

四川盆地灯影组碳酸盐岩早期热水白云石胶结物的厘定、成岩序列与孔隙演化*

周凌方¹ 钱一雄¹ 王国力² 宋晓波³ 王东³
王忠宝¹ 吴小奇¹ 储呈林¹

1 中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏无锡 214126

2 中国石化西南油气分公司, 四川成都 610081

3 中国石化西南油气分公司石油勘探开发研究院, 四川成都 610081

摘要 深层—超深层古老碳酸盐岩的成岩序列与孔隙演化是研究热点与难点。基于川深 1 井、金石 1 井等灯影组碳酸盐岩岩相学、地球化学及碳酸盐矿物 U-Pb 定年数据, 对比缝洞胶结物(微区)与围岩碳、氧及锶同位素值, 并结合仙女洞组、茅口组碳酸盐岩成岩矿物中的均一温度与地质年代, 建立并完善了四川盆地埃迪卡拉系灯影组碳酸盐岩的成岩序列, 探讨了其与孔隙演化的关系。灯影组碳酸盐岩成岩序列为: 纤状或纤状生长带→纤柱状或刀刃状→较粗的纤维状、放射状束状海水胶结(葡萄状、皮壳状或栉壳状)、纳米级微球粒原生白云石→重力悬垂、渗流砂及大气淡水方解石胶结→隐晶质、微晶石英→氟磷灰石、重晶石及萤石→半自形粒状粉晶白云石→细晶白云石→中细晶石英或中粗晶白云石(或鞍形白云石)→中粗晶方解石→幕式充注的烃类→萤石+中粗晶方解石→中粗晶石英+方铅矿+闪锌矿+黄铁矿+萤石+中粗晶、巨晶方解石+中粗晶、巨晶白云石或鞍形白云石→焦沥青(甲烷, TSR)→中粗晶或巨晶方解石+中粗晶石英。结合构造埋藏史, 初步厘定部分中粗晶白云石胶结物为埃迪卡拉纪晚期—寒武纪(或早奥陶世)的热水成因, 其特征为: $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 分别为 -1.78‰ ~ -1.69‰ 和 -9.28‰ ~ -9.32‰ , 相对较低; 均一温度为 $116.6\sim 135.3\text{ }^\circ\text{C}$, 盐度为 $12.63\text{wt}\% \text{NaCl}_{\text{Eq}}$, 碳酸盐矿物 U-Pb 协和年龄为 $474.0\pm 74.0\sim 482.0\pm 56.0 \text{ Ma}$ 。在埃迪卡拉纪晚期—寒武纪伸展构造背景下, 桐湾运动 I 幕、II 幕的挤压抬升导致大气淡水沿断裂下渗并参与热循环, 促使缝洞中早期白云石沉淀。与大规模海水胶结、强烈硅化、压实、去白云化等成岩作用相比, 该期热水胶结作用规模较小, 对原始孔隙变化影响有限。

关键词 地球化学特征 U-Pb 年龄 成岩序列 早期热水白云石 灯影组 四川盆地

第一作者简介 周凌方, 男, 1969 年生, 高级工程师, 主要从事碳酸盐岩沉积与储层研究工作。E-mail: jzzlf309@21cn.com。

通讯作者简介 钱一雄, 男, 1962 年生, 博士, 教授, 研究方向为碳酸盐岩沉积与储层。E-mail: qyx9167@vip.sina.com。

中图分类号: P588.2 文献标志码: A

Determination of early dolomitic cement origin in hot fluid, diagenetic sequence and pore evolution of the Dengying Formation in Sichuan Basin

* 国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(编号: U24B6001)、国家重点研发计划专项(编号: 2017YFC0603103)、中国科学院 A 类战略性先导科技专项(编号: XDAXX010201-3)、中国石化西南油气分公司项目(编号: 34450000-19-ZC0607-0005)和中国石油化工股份有限公司科技项目(编号: KLP25016)联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (No. U24B6001), the National Key Basic Research Project of China (No. 2017YFC0603103), a Strategic Leading Science and Technology Project, the Chinese Academy of Sciences (No. XDAXX010201-3), the Sinopec Southwest Oil and Gas Company Project (No. 34450000-19-ZC0607-0005) and the Scientific and Technological Project of Sinopec (No. KLP25016)]

收稿日期: 2025-10-06 改回日期: 2026-01-09

ZHOU Lingfang¹ QIAN Yixiong¹ WANG Guoli² SONG Xiaobo³ WANG Dong³
WANG Zhongbao¹ WU Xiaoqi¹ CHU Chenglin¹

¹ Wuxi Institute, Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Jiangsu Wuxi 214126, China

² Southwest Oil & Gas Company, SINOPEC, Chengdu 610081, China

³ Exploration & Production Research Institute, Southwest Oil & Gas Company, SINOPEC, Chengdu 610081, China

Abstract The diagenetic sequence and pore evolution of ancient carbonate rocks in deep or ultra-deep burial depth is one of the hot topical in reservoir evolution. Based on analysis of the petrographic, geochemical, and U-Pb dating of diagenesis minerals of the Dengying Formation at Chuanshen 1(CS1), Jinshi 1(JS1) and other wells, the authors has adopted the comparative methods, in which compare the matrix dolomites with different dolomite cements, as well as the other diagenetic minerals, occurred in cement or fillings in vugs & fractures with regard to the data of carbon, oxygen, and strontium isotopes, homogenization temperatures, U-Pb dating of dolomites and calcites, either in the Dengying Formation of Ediacaran, or Xianrendong Formation of the Early Cambrian, or Maokou Formation of Middle Permian. The diagenetic sequence has been reasonable modified: fibrous or fibrous growth → column fibrous or foliated or blade (length-fast cement) or dogtooth shaped → coarser fibrous or bundle shaped of marine cementation and bundle shaped cement or fascicular or radial dolomite cements. i.s botryoids or comb shell shaped or primary dolomite biomorphs of nanoscale spheroids → micro-stalactitic or vadose silt of meteoric cementation → cryptocrystalline or microcrystalline quartz (1st) → fluorapatite, barite and fluorite (1st) → semi-automorphic micro-crystalline dolomite → fine crystalline dolomite → fine and medium crystalline quartz (2nd) or medium to coarse dolomite → Saddle dolomite (1st) → medium to coarse crystalline calcite (1st) → hydrocarbon discharge (episodes) → fluorite (continuous dissolution. 2nd or 3rd) + coarse calcite (2nd) → coarse quartz (3rd) + Galena + Sphalerite + Pyrite + Fluorite (4th) + coarse calcite (3rd) + coarse crystalline dolomite (or Saddle dolomite (2nd) → pyrobitumens (pyrolysis or TSR, methane) → coarse calcite (4th) + quartz (4th); and the medium to coarse dolomite in some of the fractures or cavities is of early hot fluid dolomite origin, with relatively low $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (-1.78‰ ~ -1.69‰) and $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ (-9.28‰ ~ -9.32‰) and moderate homogenization temperatures ($T_h = 130.9\text{ }^\circ\text{C}$, $135.3\text{ }^\circ\text{C}$, $116.6\text{ }^\circ\text{C}$) and salinity (12.63wt% NaCl); the U-Pb Concordia Age of dolomite ($D_{\text{II-III}}$) is between $474.0 \pm 74.0\text{ Ma}$ to $482.0 \pm 56.0\text{ Ma}$. By integrating analyses of burial history, the geological-time of dolomite ($D_{\text{II-III}}$) is mostly like to occur in the late Ediacaran to Cambrian (No later than Early Ordovician). The weak extension during the late Ediacaran to Cambrian period, interval by multiple episodes of tectonic compression and exhumation, provided the conditions for the meteoric water percolated downward along the faults or fractures, heated by deep circulation as well as mixing with formation water, lead to precipitate of dolomite. The diagenesis effect on pore evolution display that the early dolomite cementation developed in hot fluid had a smaller proportion and had little effect on pore reduction, in compared with diagenesis such as large-scale marine cementation, strong silicification, compaction, and dedolomitization.

Key words geochemical characteristics, U-Pb dating age, diagenetic sequence, the early dolomite cement origin in hot fluid, Dengying Formation, Sichuan Basin

About the first author ZHOU Lingfang, born in 1969, senior engineer, is engaged in research on carbonate sedimentary and reservoir evaluation. E-mail: jzlf309@21cn.com.

About the corresponding author QIAN Yixiong, born in 1962, Ph.D., professor, is engaged in research on carbonate sedimentary and reservoir evaluation. E-mail: qyx9167@vip.sina.com.

四川盆地埃迪卡拉系灯影组主要经历了早期成岩 (Z_2 , 包括海水胶结、早期大气水成岩或早期喀斯特 (强深涛等, 2017))、中—浅持续埋藏成岩 (C-S)、构造挤压—抬升与热事件叠加埋藏成岩 (D-K) 以及中深埋藏晚期成岩 (E-Q) 等阶段, 成岩序列与孔隙演化关系复杂。前人研究主要集中在与桐湾运动相关的岩溶作用 (李英强等, 2013; 汪泽成等, 2014; 朱东亚等, 2014; 罗冰等, 2015; 冯伟明等, 2017; 李勇等, 2019) 和与中二叠世峨眉地裂运动相关的热液作用 (王国芝等, 2014; 冯明友等, 2016; 单秀琴等, 2016; 陈宝赞等, 2018) 方面。然而, 热液矿物的形成时代尚存在争议, 不仅有中二叠世证据 (如 248.0 Ma , $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7110$; 沈安江等, 2019), 也有早石炭世记录 (闪锌矿 Rb-Sr 年龄 $348.5 \pm 7.2 \text{ Ma}$, $\text{MSWD} = 1.10$; 冯明友等, 2016)。因此, 明确成岩作用序列与孔隙演化的关系及早期热水矿物的时代和成因, 是本研究要解决的关键问题。

基于川深 1 井 (CS1)、金石 1 井 (JS1)、金页 2 井 (JY2) 取心段以及宁强胡家坝高家山剖面 and 南江杨坝剖面的综合研究, 使用薄片、阴极发光 (CL)、微区碳氧同位素、流体包裹体、环境扫描电镜及能谱 SEM-EDS、碳酸盐矿物 U-Pb 定年等技术, 本研究完善了四川盆地埃迪卡拉系灯影组碳酸盐岩的成岩序列, 探讨了其孔隙演化, 并厘定了部分中粗晶白云石为埃迪卡拉纪晚期至寒武纪 (不晚于早奥陶世) 的热水成因 (其协和年龄 $474.0 \pm 74.0 \sim 482.0 \pm 56.0 \text{ Ma}$)。

