

川中灯影组古岩溶储层成岩序列及成储—成藏效应

谷一凡^{1,2}, 王岩松^{1,2}, 周刚³, 武鲁亚³, 蒋裕强^{1,2}, 王海军^{1,2}

1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500

2. 中国石油非常规重点实验室储层评价实验室, 成都 610500

3. 中国石油西南油气田勘探开发研究院, 成都 610041

摘要 【目的】川中地区震旦系灯影组古岩溶储层是我国海相天然气勘探的重点目标, 具有形成时期早、成岩改造久、非均质性强等特点。【方法】通过对灯影组古岩溶储层开展成岩矿物序列识别、U-Pb 同位素定年、激光原位元素含量测试, 结合岩心物性测试和图像软件识别, 可将灯二段储层和灯四段储层划分为缝洞型和孔洞型两种类型。【结果】识别出了 9 个阶段的成岩—成藏事件, 成岩流体可划分为 3 种类型: 海水、被改造海水和热液流体。成岩序列和激光原位 U-Pb 年龄分析结果表明, 包括 3 期海水胶结 (分别对应 606±21 Ma、604±42 Ma 和 590±15 Ma)、3 期热液活动 (分别对应 403±30 Ma、259.4±3 Ma 和 199±12 Ma) 等在内的多阶段成岩事件对储层物性具有破坏性。【结论】成岩演化过程中的古孔隙度恢复结果表明, 灯二段缝洞型储层在古油藏形成阶段、原油裂解成气阶段、气藏调整阶段始终具有运聚能力, 孔洞型储层则在后两个阶段具备运聚能力。灯四段的缝洞型储层和孔洞型储层在三个关键成藏阶段均具有运聚能力。

关键词 U-Pb 同位素定年; 古岩溶储层; 震旦系; 成岩序列; 灯影组; 川中地区

第一作者简介 谷一凡, 男, 1990 年出生, 博士, 助理研究员, 储层地质学, E-mail: xnsygyf@126.com

中图分类号 **文献标志码** A

0 引言

碳酸盐岩地层中的油气成藏常被认为是多期成岩流体、多期烃类流体共同作用的结果^[1-5], 其过程由于储渗空间的强烈非均质性往往具有复杂性, 给规模性勘探开发带来风险与挑战^[6-8]。震旦系灯影组是四川盆地海相碳酸盐岩天然气勘探的重要层系^[9], 已相继发现了威远气田、安岳气田, 累计三级储量近万亿立方米^[10-12]。近年来, 在盆地内蓬莱地区多口钻井在震旦系灯影组二段、四段测试均获得高产工业气流^[13-15], 展示出该地区灯影组天然气勘探的巨大潜力。尽管该地区灯影组储层发育良好, 并且紧邻寒武系生烃中心, 烃源岩条件被认为比安岳地区更优越^[15]。但实际勘探结果表明, 受加里东期、印支期、燕山期、喜马拉雅期等构造运动影响, 该区灯影组油气成藏经历复杂演化过程, 天然气以原油裂解气成因为主, 古油藏分布范围尚未落实, 关键成藏阶段无法确定且争议较大。主力烃源岩不在下方, “倒灌”和“侧接”式的油气运聚过程不清楚。气藏内部气水共存, 且气水界面不统一, 这些都给勘探工作带来极大风险^[16-18]。

收稿日期: 2023-10-31; **收修改稿日期:** 2024-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42202166) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 42202166]

储层孔隙度反映了储层储存和运移油气的能力,其现今孔隙度可以通过岩心物性测试、测井等资料得到,但碳酸盐岩储层的现今孔隙度与成藏时期的古孔隙度往往差异较大^[4,14]。获得地质历史时期,特别是成藏期时的储层古孔隙度对于研究油气成藏过程有着重要的意义。川中地区灯影组古岩溶储层在形成后,经历了长期的成岩作用改造,成岩作用复杂且对孔隙度演化的影响强烈,并且多套储层垂向上叠置发育,形成了主要的油气运聚通道。油气成藏时期的储层古孔隙度直接影响了古油藏的分布范围,但目前对于该地区成藏时期古孔隙度特征的研究较少^[17-20]。本文依据成岩矿物占位关系,结合激光原位微区定年和元素测试结果,建立研究区灯二段、灯四段成岩演化序列,应用孔隙反演回剥的方法,恢复储层的古孔隙度演化曲线,结合油气成藏关键阶段,揭示灯影组古岩溶储层成岩演化的成储—成藏效应。

1 地质背景

研究区位于四川盆地中部,包括安岳、蓬莱两个地区(图 1a)^[13]。本区发育加里东期形成的古隆起构造^[21-22]。在多期构造改造过程中,古隆起整体继承发育(图 1b),最终在喜山期后定型^[1]。基于藻类含量和沉积构造类型,区内震旦系灯影组可被划分为四段,其中,灯二段和灯四段以叠层石、凝块石等微生物白云岩为主,灯一段以泥晶白云岩为主,灯三段以黑色泥页岩为主^[2]。晚震旦世的桐湾期抬升运动,导致灯二段和灯四段顶部经历了剥蚀和广泛的岩溶作用,形成了大规模不整合面^[23-24]。不同于安岳地区(图 1c),蓬莱地区大部分缺失灯三段、灯四段,灯二段直接与上覆寒武系地层不整合接触(图 1d)。在此背景下,灯二段、灯四段顶部形成了分布广泛的古岩溶改造成因藻类丘滩储层。近年来针对储层内沥青的定量研究表明,寒武系麦地坪组、筇竹寺组泥页岩均可以作为灯影组成藏的主力烃源岩^[7]。

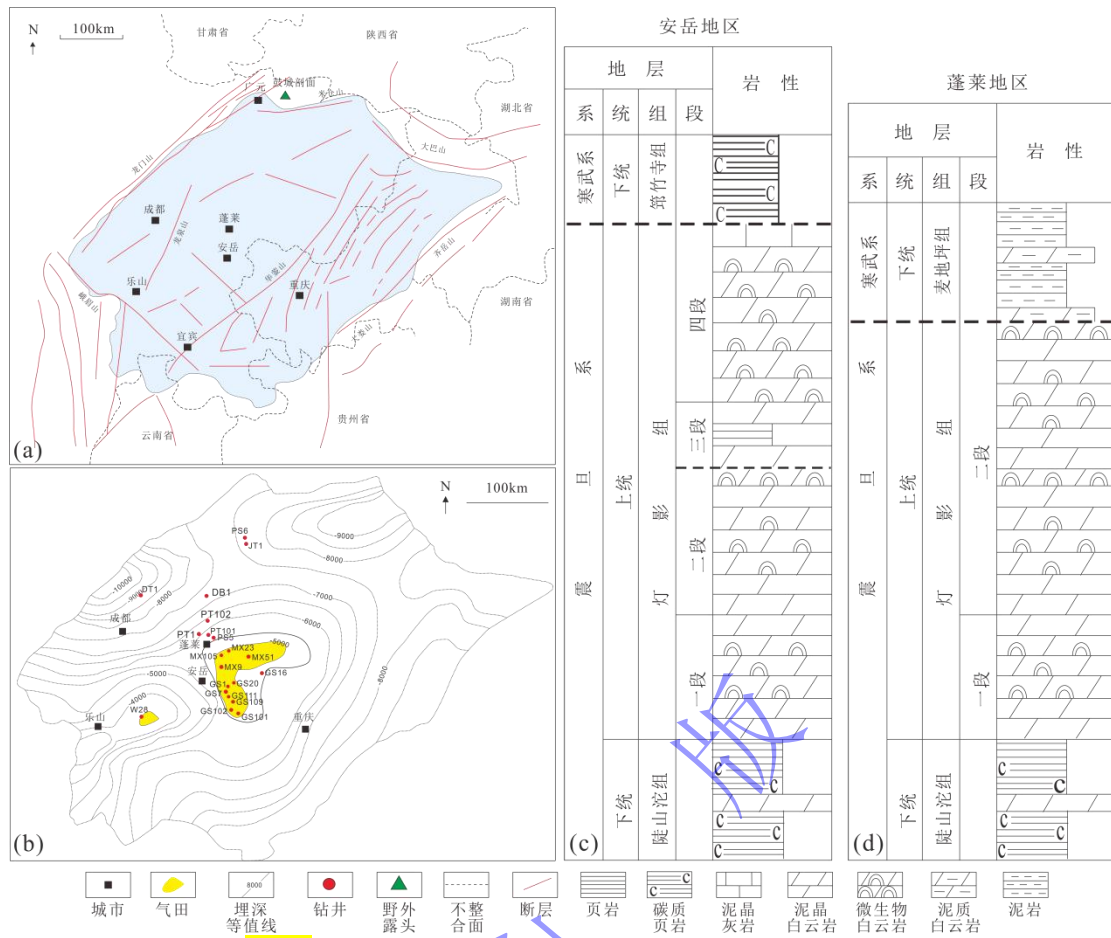


图1 研究区地理位置及地层柱状示意图 (据文献[13]修改)

Fig.1 Geographical location and stratigraphic column diagram of the study area (modified from reference [13])

