

深层白云岩储层溶蚀作用成因及其对储层的影响

——以川中蓬莱地区震旦系灯影组二段为例

谭 谦^{1,2},袁海锋^{1,2},王 涛²,马自立²,唐渤钧²,彭 秋³,李文杰^{1,2}

[1. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程全国重点实验室,四川 成都 610059;2. 成都理工大学 能源学院(页岩气现代产业学院),四川 成都 610059;3. 中国石油 西南油气田分公司 川中油气矿,四川 遂宁 629000]

摘要:为进一步明确四川盆地震旦系灯影组深层白云岩储层成因,通过岩心观察、薄片鉴定和阴极发光实验,分析了川中蓬莱地区灯影组二段(灯二段)白云岩储层不同类型溶蚀孔洞的发育和充填特征,结合包裹体、碳-氧-锶同位素、U-Pb同位素定年以及主-微量元素和稀土元素等分析测试,研究了溶蚀作用期次和成因机理。研究结果表明:①川中蓬莱地区灯二段白云岩储层主要经历了同生期—准同生期溶蚀、风化壳岩溶和热液溶蚀3期溶蚀作用的叠加改造,储集空间类型多样,储层非均质性强。②组构选择性溶蚀孔和网格状溶蚀孔洞发育在沉积旋回的中-上部,纵向上多套叠置具韵律性分布特征,以纤维状和放射状负延性白云石胶结物充填为主,具有独特的葡萄花边和葡萄石结构,是海平面频繁变化驱动下同生期—准同生期溶蚀的产物。③角砾化溶洞和蜂窝状溶蚀孔洞主要发育在灯二段不整合面之下,角砾化溶洞为岩溶垮塌角砾和泥质充填,蜂窝状溶蚀孔洞则以放射状正延性白云石胶结物半充填为特征,是桐湾运动期风化壳岩溶叠加改造的产物。④高角度缝洞发育在东西向走滑断裂附近,与海西晚期峨眉山火山活动引起的富CO₂热液溶蚀有关,多被热液矿物组合半充填。综合研究认为,同生期—准同生期溶蚀改造的丘滩沉积是优质储层形成的基础,风化壳岩溶的叠加改造是优质储层形成的关键,热液溶蚀重新分配储集空间进而控制优质储层的分布。

关键词:溶蚀作用;热液活动;深层白云岩储层;白云岩;灯影组;蓬莱地区;川中地区;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Genesis and impact of dissolution in deep dolomite reservoirs: A case of the 2nd member of the Sinian Dengying Formation, Penglai area, central Sichuan Basin

TAN Qian^{1,2}, YUAN Haifeng^{1,2}, WANG Tao², MA Zili², TANG Bojun², PENG Qiu³, LI Wenjie^{1,2}

[1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploration, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. College of Energy (College of Modern Shale Gas Industry), Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. Chuazhong Oil & Gas Mine, Southwest Oil & Gas Field Company, PetroChina, Suining, Sichuan 629000, China]

Abstract: To further determine the genesis of deep dolomite reservoirs in the Sinian Dengying Formation within the Sichuan Basin, we analyze the developmental and filling characteristics of various dissolution pores and vugs in dolomite reservoirs in the 2nd member of the Dengying Formation (also referred to as the Deng 2 Member) in the Penglai area, central Sichuan Basin, through core observation, thin section identification and cathodoluminescence (CL) imaging. In addition, by integrating the analyses and tests of inclusions, carbon-oxygen-strontium isotopes, major and trace elements, and rare earth elements (REEs), as well as U-Pb isotopic dating, we investigate the stages and genetic mechanisms of dissolution in the dolomite reservoirs. The results indicate that the dolomite reservoirs in the Deng 2 Member primarily underwent the superimposed modification of three stages of dissolution, namely the syngenetic to penecontemporaneous dissolution, weathered-crust karstification, and hydrothermal dissolution. Such superimposed modification produced a spectrum of storage spaces and strong reservoir heterogeneity. The fabric-selective dissolution pores and reticulate dissolution vugs in the reservoirs occur in the middle to upper part of sedimentary cycles, exhibiting

收稿日期:2024-12-30;修回日期:2025-04-14。

第一作者简介:谭谦(1989—),男,博士、讲师,碳酸盐沉积和储层地质学。E-mail: 799285676@qq.com。

通信作者简介:袁海锋(1980—),男,教授、博士研究生导师,储层地质学及油气成藏动力学。E-mail: yuanhaifeng08@cdut.cn。

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(42302187);四川省自然科学基金青年基金项目(2023NSFSC0759)。

multi-set superimposition and vertical rhythmicity. These pores and vugs are predominately filled by fascicular fast dolomite (FFD) cements, exhibiting unique botryoidal-lace and prehnite textures. They are the product of syngenetic to penecontemporaneous dissolution driven by frequent sea-level fluctuations. Brecciated karst caves and dissolution vugs in honeycomb pattern are principally found beneath the unconformities of the Deng 2 Member. The former is filled with collapsed karst- breccia and argillaceous materials, while the latter is half filled with radial slow dolomite (RSD) cements, both resulting from the superimposed modification of weathered-crust karstification during the Tongwan Movement. High-angle fractures and vugs in the reservoirs are distributed near E-W-trending strike-slip faults. They are associated with CO₂-rich hydrothermal dissolution caused by the Emeishan volcanism during the Late Hercynian and are largely half filled with hydrothermal mineral assemblages. The comprehensive analysis reveals that the mound-shoal deposits modified by syngenetic to penecontemporaneous dissolution provide a basis for the formation of high-quality reservoirs, while the superimposed modification of weathered-crust karstification is critical to their formation. Additionally, hydrothermal dissolution leads to the redistribution of reservoir spaces, thus governing the distribution of high-quality reservoirs.