1 构造与沉积背景

埃迪卡拉纪早期, 四川盆地处于克拉通初始裂陷阶段, 晚期转为克拉通坳陷盆地。埃迪卡拉纪末的桐湾运动 I 幕在灯二段与灯三段间形成了明显的岩溶不整合。灯影组与下寒武统麦地坪组、以及麦地坪组与筇竹寺组之间的桐湾 II 幕、III 幕构造不整合主要分布于川西南地区。寒武纪—奥陶纪为克拉通坳陷盆地持续发展期, 以补偿性沉降—陆表海沉积为特征。奥陶纪末, 受秦岭洋持续扩张的影响, 四川盆地呈现西高东低的古地理格局。志留纪末的加里东运动导致盆地抬升剥蚀, 川中古隆起定型。其后, 四川盆地又相继经历了海西旋回 (包括柳江运动、云南运动、东吴运动及相关的基性岩浆活

动)、印支旋回、燕山旋回和喜马拉雅旋回等多期构造运动的改造。

四川盆地灯影组主要发育镶边碳酸盐岩台地沉积 (李英强等, 2013; 周进高, 2015; 陈娅娜等, 2017; 钱一雄等, 2017; 宋金民等, 2017; 段金宝等, 2019; 罗冰等, 2025), 其中灯四段和灯二段主要为台地边缘相和台内丘 (滩) 相沉积, 可进一步划分为礁滩、丘滩、台坪、滩间海和潟湖等亚相 (图 1)。川深 1 井位于川中隆起北部倾没端, 灯四段岩屑段 (8162~8444 m) 437 件岩屑、取心段 (8154.28~8162.35 m) 80 件样品的统计表明, 岩石类型以微生物岩为主, 其中, 泥粉晶白云岩占 20.4%, 葡萄状—皮壳状—栉壳状白云岩占 14.0%, 藻球粒、微球粒及似球粒白云岩占 20.4%, 附植菌—肾形菌等菌藻白云岩占 11.0%, 藻砂屑占 8.9%, 叠层石—凝块石等微生物白云岩占 24.9%; 另外, 重结晶作用普遍, 中粗晶白云岩占比超过 30%。

2 主要研究方法

本研究采用的分析方法主要有 5 种, 分别在不同的实验室进行测试。(1) 阴极发光分析。在中国石化石油勘探开发研究院构造与沉积储层实验室完成; 使用 BLM-3RX 型阴极发光仪, 工作条件为: 加速电压为 10~20 kV, 电流为 0.5~1 mA, 湿度小于 70%, 真空度为 0.03 mbar。(2) 扫描电镜 (SEM) 与能谱 (EDS) 分析。在中国地质大学 (北京) 生物地质与环境地质国家重点实验室完成; 采用 FEI Quanta200F 型场发射环境扫描电镜, 工作电压 200 kV, 配合 Oxford EDAX 三元一体化能谱仪进行微区成分分析。(3) 碳氧同位素分析。在中国科学院地质与地球物理研究所稳定同位素地球化学实验室完成; 在双目镜辅助下直接择选缝洞中的矿物, 将其研磨至 200 目以下; 在基岩中, 使用直径为 0.1 mm 的微钻, 选择在阴极发光均匀区内取样; 采用 100% 正磷酸法在 50 °C 下反应 24 h, 释放的 CO_2 气体通过 Finnegan-MAT 252 型质谱仪测定同位素组成; 分析精度为 $\pm 0.2\text{‰}$ (以 V-SMOW 为标准)。(4) 碳酸盐矿物激光原位 U-Pb 定年。在澳大利亚昆士兰大学 (The University of Queensland) 放射性同位素实验室完成。(5) 流体包裹体测试。在中国石化石油勘探开发研究院无锡

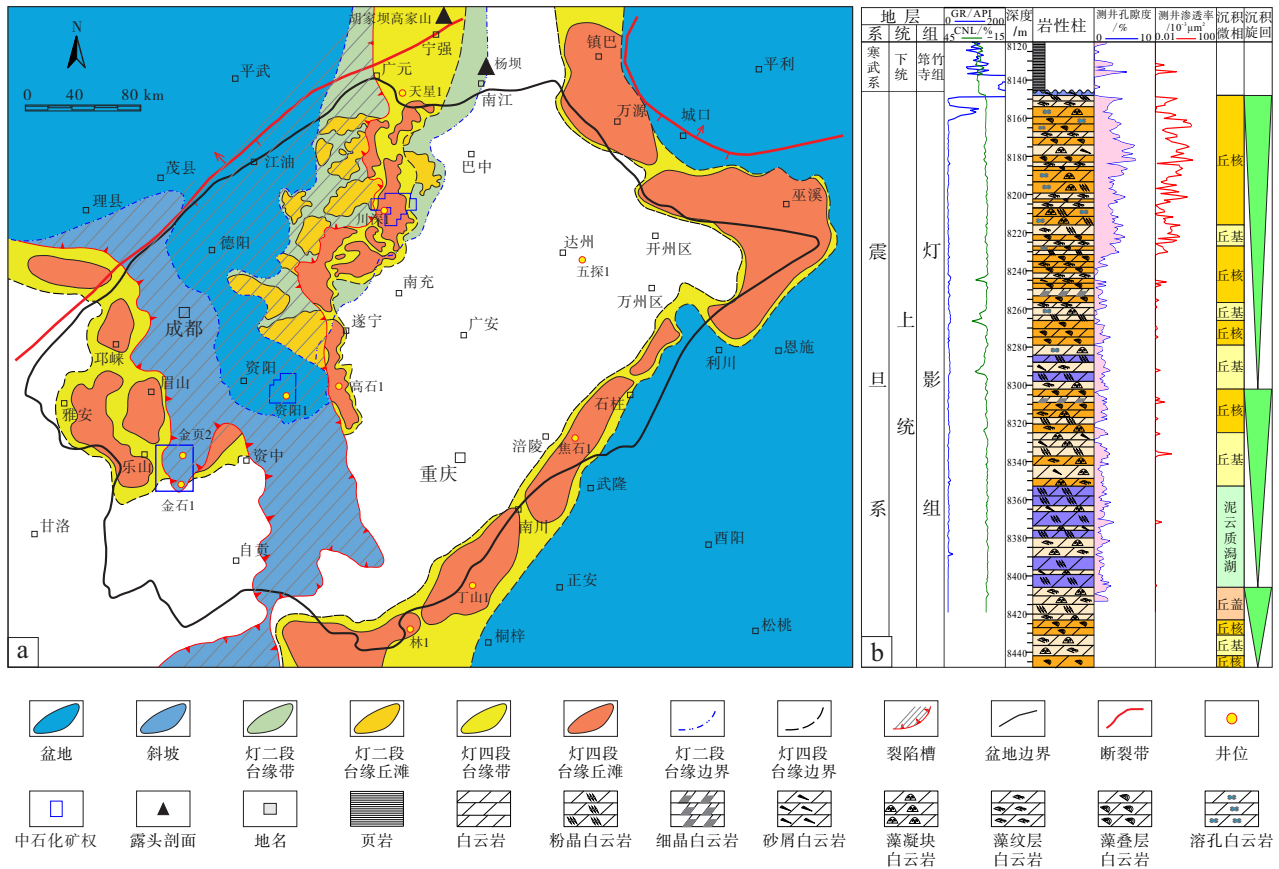


图 1 四川盆地灯影组岩相古地理 (a, 据罗冰等, 2025) 及灯影组四段柱状图 (b)

Fig. 1 Lithofacies palaeogeographic map of the Dengying Formation (a, after Luo *et al.*, 2025) and comprehensive column of the fourth Member of Dengying Formation (b) in Sichuan Basin

石油地质研究所测试中心完成；利用与 Leica 显微镜接口的 Linkam THMSG 2600 型冷热台，均一温度测试精度为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，根据冰点理想盐水溶液折算成等效盐度 (wt% NaClequ)。

3 成岩阶段

综合前人研究成果 (王兴志等, 2000; 施泽进等, 2013; 强深涛等, 2017) 及本次测试分析, 将灯影组碳酸盐岩成岩演化划分为 4 个阶段。

1) 早期海水主导成岩阶段 (Z_2): 以微生物介导的原生白云石为起点 (图 2-a), 相继发生海底纤状、纤柱状胶结 (图 2-b 至 2-f), 以及大气淡水条件下的胶结与溶解作用。可见拟晶白云岩化、渗流砂、铸模孔等特征 (图 2-i, 2-j)。

2) 中浅层埋藏成岩阶段 (C-S): 随着埋藏深度加大 ($< 700 \sim 1000\text{ m}$), 发生压实、压溶作用, 缝洞中见中细晶—中粗晶白云石、石英、萤石、方

解石等矿物充填 (图 2-d 至 2-h)。

3) 构造挤压、抬升与热事件叠加埋藏成岩阶段 (D-K): 此阶段以多期构造破裂、角砾化和热液活动为特征。中二叠世基性岩浆喷发或侵入期后的热液作用, 导致重结晶, 形成鞍形白云石、中粗晶白云石及 MVT 型金属硫化物 (如方铅矿、闪锌矿; 图 2-l, 2-o, 2-p), 并引发热化学硫酸盐还原作用 (TSR) (Zhang *et al.*, 2019)。

4) 中深或超深埋藏晚期成岩阶段 (E-Q): 此阶段以持续埋藏压实和烃类裂解成气为主, 伴随构造调整和天然气晚期充注。

4 地球化学特征及年代学

4.1 同位素特征

对川深 1 井、金石 1 井等 185 件样品同位素分析表明 (图 3-a; 表 1), 不同结构白云岩的地球化学特征存在系统差异, 表现为: (1) 原生—准同生

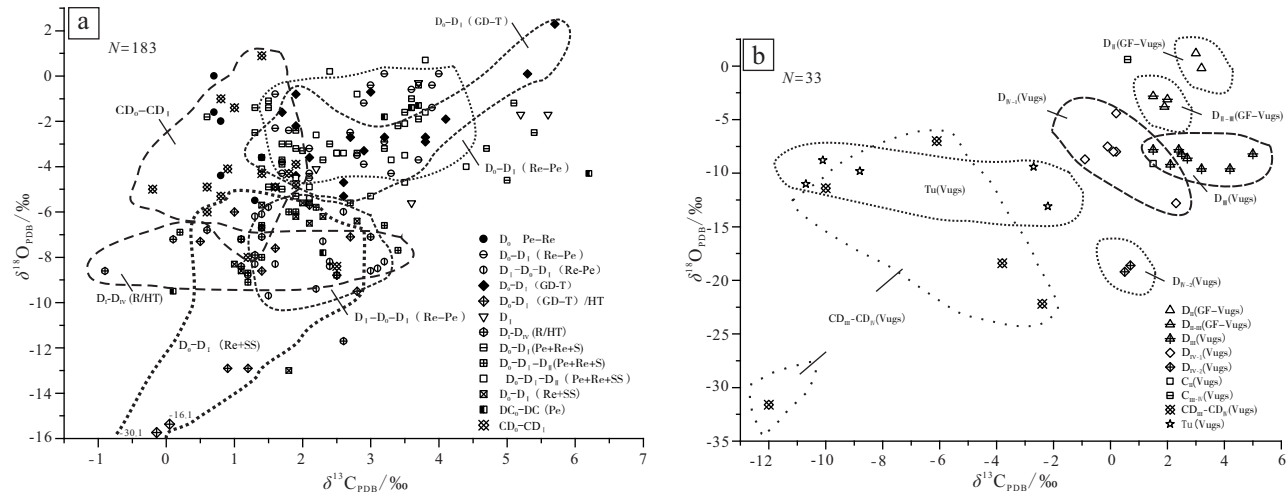


图 3 四川盆地灯影组多类型白云岩 (a)、缝洞中多期白云石 (或方解石) (b) 碳、氧同位素变化范围

Fig. 3 Stable oxygen & carbon isotope composition and genetic interpretation for various and multi-periods dolomites (or calcites) either in matrix rocks (a) and vugs and fractures (b) in the Dengying Formation, Sichuan Basin