2 样品与实验

本次研究的 14 个灯二段岩心样品取自蓬莱地区的 5 口取心井 (PS5 井、PS1 井、PT1 井、PS2 井、DB1 井), 16 个灯四段岩心样品来自安岳地区 4 口取心井 (MX105 井、GS18 井、MX51 井、GS109 井) 和蓬莱地区的 2 口取心井 (PS2 井、DB1 井)。在储层中成岩矿物类型的鉴定基础上, 选取了 7 个白云石样品进行激光原位 U-Pb 同位素测年, 包括 1 个基质白云石 (MD) 样品, 3 个纤状白云石 (FD) 样品和 3 个鞍状白云石 (SD) 样品。该实验是在成都创源微谱公司的 Thermo Scientific quadruple iCap TQ 电感耦合等离子体质谱仪 (Q-ICP-MS) 进行的, 每个年龄数据大约需要对白云石矿物打 80~115 个激光点。具体参数包括直径为 150 μm 的激光光斑尺寸、3 J/cm² 的激光能量和 10 Hz 的重复频率。白云石样品与 NIST-614 玻璃标准品和几种基质匹配的实验室工作方解石标准品一起测量, 包括 PTKD-2 和 WC-1^[3-4]。对 NIST-614 玻璃标准物 (包括未知样品) 和方解石标准物进行重复测量, 以校正 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 分馏和 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 比值中与仪器相关的漂移^[3]。基于激光剥蚀脱气和不同质量分数的 U、Pb 同位素分析, 以 ²³⁸U/²⁰⁶Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 值分别为横纵坐标、构建

Tera-Wasserburg 谐和曲线图计算碳酸盐矿物形成年龄，拟合出的不谐和曲线和 Tera-Wasserburg 反协和曲线下交点位置即为样品形成年龄。独立测年为 268.5 ± 2.7 Ma 的 WC-1 方解石标准品和独立测年为 153.5 ± 1.9 Ma 的 PTKD-2 方解石标准品也与白云石样品一起测年，作为对照标准品以确保再现性^[25]，在不同阶段得出的结果在参考值的 2% 以内。

根据 U-Pb 绝对年龄，选择了 8 个白云石晶体进行激光原位主量—微量元素和稀土元素分析。实验仪器为 Q-ICP-MS。共测试了 51 个激光点位，其中基质白云石 (MD) 6 个点位，纤状白云石 (FD) 15 个点位，细晶白云石 (FCD) 12 个点位，鞍状白云石 (SD) 18 个点位。

3 储层类型划分

根据碳酸盐岩气藏开发地质行业标准 (SY/T 6110—2002)^[26]，本区灯二段、灯四段储层均以 III 类储层为主，这种划分方案体现不出灯影组储层的强烈非均质性，不能满足勘探开发需求。本次研究基于储渗空间类型的搭配关系，结合常规—成像测井等资料，将区内灯二段、灯四段储层均划分为两种类型：缝洞型和孔洞型。

3.1 灯二段储层类型

灯二段缝洞型储层在岩心上呈浅灰、褐灰色，原岩岩性主要为凝块石白云岩或叠层石白云岩，充填物多为各类矿物和沥青 (图 2a, b)。该类储层的全直径岩心孔隙度介于 2.12%~9.73%，平均为 4.24%，全直径岩心渗透率介于 0.56 mD~5.88 mD，平均为 1.15 mD。常规测井响应特征为：扩径明显，声波时差明显增大，高中子，电阻率明显降低且侵入特征明显。孔洞型储层岩心为浅灰、褐灰色，原岩为砂屑白云岩或凝块石白云岩 (图 2c, d)，全直径岩心孔隙度介于 1.39%~4.57%，平均为 2.18%，全直径岩心渗透率介于 0.17 mD~2.17 mD，平均为 0.20 mD。常规测井响应特征为：扩径不明显，电阻率明显降低，侵入特征不明显，密度降低。



图2 研究区灯二段与灯四段古岩溶储层类型岩石学特征

(a) 缝洞型储层, PS5 井, 5 677.00 m, 灯二段; (b) 缝洞型储层, PS1 井, 7 259.20 m, 灯二段; (c) 孔洞型储层, PS5 井, 5 708.00 m, 灯二段; (d) 孔洞型储层, PT1 井, 灯二段, 5 740.83~5 741.89 m; (e) 缝洞型储层, PS2 井, 7 791.57 m, 灯四段; (f) 缝洞型储层, PS2 井, 7 782.00 m, 灯四段; (g) 孔洞型储层, PS2 井, 7 800.89 m, 灯四段; (h) 孔洞型储层, DB1 井, 6 407.16 m, 灯四段

Fig.2 Petrological characteristics of paleoreservoirs in 2nd and 4th members, Dengying Formation, in the study area

3.2 灯四段储层类型

灯四段缝洞型储层在岩心上呈浅灰、褐灰色, 原岩为凝块石白云岩和叠层石白云岩(图 2e, f), 全直径岩心孔隙度介于 2.22%~5.27%, 平均为 3.58%, 全直径岩心渗透率介于 $(0.33\sim 8.96) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $0.63 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。测井响应特征为: 扩径明显, 声波时差明显增大, 高中子, 电阻率明显降低且侵入特征明显。孔洞型储层为浅灰、褐灰色, 原岩为砂屑白云岩、凝块石白云岩(图 2g, h), 全直径岩心孔隙度介于 1.42%~4.51%, 平均为 2.92%, 全直径岩心渗透率介于 $(0.17\sim 4.87) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $0.32 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。常规测井响应特征为: 扩径不明显, 电阻率明显降低, 侵入特征不明显, 密度降低。

4 成岩矿物类型及其地球化学特征

4.1 成岩矿物类型

本区灯二段储层中最多可识别出 9 期成岩矿物(图 3, 4), 灯四段储层中最多可识别出 8 期成岩矿物(表 1)。第 1 期矿物为纤状白云石(FD)(图 3a, b), 俗称葡萄花边构造或葡萄状环边胶结(图 3c, d), 这一类白云石形成于同生海底阶段。前人研究提出纤状白云石(FD)的出现印证了灯影组沉积期海水 Mg/Ca 比演化规律, 属于灯二段中—上部溶洞、溶缝内“白云石海”事件的结晶产物, 能直接反映埃迪卡拉末期的海水化学性质, 这一类白云石胶结物形成时间早, 多具有单向延长的特征, 被认为是文石类矿物被早期白云石化改造的结果^[27]。同时, 由于海平面频繁震荡, 可出现同生期暴露前后的多期纤状白云石。相比灯四段(图 4a), 该类矿物在灯二段中发育时间长、发育期次多, 在海底胶结阶段、准同生期大气淡水成岩阶段以及表生成岩阶段均有发育。第 2 期矿物为细晶白云石(FCD), 这类白云石的自形程度高, 镜下观察中晶体更为透亮, 阴极射线下呈光亮发光特征, 与纤状白云石、粒状白云石等较为暗淡、不发光的特征对比明显^[1]。第 1 期沥青(B1, 又称沥青膜或沥青线), 志留纪末期伴随地层持续埋深, 裂隙槽内烃源岩在志留纪末期达到生烃门限, 开始发生第一期原油充注。储渗空间边缘的细晶白云石表面出现第一期油气充注形成的沥青膜(第 1 期沥青), 这一现象在蓬莱和安岳地区均可观察到^[28-29]。矿物占位关系表明, 多期

纤状白云石 (FD) 与细晶白云石 (FCD) 形成时间早于早期古油藏 (B1) 形成时期, 第 1 期鞍状白云石 (SD1) (图 4b, c)、中晶白云石 (MCD) (图 3e, f)、第 2 期鞍状白云石 (SD2) 形成晚于第 1 期沥青 (图 4d~g) [13], 但早于第 2 期沥青 (B2) (图 3g)。在第 3 期鞍状白云石 (SD3) 与方铅矿、闪锌矿共生后 (图 3h, i、图 4h), 形成了最晚一期成岩矿物为石英 (Qtz) (图 3i、图 4i)。

