D5			选择性交代的颗粒白云岩 结构致密，未见白云岩斑块；颗粒内部部分或完全白云石化，白云石晶体以中晶为主；亮晶方解石胶结，具期次性，少见白云石化	鲕粒滩

图 9 陕西西乡杨家沟剖面寒武系仙女洞组主要白云石化组构类型、特征和原始沉积环境

Fig. 9 Types, characteristics, and originally depositional environments of various dolomitized components from the Cambrian Xiannüdong Formation in the Yangjiagou section, Xixiang County, Shaanxi Province

水来源 Y/Ho (39~45)(图 8-a)。结合 D2 具有页岩标准化后的中稀土元素配型相对于轻稀土和重稀土元素富集、具明显 Eu 正异常以及与当时海相白云石相比氧同位素偏负等特征(图 7; 图 8), 笔者推测海水白云石化成因可能性很低。

此外, 研究区斑块白云岩的形成与单纯的埋藏白云石化作用关系不大, 这是因为埋藏作用形成的白云石以中—粗晶、自形—半自形为主要特征(朱光有和李茜, 2023), 而研究区斑块状白云岩中白云石晶体以细晶为主, 自形程度各异。同时, 埋藏白云石化需要埋藏环境存在充足的镁离子来源, 而杨家沟剖面仙女洞组中上部陆源黏土组分含量极低, 限制了黏土矿物来源镁离子的供给(表 1)。汉南—米仓山地区多个剖面仙女洞组岩石类型非常相似(邓嘉婷等, 2021; 李红等, 2021; 李杨凡等, 2023), 却均未见明显白云石化现象(如唐家河和龙头山剖面; 图 1), 且多个具有较高黏土组分含量的剖面(如唐家河剖面)在仙女洞组也没有发生显著白云石化(曾楷等, 2020; Li *et al.*, 2021)。

排除上述可能性成因后, 笔者认为研究区仙女洞组白云岩的形成很可能与断层控制的热液白云石化作用有关。这是因为: (1) 研究剖面与临近发育厚层白云岩的剖面均紧邻白沔峡断裂带(图 1), 这为断层控制的白云石化提供了构造基础; (2) 构造破碎白云岩(D1)形成于垂直岩层面的构造破碎带内, 基质角砾以棱角—次棱角状为主, 周围被 D1 包裹(图 4-b)。这种特征与典型构造控制热液白云石化岩石学组构——水力压裂角砾岩化非常相似(Jébrak, 1997; Martín-Martín *et al.*, 2015)。随着远离构造破碎带, 非构造选择性交代的白云岩斑块(D2)发育且白云石化程度逐步减弱(图 4-c, 4-d), 说明研究区内的白云岩分布显著受到构造破碎带的控制; (3) 高温环境下由于 Eu 热化学氧化还原行为的特殊性, 被还原为二价的 Eu^{2+} 离子半径显著增加(远大于常见造岩矿物中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 离子半径), 络合物稳定性更强, 与其他三价相邻稀土元素(REE^{3+})相比更容易保留在热流体中而不会被移出(如形成高温矿物), 在温度降低时($<200\text{ }^{\circ}\text{C}$) Eu^{2+} 被快速氧化为 Eu^{3+} 。由于高价态阳离子更容易被吸附, 因而相对相邻稀土元素更加富集的 Eu^{3+} 同其他 REE^{3+} 一道从流体中脱

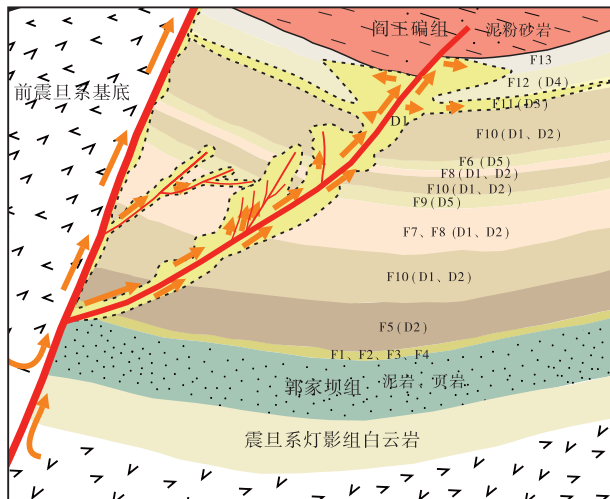
离进入碳酸盐矿物晶格(REE^{3+} 离子半径与 Ca^{2+} 非常接近), 造成热液影响下的碳酸盐矿物一般具有 Eu 正异常特征(Bau and Möeller, 1992; Cai *et al.*, 2008; Debruyne *et al.*, 2016)。在排除长石矿物污染和测试过程中 BaO 干扰后, 可以认为研究区 D2 围岩和白云石晶体中 Eu 正异常特征主要与上述热液流体中稀土元素分馏行为有关; (4) 导致碳酸盐矿物中 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显偏负的因素除了热液流体改造外, 大气淡水成岩作用也是可能的因素之一(Swart, 2015)。但是, 淡水成岩改造过程对碳同位素值影响同样非常显著($-8\text{‰} \sim -4\text{‰}$), 而研究区碳同位素数据与当时海水范围差别不大(约 1‰ ; 图 7), 显示出淡水成岩作用可能并非白云石形成的主要因素。相反, 温度可能是 D2 氧同位素值明显低于当时海水来源白云石范围的重要原因; (5) 构造破裂缝周缘大量具波状消光特征的粗晶鞍形白云石的发育(图 5-g, 6-a), 是热液成因白云石化的一个矿物学证据。此外, 本次研究发现通过全消解法获得的白云岩斑块并不具有 Eu 正异常, 其原因可能与斑块结构内部除了白云石矿物外还含有大量受热流体影响的其他自生矿物有关, 这会导致白云石的 Eu 正异常信号被掩盖(图 8-c)。而原位微区分析对单晶体白云石获得的结果能够揭示这种热液矿物稀土元素特点(图 8-b), 显示出原位微区分析的优势。