Key words: dissolution, hydrothermal activity, deep dolomite reservoir, dolomite, Dengying Formation, Penglai area, central Sichuan Basin, Sichuan Basin

引用格式: 谭谦, 袁海峰, 王涛, 等. 深层白云岩储层溶蚀作用成因及其对储层的影响——以川中蓬莱地区震旦系灯影组二段为例[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(3): 809–826. DOI: 10. 11743/ogg20250308.

TAN Qian, YUAN Haifeng, WANG Tao, et al. Genesis and impact of dissolution in deep dolomite reservoirs: A case of the 2nd member of the Sinian Dengying Formation, Penglai area, central Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(3): 809–826. DOI: 10. 11743/ogg20250308.

中国深层白云岩储层主要发育在震旦系和下古生界, 具有油气资源丰富、勘探开发前景广阔等特点, 是中国未来油气勘探的现实领域和主要目标^[1-3]。近年来, 四川盆地、塔里木盆地和鄂尔多斯盆地在深层白云岩储层中均获得重大油气突破, 彰显了中国深层白云岩储层巨大的勘探潜力, 并吸引了众多学者的关注^[1-5]。然而, 深层白云岩组构类型多样、成岩作用复杂和储层成因多元的特点, 导致不同学者对其成因的认识和理解还存在较大分歧^[6-10], 制约了该类储层的规模勘探和高效开发。

四川盆地震旦系灯影组白云岩储层埋藏深、时代老、组构类型多样, 且普遍经历了多期溶蚀作用的叠加改造, 在中国深层白云岩地层中具有一定代表性^[11-15]。尽管前人对四川盆地灯影组白云岩储层成因开展了诸多研究, 并在沉积相、白云石化、溶蚀作用和油气成藏等方面取得了不少成果^[11-20], 但对灯影组白云岩储层成因和分布规律的认识仍存在较大分歧, 主要存在以下观点: ①与桐湾运动引起的风化壳岩溶有关, 岩溶古地貌控制了储层分布^[11-13]; ②与早成岩(同生期—准同生期)溶蚀作用有关, 沉积相带和周期性海平面变化共同控制了储层分布^[14-15]; ③与埋藏有机酸溶蚀有关, 优质烃源岩控制了储层分布^[16-17]; ④与热液白云石化和溶蚀作用有关, 深大断裂控制了储层分布^[18-20]。造成这些争议的主要原因是灯影组储

层的储集空间类型多样且成因复杂, 而不同学者的研究往往存在不同侧重点, 缺乏对不同阶段溶蚀作用改造的整体认识。近年来, 川中地区北斜坡蓬莱地区灯影组二段(灯二段)勘探开发取得了重大突破, 但因对其储层成因的认识还存在分歧, 制约了该区勘探规模的进一步拓展和高效开发^[11]。为此, 本文基于川中蓬莱地区震旦系灯二段最新钻井资料, 在前人研究的基础之上, 继续开展不同期次溶蚀和充填作用的特征分析, 探究不同期次溶蚀作用对白云岩储层的差异改造机制和模式, 以期进一步了解深层白云岩储层形成机制, 为四川盆地灯影组油气勘探开发提供一定的地质依据。

1 地质背景

四川盆地是中国大型的含油富气叠合盆地, 面积约 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。盆地震旦系灯影组以浅水碳酸盐台地沉积为主, 地层岩性主要为泥-粉晶白云岩、微生物白云岩和颗粒白云岩(图1)^[11-14]。前人根据岩性、岩相以及微生物岩丰度的差异, 将盆地灯影组由下至上划分为灯(灯影组)一段—灯四段。灯一段(贫藻段)以砂质白云岩和泥-粉晶白云岩为主; 灯二段(富藻段)主要发育微生物白云岩和颗粒白云岩, 见特殊的葡萄花边和葡萄石构造; 灯三段(贫藻段)以泥质粉砂岩、云(灰)质