白云岩 (如粉晶 D_I , 泥晶/泥粉晶 D_0-D_I) 的 $\delta^{13}C$ 、 $\delta^{18}O$ 值接近埃迪卡拉纪海水平均值, $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值略高于同期海水 (0.7090), 表明白云石化流体以海水为主; (2) 埋藏重结晶白云岩 (如不等晶 D_r , 重结晶 D/R) 的 $\delta^{13}C$ 轻微负偏, $\delta^{18}O$ 负偏明显, $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值相对较高或低, 指示了埋藏条件下流体的改造; (3) 热液相关白云岩 (如 D_0-D_I/HT , $D_{II}/Si-HT$) 的 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 均显著负偏, $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值相对较高, 流体受陆屑影响明显, 是其遭受热事件影响的标志之一。

缝洞中多期白云石胶结物的稳定同位素组成同样呈现规律性变化, 即从早期到晚期, 随着晶体粒径增大, $\delta^{18}O$ 负偏, 同时 $\delta^{13}C$ 呈逐渐负偏趋势 (图 3-b), 反映了成岩流体温度升高及大气淡水、地层流体、热液或有机质等多种流体或介质参与的复杂过程。

4.2 流体包裹体特征

缝洞中不同期次白云石 (D_I 、 D_{II-1} 、 D_{II-2} 、 D_{III} 、 D_{IV}) 的流体包裹体以气液两相为主, 形态多呈椭圆形、长方形, 气液比一般为 3%~10%, 平均大小 3.4 μm 。均一温度 (Th) 和盐度值显示规律性变化 (图 4), 其中连续及叠置 (合) 的均一温度分布指示了流体活动具周期性、多期的特点。同样, 盐度的差异性分布也反映了成岩过程中不同来源流体的参与 (如浓缩海水、膏盐溶解形成的卤水、热液、大气淡水渗透和深循环等):

(1) D_{II} 、 D_{IV-1} , 均一温度平均 111.4 $^{\circ}C$, 盐度相对较低 (3.0%~10.9%), 指示有大气淡水渗透和深循环; (2) D_I 、 D_{II-2} 、 D_{III} 及 D_{IV-2} , 均一温度较高 (121.4~195.4 $^{\circ}C$), 盐度中等至高 (12.3 wt%~23.7 wt%), 可能代表了埋藏热演化过程中的卤水、热液或混合水等叠加作用 (图 4)。

4.3 碳酸盐矿物 U-Pb 年代学

碳酸盐岩矿物激光原位 U-Pb 定年技术为精确制约成岩时代提供了关键手段 (Winter and Johnson, 1995; Lawson *et al.*, 2018; 陈家旭等, 2021)。本研究在测年样品选择上遵循以下原则: (1) 优先选择受后期热液改造弱的样品; (2) 选择缝洞中普遍出现的胶结物; (3) 选择对成岩序列有明确时代意义的矿物 (如缝合线两侧、烃类充注前后); (4) 考虑样品的原始 U 含量或 U/Pb 值 (如位于氧化界面附近、大气淡水改造矿物含量相对较高), 同时选送岩石地球化学分析样品。

4.3.1 二叠系及寒武系

CS1-DN-1 (CS1-005) 为二叠系茅口组中粗晶云岩, 裂隙中的中粗晶方解石 (C_{III} , 不发光) 发育串珠状气液两相包裹体, 均一温度为 131.9 $^{\circ}C$ (119.0~170.9 $^{\circ}C$, $N=21$), 盐度平均为 19.1 wt%~19.5 wt%, 应是中深埋藏成岩阶段的产物。CS1-DN-3 (CS1-31、CS1-32) 为寒武系弱硅化、云化亮晶鲕粒灰岩, 缝洞中发育中粗晶白云石 (D_{II-III}) 和中粗晶方解石 (C_{III}), 前者原生包裹体

表 1 四川盆地灯影组不同类型白云岩碳、氧、锶同位素变化范围

Table 1 Average and variation data of stable carbon, oxygen and radioactive strontium isotope for various dolomites of the Dengying Formation in Sichuan Basin

| 岩石类型 | 代号 | $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$ | | $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$ | | $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ | |
|--------------------------------|---|---|------------|---|---------------|---------------------------------|-------------------|
| | | 平均值 | 范围 | 平均值 | 范围 | 平均值 | 范围 |
| 泥晶(球粒/肾形菌) | D ₀ (Pe-Ren) | 0.95 | 0.70~-1.40 | -2.85 | -5.50~0.00 | 0.70929 | 0.708642~0.710062 |
| 泥晶/泥粉晶(球粒/肾形菌) | D ₀ -D _I (Ren-Pe) | 2.75 | 1.10~4.00 | -2.39 | -4.50~-0.10 | 0.70896 | 0.708574~0.710008 |
| 粉晶/泥粉晶(球粒/肾形菌) | D _I -D ₀ -D _I (Pe-Ren) | 2.03 | 1.20~3.20 | -7.78 | -9.70~-5.80 | 0.70915 | 0.708609~0.710654 |
| 泥粉晶(颗粒/凝块石) | D ₀ -D _I (GD-T) | 3.08 | 1.70~5.70 | -2.32 | -5.30~0.10 | 0.70883 | 0.708560~0.709594 |
| 泥粉晶(颗粒/凝块石)/热液 | D ₀ -D _I (GD-T)/HT | 1.83 | 0.50~2.80 | -7.58 | -9.50~-5.70 | 0.70970 | 0.708771~0.710725 |
| 泥粉晶(颗粒/凝块石)/热液 | D ₀ -D _I (GD-T)/HT | | 0.10~1.20 | | -16.10~-12.90 | | 0.709242~0.710556 |
| 粉晶(无藻结构) | D _I | 5.47 | 2.20~5.60 | -1.70 | -4.10~1.70 | 0.710626 | 0.709211~0.710385 |
| 粉细晶—中细晶(无藻结构) | D _{II} -D _I | 3.47 | 3.00~3.70 | -6.73 | -7.20~-5.60 | 0.708978 | 0.708623~0.709571 |
| 不等晶(藻球粒/颗粒/叠层石) | D _I -D _{IV} /R | 1.10 | 0.60~1.40 | -7.25 | -7.90~-6.80 | 0.709453 | 0.709284~0.709728 |
| 泥—粉细晶/不等晶/重结晶 | D ₀ -D _{II} -(D _{IV} /R) | 2.50 | 1.70~3.50 | -5.58 | -5.90~-5.30 | 0.70908 | 0.708824~0.709334 |
| 粉细晶(藻球粒/颗粒)/硅化/热液 | D _{II} /Si-HT | 0.68 | -0.90~2.60 | -14.70 | -30.10~-8.60 | 0.71004 | 0.709549~0.710444 |
| 泥晶(球粒/藻纹层) | D ₀ (Pe-S) | 1.15 | 0.60~1.40 | -2.33 | -3.60~-1.40 | 0.70961 | 0.708964~0.710441 |
| 泥晶—泥粉晶 (球粒/肾形菌/藻纹层/黏结) | D ₀ -D _I (Pe/Ren/S) | 2.73 | 1.95~5.40 | -2.92 | -5.00~-0.40 | 0.70891 | 0.708451~0.709690 |
| 泥晶—粉细晶(球粒/肾形菌/ 藻纹层/黏结)—温度升高 | D ₀ -D _I -D _{II} (Pe/Ren/S) | 1.86 | 0.20~3.40 | -7.15 | -9.10~-5.60 | 0.70919 | 0.708637~0.709859 |
| 泥晶—泥粉(细)晶 (球粒/肾形菌/叠层石) | D ₀ -D _I -D _{II} (Pe/Ren/SS) | 2.87 | 1.40~4.40 | -3.12 | -5.40~0.70 | 0.70878 | 0.708333~0.709076 |
| 泥晶—泥粉(细)晶 (球粒/肾形菌/叠层石) | D ₀ -D _I (SS) | 1.81 | 1.00~2.30 | -5.98 | -8.60~-5.6 | 0.70906 | 0.708531~0.710088 |
| 灰云岩(球粒/肾形菌/海绿石 /颗粒/纹层/叠层石) | CD ₀ (Pe/Ren/GD) | 1.05 | -0.20~1.90 | -4.23 | -5.30~-1.40 | 0.70871 | 0.708500~0.708866 |
| 灰云岩 | CD ₀ | 1.38 | 0.80~1.90 | -2.30 | -4.80~0.90 | 0.710744 | 0.709900~0.711348 |
| 灰云岩 | CD ₀ -CD _I | 1.43 | 0.60~2.50 | -7.47 | -8.40~-6.00 | 0.70949 | 0.785670~0.710681 |
| 云灰岩、云灰岩(球粒) | DC ₀ -DC _I (Pe) | 3.50 | 3.20~3.70 | -1.50 | -1.80~-1.30 | 0.70901 | 0.708459~0.710029 |
| 云灰岩(球粒)/重结晶 | DC/R | | 0.10~2.30 | | -9.50~-7.80 | | 0.704110~0.708623 |
| 钙质砂岩(球粒) | CS(Pe) | | 1.10~2.40 | | -9.40~-6.70 | | 0.710923 |

均一温度为 160.2 °C (159.0~163.5 °C, N=6), 次生包裹体均一温度为 124.0~127 °C 和 196.5~210.5 °C, 主要记录了热液改造时的温度。

茅口组 (CS1-005) 中粗晶白云石 (D_{II-III}) Pb 浓度为 0.56 μg/g (0.24~1.01 μg/g, N=4)、U 为 2.23 μg/g (0.028~4.83 μg/g, N=4); 龙王庙组 Pb 为 12.7 μg/g (3.4~29.6 μg/g, N=4)、U 为 4.60 μg/g (0.79~7.78 μg/g, N=4); 仙女洞组 Pb 为 9.8 μg/g (3.2~23.4 μg/g, N=7)、U 为 2.0 μg/g (0.39~6.05 μg/g, N=7)。