5.2 断层控制的白云岩形成机制

除杨家沟剖面外, 西乡堰口镇至白勉峡镇之间多个剖面的仙女洞组均发育厚层结晶白云岩和斑块白云岩(图 1; 图 2), 它们被上覆阎王庙组底部紫红色粉砂岩和下伏郭家坝组灰色—灰绿色粉砂岩及粉砂质黏土岩分隔, 且越靠近仙女洞组上部白云石化程度越高。基于系统的岩相学分析以及针对白云岩的岩石学和地球化学证据, 本次研究尝试构建了研究区受断层控制白云岩的形成模式(图 10)。在该模式下, 各类白云岩(D1 至 D5)集中保存在顶底 2 套低渗透率的、陆源碎屑细组分主导的岩石类型之间。其中构造破碎白云岩(D1)主要沿垂直贯通仙女洞组中—上部岩层方向分布, 周缘以非构造选择性交代的白云岩斑块(D2)发育为特征(图 4-a, 4-c, 4-d)。白云石化最彻底的中—粗晶白云岩(D3)原始组构形成于潮间带环境, 其下部和上

部分别与非组构选择性交代的白云岩斑块 (D2) 和选择性交代的白云岩斑块 (D4) 相邻(图 4-g; 图 9)。垂直岩层面的构造破碎角砾岩带应属于热液流体通道(图 4-a)。胶结致密的鲕粒颗粒灰(云)岩和生屑—鲕粒—核形石灰(云)岩对于热流体的运移可能起到了一定阻挡作用(图 4-f), 在内部形成组构选择性交代的颗粒白云岩 (D5)。

由于研究区主要受印支期华北板块与华南板块碰撞影响, 从晚三叠世开始汉南—米仓山古陆构造抬升, 并与大巴山前陆弧形构造带北缘接触形成白沔峡断裂(魏显贵等, 1997; 刘树根等, 2006)。笔者推测研究区白云岩的形成与基底热流体通过构造断层、裂隙和破碎带等通道侵入寒武系仙女洞组碳酸盐主导地层有关(图 10)。



岩石微相 (F1—F13) 和白云岩类型 (D1—D5) 代号和结果部分一致, 红色线条代表断层体系, 橙色箭头指示热液流体移动路径, 且地层厚度非真实厚度, 仅具示意性

图 10 陕西西乡杨家沟剖面寒武系仙女洞组断层控制白云岩发育模式

Fig. 10 Model of fault-controlled patchy dolomite from the Cambrian Xiannudong Formation in the Yangjiagou section, Xixiang County, Shaanxi Province

5.3 断层控制白云岩地质意义

白云岩是油气资源赋存的重要载体之一, 是近年来国内外石油和天然气勘探开发的主要储集岩类型。由于白云石化成因复杂, 如何准确识别不同类型白云岩成因及其形成发育机制是亟待解决的关键问题。四川盆地是中国海相油气勘探领域的主要场所, 针对白云岩开展勘探工作的岩石地层包括灯影组、龙王庙组、长兴组、飞仙关组和嘉陵江组等