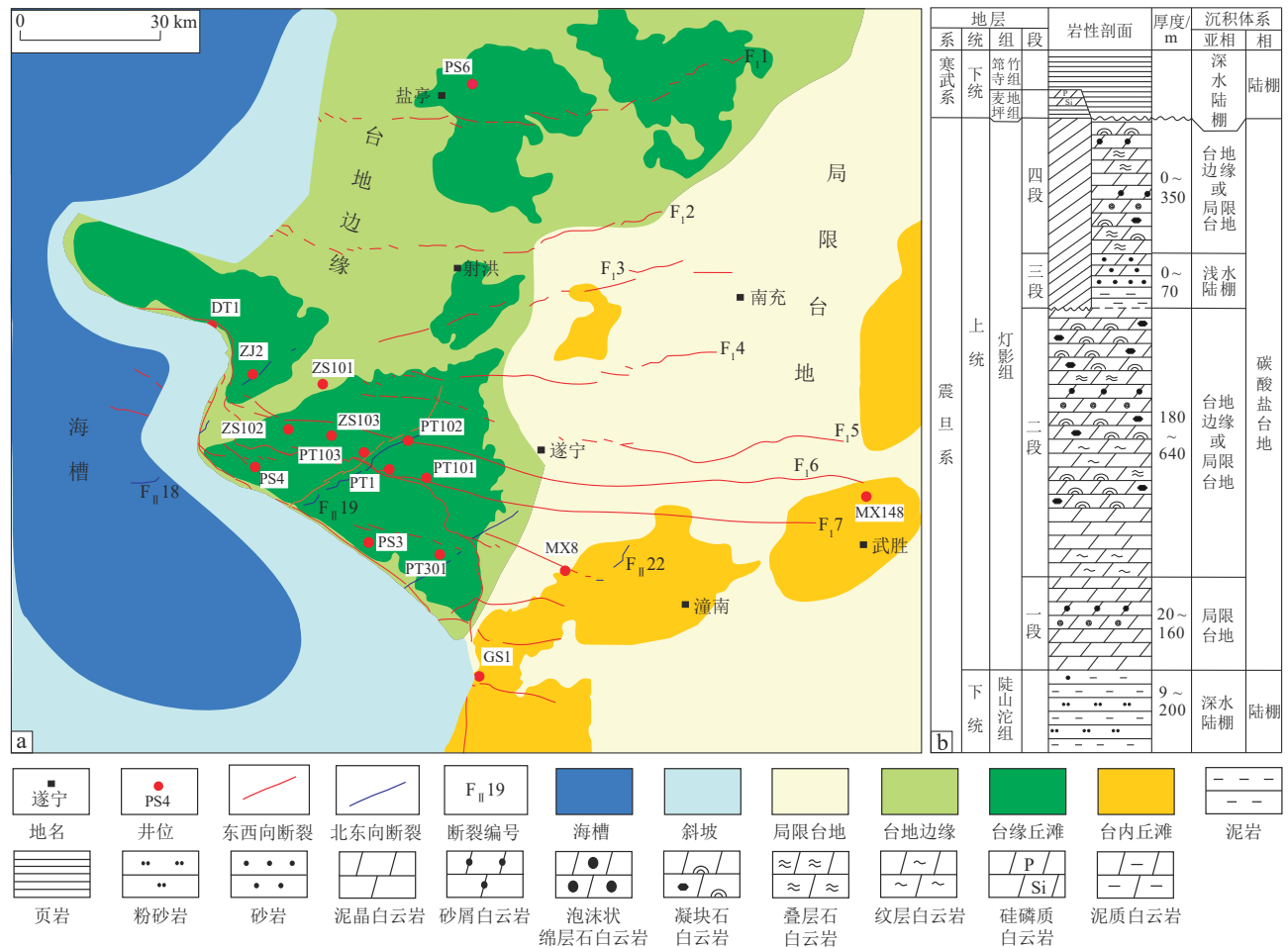


图1 川中蓬莱地区灯二段沉积相分布特征(a)及地层综合柱状图(b)(据文献[11,23]修改)

Fig. 1 Sedimentary facies distribution of the Deng 2 Member (a) and composite stratigraphic column (b) of the Penglai area, central Sichuan Basin (modified after references [11,23])

砂岩和泥-粉晶灰(云)岩沉积为主,见管状后生生物化石;灯四段(富藻段)以微生物白云岩夹颗粒白云岩、晶粒白云岩和硅质白云岩为主^[14-16]。受Rodinia超级大陆裂解和Gondwana超级大陆聚合的影响,四川盆地在震旦纪-寒武纪,发育“德阳-安岳裂陷槽”^[21-22](图1)。最近的研究认为该裂陷槽成因存在南北差异,其中北段以拉张为主,发育沉积型台缘带;南段以侵蚀为主,发育台地边缘侵蚀陡坎^[23-24]。

蓬莱地区位于川中古隆起北斜坡,即裂陷槽南段的东侧,其灯二段以残余台地边缘沉积为主,可划分为微生物丘滩和滩间海2个沉积亚相^[23-24]。微生物丘滩亚相主要发育藻凝块白云岩、(藻黏结)砂屑白云岩、泡沫状绵层白云岩和藻叠层白云岩;而滩间海亚相主要发育暗色泥-粉晶白云岩和泥质白云岩^[23]。受桐湾运动剥蚀作用的影响,研究区的灯三段和灯四段均被剥蚀殆尽,残余的灯二段多与寒武系麦地坪组和筇竹寺组呈不整合接触^[23],岩溶古地貌具有东高、西低的特

征^[11]。此外,川中地区自灯影组埋藏以来经历了多幕次构造活动,并在震旦系一二叠系中发育大量负花状构造和马尾状构造等典型的走滑断裂(图1)^[18]。这些走滑断裂为川中地区灯影组成岩流体活动提供了运移通道^[25]。前期研究表明,灯二段储层主要发育在微生物丘滩亚相中,储集空间以溶蚀孔-洞-缝为主,但储层整体表现为低孔、低渗的特征^[23-25]。

2 实验样品与方法

本次研究在川中蓬莱地区灯二段岩心观察和描述的基础之上,选取微生物丘滩沉积为主的PT1井、PT101井和PT103井以及滩间海沉积为主的ZS101井为重点研究对象(图1),共采样品117件,采样位置均为灯二上亚段,岩性包括微生物岩、颗粒白云岩、角砾白云岩和泥-粉晶白云岩(图2)。PT1井灯二段残余厚度为635.0 m,距走滑断裂1.6 km,测井解释储层厚度