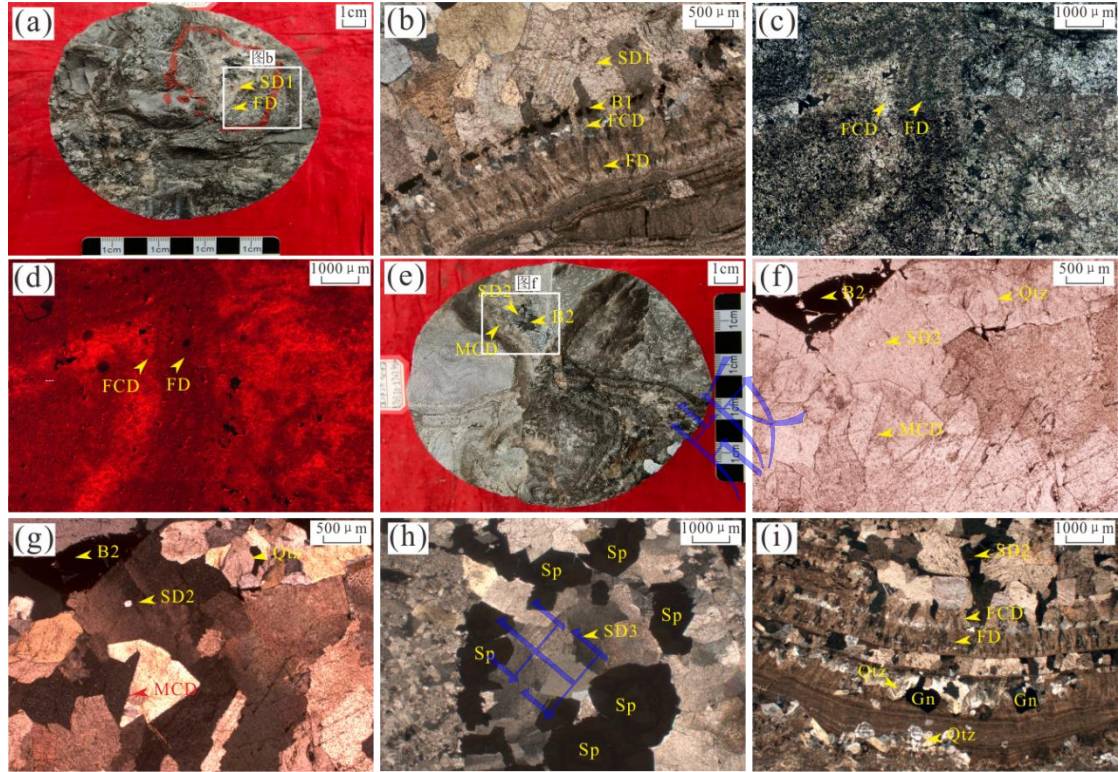


图3 研究区灯二段古岩溶储层成岩矿物特征

(a) PS5 井, 5 707.30 m, 纤状白云石 (FD) 与第 1 期鞍状白云石 (SD1) (岩心照片); (b) PS5 井, 5 707.30 m, 纤状白云石 (FD) — 细晶白云石 (FCD) — 第 1 期沥青 (B1) — 第 1 期鞍状白云石 (SD1) (正交偏光照片); (c) PS1 井, 7 259.20 m, 纤状白云石 (FD) — 细晶白云石 (FCD) (单偏光照片); (d) PS1 井, 7 259.20 m, 纤状白云石 (FD) — 细晶白云石 (FCD) (阴极发光照片); (e) PS5 井, 5 707.30 m, 中晶白云石 (MCD) — 第 2 期鞍状白云石 (SD2) — 第 2 期沥青 (B2) — 石英 (Qtz) (岩心照片); (f) PS5 井, 5 707.30 m, 中晶白云石 (MCD) — 第 2 期鞍状白云石 (SD2) — 第 2 期沥青 (B2) (单偏光照片); (g) PS5 井, 5 707.30 m, 正交偏光下, 鞍状白云石波状消光, 而中晶白云石未见此现象 (正交偏光); (h) PS5 井, 5 676.11 m, 闪锌矿 (Sp) 与第 3 期鞍状白云石 (SD3), 见明显波状消光 (正交偏光); (i) PT1 井, 5 740.83 m, 纤状白云石 (FD) — 细晶白云石 (FCD) — 第 2 期鞍状白云石 (SD2) — 方铅矿 (Gn) — 石英 (Qtz) (正交偏光)

Fig.3 Diagenetic minerals in paleoreservoir of 2nd member, Dengying Formation

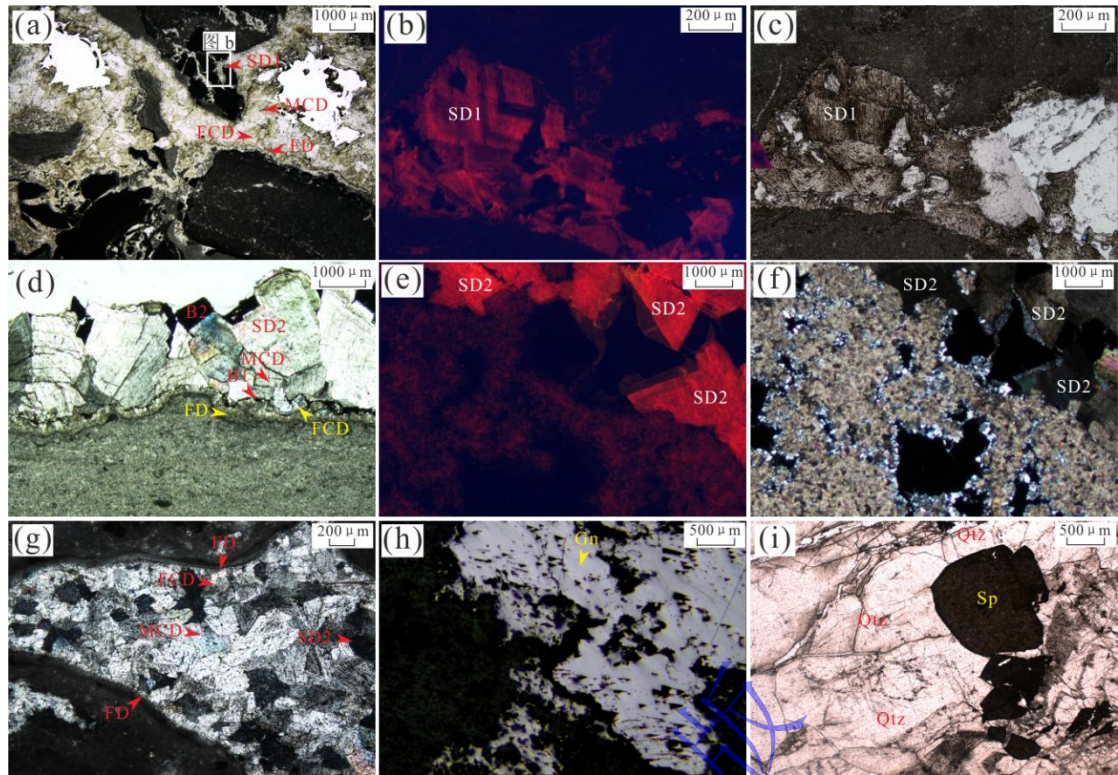


图4 研究区灯四段古岩溶储层成岩矿物特征

(a) MX105 井, 5 334.64 m (单偏光); (b) MX105 井, 5 334.64 m (阴极发光); (c) MX105 井, 5 334.64 m (单偏光); (d) GS18 井, 5 177.82 m (单偏光); (e) GS18 井, 5 177.82 m (阴极发光); (f) GS18 井, 5 177.82 m (单偏光); (g) MX51 井, 5 342.30 m (单偏光); (h) GS109 井, 5 317.00 m, 方铅矿 (Gn) (反射光); (i) GS109, 5 317.40 m, 闪锌矿 (Sp) 与石英 (Qtz) (单偏光)

Fig.4 Diagenetic minerals in paleoreservoir of 4th member, Dengying Formation

表1 研究区灯影组古岩溶储层成岩矿物类型及充填序列

Table 1 Mineral types and diagenetic sequences of paleokarst reservoirs in the Dengying Formation in the study area

发育位置	储层类型	原岩类型	成岩矿物类型及充填序列
灯二段	缝洞型	叠层石白云岩或凝块石白云岩	(1) 第1期+第2期+第3期纤状白云石 (FD1、FD2、FD3)、(2) 细晶白云石 (FCD)、(3) 第1期沥青 (B1)、(4) 第1期鞍状白云石 (SD1)、(5) 中晶白云石 (MCD)、(6) 第2期鞍状白云石 (SD2)、(7) 第2期沥青 (B2)、(8) 方铅矿 (Gn)+闪锌矿 (Sp)+第3期鞍状白云石 (SD3)、(9) 石英 (Qtz)
灯二段	孔洞型	凝块石白云岩	(1) 第1期+第2期+第3期纤状白云石 (FD1、FD2、FD3)、(2) 细晶白云石 (FCD)、(3) 第2期鞍状白云石 (SD2)、(4) 第3期鞍状白云石 (SD3)、(5) 石英 (Qtz)
灯四段	缝洞型	叠层石白云岩或凝块石白云岩	(1) 第3期纤状白云石 (FD3)、(2) 细晶白云石 (FCD)、(3) 第1期沥青 (B1)、(4) 中晶白云石 (MCD)、(5) 第2期鞍状白云石 (SD2)、(6) 第2期沥青 (B2)、(7) 方铅矿 (Gn)+闪锌矿 (Sp)+第3期鞍状白云石 (SD3)、(8) 石英 (Qtz)
灯四段	孔洞型	凝块石白云岩	(1) 第3期纤状白云石 (FD3)、(2) 细晶白云石 (FCD)、(3) 中晶白云石 (MCD)、(4) 第2期鞍状白云石 (SD2)、(5) 第2期沥青 (B2)、(6) 方铅矿 (Gn)+闪锌矿 (Sp)+第3期鞍状白云石 (SD3)、(7) 石英 (Qtz)

4.2 地球化学特征

4.2.1 主量—微量元素特征

激光原位元素含量测试结果表明(图5),灯二段与灯四段基质白云石样品中主量元素Ca含量的分布范围相近,介于 $226\ 860\times 10^{-6}\sim 251\ 387\times 10^{-6}$ (平均值为 $236\ 538\times 10^{-6}$),略高于白云石的标准测量值(约 $217\ 071\times 10^{-6}$)^[29]。灯二段与灯四段细晶白云石样品中主量元素Ca含量、微量元素Sr、Fe、Mn含量也呈现出相近的富集特征。第1期、第2期、第3期纤状白云石样品中主量元素Ca含量的分布范围分别为 $234\ 457\times 10^{-6}\sim 248\ 879\times 10^{-6}$ 、 $239\ 275\times 10^{-6}\sim 247\ 999\times 10^{-6}$ 和 $238\ 526\times 10^{-6}\sim 259\ 396\times 10^{-6}$,平均值分别为 $240\ 216\times 10^{-6}$ 、 $244\ 486\times 10^{-6}$ 和 $250\ 064\times 10^{-6}$,均略高于基质白云石。作为热液流体的直接产物,两期鞍状白云石的Ca含量差异明显,第1期鞍状白云石的Ca含量仅为 $11\ 819\times 10^{-6}\sim 29\ 935\times 10^{-6}$,平均值仅为 $17\ 907\times 10^{-6}$ 。而第3期鞍状白云石的主量元素Ca含量介于 $248\ 323\times 10^{-6}\sim 261\ 980\times 10^{-6}$,平均值高达 $255\ 835\times 10^{-6}$ 。