(郭旭升等, 2020)。前人对四川盆地白云岩成因的认识多样, 以蒸发—回流渗透、埋藏、海水、岩溶控制或改造叠加等观点为主(马永生等, 2005; 黄思静等, 2006; 邹才能等, 2014; 沈安江等, 2015)。对于热液白云岩往往认为其发育规模有限, 难以形成厚层储集层, 或者是热液作为次要因素与其他主导因素叠合改造的结果。近年来, 针对四川盆地二叠系栖霞组和茅口组构造热液白云岩的研究开始大量出现(陈轩等, 2012), 但是对于其他时代热液成因白云岩形成机制的研究非常薄弱, 并且大多数研究证据局限于地球化学角度。文中通过系统的岩石微相研究, 结合野外观察和室内地球化学测试, 明确了汉南—米仓山地区东部存在受断层控制的白云岩发育。考虑到近东西向断裂带在汉南—米仓山地区存在多组, 且断层带周围碳酸盐岩地层分布较为广泛(图 1), 笔者推测上扬子北缘构造活动区可能存在规模性热液成因主导的厚层白云岩的发育, 这对于上扬子北缘深层白云岩油气勘探具有启示意义。

6 结论

1) 汉南—米仓山地区东部寒武系仙女洞组沿白沔峡断裂带存在断层控制的白云岩发育, 包括构造破碎白云岩 (D1)、非组构选择性交代的白云岩斑块 (D2)、中—粗晶白云岩 (D3)、组构选择性交代的白云岩斑块 (D4), 以及选择性交代的颗粒白云岩 (D5) 共 5 种白云岩类型。

2) 在系统岩相学、岩石学和地球化学证据的约束下, 本次研究发现汉南—米仓山地区东部仙女洞组白云岩的形成与垂向构造破碎带及其横向延伸带有关。同时, 显著低于当时海水的氧同位素组成、白云石晶体具有 Eu 正异常以及页岩化后中稀土富集的稀土元素配型、高 Mn/Sr 值以及大量鞍形白云石在构造缝发育等特征, 共同指向了该白云岩成因与断层控制的热液流体活动有关。

3) 通过对受区域断层控制的仙女洞组白云岩进行研究, 可为汉南—米仓山地区近东西向断裂带附近储集层研究以及其他地区不同时期受热液影响白云岩的识别提供参考。

致谢 感谢两位匿名评审专家的宝贵意见。

参考文献 (References)