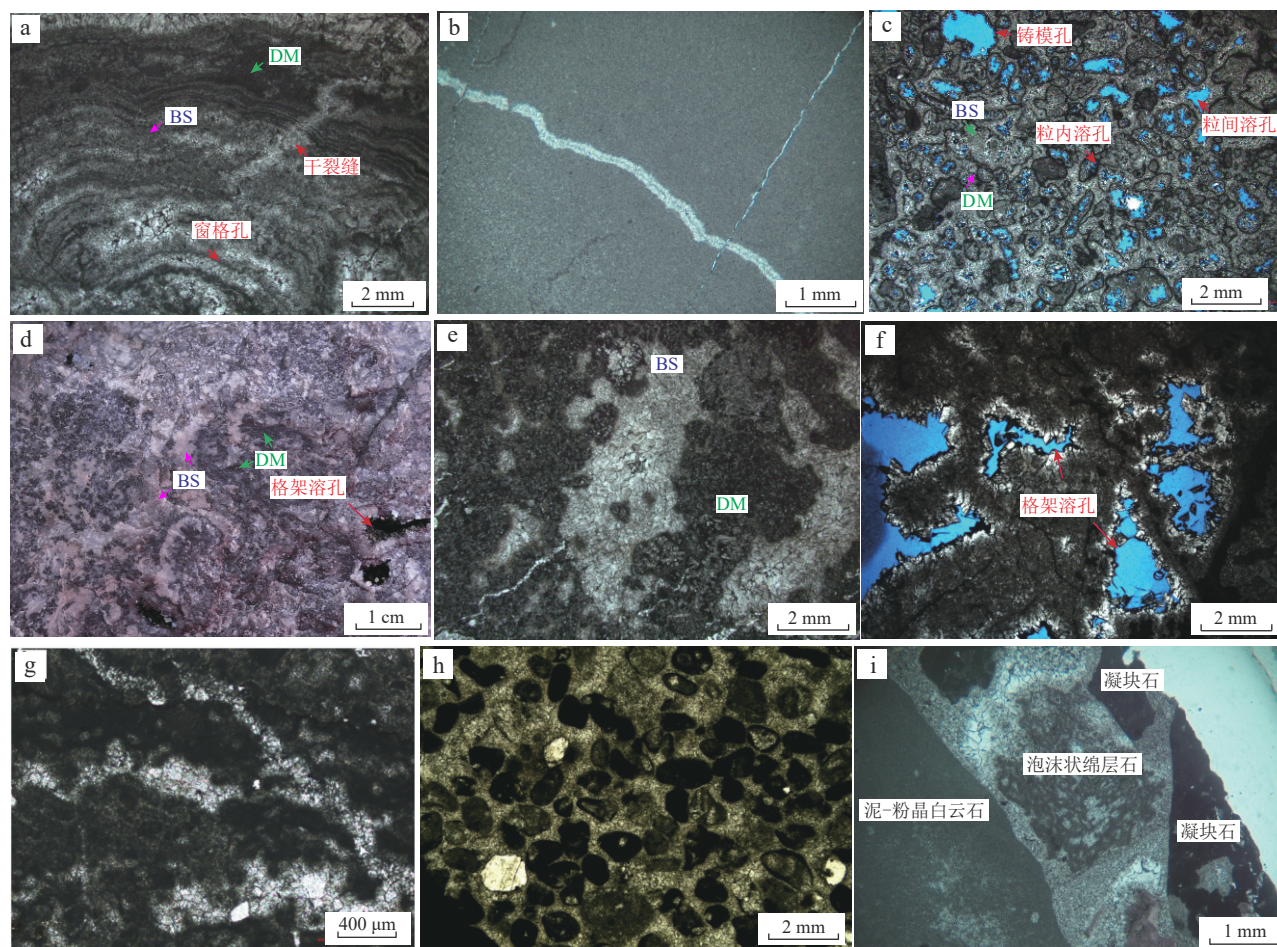


图2 川中蓬莱地区灯二段白云岩储层岩石学特征显微照片

Fig. 2 Micrographs showing the petrological characteristics of dolomite reservoirs in the Deng 2 Member, Penglai area, central Sichuan Basin

a. 叠层石, 见明(Bs)暗(Dm)相间的纹层, PT102井, 埋深5 844.09 m, 单偏光, 普通薄片; b. 泥-粉晶白云岩, 见多期构造裂缝, ZS101井, 埋深6 225.45 m, 单偏光, 普通薄片; c. 泡沫状绵层石, 发育粒内溶孔、粒间溶孔和铸模孔, PT1井, 埋深5 728.72 m, 单偏光, 铸体薄片; d. 凝块石, 发育不规则凝块, PT103井, 埋深5 725.14 m, 岩心; e. 凝块石, 暗色凝块中见大量管状细菌, PT103井, 埋深5 725.14 m, 单偏光, 普通薄片; f. 凝块石, 发育藻凝块格架(溶)孔, PT101井, 埋深5 747.73 m, 单偏光, 铸体薄片; g. 藻黏结颗粒白云岩, PT1井, 埋深5 731.08 m, 单偏光, 普通薄片; h. 砂屑白云岩, 亮晶胶结物, PT1井, 埋深5 733.19 m, 单偏光, 普通薄片; i. 角砾白云岩, 角砾磨圆和分选较差, 成分复杂, PT101井, 埋深5 726.41 m, 单偏光, 普通薄片

Dm. 泥晶白云石; Bs. 粉晶白云石

为291.0 m^[23], 取样段距灯二段顶面82.0 m, 深度为5 726~5 793 m; PT101井灯二段残余厚度为575.0 m, 距走滑断裂1.2 km, 测井解释储层厚度为318.0 m^[23], 取样段距灯二段顶面95.0 m, 深度为5 711~5 780 m; PT103井灯二段残余厚度为655.0 m, 距走滑断裂2.4 km, 测井解释储层厚度为265.0 m^[23], 取样段距灯二段顶面3.3 m, 深度为5 714~5 750 m; ZS101井灯二段残余厚度为733.0 m, 距走滑断裂较远, 测井解释储层厚度为113.7 m, 取样段距灯二段顶面48.0 m, 深度为6 229~6 263 m。

制作了100件普通薄片、50件铸体薄片和30件阴极发光(CL)薄片, 分别利用Nikon Eclipse LV100 POL偏光显微镜和CL8200 MK5型阴极发光仪完成岩性、孔洞形态和充填矿物特征分析。在岩石学观察的基础