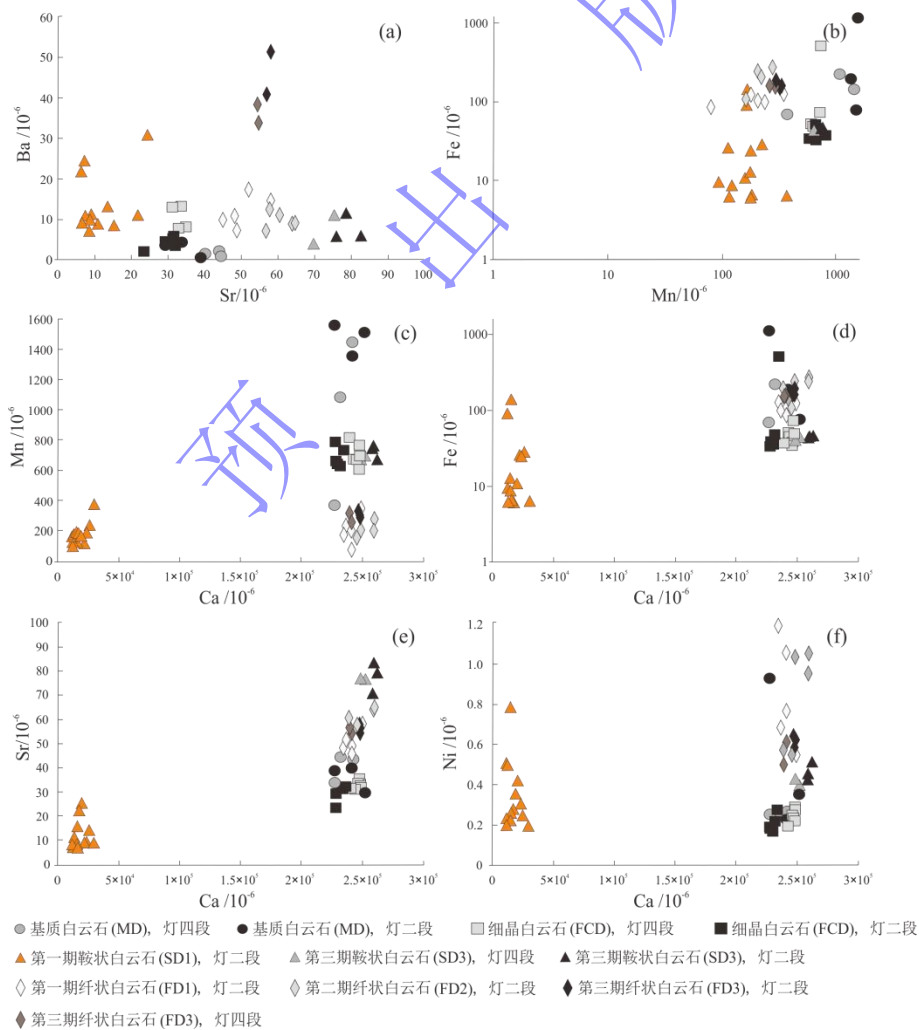


图5 研究区灯影组古岩溶储层成岩矿物主量—微量元素交会图

Fig.5 Cross-plot of major elements vs. trace elements in diagenetic minerals of Dengying Formation

灯二段与灯四段不同期次的纤状白云石样品具有相似的微量元素 Sr、Fe、Mn 含量 (图 5a~f), Ba、Ni 含量在不同期次中差异明显 (图 5f)。与第 1 期鞍状白云石的各类元素含量相比, 第 3 期鞍状白云石的每种元素含量均明显更高, 并且灯四段中第 3 期鞍状白云石的各项元素富集程度略高于灯二段的同类样品 (图 5c), 并且在微量元素 Sr、Ni 和 Fe 含量方面更接近纤状白云石 (图 5d)。元素丰度的显著差异还表明, 第 1 期鞍状白云石和第 3 期鞍状白云石具有不同的流体化学性质, 明显属于不同阶段的热液流体, 推测流体来源、类型明显不同 (图 5e), 后者似乎与海水关系更密切 (图 5f)。

4.2.2 稀土元素特征

在所有白云石样品中, 稀土元素总量普遍偏低, 其中基质白云石的稀土元素总量明显较高, 分布范围为 $5.11 \times 10^{-6} \sim 35.49 \times 10^{-6}$, 平均值高达 12.93×10^{-6} 。纤状白云石的稀土元素总量变化很大, 第 1 期到第 3 期纤状白云石的稀土元素总量分别为 $0.91 \times 10^{-6} \sim 2.15 \times 10^{-6}$ 、 $1.43 \times 10^{-6} \sim 2.94 \times 10^{-6}$ 和 $5.40 \times 10^{-6} \sim 8.55 \times 10^{-6}$, 稀土元素总量有逐渐升高的趋势。细晶白云石的稀土元素总量介于 $0.42 \times 10^{-6} \sim 3.27 \times 10^{-6}$, 平均值为 0.86×10^{-6} 。第 1 期鞍状白云石稀土元素总量介于 $0.48 \times 10^{-6} \sim 4.31 \times 10^{-6}$, 平均值为 1.85×10^{-6} 。第 3 期鞍状白云石稀土元素总量远高于第 1 期, 介于 $7.86 \times 10^{-6} \sim 11.07 \times 10^{-6}$, 平均值高达 9.22×10^{-6} 。

经过 PAAS 标准化后可得到稀土元素配分曲线^[30], 结果表明 (图 6a), 基质白云石呈明显的 Ce 负异常, 其他稀土元素相对平坦。第 1 期纤状白云石 (图 6b) 到第 3 期纤状白云石的稀土元素配分曲线呈微弱“左倾” (图 6c), 重稀土元素微弱富集 (图 6d)。值得注意的是, 第 2 期纤状白云石的稀土元素分配模式似乎已脱离海水特征, 呈现出 Ce 正异常, 说明第 2 期纤状白云石的结晶过程是在一个相对还原的环境中进行的 (图 6c), 推测为非热液成因地层流体。第 1 期鞍状白云石呈明显的 Ce 负异常和 Eu 正异常, 其他元素的曲线部分较为平坦。第 3 期鞍状白云石仅具有 Eu 正异常的特点, 其他元素未见异常。细晶白云石稀土元素配分曲线具有明显的 Ce 负异常和微弱的 Gd 正异常。相比基质白云石, 3 期纤状白云石代表了海水流体, 第 1 期鞍状白云石代表的第 1 期热液流体和细晶白云石代表的成岩流体具有海源流体特征, 推测为被改造的海水。第 3 期鞍状白云石代表的第 3 期热液流体则未见海水亲缘性, 从绝对年龄和元素特征来看, 推测与峨眉山大火成岩省活动有关^[13,31]。

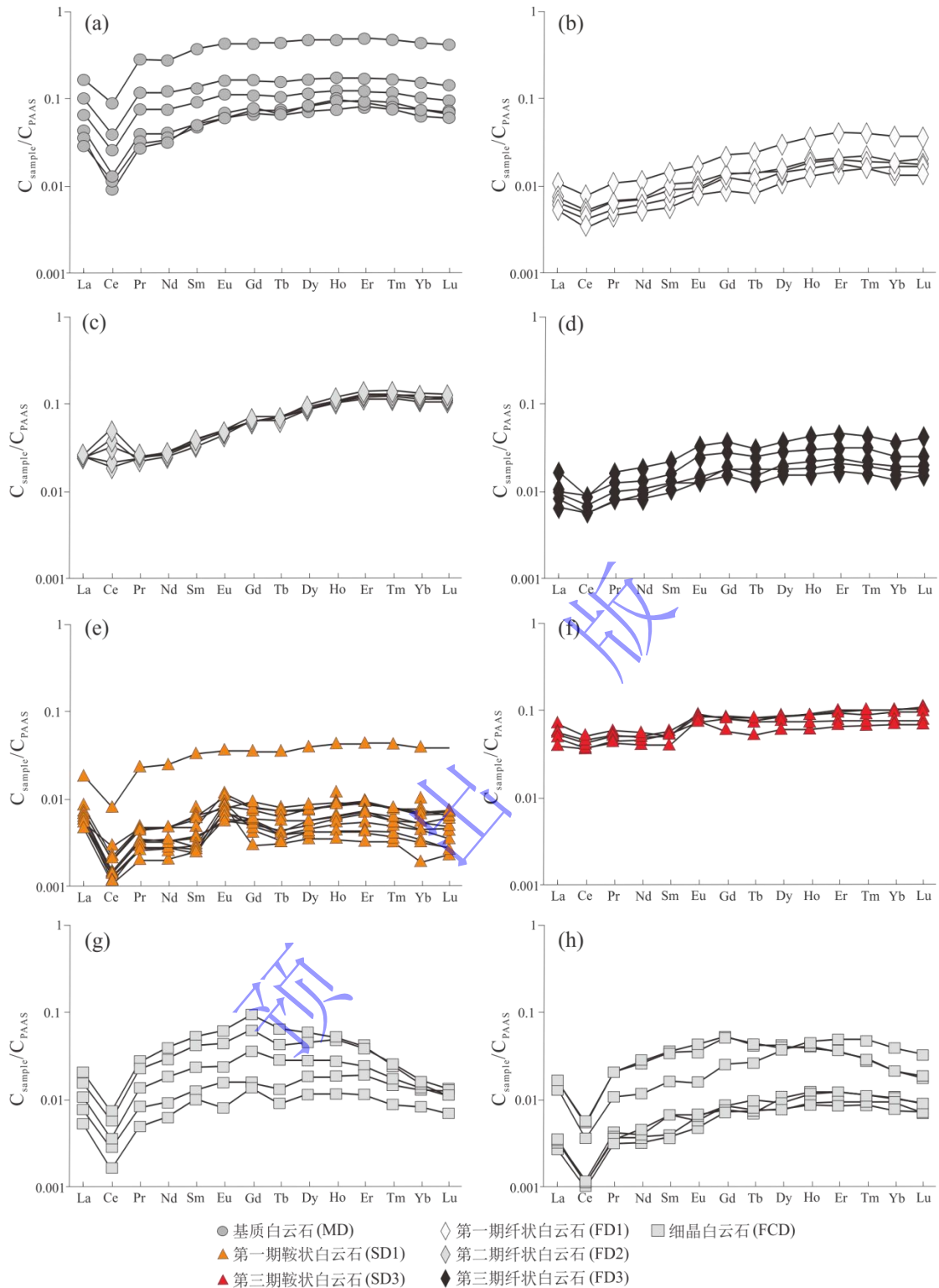


图6 研究区灯影组古岩溶储层成岩矿物稀土元素配分曲线

$C_{\text{样品}}$ 是样品中的稀土元素含量, C_{PAAS} 是后太古界澳大利亚沉积岩中对应 REE 含量^[30]