- 陈代钊. 2008. 构造-热液白云岩化作用与白云岩储层. 石油与天然气地质, 29(5): 614-622. [Chen D Z. 2008. Structure-controlled hydrothermal dolomitization and hydrothermal dolomite reservoirs. *Oil and Gas Geology*, 29(5): 614-622]
- 陈轩, 赵文智, 张利萍, 赵宗举, 刘银河, 张宝民, 杨雨. 2012. 川中地区中二叠统构造热液白云岩的发现及其勘探意义. 石油学报, 33(4): 562-569. [Chen X, Zhao W Z, Zhang L P, Zhao Z J, Liu Y H, Zhang B M, Yang Y. 2012. Discovery and exploration significance of structure-controlled hydrothermal dolomites in the Middle Permian of the central Sichuan Basin. *Acta Petroli Sinica*, 33(4): 562-569]
- 程裕祺, 项礼文, 朱兆玲, 李善姬. 1999. 中国地层典·寒武系. 北京: 地质出版社, 6-76. [Cheng Y Q, Xiang L W, Zhu Z L, Li S J. 1999. *Stratigraphical Lexicon of China: Cambrian*. Beijing: Geological Publishing House, 6-76]
- 邓嘉婷, 李飞, 龚峤林, 李红, 易楚恒, 连承波. 2021. 埃迪卡拉纪-寒武纪之交微生物岩特征对比及古海洋学意义: 以汉南一米仓山地区为例. 古地理学报, 23(5): 919-936. [Deng J T, Li F, Gong Q L, Li H, Yi C H, Lian C B. 2021. Characteristics and palaeoceanographic significances of microbialite development in the Ediacaran-Cambrian transition: a case study from Hannan-Micangshan area. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 23(5): 919-936]
- 龚峤林, 李飞, 苏成鹏, 曾楷, 唐浩, 谭秀成. 2018. 细粒浊积岩特征、分布及发育机制: 以川北唐家河剖面寒武系郭家坝组为例. 古地理学报, 20(3): 349-364. [Gong Q L, Li F, Su C P, Zeng K, Tang H, Tan X C. 2018. Characteristics, distribution and mechanisms of fine-grained turbidite: a case study from the Cambrian Guojiahe Formation in Tangjiahe Section, northern Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 20(3): 349-364]
- 郭旭升, 胡东风, 黄仁春, 魏志红, 段金宝, 魏祥峰, 范小军, 缪志伟. 2020. 四川盆地深层-超深层天然气勘探进展与展望. 天然气工业, 40(5): 1-14. [Guo X S, Hu D F, Huang R C, Wei Z H, Duan J B, Wei X F, Fan X J, Miao Z W. 2020. Deep and ultra-deep natural gas exploration in the Sichuan Basin: progress and prospect. *Natural Gas Industry*, 40(5): 1-14]
- 韩波, 冯菊芳, 何治亮, 田海芹, 朱爽, 王晓涛. 2017. 四川盆地寒武统豹斑灰岩成因机理及其对储层的影响. 石油与天然气地质, 38(4): 764-775, 783. [Han B, Feng J F, He Z L, Tian H Q, Zhu S, Wang X T. 2017. Origin of the Lower Cambrian leopard-pattern limestones and its influence on reservoirs in the Sichuan Basin. *Oil and Gas Geology*, 38(4): 764-775, 783]
- 韩月卿, 张军涛, 何治亮, 金振奎, 韩文彪, 高平, 郝运轻, 孙伟, 武重阳. 2023. 川西中二叠统栖霞组白云岩特征与成因. 石油与天然气地质, 44(1): 75-88. [Han Y Q, Zhang J T, He Z L, Jin Z K, Han W B, Gao P, Hao Y Q, Sun W, Wu C Y. 2023. Characteristics and genesis of the Middle Permian Qixia Formation dolostone in western Sichuan Basin. *Oil and Gas Geology*, 44(1): 75-88]