由此可见, 上述矿物中的 U 含量均接近于海水平均值 (3.3 μg/g), 茅口组中裂隙方解石 U/Pb>1, U-Pb 谐和年龄为 133.0±66.0 Ma (图 5-

a, 5-b), 虽然误差较大, 但大致记录了燕山期构造—埋藏过程中的流体活动 (J-K₁: 199.6—99.6 Ma)。龙王庙组、仙女洞组裂隙白云石中, U/Pb<1, 其矿物均受中晚二叠世岩浆期后热液影响, 指示开放的 U-Pb 成岩体系, 不适合进行 U-Pb 定年, 或年龄值误差巨大 (363.0±400.0 Ma), 不具有年代学参考价值。

4.3.2 埃迪卡拉系 (630—542 Ma) 灯影组

CS1-DN-8 (图 5-1) 和 CS1-DN-10 (图 5-k) 为早期海水胶结—棒壳状、纤状生长 (GBS) -放射状及束状胶结物 (RSD 或 RASD), U/Pb<1。缝洞中的中粗晶白云石 (D_{II-III}) 至少有 2 种情形: (1) JY2-DN-11 (JY2-001; 图 5-c, 5-d) 为藻

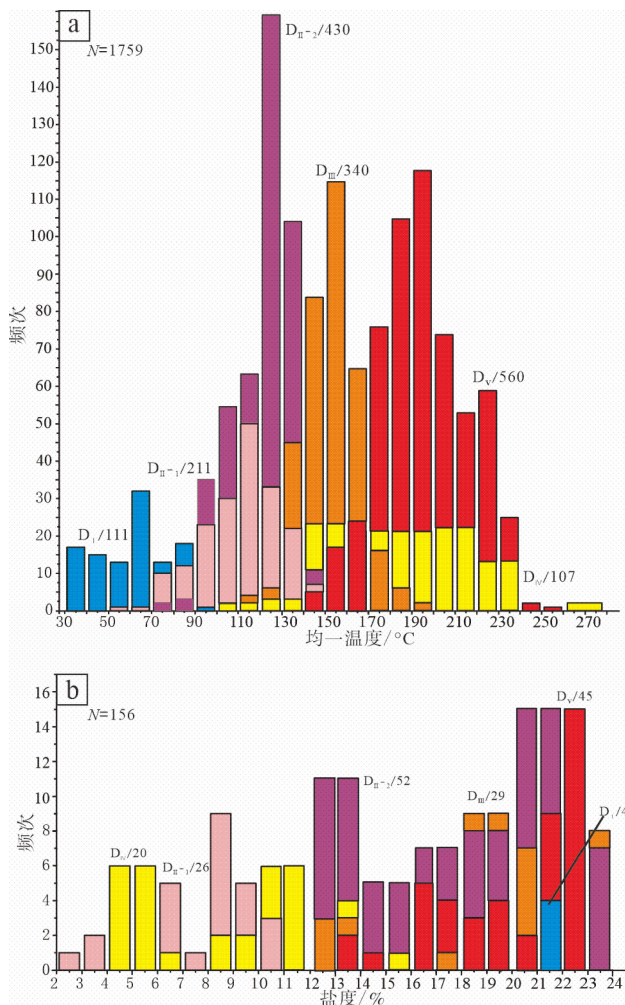


图 4 四川盆地灯影组缝洞中不同类型及 4 个期次白云石的均一温度 (a) 及盐度分布图 (b)

Fig. 4 Histograms of homogenization temperatures (a) and salinities (b) for four periods of various dolomite in vugs and fractures in the Dengying Formation, Sichuan Basin

纹层—藻球粒粉细晶白云岩，其缝洞中的中粗晶白云石 (D_{II-III}) 微区同位素 $\delta^{13}C_{PDB}$ 值为 $-1.78\text{‰} \sim -1.69\text{‰}$ ， $\delta^{18}O_{PDB}$ 值为 $-9.28\text{‰} \sim -9.32\text{‰}$ ，均一温度为 135.3 °C ($126.5 \sim 153.0\text{ °C}$, $N=36$)，盐度为 $12.63\text{ wt}\%$ ($12.52\text{ wt}\% \sim 12.74\text{ wt}\%$)；(2) CS1-DN-6 (CS1-76, 8158.47 m) 为藻黏结白云岩，缝洞充填物中有方铅矿、萤石、黄铁矿等 (图 2)；CS1-DN-5、CS1-DN-6 缝洞中的中粗晶白云石 (D_{II-III}) 的均一温度分别为 130.9 °C ($121.7 \sim 162.2\text{ °C}$, $N=27$) 和 116.6 °C ($110.5 \sim 122.0\text{ °C}$, $N=10$)，它是埋藏成岩阶段受热水作用影响的产物 (图 5-g 至 5-j)。

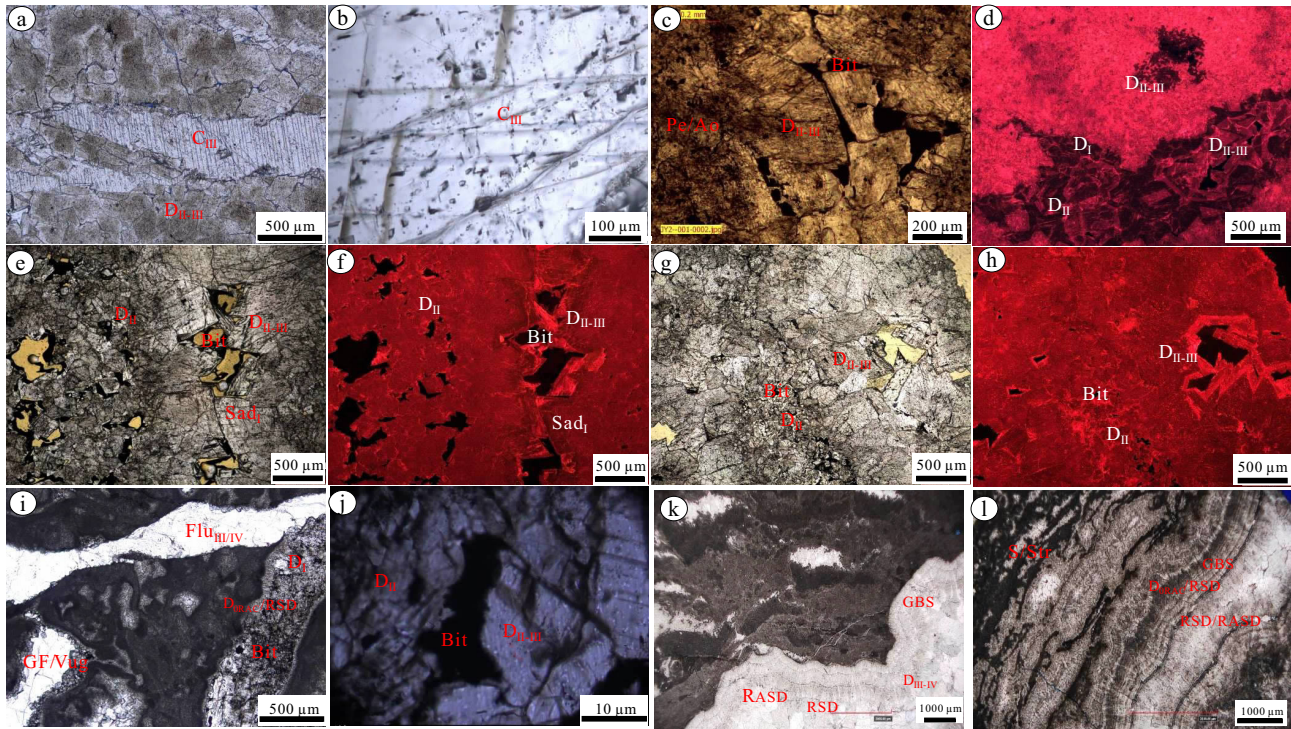
在灯影组 73 件样品中，仅 14 件 (19.1%) 满足 $U/Pb > 1$ 的定年条件。早期海水胶结物因铀含量过低，均不满足测年要求。前人 (沈安江等, 2019) 已获取了第 1 期早成岩环边胶结物的 U-Pb 年龄 (546.0 Ma , 545.7 Ma , $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.7090$) 和第 4 期白云石胶结物的 U-Pb 年龄 (248.0 Ma , $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.7110$)，可作为对比参考、约束使用。

本次获得地质年代的样品主要集中于缝洞中的中粗晶白云石 (D_{II-III})。以 JY2-DN-11 (JY2-001) 为例，其 U/Pb 值差异大，呈较好线性不协和，年龄值有相对较高可信度，获得了 $482.0 \pm 56.0\text{ Ma}$ 的 U-Pb 谐和年龄 (图 6)。结合埋藏史分析，若按持续埋藏模型计算，其形成时代上限为 426 Ma (中志留世)，这与寒武系烃源岩的生烃史 (郭旭升等, 2020) 存在矛盾。因此，更合理的解释是，该期白云石形成于埃迪卡拉纪晚期—寒武纪 (约 538 Ma) 的浅埋藏阶段，因受到局域性构造事件影响，形成温度高于正常地温梯度。CS1-052 (CS1-DN-4; 图 5-e, 5-f)、CS1-076 (CS1-DN-6; 图 5-i, 5-j) 的谐和年龄 ($474.0 \pm 74.0\text{ Ma} \sim 482.0 \pm 56.0\text{ Ma}$) 支持这一解释，表明部分中粗晶白云石 (D_{II-III}) 的形成时代为埃迪卡拉纪晚期—寒武纪，最晚不晚于早奥陶世。CS1-064 ($450.0 \pm 24.0\text{ Ma}$; 图 5-g, 5-h) 可能是相对稍晚一期的白云石。