Fig.6 Rare earth element patterns of different rock fabrics in paleokarst reservoir, Dengying Formation

5 成岩演化及成储—成藏效应评价

矿物占位关系和储层岩石学特征表明, 本区灯二段、灯四段储层经历的成岩事件大体相

似,但在第一阶段成岩事件则具有不同的成储效应。以灯二段基质白云石的绝对年龄(607 ± 26 Ma)为参考标准,结合成岩矿物定年结果(图 7a),结合前人研究获得的实验数据,可以清楚地区分灯二段、灯四段储层形成后的各个成岩事件。第一阶段成岩事件为多期纤状白云石胶结作用,作为储集空间中最早的胶结物,识别出的 3 期纤状白云石绝对年龄分别为 606 ± 21 Ma、 604 ± 42 Ma、 590 ± 15 Ma(图 8),其形成时期略晚于灯二段或灯四段的表生成岩阶段。在阴极射线下(图 3d),纤状白云石的暗淡发光特征表明流体类型偏氧化型,这一点也得到了中等—低 Fe、Mn 含量和稀土元素 Ce 负异常的印证(图 5, 6)。这些地球化学特点表明,纤状白云石极有可能形成于非埋藏成岩环境,流体来源为灯影组同期海水。岩心、薄片观察结果表明,3 期纤状白云石在灯二段储层中均可观察到(图 3),对先期形成的孔洞空间进行了明显的胶结破坏(图 7b),但在灯四段储层中,仅可以观察到第 3 期纤状白云石(FD3),对孔洞空间的破坏作用明显较弱(图 4),宏观、微观岩石学特征均表明灯二段储层这一阶段成岩事件对于储层物性的破坏性明显强于灯四段储层(图 7b)。第二阶段成岩事件对应细晶白云石对于灯二段、灯四段储层的充填作用,其形成时间为 498 ± 12 Ma。在阴极射线下,细晶白云石的发光程度明显高于纤状白云石(图 3d),同样具有 Ce 元素负异常,并且 Fe、Mn 富集程度与纤状白云石相近(图 5, 6),对应的流体类型可能是在地层条件下被微弱改造的海水^[13]。

第三阶段为第 1 期古油藏充注事件,但这一期古油藏规模极为有限^[8,32-33],后期裂解后形成第 1 期沥青,仅在少数井区可以观察到。第四阶段成岩事件为第 1 期热液流体沉淀出的鞍状白云石(SD1)(图 7c),形成时间为 403 ± 30 Ma。稀土元素配分曲线表明,虽然两期白云石都具有热液流体典型的 Eu 元素正异常(图 6),但第 1 期鞍状白云石具有明显的 Ce 元素负异常,与第 3 期鞍状白云石的曲线特征有明显差异,表明确实存在两期流体性质不同的热液流体,这一观点也可以表现在两期鞍状白云石在微量元素富集程度上的显著差异(图 5)。第五阶段为中晶白云石(MCD)的充填作用,进一步破坏了储渗空间的保存。第六阶段成岩事件为第 2 期热液流体沉淀出的鞍状白云石(图 7d),形成时间为 259.4 ± 3 Ma^[13]。第七阶段成岩事件为第 2 期古油藏充注事件,是灯影组大规模古油藏的形成阶段^[1],后期裂解后形成第 2 期沥青。第八阶段为方铅矿、闪锌矿和第 3 期鞍状白云石等代表的第 3 期热液活动,形成时间为 199 ± 12 Ma。最后一个阶段的成岩事件以石英胶结物为特征,黎凌川^[31]使用 Ar-Ar 同位素测年法确定该阶段石英年龄为 125.8 ± 8.2 Ma,王国芝等^[34]认为伴生萤石的 Sm-Nd 同位素年龄为 130 Ma。

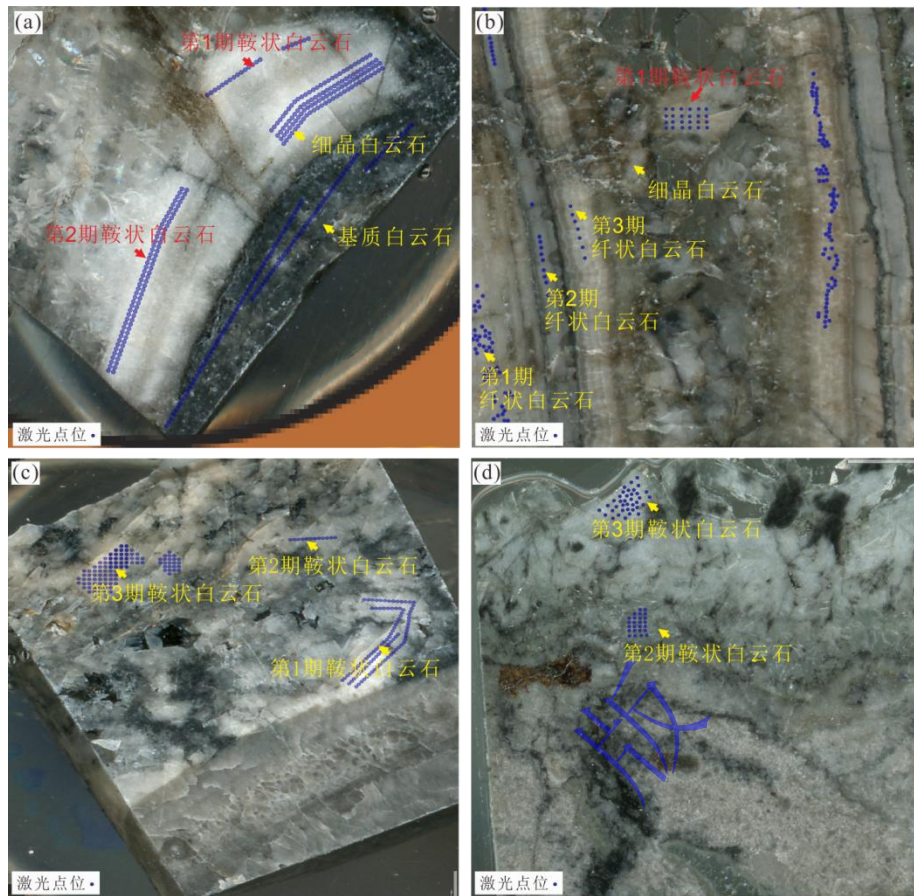


图 7 研究区灯影组古岩溶储层成岩矿物激光原位 U-Pb 同位素年龄岩心样品

Fig.7 Petrographic photographs of core specimen for in situ U-Pb dating in paleokarst reservoir, Dengying Formation

对储层的地质历史时期的古孔隙度演化研究是借助铸体薄片进行的,但铸体薄片反映的是面孔率特征,要得到真实的古孔隙度,需计算真实古孔隙度与面孔率的换算关系。根据前人的研究成果以及大量的油田实例^[35],利用研究区的全直径岩心物性测试资料得到现今孔隙度;通过磨制大铸体薄片(6 cm×5 cm)的镜下照片及计算机图像分析技术得到样品的面孔率,将二者相匹配后通过实验数据拟合,得到现今孔隙度与面孔率的关系,并且要求相关系数 R^2 要大于 0.5。

选取研究区不同储层的典型视域薄片,人工圈绘出各期矿物充填物对孔隙度造成的影响,利用 Image-Pro Plus 6.0 软件计算各期矿物充填物及残留孔隙所占照片总体的百分含量,确定各期矿物充填物对面孔率的影响(图 9)。根据成岩演化过程依次计算各期成岩矿物充填物对面孔率的影响,由此可获得成岩矿物充填开始时的反演回剥的古孔隙度。