- 何治亮, 马永生, 张军涛, 朱东亚, 钱一雄, 丁茜, 陈代钊. 2020. 中国的白云岩与白云岩储层: 分布、成因与控制因素. 石油与天然气地质, 41(1): 1-14. [He Z L, Ma Y S, Zhang J T, Zhu D Y, Qian Y X, Ding Q, Chen D Z. 2020. Distribution, genetic mechanism and control factors of dolomite and dolomite reservoirs in China. *Oil and Gas Geology*, 41(1): 1-14]
- 胡文瑄, 陈琪, 王小林, 曹剑. 2010. 白云岩储层形成演化过程中不同流体作用的稀土元素判别模式. 石油与天然气地质, 31(6): 810-818. [Hu W X, Chen Q, Wang X L, Cao J. 2010. REE models for the discrimination of fluids in the formation and evolution of dolomite reservoirs. *Oil and Gas Geology*, 31(6): 810-818]
- 胡忠贵, 郑荣才, 胡九珍, 文华国, 李瑜, 文其兵, 徐发波. 2009. 川东一渝北地区黄龙组白云岩储层稀土元素地球化学特征. 地质学报, 83(6): 782-790. [Hu Z G, Zheng R C, Hu J Z, Wen H G, Li Y, Wen Q B, Xu F B. 2009. Geochemical characteristics of rare earth elements of Huanglong Formation dolomites reservoirs in eastern Sichuan-northern Chongqing area. *Acta Geologica Sinica*, 83(6): 782-790]
- 黄思静, QING Hairuo, 裴昌蓉, 胡作维, 吴素娟, 孙治雷. 2006. 川东三叠系飞仙关组白云岩铈含量、铈同位素组成与白云石化流体. 岩石学报, 22(8): 2123-2132. [Huang S J, Qing H R, Pei C R, Hu Z W, Wu S J, Sun Z L. 2006. Strontium concentration, isotope composition and dolomitization fluids in the Feixianguan Formation of Triassic, eastern Sichuan of China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(8): 2123-2132]
- 焦存礼, 何治亮, 邢秀娟, 卿海若, 何碧竹, 李程成. 2011. 塔里木盆地构造热液白云岩及其储层意义. 岩石学报, 27(1): 277-284. [Jiao C L, He Z L, Xing X J, Qing H R, He B Z, Li C C. 2011. Tectonic hydrothermal dolomite and its significance of reservoirs in Tarim Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(1): 277-284]
- 雷国良, 王长生, 钱志鑫, 张忠敏, 杨正礼, 漆亮. 1994. 贵州岩溶沉积物稀土元素地球化学研究. 矿物学报, 14(3): 298-308. [Lei G L, Wang C S, Qian Z X, Zhang Z M, Yang Z L, Qi L. 1994. REE geochemistry of karst sediments in Guizhou Province. *Acta Mineralogica Sinica*, 14(3): 298-308]
- 黎霆, 诸丹诚, 杨明磊, 李平平, 邹华耀. 2021. 热液活动对四川盆地中西部地区二叠系茅口组白云岩的影响. 石油与天然气地质, 42(3): 639-651. [Li T, Zhu D C, Yang M L, Li P P, Zou H Y. 2021. Influence of hydrothermal activity on the Maokou Formation dolostone in the central and western Sichuan Basin. *Oil and Gas Geology*, 42(3): 639-651]
- 李红, 李飞, 龚峤林, 曾楷, 邓嘉婷, 王浩铮, 苏成鹏. 2021. 混积岩中重矿物形貌学特征及物源意义: 以川北寒武系第二统仙女洞组为例. 沉积学报, 39(3): 525-539. [Li H, Li F, Gong Q L, Zeng K, Deng J T, Wang H Z, Su C P. 2021. Morphological characteristics and provenance significance of heavy minerals in the mixed siliciclastic-carbonate sedimentation: a case study from the Xiannüdong Formation, Cambrian (Series 2), northern Sichuan. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(3): 525-539]
- 李雅兰, 李飞, 吕月健, 王夏, 王曾俊, 李红, 易楚恒, 李杨凡, 曾伟, 李怡霖. 2024. 陕南勉县寒武系仙女洞组生物礁岩相学及古环境