之上, 继续开展包裹体(10件)、碳-氧-锶同位素(25件)、U-Pb同位素定年(5件)以及主微量元素和稀土元素(30件)等测试分析, 其中包裹体测温分析仪器为LINKAMTHMS600型冷热台; 碳-氧同位素分析仪器为MAT252质谱仪, 测试精度为 $\pm 0.2\%$; 锶同位素测试采用Furuyama等(2016)的实验方法, 在MAT-261型同位素质谱仪中完成, 测样品误差小于0.01%; 主微量元素和稀土元素的原位微区分析仪器在193 nm准分子激光剥蚀系统(GeoLas-PRO)和安捷伦7900电感耦合离子体质谱仪(ICP-MS)上完成, 所测数据的误差小于0.001%。碳酸盐岩U-Pb同位素定年测试分析主要采用Godeau等(2018)^[26]的实验方法, 实验仪器为JenaPQMS和配套的193 nm RESolution准分子激光剥蚀系统。

3 储层岩相学及孔洞发育特征

3.1 储层岩相学特征

观察岩心和薄片发现,蓬莱地区不同钻井灯二段具有相似的岩相发育特征,主要由泥质白云岩、泥-粉晶白云岩、藻凝块白云岩、(藻黏结)砂屑白云岩、泡沫状绵层白云岩和藻纹层-叠层白云岩组成(图2)。根据不同岩相组合可将灯二段的取心段划分为丘间、丘基、丘核和丘坪4个微相。丘坪位于在丘滩体上部,主

要由浅色藻纹层-叠层白云岩(图2a)和泥-粉晶白云岩(图2b)组成,因其频繁暴露地表,常见干裂纹和窗格孔等暴露标志,发育顺层溶孔和针状溶孔;丘核发育在丘坪之下,是微生物丘建造的主体,主要由泡沫状绵层白云岩(图2c)、藻凝块白云岩(图2d—f)和藻黏结颗粒白云岩(图2g)组成,是不同类型孔洞发育的主要场所;丘基是微生物丘建造的基底,主要由砂屑白云岩(图2h)组成,见少量的针状溶孔;丘间主要发育在丘滩体之间,由暗色泥-粉晶白云岩和泥质白云岩组成,整体岩性致密。平面上,以微生物丘滩沉积为主的钻井,主要发育丘基、丘核和丘坪微相(图3);而以滩间

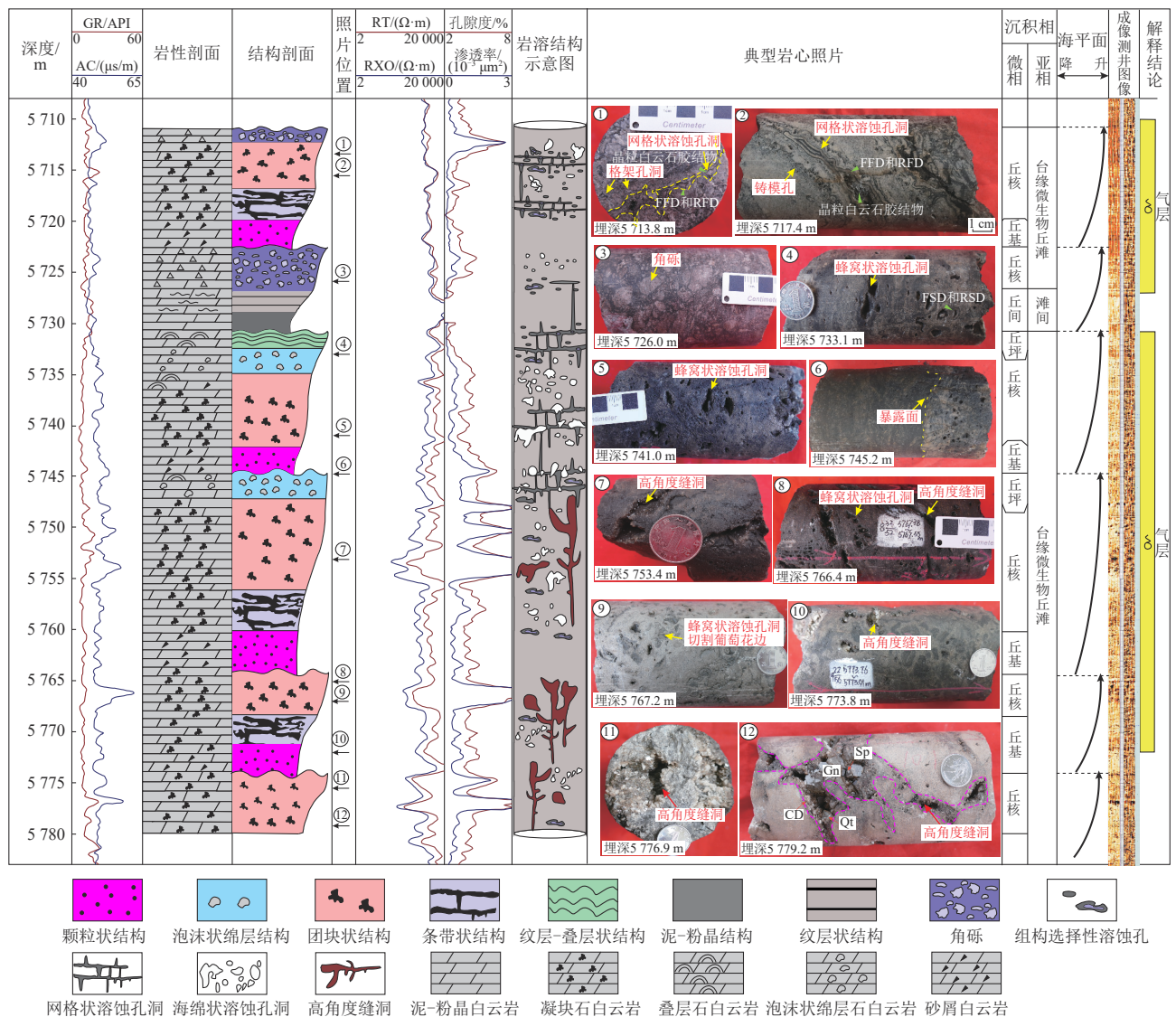


图3 川中蓬莱地区灯二段PT101井沉积序列和不同类型孔洞发育特征

Fig. 3 Sedimentary sequence and the developmental characteristics of various pores and vugs in the Deng 2 Member in well PT101, Penglai area, central Sichuan Basin