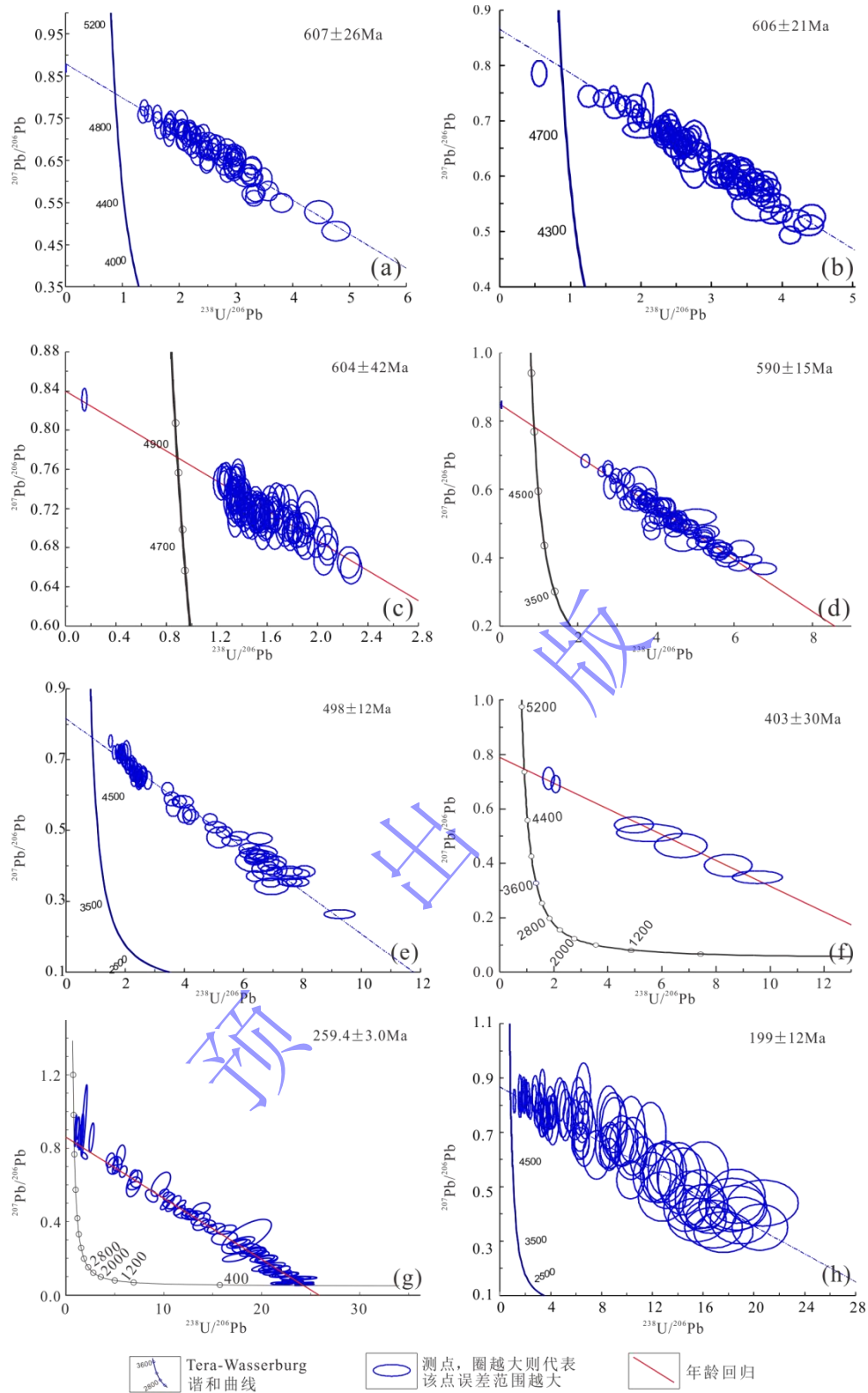


图8 研究区灯影组古岩溶储层成岩矿物激光原位 U-Pb 同位素年龄

(a) 基质白云石 (MD), PS5 井, 灯二段; (b) 第 1 期纤状白云石 (FD1), PS5 井, 灯二段; (c) 第 2 期纤状白云石 (FD2), PS5 井, 灯二段; (d) 第 3 期纤状白云石 (FD3), PS5 井, 灯二段; (e) 细晶白云石 (FCD), GS101 井, 灯四段; (f) 第 1 期鞍状白云石 (SD1), GS101 井, 灯四段; (g) 第 2 期鞍状白云石 (SD2), 数据来源于文献[13]; (h) 第 3 期鞍状白云石 (SD3), PS5 井, 灯二段

Fig.8 Plotted results of situ U-Pb dating in paleokarst reservoir, Dengying Formation

研究区灯影组在志留纪末期曾形成早期古油藏，由于海西早期发生抬升剥蚀而破坏^[1]，而后随着寒武系烃源岩的快速埋藏升温，大规模油气充注导致灯影组储层又经历了三个关键成藏阶段^[13]，第一阶段为三叠纪末—侏罗纪初期的大规模古油藏形成阶段，第二阶段为白垩纪中期的大规模古油藏裂解成气阶段，第三阶段为古近纪~新近纪的气藏调整阶段^[36-37]。原油的运移和聚集所对应的孔隙度下限比天然气更高，前人提出碳酸盐岩油藏古油藏形成的孔隙度下限为 2.6%^[22,38]，若碳酸盐岩储层古孔隙度低于 2.6%，则不利于古油藏运聚。古孔隙度恢复结果表明（图 10）^[1,3]，灯二段缝洞型储层在大规模古油藏运聚时期的古孔隙度为 4.84%，有利于古油藏运移聚集，原油裂解成气阶段的古孔隙度为 4.24%，有利于气藏运移聚集，而后古孔隙度维持在 4.24%，在气藏调整阶段仍有利于天然气聚集。灯二段孔洞型储层在大规模古油藏运聚时期的古孔隙度为 2.18%，不利于大规模古油藏运移聚集，而后两个成藏阶段，古孔隙度维持在 2.18%，有利于天然气的运移聚集。灯四段缝洞型储层在大规模古油藏运聚时期的古孔隙度为 4.93%，有利于古油藏运移聚集，古油藏裂解成气阶段和气藏调整阶段时的古孔隙度分别为 4.68%和 3.58%，均有利于天然气运移聚集。灯四段孔洞型储层在大规模古油藏运聚时期的古孔隙度为 3.05%，高于原油运移聚集的孔隙度下限，古油藏裂解成气阶段和气藏调整阶段时的古孔隙度维持在了 2.92%，有利于天然气运移聚集。

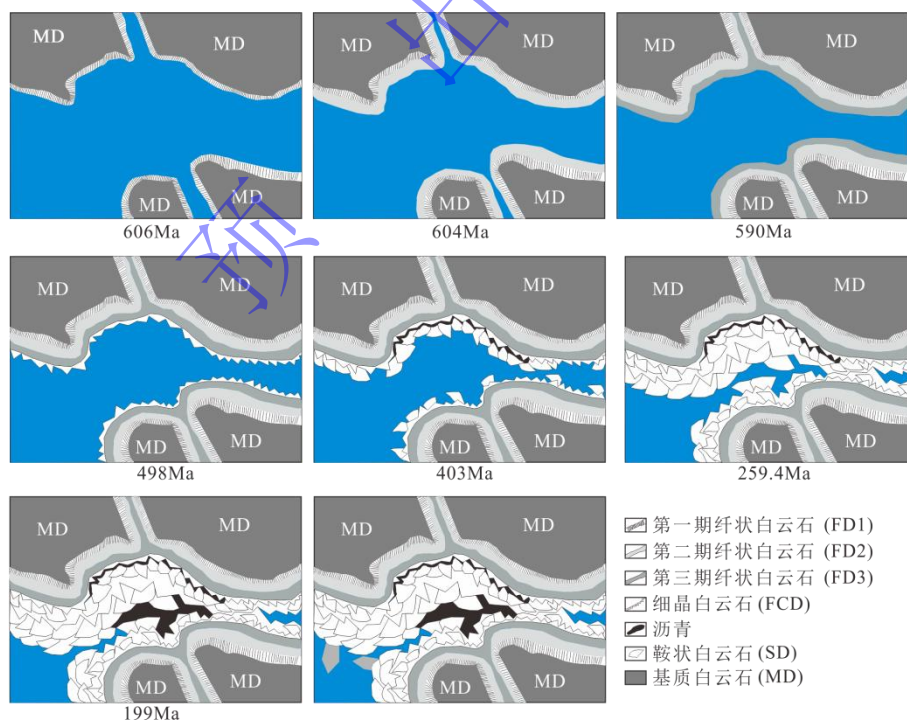


图 9 回剥法恢复研究区灯影组古岩溶储层古孔隙度

Fig.9 Restoration of Dengying Formation paleokarst reservoir in study area using the stripping method