- 分析. 沉积学报, 42(2): 608-618. [Li Y L, Li F, Lü Y J, Wang X, Wang Z J, Li H, Yi C H, Li Y F, Zeng W, Li Y L. 2024. Petrographic features and paleoenvironmental significance of the Lower Cambrian reef in the Xiannüdong Formation, Mian County, Southern Shaanxi. *Acta Sedimentologica Sinica*, 42(2): 608-618]
- 李杨凡, 李飞, 王夏, 李翔, 李怡霖, 王曾俊, 李雅兰, 易楚恒, 曾伟. 2023. 上扬子北缘寒武纪早期后生动物礁特征及古环境意义. 地球科学, 48(11): 4321-4334. [Li Y F, Li F, Wang X, Li X, Li Y L, Wang Z J, Li Y L, Yi C H, Zeng W. 2023. Sedimentary characteristics and paleoenvironmental significance of Early Cambrian metazoan reefs in northern margin of Upper Yangtze Block. *Earth Science*, 48(11): 4321-4334]
- 李耀西, 宋礼生, 周志强. 1975. 大巴山西段早古生代地层志. 北京: 地质出版社, 1-232. [Li Y X, Song L S, Zhou Z Q. 1975. Early Paleozoic Stratigraphy of Western Daba Mountains. Beijing: Geological Publishing House, 1-232]
- 刘梦瑶, 齐永安, 史云鹤, 高星, 苏中堂, 张立军. 2020. 华北寒武纪—奥陶纪豹皮状碳酸盐岩系生物扰动成因. 沉积学报, 38(1): 91-103. [Liu M Y, Qi Y A, Shi Y H, Gao X, Su Z T, Zhang L J. 2020. Formation mechanism of Cambrian-Ordovician bioturbated dolomites in North China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38(1): 91-103]
- 刘树根, 李智武, 刘顺, 罗玉宏, 徐国强, 戴国汗, 龚昌明, 雍自权. 2006. 大巴山前陆盆地—冲断带的形成演化. 北京: 地质出版社, 51-75. [Liu S G, Li Z W, Liu S, Luo Y H, Xu G Q, Dai G H, Gong C M, Yong Z Q. 2006. The Formation and Evolution of Foreland Basin-thrust Belt in Daba Mountains. Beijing: Geological Publishing House, 51-75]
- 马永生, 蔡勋育, 李国雄. 2005. 四川盆地普光大型气藏基本特征及成藏富集规律. 地质学报, 79(6): 858-865. [Ma Y S, Cai X Y, Li G X. 2005. Basic characteristics and concentration of the Puguang Gas Field in the Sichuan Basin. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 858-865]
- 齐永安, 孟瑶, 代明月, 李姐. 2014. 豫西登封地区寒武系第二统朱砂洞组生物成因的豹斑构造. 地质科技情报, 33(5): 1-8. [Qi Y A, Meng Y, Dai M Y, Li D. 2014. Biogenic leopard patch structures from the Zhushadong Formation (Cambrian Series 2), Dengfeng area, western Henan. *Geological Science and Technology Information*, 33(5): 1-8]
- 钱一雄, 张克银, 陈跃, 陈强路, 田蜜, 尤东华, 罗宇. 2016. 塔里木盆地东北部中上奥陶统却尔克群深水碳酸盐岩及白云岩化. 古地理学报, 18(1): 21-38. [Qian Y X, Zhang K Y, Chen Y, Chen Q L, Tian M, You D H, Luo Y. 2016. Deep-water carbonate rocks and their dolomitization of the Middle and Upper Ordovician Queerquek Formation in northeastern Tarim Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 18(1): 21-38]
- 沈安江, 赵文智, 胡安平, 余敏, 陈娅娜, 王小芳. 2015. 海相碳酸盐岩储集层发育主控因素. 石油勘探与开发, 42(5): 545-554. [Shen A J, Zhao W Z, Hu A P, She M, Chen Y N, Wang X F. 2015. Major factors controlling the development of marine carbonate reservoirs. *Petroleum Exploration and Development*, 42(5): 545-554]
- 谭秀成, 肖笛, 陈景山, 李凌, 刘宏. 2015. 早成岩期喀斯特化研究新进展及意义. 古地理学报, 17(4): 441-456. [Tan X C, Xiao D, Chen J S, Li L, Liu H. 2015. New advance and enlightenment of eogenetic karstification. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 17(4): 441-456]
- 魏柳斌, 王宗延, 李漪, 庞志超, 王前平, 包洪平, 杨琦琦, 王振, 苏中堂, 张立军. 2023. 豹皮(斑)状碳酸盐岩分类与成因初探: 以鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组四段为例. 古地理学报, 26(4): 880-894. [Wei L B, Wang Z Y, Li Y, Pang Z C, Wang Q P, Bao H P, Yang Q Q, Wang Z, Su Z T, Zhang L J. 2023. Classification of Leopard skin (spot) carbonate rock and their formation mechanism: a case study of the Member 4 of Middle Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 26(4): 880-894]
- 魏显贵, 杜思清, 刘援朝, 吴德超. 1997. 米仓山推覆构造的结构样式及演化特征. 矿物岩石, 17(增): 114-122. [Wei X G, Du S Q, Liu Y C, Wu D C. 1997. Tectonic styles and evolution of Micangshan Nappe tectonics. *Mineralogy and Petrology*, 17(S): 114-122]
- 徐妍, 杨雪飞, 唐浩, 伍坤宇, 唐锐锋, 潘爽, 杜忆. 2023. 川中地区龙王庙组花斑白云岩储层特征及成因机理. 天然气地球科学, 34(3): 402-417. [Xu Y, Yang X F, Tang H, Wu K Y, Tang R F, Pan S, Du Y. 2023. Reservoir characteristics and genetic mechanism of mottled dolomite of Longwangmiao Formation in central Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 34(3): 402-417]
- 杨友运, 叶俭. 1996. 陕西西乡杨家沟早寒武世的生物礁. 西北地质, 17(2): 1-5. [Yang Y Y, Ye J. 1996. Early Cambrian reef in Yangjiagou, Xixiang, Shaanxi Province. *Northwestern Geology*, 17(2): 1-5]
- 张岳桥, 施炜, 李建华, 王瑞瑞, 李海龙, 董树文. 2010. 大巴山前陆弧形构造带形成机理分析. 地质学报, 84(9): 1300-1315. [Zhang Y Q, Shi W, Li J H, Wang R R, Li H L, Dong S W. 2010. Formation mechanism of the Dabashan foreland arc-shaped structural belt. *Acta Geologica Sinica*, 84(9): 1300-1315]
- 朱光有, 李茜. 2023. 白云岩成因类型与研究方法进展. 石油学报, 44(7): 1167-1190. [Zhu G Y, Li X. 2023. Progress in genetic types and research methods of dolomite. *Acta Petrolei Sinica*, 44(7): 1167-1190]
- 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 汪泽成, 张宝民, 魏国齐, 王铜山, 姚根顺, 邓胜徽, 刘静江, 周慧, 徐安娜, 杨智, 姜华, 谷志东. 2014. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现. 石油勘探与开发, 41(3): 278-293. [Zou C N, Du J H, Xu C C, Wang Z C, Zhang B M, Wei G Q, Wang T S, Yao G S, Deng S H, Liu J J, Zhou H, Xu A N, Yang Z, Jiang H, Gu Z D. 2014. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 41(3): 278-293]
- 曾楷, 李飞, 龚峤林, 唐浩, 苏成鹏, 车正强, 邓嘉婷, 胡广, 李凌, 曾伟, 谭秀成. 2020. 寒武系第二统仙女洞组混合沉积特征及古环境意义: 以川北旺苍唐家河剖面为例. 沉积学报, 38(1): 166-