5 讨论

5.1 成岩序列与孔隙演化

利用团簇同位素、碳酸盐岩矿物 U-Pb 定年及流体包裹体等数据，可以更精确地标定埋藏史—孔隙演化曲线 (Honlet *et al.*, 2018; 徐秋晨等, 2019; 郭旭升等, 2020; 陈家旭等, 2021; 钱一雄等, 2023)。以川深 1 井为代表，灯影组经历了早期持续埋藏—中期抬升—浅埋藏—中晚期持续深埋藏—晚期抬升过程，同时还受到了构造热水、岩浆期后热液等作用影响 (图 7-a 中虚线)。从埃迪卡拉系灯影组、下寒武统仙女洞组及二叠系茅口组的成岩矿物类型、均一温度可见 (图 7-b)，灯影组在白云石化过程中，均一温度呈低温、中低温或中高温连续分布，而茅口组中未见到白云石均一温度大于 130 °C 的记录，由此间接推断，灯影组中部分



a, b—CS1-5, 6630.14 m, P_2m , 中粗晶白云岩, 中粗晶菱形 D_{II-III} (Vug, DFR) → 粗晶 C_{III} (气液两相包裹体 $l+q$), 去白云石化; c, d—JY2-002, 3819.22 m, Z_2d^4 , 含藻鲕、微球粒藻纹层泥粉晶白云岩, 暗层藻球粒、藻纹层条带发中亮橙红—玫瑰红色光, 纤柱状或部分粒状胶结物发暗橙红色光或不发光; D_{II-III} (边缘发环带状橙红—玫瑰红、橙黄红; D_{II} 发暗橙红色光、 D_I 不发光) → Bit (Vug, BC); e, f—CS1-052, 8154.92 m, 中细晶白云岩, D_{II} → D_{II-III} 或 Sad_I (中等或中暗橙红色) → 溶蚀 (边缘亮橙红色) + Bit (Vug); g, h—CS1-64, 8156.73 m, 藻球粒、细—中晶白云岩, D_{II} 、 D_{II-III} (发光同上)、Bit (Vug, BP, BC); i, j—CS1-76, 8158.47 m, 泡沫状、藻纹层藻黏结白云岩, D_{ORAC}/RSD → D_I → D_{II} → D_{II-III} → Bit → Fl_{III-IV} (GF, Vug, DFR); k—JS1-001, 4026.38 m, 含藻球粒—斑块状泥粉晶白云岩, 栉壳状结构, D_{ORAC} → $RSD/RASD/GBS$ → D_{III-IV} (GF, Vug); l—JS1-005, 4028.08 m, 藻纹层藻黏结/叠层石—泡沫绵层白云岩, 栉壳状结构 (再作用溶蚀面), D_{ORAC} → $RSD/RASD/GBS$ → D_{II} → D_{III-IV} (GF, Vug)。代号含义同图 4

图 5 四川盆地二叠系、寒武系及埃迪卡拉系缝洞方解石、白云石 U-Pb 定年样品特征

Fig. 5 Photographs showing sampling for LA-ICP-MS U-Pb dating of dolomite and calcite in vugs under plane-polarized light (PPL), cathodoluminescence (CL) of the Permian, Cambrian and Ediacaran in Sichuan Basin

温度相对高的中粗晶白云石形成于中二叠世末的岩浆活动之前。萤石中流体包裹体均一温度呈连续分布, 指示在残余海水、卤水及热液中, 挥发组分氟可发生连续溶蚀及交代作用, 溶出的钙、镁离子可作为缝洞中沉淀的方解石、白云石来源之一。石英的均一温度呈间断式、连续分布, 白云石、方解石的较宽、间断式氧同位素值分布(图 3; 表 1), 均指示其包含多种流体作用过程, 兼有幕式及连续性特征。

灯影组碳酸盐岩缝洞胶结物包括纤状、纤柱状、刀刃状或叶片状、中细晶、中粗晶以及鞍形白云石等多期胶结作用 (Hu *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2024)。以核形石或葡萄状—皮壳状或栉壳状白云

岩为例, 其相续发育了格架孔 (GF) 或溶孔洞 (Vug) → 颗粒间或孔隙中的纤状 D_{ORAC} 或纤状生长 (GBS) → 纤柱状或刀刃状 → 较粗纤维状或束状海底胶结 D_{ORAC} (放射状及束状胶结物 RSD 或 RASD)、葡萄状、栉壳状或纳米级微球粒原生白云石 → 重力悬垂及大气淡水胶结 (C_I) → 隐晶质—微晶 Q_I → 氟磷灰石 (F-Ap)、重晶石 (Br_{T1})、萤石 (Fl_I) → 半自形粒状粉晶 (D_I) → 细晶 (D_{II}) → Q_{II} 或中粗晶 ($D_{III}-D_{IV}$) → 中细晶方解石 (C_{II}) → 烃类 (幕式) 充注 → 萤石 (F_{II-III}) (连续溶蚀交代) + 中粗晶方解石 (C_{III}) → 中粗晶石英 (Q_{III}) + 方铅矿 (Gn) + 闪锌矿 (Sp) + 黄铁矿 (Py) + 萤石 (Fl_{IV}) + 粗晶方解石 (C_{III-IV}) → 烃

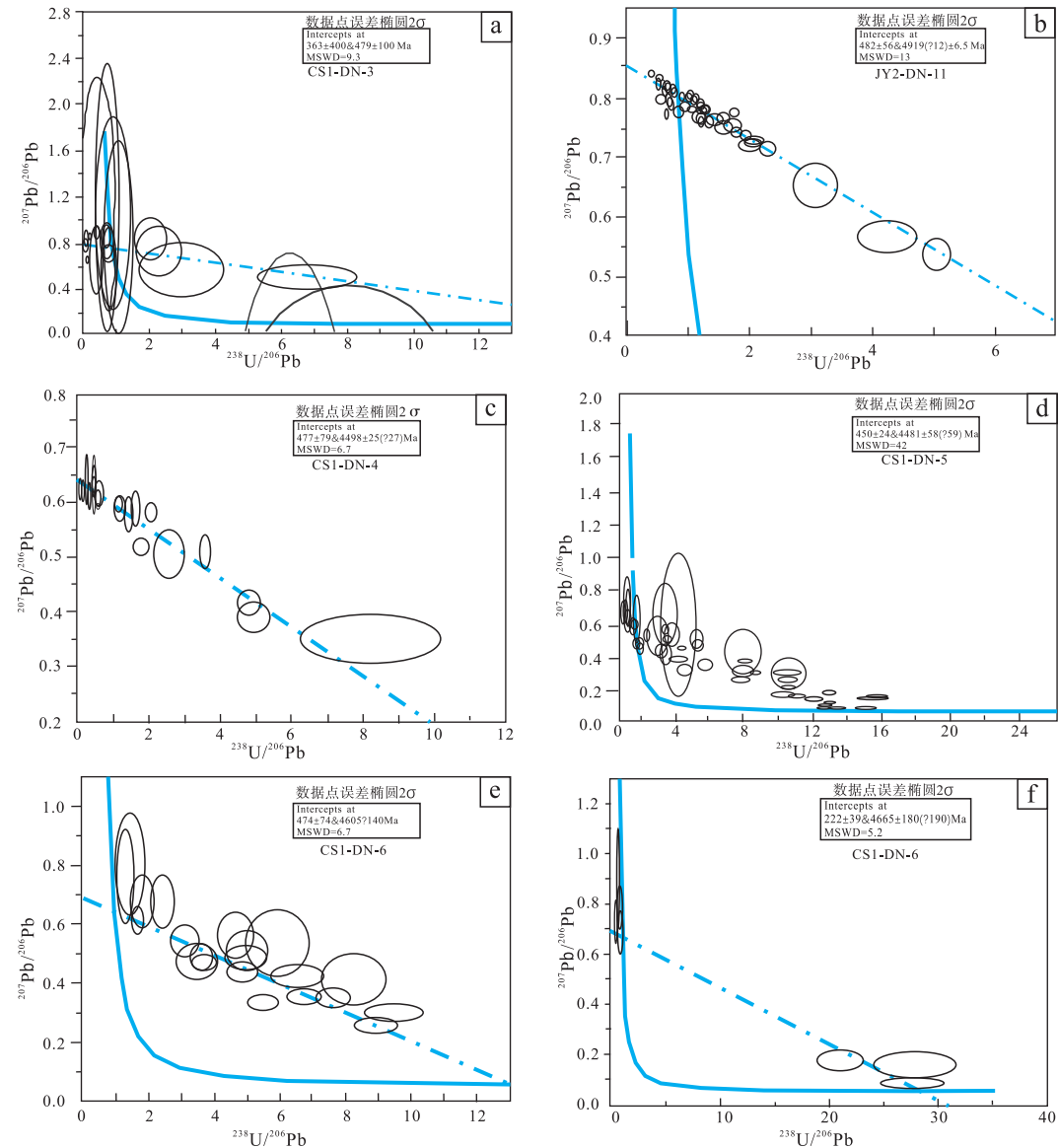


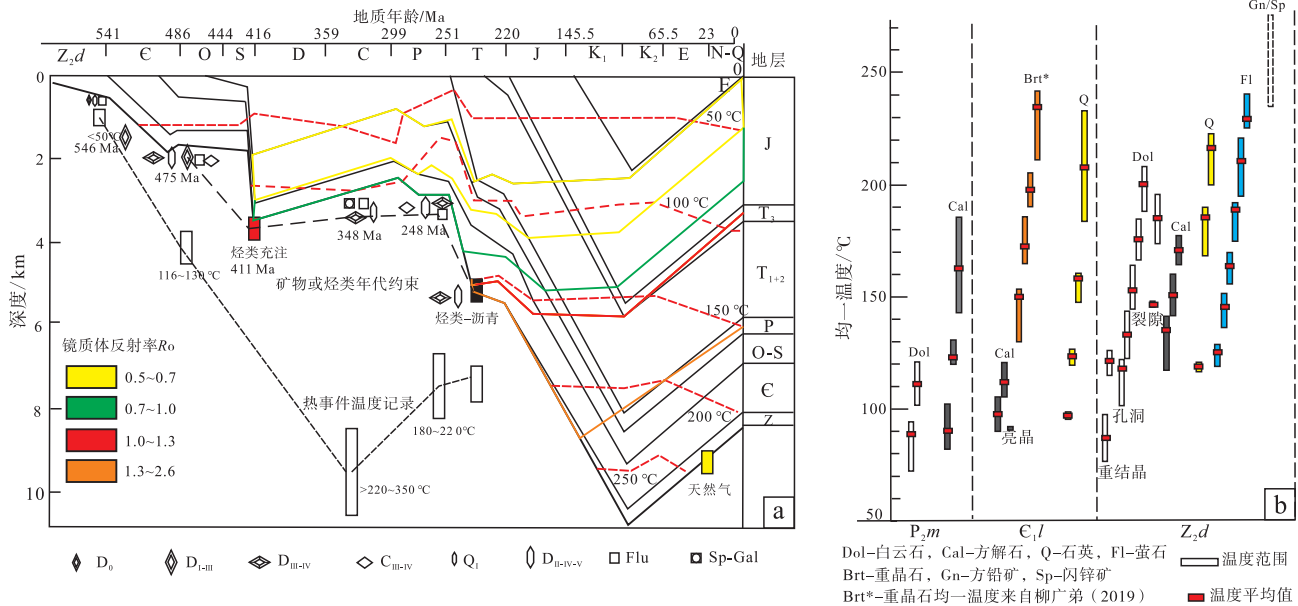
图 6 四川盆地 CS1、JY2 井灯影组碳酸盐岩缝洞方解石、白云石 U-Pb Tera-Wasserburg 谐和图