FSD. 纤维状正延性白云石; RSD. 放射状正延性白云石; FFD. 纤维状负延性白云石; RFD. 放射状负延性白云石; CD. 粗晶白云石;

Gn. 方铅矿; Sp. 闪锌矿; Qt. 石英

(①—⑫分别对应样品取心位置。)

海沉积为主的钻井,主要发育丘间、丘基和丘核微相,微生物丘的规模较小。纵向上,不同钻井不同时期的优势微相存在差异,指示丘滩发育具有一定继承性和迁移性^[23]。

以PT101井灯二段取心段为例,丘间、丘基、丘核和丘坪4个微相在垂向上组成丘间-丘基-丘核、丘基-丘核和丘核-丘坪等多种向上变浅的米级沉积旋回地层(图3),指示沉积水体逐渐变浅。在这些米级旋回地层顶部常见暴露面,表现为不平整的岩性突变面,说明灯二段微生物丘滩体易暴露地表。值得注意的是,该井取心段还发育大量垮塌成因和构造破碎成因的角砾白云岩(图3)。垮塌成因的角砾白云岩发育在取心段的上部,单个角砾岩可贯穿多个米级沉积旋回地层,其角砾具有组构复杂、分选和磨圆差等特征,但岩性和组构与围岩相似(图2i),为原地或就近堆积角砾;构造破碎成因的角砾白云岩在整个取心段均发育,多被网格状裂缝切割,其角砾的岩性和组构与围岩相似,且可拼接,角砾之间多被晶粒白云石胶结物充填。

3.2 孔洞类型和充填特征

研究区灯二段白云岩储层的储集空间主要由组构选择性溶蚀孔、网格状溶蚀孔洞、蜂窝状溶洞、孤立溶洞和高角度缝洞组成。这些储集空间主要发育在丘核和丘坪微相中,且普遍存在共生甚至相互交叉切割的现象(图3)。

3.2.1 组构选择性溶蚀孔和网格状溶蚀孔洞及其充填特征

组构选择性溶蚀孔主要由格架溶孔、层间溶孔和铸模孔等组成,多分布在丘核-丘坪微相组合中,具有顺层分布、多套叠置和韵律性发育的特征(图3)。受微生物岩组构差异的影响,格架溶孔主要发育在凝块石中,孔隙形态不规则、大小不一(图2f);层间溶孔多分布在叠层石中,孔隙大小与纹层厚度有关(图2b);而铸模孔则发育在泡沫状绵层石中,孔径主要介于0.4~0.8 mm(图2c)。微生物岩的沉积组分多为富有机质泥晶白云石和贫有机质粉晶白云石,而选择性溶蚀的对象是贫有机质粉晶白云石(图2c,f),指示其原生矿物相对不稳定。

网格状溶蚀孔洞是由顺层溶洞和近垂直溶洞共同组成的复杂孔-洞系统,其中顺层溶洞和近垂直溶洞无切割关系(图3)。该类孔-洞系统多分布在丘基-丘核和丘核-丘坪微相组合中,可切割多个米级沉积旋回地层,在纵向上也具有多套叠置和韵律性发育的特

征(图3)。由于网格状溶蚀孔洞中发育特殊的葡萄状和葡萄花边状结构的胶结物,在野外剖面及岩心观察中极易识别(图3)。

组构选择性溶蚀孔和网格状溶蚀孔洞多被纤维状负延性白云石(FFD)、放射状负延性白云石(RFD)和晶粒白云石胶结物依次充填(图4a,b)。在手标本上,FFD和RFD的厚度较大(可达5 cm)且颜色深,呈黑色或灰黑色,具有等厚环边生长的特征,而晶粒白云石胶结物颜色较浅,呈白色或乳白色,发育在孔洞中心(图3)。在显微镜下,FFD由针状白云石晶体组成,晶体长0.2~2.0 mm,宽20~50 μm ,长/宽比多大于10(图4a)。RFD晶体表面较脏,由刀片状和叶片状白云石晶体组成,晶体末端较平滑,晶体长0.5~5.0 mm,宽100~500 μm ,长/宽比多介于5~10(图4b)。在正交偏光下,FFD构成的扇形集合体具有负延性和十字消光的特征,而RFD具有左旋波状消光的特征(图4b)。在阴极发光下,FFD和RFD多不发光或者发暗红色弱光,偶见橘红色斑点(图4c)。

3.2.2 角砾化溶洞及其充填特征

研究区缺失灯三段和灯四段,其灯二段直接与寒武系麦地坪组呈不整合接触^[11]。多口钻井显示,在距不整合面之下100 m的范围内,发育多套角砾白云岩(图3)。这些角砾岩的单层厚度普遍超过1.0 m,局部高达6.5 m(图3)。岩心观察和薄片鉴定显示角砾岩的角砾具有岩性单一、磨圆差、分选差和不可拼接等特征(图4d),与沉积角砾岩(岩性复杂、磨圆好、分选好)和构造角砾岩(可拼接)的特征明显不同,多为岩溶垮塌成因^[11-13]。此外,其角砾组分与周围围岩的组分相似,甚至见残余葡萄花边结构(图4d,e),说明这些角砾发育在葡萄花边形成之后。在部分角砾之间,见上覆麦地坪组地层的砂-泥沉积物充填,指示其形成可能与风化壳岩溶有关。岩溶垮塌角砾的出现说明研究区灯二段发育大型溶洞。然而钻井、录井和测井资料显示,该区灯二段未充填的大型溶洞十分罕见,多被坍塌破坏,表现为整体角砾化(图3),仅发育少量角砾间残余孔隙(图4e)。