181. [Zeng K, Li F, Gong Q L, Tang H, Su C P, Che Z Q, Deng J T, Hu G, Li L, Zeng W, Tan X C. 2020. Characteristics and paleoenvironmental significance of mixed siliciclastic-carbonate sedimentation in the Xiannüdong Formation, Cambrian (Series 2): a case study from the Tangjiahe Section, Wangcang, northern Sichuan. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38(1): 166–181]
- Al-Aasm I S, Mrad C, Packard J. 2019. Fluid compartmentalization of Devonian and Mississippian dolostones, Western Canada Sedimentary Basin: petrologic and geochemical evidence from fracture mineralization. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 56(3): 265–305.
- Allan J R, Wiggins W D. 1993. Dolomite Reservoirs: Geochemical Techniques for Evaluating Origin and Distribution. American Association of Petroleum Geologists: 1–110.
- Bau M. 1991. Rare-earth element mobility during hydrothermal and metamorphic fluid-rock interaction and the significance of the oxidation state of europium. *Chemical Geology*, 93(3–4): 219–230.
- Bau M, Möller P. 1992. Rare earth element fractionation in metamorphic hydrothermal calcite, magnesite and siderite. *Mineralogy and Petrology*, 45(3): 231–246.
- Braithwaite C J, Rizzi G, Darke G. 2004. The geometry and petrogenesis of dolomite hydrocarbon reservoirs: introduction. *Geological Society, London, Special Publications*, 235(1): 1–6.
- Budd D A. 1997. Cenozoic dolomites of carbonate islands: their attributes and origin. *Earth-Science Reviews*, 42(1): 1–47.
- Cai C F, Li K K, Li H T, Zhang B S. 2009. Evidence for cross-formational hot brine flow from integrated $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, REE and fluid inclusions of the Ordovician veins in central Tarim, China. *Applied Geochemistry*, 23(8): 2226–2235.
- Davies G R, Smith Jr L B. 2006. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: an overview. *AAPG Bulletin*, 90(11): 1641–1690.
- Debruyne D, Hulsbosch N, Muechez P. 2016. Unraveling rare earth element signatures in hydrothermal carbonate minerals using a source-sink system. *Ore Geology Reviews*, 72(1): 232–252.
- Dong Y P, Liu X M, Santosh M, Chen Q, Zhang X N, Li W, He D F, Zhang G W. 2012. Neoproterozoic accretionary tectonics along the northwestern margin of the Yangtze Block, China: constraints from zircon U-Pb geochronology and geochemistry. *Precambrian Research*, 196–197: 247–274.
- Folk R L. 1980. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Austin: Hemphill Publishing Company, 1–182.
- Gingras M K, Pemberton S G, Muelenbachs K, Machel H. 2004. Conceptual models for burrow-related, selective dolomitization with textural and isotopic evidence from the Tyndall Stone, Canada. *Geobiology*, 2(1): 21–30.
- Gong Q L, Li F, Lu C J, Wang H Z, Tang H. 2021. Tracing seawater-and terrestrial-sourced REE signatures in detritally contaminated, diagenetically altered carbonate rocks. *Chemical Geology*, 570: 120169.
- Gregg J M, Sibley D F. 1984. Epigenetic dolomitization and the origin of xenotopic dolomite texture. *Journal of Sedimentary Research*, 54(3): 908–931.
- Gregg J M, Bish D L, Kaczmarek S E, Machel H G. 2015. Mineralogy, nucleation and growth of dolomite in the laboratory and sedimentary environment: a review. *Sedimentology*, 62(6): 1749–1769.
- Hirani J, Bastesen E, Boyce A, Corlett H, Eker A, Gawthorpe R, Hollis C, Korneva I, Rotevatn A. 2018. Structural controls on non fabric-selective dolomitization within rift-related basin-bounding normal fault systems: insights from the Hammam Faraun Fault, Gulf of Suez, Egypt. *Basin Research*, 30(5): 990–1014.
- Hollis C, Bastesen E, Boyce A, Corlett H, Gawthorpe R, Hirani J, Rotevatn A, Whitaker F. 2017. Fault-controlled dolomitization in a rift basin. *Geology*, 45(3): 219–222.
- Horita J. 2014. Oxygen and carbon isotope fractionation in the system dolomite-water-CO₂ to elevated temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 129(1): 111–124.
- Hsü K J, Siegenthaler C. 1969. Preliminary experiments on hydrodynamic movement induced by evaporation and their bearing on the dolomite problem. *Sedimentology*, 12(1–2): 11–25.
- Jébrak M. 1997. Hydrothermal breccias in vein-type ore deposits: a review of mechanisms, morphology and size distribution. *Ore Geology Reviews*, 12(3): 111–134.
- Kendall A C. 1977. Origin of dolomite mottling in Ordovician limestones from Saskatchewan and Manitoba. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 25(3): 480–504.
- Koeshidayatullah A, Corlett H, Hollis C. 2021. An overview of structurally-controlled dolostone-limestone transitions in the stratigraphic record. *Earth-Science Reviews*, 220: 103751.
- Land L S. 1985. The origin of massive dolomite. *Journal of Geological Education*, 33(2): 112–125.
- Lawrence M G, Greig A, Collerson K D, Kamber B S. 2006. Rare earth element and yttrium variability in South East Queensland waterways. *Aquatic Geochemistry*, 12(1): 39–72.
- Li F, Webb G E, Algeo T J, Kershaw S, Lu C J, Oehlert A M, Gong Q L, Pourmand A, Tan X C. 2019. Modern carbonate ooids preserve ambient aqueous REE signatures. *Chemical Geology*, 509: 163–177.
- Li H, Li F, Li X, Zeng K, Gong Q L, Yi C H, Wang Z J. 2021. Development and collapse of the early Cambrian shallow-water carbonate factories in the Hannan-Micangshan area, South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 583: 110665.
- Li Y L, Li F, Kershaw S, Burne R, Wang X, Lu C J, Liao J J, Li Y F, Wang Z J, Li Y L. 2023. Extensive occurrences of lower Cambrian red beds in South China: composition, characteristics, and implications for global environmental change. *Marine and Petroleum Geology*, 157: 106475.
- Lonnee J, Machel H G. 2006. Pervasive dolomitization with subsequent hydrothermal alteration in the Clarke Lake gas field, Middle Devonian Slave Point Formation, British Columbia, Canada. *AAPG Bulletin*, 90(11): 1739–1761.
- Lu C J, Koeshidayatullah A, Li F, Cui H, Zou H Y, Swart P K. 2024. A