Fig. 6 Tera-wasserburg concordia diagrams for dolomite and calcites in vugs of the Dengying Formation at Wells CS1 and JY2 in Sichuan Basin

类相态转换（裂解气、焦沥青，TSR）→粗晶或巨粗晶方解石（ C_{IV} ）+石英 Q_{IV} （图 8）。另外，早期烃类充注并未完全阻止中晚二叠世热液矿物胶结充填，这与 Li 等（2021）认识有所不同，即该胶结作用应发生于晚期天然气充注所产生的地层高压之前。

假设原始沉积微生物碳酸盐岩的格架孔隙度 55%左右，其孔隙演化可概括为：原生格架孔（GF）或溶孔（Vug）→海底纤状胶结（减孔 35%~30%）→原生及准同生白云石化、浅埋藏的大气

淡水溶蚀与胶结（早期强烈硅化、浅埋藏的去白云石化）（两者相抵后，增孔 1%~3%）→持续埋藏期压实作用、石英、白云石、方解石等胶结（减孔 10%~15%）→有机酸溶蚀和构造破裂（增孔 3%~5%）→烃类充注及相态转化（保孔及减孔，分别为 20%~15%至 10%~5%）→构造破裂、热液矿物胶结与 TSR（增减孔+3%~-3%），最终残余孔隙度为 3%~8%。与海水胶结、强烈硅化、压实作用等相比，早期热水白云石胶结规模小，对总孔隙度的减少影响有限（图 9）。



a—碳酸盐岩埋藏史 (据郭旭升等, 2020; 有修改); b—重晶石均一温度值 (据 Zhang *et al.*, 2019)

图 7 四川盆地川深 1 井灯影组碳酸盐岩埋藏史及不同层位成岩矿物的均一温度分布

Fig. 7 Thermal bury history for carbonate rocks of the Dengying Formation constrained by diagenetic sequence and histograms of homogenization temperatures of different strata at Well CS-1 in Sichuan Basin

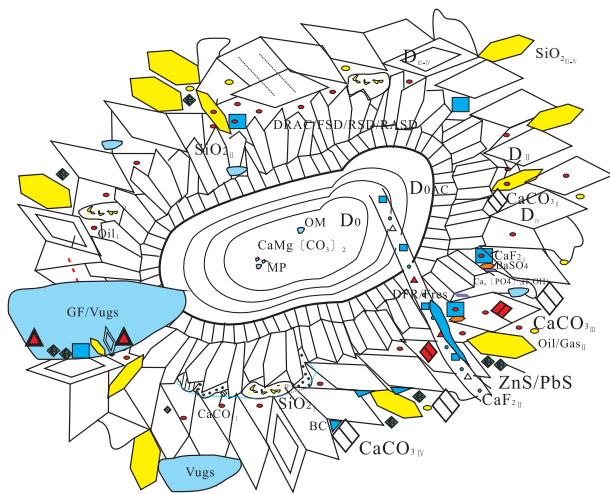


图 8 四川盆地灯影组以栉壳状、核形石白云岩为代表的成岩序列以及孔隙分布示意图

Fig. 8 Sketch showing diagenetic sequence and distribution of porosity of oncolite dolomite with botryoidal (or ctenoid) structure for representative carbonate rocks of the Dengying Formation in Sichuan Basin

5.2 早期热水白云石形成机制探讨

本研究“早期热水白云石”中的“热水”指形成温度明显高于围岩 ($\geq 15\text{ }^\circ\text{C}$)、源于大气淡水与地层水混合并经深部循环加热的热流体, 含有 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 、 Si^{4+} 、 B^{3+} 、 F^- 、 Cl^- 、

HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 等组分。

从地球化学特征来分析, 缝洞中粗晶白云石 $\text{D}_{\text{II-III}}$ 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 $-1.78\text{ }^\circ\text{‰} \sim -1.69\text{ }^\circ\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 为 $-9.28\text{ }^\circ\text{‰} \sim -9.32\text{ }^\circ\text{‰}$, 指示主要为大气淡水、少量混和地层水特征; 均一温度平均 $130.9\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $135.3\text{ }^\circ\text{C}$ 或 $116.6\text{ }^\circ\text{C}$; 盐度平均 $12.63\text{ wt}\%$, 这区别于典型的埋藏白云石或与中二叠世岩浆活动相关的热液鞍形白云石, 反映其为准同生期后、埋藏早期热流体作用的产物。然而, 它比前人 (卿海若和陈代钊, 2010; 李国蓉等, 2020) 报道的非典型热液白云石 (鞍形白云石) 均一温度稍高, 又不同于缝洞中细晶白云石 D_{III} , 后者 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值平均为 $3.0\text{ }^\circ\text{‰}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值平均为 $-8.6\text{ }^\circ\text{‰}$ 、 $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ 值平均为 0.70938 , 应为继承性海水为主的热水产物。其次, 它也不同于缝洞中的中粗晶白云石 $\text{D}_{\text{IV-1}}$ 或粗晶白云石 $\text{D}_{\text{IV-2}}$, 前者的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值平均为 $-0.1\text{ }^\circ\text{‰}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值平均为 $-7.3\text{ }^\circ\text{‰}$ 、 $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ 值平均为 0.70991 , 应为陆源渗入、大气淡水与海水混和的流体产物; 后者的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值平均为 $1.2\text{ }^\circ\text{‰}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值平均为 $-16.9\text{ }^\circ\text{‰}$ 、 $^{86}\text{Sr}/^{87}\text{Sr}$ 值为 0.709643 , 指示海水为主、结晶温度较高。另外, CS1 中储集层沥青的等效 R_0 介于 $3.74\% \sim 4.45\%$ 之间, 平均 4.14% , 为热裂解的焦沥青, 含一定量 H_2S , 少数方解石 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为

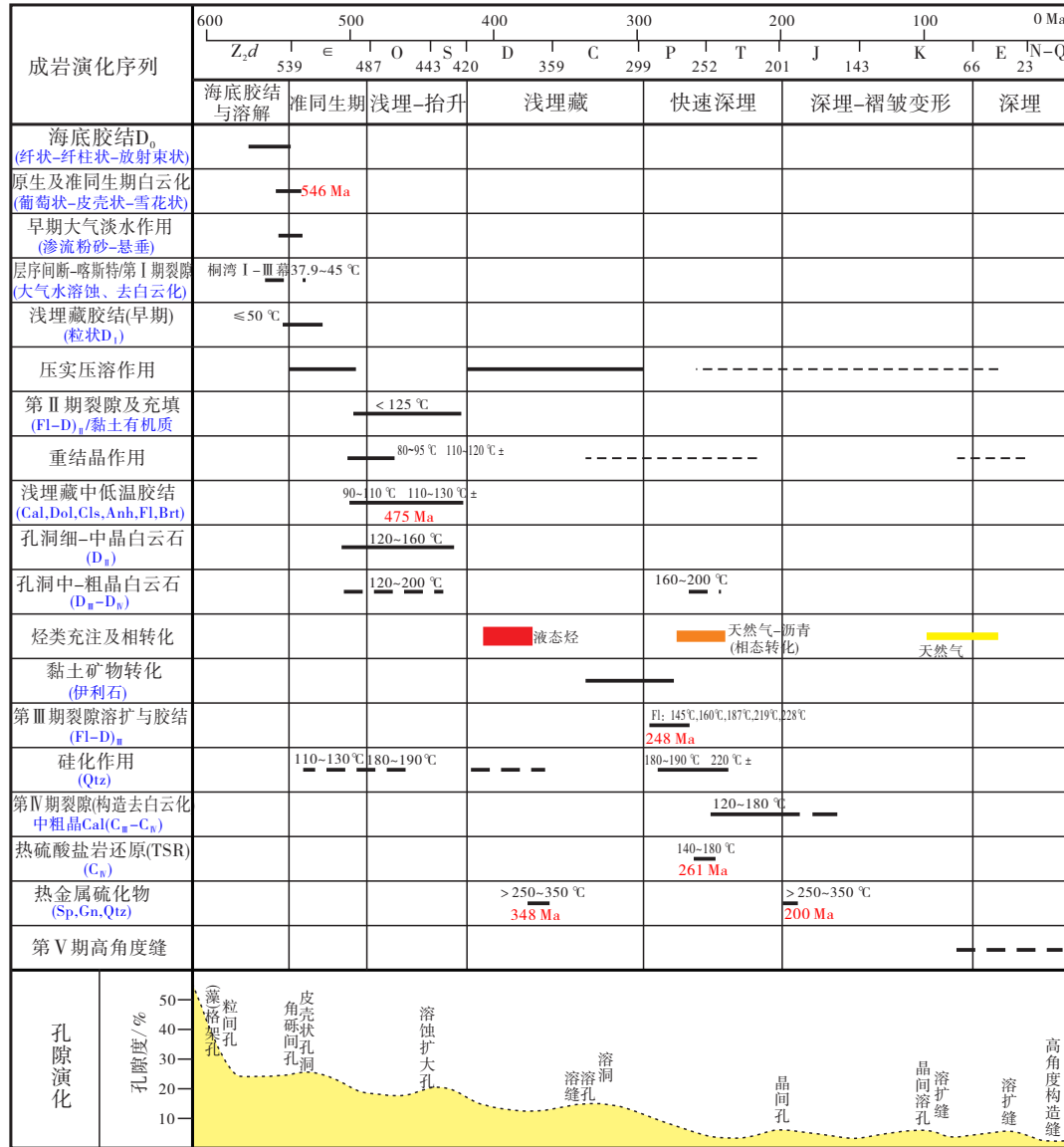


图 9 四川盆地川深 1 井灯影组碳酸盐岩主要成岩序列与孔隙演化关系示意图

Fig. 9 Diagenetic sequence and evolution of porosity within carbonate rocks of the Dengying Formation at Well CS1 in Sichuan Basin

-12‰ ~ -13‰，均一温度为 140 ~ 150 °C，指示了 TSR 作用。再次，它与同一井段下寒武统仙女洞组 (ε_{1x}) 裂隙中的白云石也不同，后者均一温度平均为 160.2 °C，次生包裹体均一温度为 124.0 ~ 127 °C 和 196.5 ~ 210.5 °C，显然是受中晚二叠世岩浆期后热液作用叠加改造的产物。最后，它与川东南灯影组热液白云石脉的地球化学特征存在较大差异，后者具高温 (250 °C)、高盐度 (20.1% ~ 25.8%)、高 Sr⁸⁷/Sr⁸⁶ 值 (>0.71300)、高流体 δ¹⁸O_{SMOW} 值 (>11.0‰)、高 ΣREE (>5.0 μg/g) 及 LREE 富集特征 (张咏梅, 2023)。与中二叠统