3.2.3 蜂窝状溶洞及其充填特征

蜂窝状溶洞由不同尺度孔洞(孔径集中分布在0.5~2.0 cm)组成,是研究区灯二段白云岩储层最主要的储集空间类型(图3)。取心井显示,蜂窝状溶洞具有如下发育特征:①在时-空分布上主要与不整合面有关,多发育在灯二上亚段,特别是距不整合面

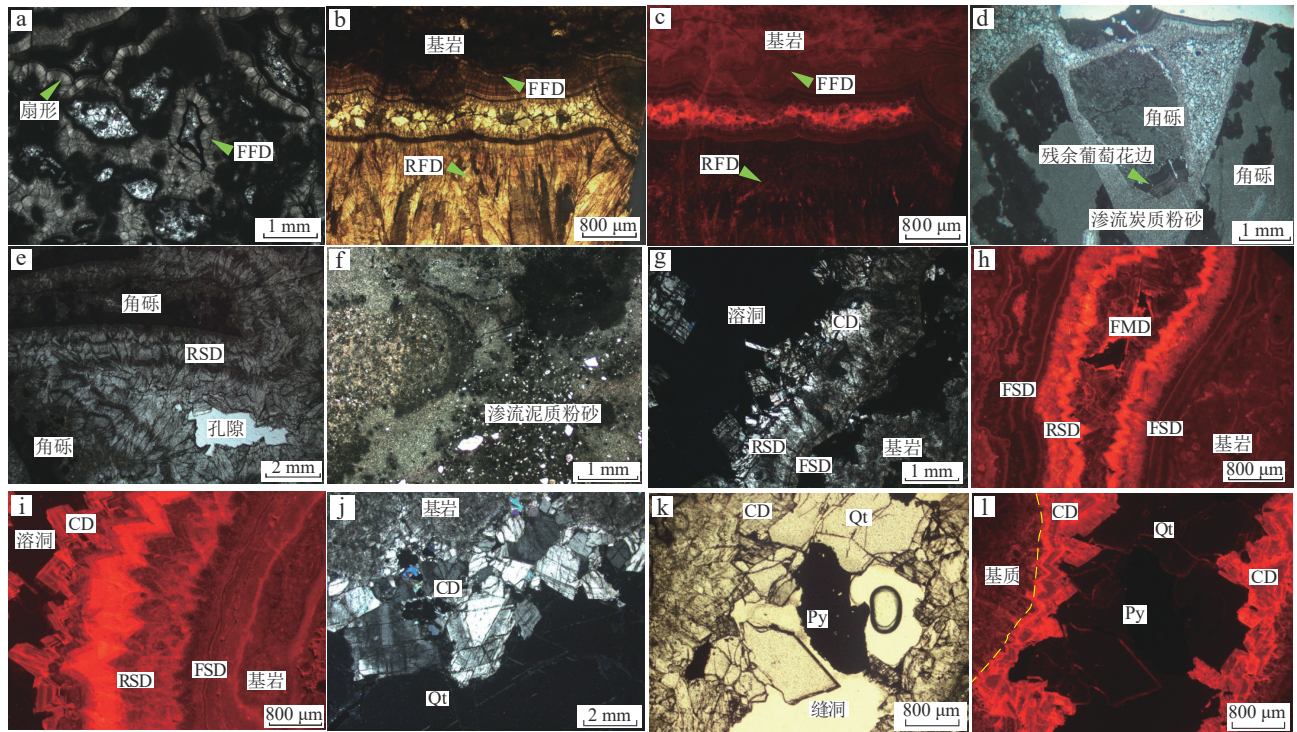


图4 川中蓬莱地区灯二段不同类型孔洞充填特征普通薄片显微照片

Fig. 4 Thin-section micrographs showing the filling characteristics of various pores and vugs in the Deng 2 Member, Penglai area, central

Sichuan Basin

a. 凝块石白云岩, 格架溶蚀孔被FFD和晶粒白云石充填, FFD呈扇形集合体, 十字消光, PT101井, 埋深5 716.60 m, 正交偏光; b. 凝块石白云岩, 网格状溶蚀孔被FFD和RFD充填, RFD左旋消光, PT1井, 埋深5 735.80 m, 正交偏光; c. 同b图, FFD和RFD不发光, 阴极发光; d. 角砾化溶洞, 角砾之间充填白云质渗流粉砂和FMD, DT1井, 埋深7 482.62 m, 单偏光; e. 角砾白云岩孔洞, 角砾之间充填放射状白云石, PT101井, 埋深5 743.46 m, 单偏光; f. 角砾白云岩孔洞, 角砾之间充填泥质粉砂, PT101井, 埋深5 726.00 m, 单偏光; g. 蜂窝状溶蚀孔洞被FSD和RSD充填, RSD左旋消光, PT101井, 埋深5 759.53 m, 正交偏光; h. 蜂窝状溶蚀孔洞依次被FSD, RSD和FMD充填, FSD和RSD发暗红色光, FMD发暗红色光, PT102井, 埋深5 865.25 m, 阴极发光; i. 蜂窝状溶蚀孔洞依次被FSD, RSD和CD充填, CD发红光, PT101井, 埋深5 736.52 m, 阴极发光; j. CD波状消光、Ba和Qt全消光, PT102井, 埋深5 844.09 m, 正交偏光; k, l. 缝洞中半充填CD, Py和Qt, CD发亮红色光, 见明显生长纹层, Qt不发光, PT1井, 埋深5 776.58 m, 阴极发光
Qt. 自生石英; Py. 黄铁矿; CD. 粗晶白云石; FSD. 纤维状正延性白云石; RSD. 放射状正延性白云石; FFD. 纤维状负延性白云石; RFD. 放射状负延性白云石; FMD. 细-中晶白云石