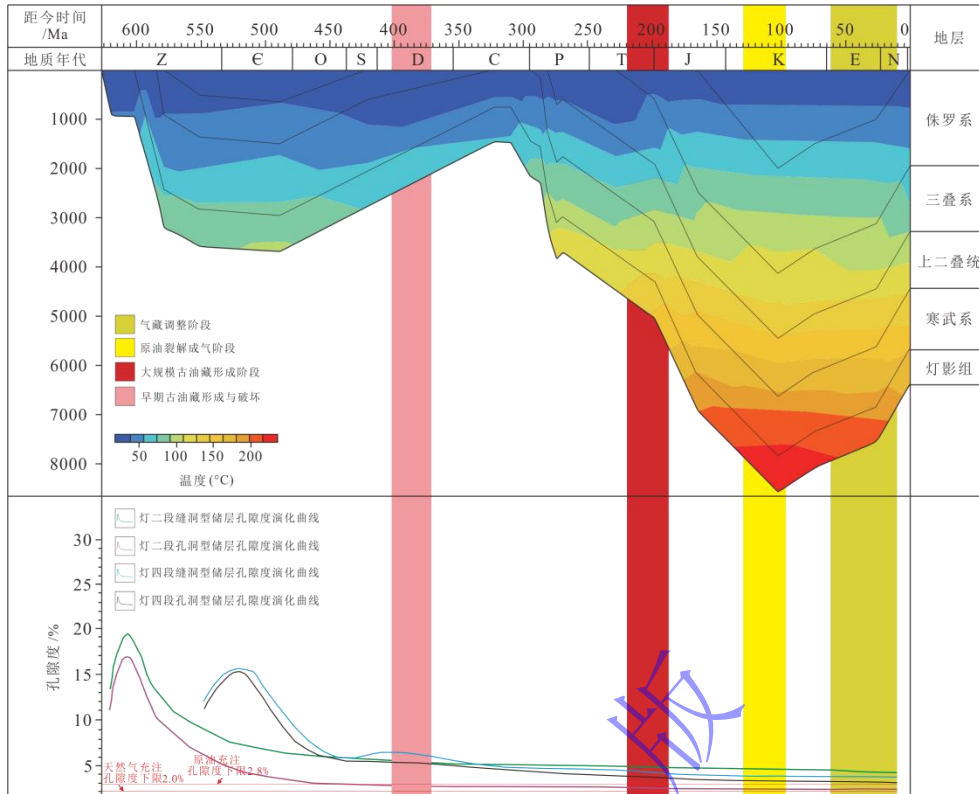


图 10 研究区灯影组古岩溶储层成藏史与孔隙度演化曲线 (据文献[1,3]修改)

Fig.10 Hydrocarbon accumulation history and porosity evolution in paleokarst reservoir, Dengying Formation (modified from references [1,3])

6 结论

(1) 川中地区震旦系灯影组灯二段、灯四段储层根据储渗空间搭配关系, 均可划分为缝洞型和孔洞型两种储层类型。灯二段储层中可识别出包括 3 期纤状白云石、3 期鞍状白云石在内的 9 期成岩矿物。灯四段储层中识别出的成岩矿物与灯二段略有不同, 仅可识别包括 1 期纤状白云石在内的 8 期成岩矿物。

(2) 在激光原位主量微量元素、稀土元素分析基础上, 识别出的成岩流体类型包括海水、被改造的海水、热液流体、非热液成因地层流体。成岩序列和激光原位 U-Pb 年龄分析结果表明, 包括 2 期海水胶结、3 期热液活动等在内的多阶段成岩事件对储层物性具有破坏性。

(3) 成岩演化过程中的古孔隙度恢复结果表明, 灯二段缝洞型储层在古油藏形成阶段、原油裂解成气阶段、气藏调整阶段始终具有运聚能力, 孔洞型储层则仅在原油裂解成气阶段、气藏调整阶段具备运聚能力。灯四段的缝洞型储层和孔洞型储层在三个关键成藏阶段均具有运聚能力。

参考文献 (References)

- [1] 范俊佳, 姜华, 鲁雪松, 等. 四川盆地蓬莱地区震旦系灯影组气藏压力演化与成藏过程[J]. 天然气工业, 2022, 42(12): 32-43. [Fan Junjia, Jiang Hua, Lu Xuesong, et al. Pressure evolution and hydrocarbon accumulation process of Sinian Dengying Formation gas reservoirs in the Penglai area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(12): 32-43.]
- [2] 赵虎, 孙勇, 吴勇, 等. 四川盆地中江—蓬莱地区灯二段丘滩体储层地震识别及有利区预测[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(6): 980-991. [Zhao Hu, Sun Yong, Wu Yong, et al. Seismic identification and favorable area prediction of hilly-shoal reservoir in the Second member of Dengying Formation in Zhongjiang-Penglai area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(6): 980-991.]
- [3] 沈安江, 赵文智, 胡安平, 等. 碳酸盐矿物定年和定温技术及其在川中古隆起油气成藏研究中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 476-487. [Shen Anjiang, Zhao Wenzhi, Hu Anping, et al. The dating and temperature measurement technologies for carbonate minerals and their application in hydrocarbon accumulation research in the paleo-uplift in central Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 476-487.]
- [4] 沈安江, 胡安平, 程婷, 等. 激光原位 U-Pb 同位素定年技术及其在碳酸盐岩成岩-孔隙演化中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(6): 1062-1074. [Shen Anjiang, Hu Anping, Cheng Ting, et al. Laser ablation in situ U-Pb dating and its application to diagenesis-porosity evolution of carbonate reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(6): 1062-1074.]
- [5] 蒋裕强, 陶艳忠, 谷一凡, 等. 四川盆地高石梯—磨溪地区灯影组热液白云石化作用[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(1): 51-60. [Jiang Yuqiang, Tao Yanzhong, Gu Yifan, et al. Hydrothermal dolomitization in Sinian Dengying Formation, Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(1): 51-60.]
- [6] 蒋裕强, 谷一凡, 朱讯, 等. 四川盆地川中地区震旦系灯影组热液白云岩储集相[J]. 天然气工业, 2017, 37(3): 17-24. [Jiang Yuqiang, Gu Yifan, Zhu Xun, et al. Hydrothermal dolomite reservoir facies in the Sinian Dengying Fm, central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(3): 17-24.]
- [7] 郭旭升, 胡东风, 黄仁春, 等. 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[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 673-683. [Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Huang Renchun, et al. Feature of paleo-oil pools in the Sinian Dengying Formation, northeastern Sichuan Basin, and its significance to exploration[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 673-683.]
- [8] 杨程宇, 文龙, 王铁冠, 等. 川中隆起安岳气田古油藏成藏时间厘定[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(3): 492-502. [Yang Chengyu, Wen Long, Wang Tieguan, et al. Timing of hydrocarbon accumulation for paleo-oil reservoirs in Anyue gas field in Chuansong uplift[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(3): 492-502.]
- [9] 邱楠生, 刘一锋, 刘雯, 等. 沉积盆地地层古压力定量重建方法与研究实例[J]. 中国科学 (D 辑): 地球科学, 2020, 50(6): 793-806. [Qiu Nansheng, Liu Yifeng, Liu Wen, et al. Quantitative reconstruction of formation paleo-pressure in sedimentary basins and case studies[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2020, 50(6): 793-806.]
- [10] 杨威, 魏国齐, 谢武仁, 等. 四川盆地绵竹—长宁克拉通内裂陷东侧震旦系灯影组四段台缘丘滩体成藏特征与勘探前景[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1174-1184. [Yang Wei, Wei Guoqi, Xie Wuren, et al. Hydrocarbon accumulation and exploration prospect of mound-shoal complexes on the platform margin of the Fourth member of Sinian Dengying Formation in the east of Mianzhu-Changning intracratonic rift, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1174-1184.]
- [11] 孙玮, 刘树根, 李泽奇, 等. 四川盆地灯影组天然气晚期调整成藏的主控因素[J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2021, 48(6): 641-652. [Sun Wei, Liu Shugen, Li Zeqi, et al. Main controlling factors of late adjustment and accumulation of natural gas in Dengying Formation, Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2021, 48(6): 641-652.]
- [12] 谢武仁, 杨威, 汪泽成, 等. 台缘带特征、形成主控因素及其对油气成藏的控制: 以四川盆地灯影组为例[J]. 地质科学, 2021, 56(3): 867-883. [Xie Wuren, Yang Wei, Wang Zecheng, et al. Characteristics and main controlling factors on the development of a platform margin belt and its effect on hydrocarbon accumulation: A case study of Dengying Formation in Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2021, 56(3): 867-883.]