栖霞组缝洞中鞍形白云石也不同，后者具有海水和深部 CO₂ 混合碳源特征，δ¹⁸O_{PDB} 值为 -5.94‰ ~ -4.35‰，均一温度为 110 ~ 210 °C，δ¹⁸O_{SMOW} 值为 +4‰ ~ +14‰，这与川西中二叠世末东吴运动期间峨眉山玄武岩喷发事件有关 (黄思静等, 2014)。

如前述，缝洞中的中粗晶白云石 D_{II-III} 的 U-Pb 谐和年龄为 482.0 ± 56.0—474.0 ± 74.0 Ma，误差范围较大。早期海水胶结物 U 含量较低 (海水及海水胶结物一般较低)、U/Pb < 1，表明其经历了多次构造—热事件作用的叠加改造 (如构造抬升、断裂活动、重结晶、TSR 等一系列半开放或开放体

系成岩环境及作用), 导致 U 迁移与重新分布。根据矿物 U-Pb 同位素测定原理, ^{238}U 衰变为 ^{206}Pb 、 ^{235}U 衰变为 ^{207}Pb , 当依据 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 值、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 值以及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值获得的年龄落入一致的误差范围 (T-W 谐和图), 表明 U-Pb 是个封闭体系, 这是获得相对可靠地质年龄的基本条件 (张亮亮等, 2022)。徐秋晨等 (2019) 获得的团簇同位素温度 ($\Delta 47 = 0.423\text{‰} \sim 0.537\text{‰}$, $105.7 \sim 233\text{ }^\circ\text{C}$) 也支持该期热流体活动的存在。

埃迪卡拉纪晚期—早寒武世, 四川盆地处于克拉通内裂陷阶段, 同期存在火山热液活动证据, 如先锋剖面灯三段 $539.6 \pm 1.4\text{ Ma}$ 的火山碎屑岩、下寒武统 521.0 Ma 的 Ni-Mo 硫化物层 (资金平等, 2017) 和扬子地台北缘埃迪卡拉系中热水沉积 (陈宝赞等, 2018)。根据地层埋藏史分析 (图 7; 郭旭升等, 2020), 埃迪卡拉纪至晚寒武世 (最晚至早奥陶世) 的桐湾运动 I 幕、II 幕等构造活动导致区域构造隆升, 促使大气淡水沿断裂下渗、深循环加热, 为早期中粗晶白云石沉淀创造了条件。因此, 缝洞中早期热水白云石形成于海水胶结 (纤状、纤柱状或刀刃状、放射状及束状)、大气淡水胶结及早期硅化、矿化 (微晶石英、氟磷灰石、重晶石或萤石、粉细晶、中细晶白云石等) 之后, 烃类充注之前, 是大气淡水混合地层流体经深部加热沉淀的产物, 后期又受到热流体改造。

6 结论

1) 以川深 1 井为代表的四川盆地埃迪卡拉系灯影组超深埋藏碳酸盐岩经历了 4 个成岩阶段, 依次是早期海水成岩 (Z_2)、中浅埋藏成岩 ($\epsilon-S$)、构造挤压—抬升与缓慢沉降叠加加热事件的埋藏成岩 ($D-K_1$)、中深或超深层埋藏晚期成岩阶段 (K_2-Q)。

2) 建立了四川盆地埃迪卡拉系灯影组碳酸盐岩较完整的成岩序列: 纤状→纤柱状或刀刃状→较粗纤维状、束状海底胶结 (放射状及束状胶结物) 或葡萄状、栉壳状 (纳米级微球粒原生白云石)→重力悬垂、渗流砂及大气淡水胶结→隐晶质—微晶石英 (Q_1)→氟磷灰石、重晶石或萤石 (Fl_1)→半自形粒状粉晶白云石→细晶白云石→中细晶石英 (Q_{II})→中粗晶白云石 (或鞍形白云石 Sad_1)→中晶方解石 (C_{II})→烃类充注→萤石 (Fl_{II} 或 Fl_{III}) + 中粗晶方

解石 (C_{III})→中粗晶石英 (Q_{III}) + 方铅矿 + 闪锌矿 + 黄铁矿 + 萤石 (Fl_{IV}) + 粗晶方解石 (C_{III-IV}) + 中粗晶或巨粗晶白云石或鞍形白云石 (D_{III})→烃类相态转换为裂解气、焦沥青 (TSR)→粗晶或巨粗晶方解石 (C_{IV}) + 粗晶石英 (Q_{IV})。

3) 四川盆地埃迪卡拉系灯影组碳酸盐岩缝洞中充填的部分中 (粗) 晶白云石 (D_{II-III}) 形成于埃迪卡拉纪晚期至早奥陶世 ($482.0 \pm 56.0 \sim 474.0 \pm 74.0\text{ Ma}$)。在盆地伸展构造背景下, 桐湾运动 I 幕、II 幕运动等挤压隆升及断裂活动, 为大气淡水下渗、流体热循环以及早期热水白云石沉淀提供了条件。该期胶结对灯影组碳酸盐岩孔隙减少的影响较小。

参考文献 (References)

- 陈宝赞, 李荣西, 余金杰, 刘帅杰. 2018. 扬子地台北缘震旦系灯影组地球化学特征及其对热水沉积暗示. 矿物岩石地球化学通报, 37(4): 770-778. [Chen B Y, Li R X, Yu J J, Liu S J. 2018. Geochemical characteristics of the Sinian Dengying Formation in northern margin of the Yangtze platform and their implications to hydrothermal sedimentation. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 37(4): 770-778]
- 陈家旭, 王斌, 郭小文, 曹自成, 刘永立, 耿锋, 张旭友, 徐豪, 赵建新. 2021. 应用方解石激光原位 U-Pb 同位素定年确定多旋回叠合盆地油气成藏绝对时间: 以塔里木盆地塔河油田为例. 石油与天然气地质, 42(6): 1365-1375. [Chen J X, Wang B, Guo X W, Cao Z C, Liu Y L, Geng F, Zhang X Y, Xu H, Zhao J X. 2021. Application of laser in-situ U-Pb dating of calcite to determination of the absolute time of hydrocarbon accumulation in polycyclic superimposed basins: a case study on Tahe oilfield, Tarim Basin. Oil & Gas Geology, 42(6): 1365-1375]
- 陈娅娜, 沈安江, 潘立银, 张杰, 王小芳. 2017. 微生物白云岩储集层特征、成因和分布: 以四川盆地震旦系灯影组四段为例. 石油勘探与开发, 44(5): 704-715. [Chen Y N, Shen A J, Pan L Y, Zhang J, Wang X F. 2017. Features, origin and distribution of microbial dolomite reservoirs: a case study of 4th Member of Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin, SW China. Petroleum Exploration and Development, 44(5): 704-715]
- 段金宝, 代林呈, 李毕松, 朱祥, 李辉. 2019. 四川盆地北部埃迪卡拉统灯影组四段储层特征及其控制因素. 天然气工业, 39(7): 9-20. [Duan J B, Dai L C, Li B S, Zhu X, Li H. 2019. Reservoir characteristics and their controlling factors of the fourth Member of Upper Sinian Dengying Fm in the northern Sichuan Basin. Natural Gas Industry, 39(7): 9-20]
- 冯明友, 强子同, 沈平, 张健, 陶艳忠, 夏茂龙. 2016. 四川盆地高石梯—磨溪地区震旦系灯影组热液白云岩证据. 石油学报, 37(5): 587-598. [Feng M Y, Qiang Z T, Shen P, Zhang J, Tao Y Z, Xia M L. 2016. Evidences for hydrothermal dolomite of Sinian