- clumped isotope diagenetic framework for the Ediacaran dolomites: insights to fabric-specific geochemical variabilities. *Sedimentology*, 71(2): 546–572.
- Lu Z Y, Chen H H, Qing H R, Chi G X, Chen Q L, You D H, Yin H, Zhang S Y. 2017. Petrography, fluid inclusion and isotope studies in Ordovician carbonate reservoirs in the Shunnan area, Tarim Basin, NW China: implications for the nature and timing of silicification. *Sedimentary Geology*, 359: 29–43.
- Maloolf A C, Porter S M, Moore J L, Dudás F ö, Bowring S A, Higgins J A, Fike D A, Eddy M P. 2010. The earliest Cambrian record of animals and ocean geochemical change. *Geological Society of America Bulletin*, 122(11–12): 1731–1774.
- Manche C J, Kaczmarek S E. 2019. Evaluating reflux dolomitization using a novel high-resolution record of dolomite stoichiometry: a case study from the Cretaceous of central Texas, USA. *Geology*, 47(6): 586–590.
- Martín-Martín J D, Travé A, Gomez-Rivas E, Salas R, Sizun J-P, Vergés J, Corbella M, Stafford S L, Alfonso P. 2015. Fault-controlled and stratabound dolostones in the Late Aptian-earliest Albian Benassal Formation (Maestrat Basin, E Spain): petrology and geochemistry constrains. *Marine and Petroleum Geology*, 65: 83–102.
- Nicolaides S. 1995. Origin and modification of Cambrian dolomites (Red Heart Dolomite and Arthur Creek Formation), Georgina Basin, central Australia. *Sedimentology*, 42(2): 249–266.
- Nozaki Y, Zhang J, Amakawa H. 1997. The fractionation between Y and Ho in the marine environment. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1–2): 329–340.
- Petrash D A, Bialik O M, Bontognali T R 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.
- Qing H R, Mountjoy E. 1992. Large-scale fluid flow in the Middle Devonian Presqu'île barrier, Western Canada Sedimentary Basin. *Geology*, 20(10): 903–906.
- Radke B M, Mathis R L. 1980. On the formation and occurrence of saddle dolomite. *Journal of Sedimentary Research*, 50(4): 1149–1168.
- 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(4): 217–220.
- Shah M M, Nader F H, Garcia D, Swennen R, Ellam R. 2012. Hydrothermal dolomites in the early Albian (Cretaceous) Platform Carbonates (N.W. Spain): nature and origin of dolomites and dolomitising fluids. *Oil & Gas Science and Technology-Rev. IFP Energies nouvelles*, 67(1): 97–122.
- Shelton K L, Gregg J M, Johnson A W. 2009. Replacement dolomites and ore sulfides as recorders of multiple fluids and fluid sources in the Southeast Missouri Mississippi Valley-type district: halogen – $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ – $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^{34}\text{S}$ systematics in the Bonnetterre Dolomite. *Economic Geology*, 104(5): 733–748.
- Smith Jr L B, Davies G R. 2006. Structurally controlled hydrothermal alteration of carbonate reservoirs: introduction. *AAPG Bulletin*, 90(11): 1635–1640.
- Swart P K. 2015. The geochemistry of carbonate diagenesis: the past, present and future. *Sedimentology*, 62(5): 1233–1304.
- 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.
- Warren J. 2000. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations. *Earth-Science Reviews*, 52(1–3): 1–81.
- Webb G E, Nothdurft L D, Kamber B S, Klopogge J, Zhao J X. 2009. Rare earth element geochemistry of scleractinian coral skeleton during meteoric diagenesis: a sequence through neomorphism of aragonite to calcite. *Sedimentology*, 56(5): 1433–1463.
- Wei A Y, Xue C D, Xiang K, Li J, Liao C, Akhter Q J. 2015. The ore-forming process of the Maoping Pb-Zn deposit, northeastern Yunnan, China: constraints from cathodoluminescence (CL) petrography of hydrothermal dolomite. *Ore Geology Reviews*, 70: 562–577.

(责任编辑 张西娟; 英文审校 刘贺娟)