- [13] Su A, Chen H H, Feng Y X, et al. In situ U-Pb dating and geochemical characterization of multi-stage dolomite cementation in the Ediacaran Dengying Formation, central Sichuan Basin, China: Constraints on diagenetic, hydrothermal and paleo-oil filling events[J]. *Precambrian Research*, 2022, 368: 106481.
- [14] 杨跃明, 王文之, 文龙, 等. 四川盆地大型古隆起斜坡区微生物碳酸盐岩储层沉积演化特征与天然气规模成藏模式[J]. *天然气工业*, 2021, 41(3): 38-47. [Yang Yueming, Wang Wenzhi, Wen Long, et al. Sedimentary evolution characteristics and large-scale natural gas accumulation pattern of microbial carbonate in the slope area of major paleouplift, the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(3): 38-47.]
- [15] 刘树根, 李泽奇, 邓宾, 等. 四川盆地震旦系灯影组深层碳酸盐岩储层沥青赋存形态及其油气藏示踪作用[J]. *天然气工业*, 2021, 41(8): 102-112. [Liu Shugen, Li Zeqi, Deng Bin, et al. Occurrence morphology of bitumen in Dengying Formation deep and ultra-deep carbonate reservoirs of the Sichuan Basin and its indicating significance to oil and gas reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(8): 102-112.]
- [16] 李建忠, 陶小晚, 白斌, 等. 中国海相超深层油气地质条件、成藏演化及有利勘探方向[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(1): 52-67. [Li Jianzhong, Tao Xiaowan, Bai Bin, et al. Geological conditions, reservoir evolution and favorable exploration directions of marine ultra-deep oil and gas in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(1): 52-67.]
- [17] 姜华, 李文正, 黄士鹏, 等. 四川盆地震旦系灯影组跨重大构造期油气成藏过程与成藏模式[J]. *天然气工业*, 2022, 42(5): 11-23. [Jiang Hua, Li Wenzheng, Huang Shipeng, et al. Process and model of hydrocarbon accumulation spanning major tectonic phases of Sinian Dengying Formation in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42(5): 11-23.]
- [18] 李纯泉, 陈红汉, 肖雪薇, 等. 四川盆地中部高石梯-磨溪地区震旦系灯影组储层沥青拉曼光谱分析[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(2): 456-466. [Li Chunquan, Chen Honghan, Xiao Xuewei, et al. Raman spectroscopy of bitumen from the Sinian Dengying Formation reservoirs, Gaoshiti-Moxi area, central Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(2): 456-466.]
- [19] Roberts N M W, Rasbury E T, Parrish R R, et al. A calcite reference material for LA-ICP-MS U-Pb geochronology[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2017, 18(7): 2807-2814.
- [20] 沈安江, 李杰, 龙晓平, 等. 四川盆地北缘沱家洞灯影组四段焦沥青 Re-Os 定年与烃源岩示踪[J]. *岩石学报*, 2022, 38(6): 1702-1712. [Shen Anjiang, Li Jie, Long Xiaoping, et al. Re-Os dating and oil-source correlation of the pyrobitumen in the member 4, Dengying Formation of the Kangjiaodong paleo-reservoir, northern margin of the Sichuan Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(6): 1702-1712.]
- [21] 杨雨, 汪泽成, 文龙, 等. 扬子克拉通西北缘震旦系油气成藏条件及勘探潜力[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(2): 238-248. [Yang Yu, Wang Zecheng, Wen Long, et al. Sinian hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential at the northwest margin of the Yangtze region, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(2): 238-248.]
- [22] 宋泽章, 葛冰飞, 王文之, 等. 超深层古油藏的定量表征及其对气藏形成的指示意义: 以川中古隆起北斜坡灯影组为例[J]. *地球科学*, 2023, 48(2): 517-532. [Song Zechang, Ge Bingfei, Wang Wenzhi, et al. Quantitative characterization of ultra-deep paleo-oil reservoirs and its indication for deep gas accumulation: A case study on the Dengying Formation, the North slope of central Sichuan paleo-uplift[J]. *Earth Science*, 2023, 48(2): 517-532.]
- [23] 黄士鹏, 姜华, 王铜山, 等. 四川盆地 8000m 海相超深层天然气成藏条件及有利勘探区带[J]. *地质学报*, 2023, 97(5): 1544-1560. [Huang Shipeng, Jiang Hua, Wang Tongshan, et al. Accumulation conditions and favorable exploration zones for natural gas in 8000 meters marine ultra-deep strata in the Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(5): 1544-1560.]
- [24] 李剑, 杨春龙, 谢武仁, 等. 四川盆地安岳气田震旦系台缘带和台内地区天然气成藏差异性及其勘探领域[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(1): 34-45. [Li Jian, Yang Chunlong, Xie Wuren, et al. Differences of natural gas accumulation and play fairways in the marginal zone and interior of Sinian platform in Anyue gas field, Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(1): 34-45.]
- [25] 杨威, 魏国齐, 武赛军, 等. 四川盆地不整合特征及其对油气成藏的控制作用[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(3): 504-515. [Yang Wei, Wei Guoqi, Wu Saijun, et al. Regional unconformities and their controls on hydrocarbon accumulation in Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(3): 504-515.]
- [26] Gu Y F, Zhou L, Jiang Y Q, et al. A model of hydrothermal dolomite reservoir facies in Precambrian dolomite, central Sichuan Basin, SW China and its geochemical characteristics[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(1): 130-145.

- [27] Gu Y F, Wang Z L, Yang C C, et al. Effects of diagenesis on quality of Dengying Formation deep dolomite reservoir, central Sichuan Basin, China: Insights from petrology, geochemistry and *in situ* U-Pb dating[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 10: 1041164.
- [28] Ding Y, Chen D Z, Zhou X Q, et al. Cavity-filling dolomite speleothems and submarine cements in the Ediacaran Dengying microbialites, South China: Responses to high-frequency sea-level fluctuations in an 'aragonite-dolomite sea'[J]. *Sedimentology*, 2019, 66(6): 2511-2537.
- [29] 李红, 王良军, 柳益群, 等. 四川盆地东部中二叠统茅口组热液活动特征[J]. *古地理学报*, 2021, 23(1): 153-174. [Li Hong, Wang Liangjun, Liu Yiqun, et al. Hydrothermal activities in the Middle Permian Maokou Formation in eastern Sichuan Basin[J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2021, 23(1): 153-174.]
- [30] Waheed S, Siddique N, Faiz Y. Rare earth and high field-strength elements in the Multani Mitti clay: A study using INAA[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2013, 37(2): 197-205.
- [31] 川中高石梯-磨溪构造寒武系龙王庙组成藏地球化学研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017: 1-51. [Li Lingchuan. Geochemical study on hydrocarbon accumulation of the Cambrian Formation in the Middle Cambrian of the middle Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017: 1-51.]
- [32] Fang X Y, Deng B, Geng A S, et al. Geochemical properties, mechanism of formation, and source of solid bitumen in the Ediacaran Dengying Formation from the central to northern Sichuan Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2024, 159: 106573.
- [33] 刘可禹, 刘建良. 盆地沉积充填演化与含油气系统耦合模拟方法在超深层油气成藏模拟中的应用: 以四川盆地中部震旦系灯影组为例[J]. *石油学报*, 2023, 44(9): 1445-1458. [Liu Keyu, Liu Jianliang. Application of basin modeling method coupling sedimentary filling evolution with petroleum system in simulating ultra-deep oil-gas accumulations: A case study of Sinian Dengying Formation in central Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(9): 1445-1458.]
- [34] 王国芝, 刘树根, 陈翠华, 等. 四川盆地东南缘河坝 MVT 铅锌矿与古油气藏的成生关系[J]. *地学前缘*, 2013, 20(1): 107-116. [Wang Guozhi, Liu Shugen, Chen Cuihua, et al. The genetic relationship between MVT Pb-Zn deposits and paleo-oil/gas reservoirs at Heba, southeastern Sichuan Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(1): 107-116.]
- [35] 路允乾, 蒋有录, 王尉, 等. 松辽盆地长岭断陷东岭地区营城组输导层孔隙演化与油气充注关系[J]. *石油实验地质*, 2018, 40(4): 485-492. [Lu Yunqian, Jiang Youlu, Wang Wei, et al. Relationship between porosity of Yingcheng sand-body migration channel and hydrocarbon injection of Dongling area, Changling Fault Depression, Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2018, 40(4): 485-492.]
- [36] 沈安江, 罗宪婴, 胡安平, 等. 从准同生到埋藏环境的白云石化路径及其成储效应[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(4): 637-647. [Shen Anjiang, Luo Xianying, Hu Anping, et al. Dolomitization evolution and its effects on hydrocarbon reservoir formation from penecontemporaneous to deep burial environment[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(4): 637-647.]
- [37] 邓宾, 吴娟, 李文正, 等. 烃类包裹体赋存碳酸盐矿物 U-Pb 定年及其在油气成藏期次研究中的应用: 以川中震旦系灯影组为例[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(11): 1887-1898. [Deng Bin, Wu Juan, Li Wenzheng, et al. U-Pb dating and trapped hydrocarbon inclusions in carbonate for petroleum accumulation: Case study from the Sinian Dengying Formation in the central Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(11): 1887-1898.]
- [38] 李平平, 郭旭升, 郝芳, 等. 四川盆地元坝气田长兴组古油藏的定量恢复及油源分析[J]. *地球科学*, 2016, 41(3): 452-462. [Li Pingping, Guo Xusheng, Hao Fang, et al. Paleo-oil-reservoirs reconstruction and oil correlation of Changxing Formation in the Yuanba gas field, Sichuan Basin[J]. *Earth Science*, 2016, 41(3): 452-462.]

Diagenetic Sequence, Reservoir-forming and Hydrocarbon Accumulation Effect of Paleokarst Reservoirs in the Dengying Formation, Central Sichuan Basin

GU YiFan^{1,2}, WANG YanSong^{1,2}, ZHOU Gang³, WU LuYa³, JIANG YuQiang^{1,2}, WANG HaiJun^{1,2}

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

2. Reservoir Evaluation Department, PetroChina Key Laboratory of Unconventional Oil and Gas Resources, Chengdu 610500, China

3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Chengdu 610041, China

Abstract: **[Objective]** The paleokarst reservoirs of the Sinian Dengying Formation in the Central Sichuan Basin are key targets for marine natural gas exploration in China, with characteristics such as an early period of formation, long-term diagenetic alteration, and strong heterogeneity. **[Methods]** By identifying diagenetic mineral sequences, U-Pb isotope dating and laser in-situ element content testing in the paleokarst reservoirs of the Dengying Formation, combined with physical property testing of cores and image software identification, two types of reservoir were recognized in the 2nd and 4th members of the Dengying Formation: a fracture-vug type and a pore-vug type. **[Results]** Nine stages of diagenesis-hydrocarbon accumulation events were identified. The diagenetic fluids were of three types: seawater, modified seawater and hydrothermal. Diagenetic sequencing and laser in-situ U-Pb age analyses indicated that multi-stage diagenetic events (three stages of seawater cementation and three stages of hydrothermal activity) had destructive effects on reservoir physical properties. **[Conclusion]** Reconstructed paleoporosity for the period of diagenetic evolution indicate that the fracture-vug type of reservoirs in the 2nd member of the Deng Formation always enabled hydrocarbon migration and accumulation during the formation stage of paleo-oil reservoirs, also during the stage of crude oil cracking into gas and during the stage of gas reservoir adjustment. Pore-vug type reservoirs allowed migration and accumulation only in the latter two stages. In the 4th member, fracture-vug reservoirs enabled migration and accumulation in all three stages of hydrocarbon accumulation.

Key words: U-Pb isotope dating; paleokarst reservoirs; Sinian system; diagenetic sequence; Dengying Formation; central Sichuan Basin