- Dengying Formation in Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 37(5): 587-598]
- 冯伟明, 谢渊, 李嵘, 罗建宁, 林家善, 刘建清, 赵瞻. 2017. 川东南—黔西北桐湾Ⅲ幕岩溶古地貌恢复. *地质论评*, 63(5): 1270-1280. [Feng W M, Xie Y, Li R, Luo J N, Lin J S, Liu J Q, Zhao Z. 2017. Restoration of karst palaeotopography on the Tongwan movement period in the southeastern Sichuan and northwestern Guizhou. *Geological Review*, 63(5): 1270-1280]
- 郭旭升, 胡东风, 黄仁春, 段金宝, 姜智利, 朱祥. 2020. 川东北地区胡家坝震旦系灯影组古油藏特征及其油气勘探意义. *石油与天然气地质*, 41(4): 673-683. [Guo X S, Hu D F, Huang R C, Duan J B, Jiang Z L, Zhu X. 2020. Feature of paleo-oil pools in the Sinian Dengying Formation, northeastern Sichuan Basin, and its significance to exploration. *Oil & Gas Geology*, 41(4): 673-683]
- 黄思静, 兰叶芳, 黄可, 吕杰. 2014. 四川盆地西部中二叠统栖霞组晶洞充填物特征与热液活动记录. *岩石学报*, 30(3): 687-698. [Huang S J, Lan Y F, Huang K K, Lü J. 2014. Vug fillings and records of hydrothermal activity in the Middle Permian Qixia Formation, western Sichuan Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 30(3): 687-698]
- 李国蓉, 刘正中, 谢子潇, 段勇民, 何赛, 邓美洲, 王雨辰, 李勇, 吴章志. 2020. 四川盆地西部雷口坡组非热液成因鞍形白云石的发现及意义. *石油与天然气地质*, 41(1): 164-176. [Li G R, Liu Z Z, Xie Z X, Duan Y M, He S, Deng M Z, Wang Y C, Li Y, Wu Z Z. 2020. Discovery of non-hydrothermal saddle-shaped dolomite in Leikoupo Formation, western Sichuan Basin and its significance. *Oil & Gas Geology*, 41(1): 164-176]
- 李英强, 何登发, 文竹. 2013. 四川盆地及邻区晚埃迪卡拉世古地理与构造—沉积环境演化. *古地理学报*, 15(2): 231-245. [Li Y Q, He D F, Wen Z. 2013. Palaeogeography and tectonic-depositional environment evolution of the Late Sinian in Sichuan Basin and adjacent areas. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 15(2): 231-245]
- 李勇, 王兴志, 冯明友, 曾德铭, 谢圣阳, 凡睿, 王良军, 曾韬, 杨雪飞. 2019. 四川盆地北部及周缘地区震旦系灯影组二段、四段储集层特征及成因差异. *石油勘探与开发*, 46(1): 52-64. [Li Y, Wang X Z, Feng M Y, Zeng D M, Xie S Y, Fan R, Wang L J, Zeng T, Yang X F. 2019. Reservoir characteristics and genetic differences between the second and fourth members of Sinian Dengying Formation in northern Sichuan Basin and its surrounding areas. *Petroleum Exploration and Development*, 46(1): 52-64]
- 罗冰, 杨跃明, 罗文军, 文龙, 王文之, 陈康. 2015. 川中古隆起灯影组储层发育控制因素及展布. *石油学报*, 36(4): 416-426. [Luo B, Yang Y M, Luo W J, Wen L, Wang W Z, Chen K. 2015. Controlling factors and distribution of reservoir development in Dengying Formation of paleo-uplift in central Sichuan Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 36(4): 416-426]
- 罗冰, 周刚, 马奎, 王文之, 徐少立, 武鲁亚, 王玥蕴, 张新. 2025. 四川盆地德阳—安岳裂陷西侧震旦系灯影组四段储层特征及成藏主控因素. *岩性油气藏*, 37(5): 49-58. [Luo B, Zhou G, Ma K, Wang W Z, Xu S L, Wu L Y, Wang Y Y, Zhang X. 2025. Reservoir characteristics and main controlling factors for hydrocarbon accumulation of the fourth member of Sinian Dengying Formation in the west side of Deyang-Anyue Rift, Sichuan Basin. *Lithologic Reservoirs*, 37(5): 49-58]
- 钱一雄, 冯菊芳, 何治亮, 张克银, 金婷, 董少峰, 尤东华, 张永东. 2017. 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. 2017. 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, 武恒志, 周凌方, 董少峰, 王琼仙, 宋晓波, 邓美洲, 李勇. 2023. 深埋条件下微生物碳酸盐岩成岩作用与孔隙演化: 以四川盆地西部中三叠统雷口坡组为例. *石油与天然气地质*, 44(1): 55-74. [Qian Y X, Wu H Z, Zhou L F, Dong S F, Wang Q X, Song X B, Deng M Z, Li Y. 2023. Diagenesis and porosity evolution of microbial carbonate rocks undergone a deep burial history: taking the Leikoupo Formation of Middle Triassic in western Sichuan Basin as an example. *Oil & Gas Geology*, 44(1): 55-74]
- 强深涛, 沈平, 张健, 夏茂龙, 冯明友, 夏青松, 陶艳忠, 夏自强, 林怡. 2017. 四川盆地川中地区震旦系灯影组碳酸盐沉积物成岩作用与孔隙流体演化. *沉积学报*, 35(4): 797-811. [Qiang S T, Shen P, Zhang J, Xia M L, Feng M Y, Xia Q S, Tao Y Z, Xia Z Q, Lin Y. 2017. The evolution of carbonate sediment diagenesis and pore fluid in Dengying Formation, central Sichuan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(4): 797-811]
- 卿海若, 陈代钊. 2010. 非热液成因的鞍形白云石: 来自加拿大萨斯喀彻温省东南部奥陶系 Yeoman 组的岩石学和地球化学证据. *沉积学报*, 28(5): 980-986. [Qing H R, Chen D Z. 2010. Non-hydrothermal saddle dolomite: petrological and geochemical evidence from the Ordovician yeoman formation, southeastern Saskatchewan, Canada. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(5): 980-986]
- 单秀琴, 张静, 张宝民, 刘静江, 周慧, 王拥军, 傅卓文. 2016. 四川盆地震旦系灯影组白云岩岩溶储层特征及溶蚀作用证据. *石油学报*, 37(1): 17-29. [Shan X Q, Zhang J, Zhang B M, Liu J J, Zhou H, Wang Y J, Fu Z W. 2016. Dolomite karst reservoir characteristics and dissolution evidences of Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 37(1): 17-29]
- 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. Algal dolomite cementation and its diagenetic fluid analysis in the Sinian Dengying Formation, southeastern Sichuan Basin. *Scientia Sinica (Terra)*, 43(2): 317-328]
- 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]

- 宋金民,刘树根,李智武,罗平,杨迪,孙玮,彭瀚霖,余永强. 2017. 四川盆地上埃迪卡拉统灯影组微生物碳酸盐岩储层特征与主控因素. 石油与天然气地质,38(4): 741-752. [Song J M, Liu S G, Li Z W, Luo P, Yang D, Sun W, Peng H L, Yu Y Q. 2017. Characteristics and controlling factors of microbial carbonate reservoirs in the Upper Sinian Dengying Formation in the Sichuan Basin, China. Oil & Gas Geology, 38(4): 741-752]
- 汪泽成,姜华,王铜山,鲁卫华,谷志东,徐安娜,杨雨,徐兆辉. 2014. 四川盆地桐湾期古地貌特征及成藏意义. 石油勘探与开发, 41(3): 305-312. [Wang Z C, Jiang H, Wang T S, Lu W H, Gu Z D, Xu A N, Yang Y, Xu Z H. 2014. Paleogeomorphology formed during Tongwan tectonization in Sichuan Basin and its significance for hydrocarbon accumulation. Petroleum Exploration and Development, 41(3): 305-312]
- 王国芝,刘树根,李娜,王东,高媛. 2014. 四川盆地北缘灯影组深埋白云岩优质储层形成与保存机制. 岩石学报,30(3): 667-678. [Wang G Z, Liu S G, Li N, Wang D, Gao Y. 2014. Formation and preservation mechanism of high quality reservoir in deep burial dolomite in the Dengying Formation on the northern margin of the Sichuan basin. Acta Petrologica Sinica, 30(3): 667-678]
- 王兴志,穆曙光,方少仙,黄继祥,侯方浩. 2000. 四川盆地西南部埃迪卡拉系白云岩成岩过程中的孔隙演化. 沉积学报,18(4): 549-554. [Wang X Z, Mu S G, Fang S X, Huang J X, Hou F H. 2000. Evolution of porosity in the process of Sinian dolostone diagenesis in southwest Sichua. Acta Sedimentologica Sinica, 18(4): 549-554]
- 徐秋晨,邱楠生,刘雯,常青. 2019. 利用团簇同位素恢复沉积盆地热历史的探索. 科学通报,64(5): 566-578. [Xu Q C, Qiu N S, Liu W, Chang Q. 2019. Reconstructing the basin thermal history with clumped isotope. Chinese Science Bulletin, 64(5): 566-578]
- 张咏梅. 2023. 盆山转换带热液流体识别与示踪: 以四川盆地东南缘埃迪卡拉系灯影组为例. 成都理工大学博士学位论文. [Zhang Y M. 2023. Origin and evolution of hydrothermal fluids in basin-mountain transition. Doctoral dissertation of Chengdu University of Technology]
- 张亮亮,朱弟成,谢锦程,王青,鲁瑶,徐若炎,齐宁远. 2022. 碳酸盐矿物激光原位 U-Pb 定年: 进展与展望. 矿物岩石地球化学通报,41(6): 1120-1134. [Zhang L L, Zhu D C, Xie J C, Wang Q, Lu Y, Xu R Y, Qi N Y. 2022. Advances and perspectives of the *in-situ* laser ablation carbonate minerals U-Pb dating. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 41(6): 1120-1134]
- 周进高,姚根顺,杨光,张建勇,郝毅,王芳,谷明峰,李文正. 2015. 四川盆地安岳大气田震旦系—寒武系储层的发育机制. 天然气工业,35(1): 36-44. [Zhou J G, Yao G S, Yang G, Zhang J Y, Hao Y, Wang F, Gu M F, Li W Z. 2015. Genesis mechanism of the Sinian-Cambrian reservoirs in the Anyue gas field, Sichuan Basin. Natural Gas Industry, 35(1): 36-44]
- 朱东亚,金之钧,张荣强,张殿伟,何治亮,李双建. 2014. 震旦系灯影组白云岩多级次岩溶储层叠合发育特征及机制. 地学前缘, 21(6): 335-345. [Zhu D Y, Jin Z J, Zhang R Q, Zhang D W, He Z L, Li S J. 2014. Characteristics and developing mechanism of Sinian Dengying Formation dolomite reservoir with multi-stage karst. Earth Science Frontiers, 21(6): 335-345]
- 资金平,贾东,魏国齐,杨振宇,张勇,胡晶,沈淑鑫. 2017. 四川乐山震旦系灯影组火山碎屑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及盆地裂陷演化讨论. 地质论评,63(4): 1040-1049. [Zi J P, Jia D, Wei G Q, Yang Z Y, Zhang Y, Hu J, Shen S X. 2017. LA-ICP-MS U-Pb zircon ages of volcanoclastic beds of the third member of the Sinian (Ediacaran) Dengying Formation in Leshan, Sichuan, and a discussion on the rift evolution in the basin. Geological Review, 63(4): 1040-1049]
- Honlet R, Gasparrini M, Muchez P, Swennen R, John C M. 2018. A new approach to geobarometry by combining fluid inclusion and clumped isotope thermometry in hydrothermal carbonates. Terra Nova, 30: 199-206.
- Hu Y J, Cai C F, Pederson C L, Liu D W, Jiang L, He X Y, Shi S Y, Immenhauser A. 2020. Dolomitization history and porosity evolution of a giant, deeply buried Ediacaran gas field (Sichuan Basin, China). Precambrian Research, 338: 105595.
- Lawson M, Shenton B J, Stolper D A, Eiler J M, Rasbury E T, Becker T P, Phillips-Lander C M, Buono A S, Becker S P, Pottorf R, Gray G G, Yurewicz D, Gournay J. 2018. Deciphering the diagenetic history of the El Abra Formation of eastern Mexico using reordered clumped isotope temperatures and U-Pb dating. Geological Society of America Bulletin, 130: 617-629.
- Li Y, Zhang B J, Zhou G, Tang R F, Long H Y, Li C L, Chen X, Chen D, Liu X H, Zhang C, Feng M Y. 2024. Lithofacies and diagenetic controls on thrombotic dolomite reservoir development from the Precambrian Dengying Formation in the central Sichuan Basin, SW China. Frontiers in Earth Science, 12: 1407400.
- Li Z Q, Sun W, Liu S G, Li Z W, Deng B, Wu J, Ding Y, Jiao K, Jin X, Lu P D, Tian T Z. 2021. Pore preservation and failure mechanism of Sinian Dengying Formation carbonate reservoirs: a case study of two ultradeep wells in the Sichuan Basin, western China. Geofluids, 2021: 8387748.
- Winter B L, Johnson C M. 1995. U-Pb dating of a carbonate subaerial exposure event. Earth and Planetary Science Letters, 131: 177-187.
- Zhang P W, Liu G D, Cai C F, Li M J, Chen R Q, Gao P, Xu C L, Wan W C, Zhang Y Y, Jiang M Y. 2019. Alteration of solid bitumen by hydrothermal heating and thermochemical sulfate reduction in the Ediacaran and Cambrian dolomite reservoirs in the Central Sichuan Basin, SW China. Precambrian Research, 321: 277-302.

(责任编辑 张西娟)