之下150 m的范围内;②相对于组构选择性溶蚀孔和网格状溶蚀孔洞, 该类型溶洞中主要充填纤维状正延性白云石(FSD)和放射状正延性白云石(RSD);③与裂缝和节理面无明显相关性, 多发生在先存孔洞发育的丘滩体中, 且见蜂窝状溶洞切割葡萄花边构造(图3)。

蜂窝状溶洞多被FSD, RSD和晶粒白云石胶结物半充填(图4g)。在手标本上, FSD和RSD生长速度慢, 整体厚度普遍小于0.5 cm, 颜色相对较浅, 呈等厚环边分布(图3), 这与FFD和RFD组成的深色葡萄花边状或葡萄石状构造具有明显区别。在显微镜下, FSD由针状白云石晶体组成, 单个晶体长度较短, 介于0.1~0.5 mm, 长/宽比小于10(图4g, h)。RSD由刀片状白云石晶体组成, 晶体末端见菱形结构, 晶体长度介于0.5~2.0 mm, 长/宽比小于5(图4g, h)。RSD在正

交偏光下具有左旋消光特征(图4g), 在阴极发光下整体发暗红色光, 晶体末端发红色光, 且见明显生长纹层(图4h, i)。在部分岩溶垮塌角砾之间见FSD和RSD充填, 说明角砾化溶洞和蜂窝状溶洞成因相似。

3.2.4 高角度缝洞及其充填特征

高角度缝洞多是构造作用、溶蚀作用和岩石组构共同作用的产物, 具有明显穿层发育的特征。灯二段高角度缝洞多与埋藏溶蚀有关, 具有以下发育特征:①单个缝洞规模不大, 长度集中在10~30 cm, 直径主要介于1~5 cm, 且多具有“漏斗形”(下窄上宽)的特征;②缝洞边壁不平滑, 多呈港湾状, 且多被热液矿物组合半充填;③在平面上, 多分布在东西向走滑断裂附近, 具有明显沿裂缝扩溶的特征(图3)。

高角度缝洞多被粗晶白云石、重晶石、自生石英、

方铅矿、闪锌矿和萤石等热液矿物半充填(图4j—k),指示其形成和演化与热液活动相关。粗晶白云石是高角度缝洞中最早的胶结物,具有波状消光(图4j)和红色阴极发光的特征(图4l),而重晶石和石英等矿物具有在正交偏光下全消光和在阴极发光下不发光的特征(图4j—l)。

4 成岩流体特征

4.1 碳-氧同位素特征

碳酸盐成岩矿物的碳同位素值($\delta^{13}\text{C}$)主要与成岩流体的性质有关,如淡水成因的值多偏负、海水成因的值多偏正;而氧同位素值($\delta^{18}\text{O}$)则多与成岩环境有关,一般成岩温度越高,其值越低^[27-29]。测试结果显示(图5),沉积组分中富有机质泥晶白云石和贫有机质粉晶白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别分布在1.03‰~2.10‰(平均值为1.60‰,样本数 $n=4$)和1.64‰~3.27‰(平均值为2.47‰, $n=4$); $\delta^{18}\text{O}$ 值分别分布在-3.84‰~-2.26‰(平均值为-3.12‰, $n=4$)和-3.76‰~-2.19‰(平均值为-2.96‰, $n=4$),均分布在震旦纪末期海水碳-氧同位素值的范围内^[30-31],指示沉积组分受成岩蚀变较小,保留了当时海水的碳同位素值信息。孔洞充填物多为“FFD+RFD”和“FSD+RSD”胶结物,其 $\delta^{13}\text{C}$ 分别分布在1.53‰~2.94‰(平均值为2.09‰, $n=4$)和3.67‰~4.27‰(平均值为4.09‰, $n=2$), $\delta^{18}\text{O}$ 值分别分布在-6.10‰~-3.40‰(平均值为-4.70‰, $n=4$)和-2.90‰~-2.70‰(平均值为-2.8‰, $n=2$),与沉积组分的碳同位素值基本一致,说明其成岩流体主要为同期海水。相反,晶粒白云石

胶结物的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值均较低,其中,粗晶白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别分布在-1.05‰~-0.11‰(平均值为-0.69‰, $n=6$)和-12.19‰~-9.97‰(平均值为-11.07‰, $n=6$)。粗晶白云石较低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值指示其成岩流体并非同期海水,为外来流体,而较低 $\delta^{18}\text{O}$ 值说明其成岩环境温度较高。

4.2 锶同位素特征

碳酸盐岩锶同位素组成主要受壳源锶($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素含量比值较高,平均值为0.71190)和幔源锶($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值较低,平均值为0.70350)混入的比例控制,多数情况下陆源碎屑地层中卤水和大气淡水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值较高,而海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值较低^[28-29]。研究区灯二段微生物岩沉积组泥晶白云石和粉晶白云石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为0.70751~0.70928,平均值为0.70814;FFD和RFD的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为0.70815~0.70903,平均值为0.70857;FSD和RSD的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为0.70742~0.70787,平均值为0.70764。FFD,RFD,FSD,RSD和微生物岩沉积组分的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值基本一致,均分布在震旦纪海水范围内,指示其成岩流体主要为同期海水^[30-31](图5b)。相反,晶粒白云石胶结物的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值却较高,分布在0.70947~0.71201,平均值为0.71051,说明其成岩流体是受陆源碎屑或大气淡水影响的外来流体。

4.3 稀土元素特征

碳酸盐岩中稀土元素的含量及配分型式不仅能够指示流体来源和性质,还在判断流体氧化-还原环境和热液环境等方面具有独特优势^[32-34]。与大气淡水有关的成岩流体往往具有全稀土总量($\Sigma \text{REE}+\text{Y}$,稀土+

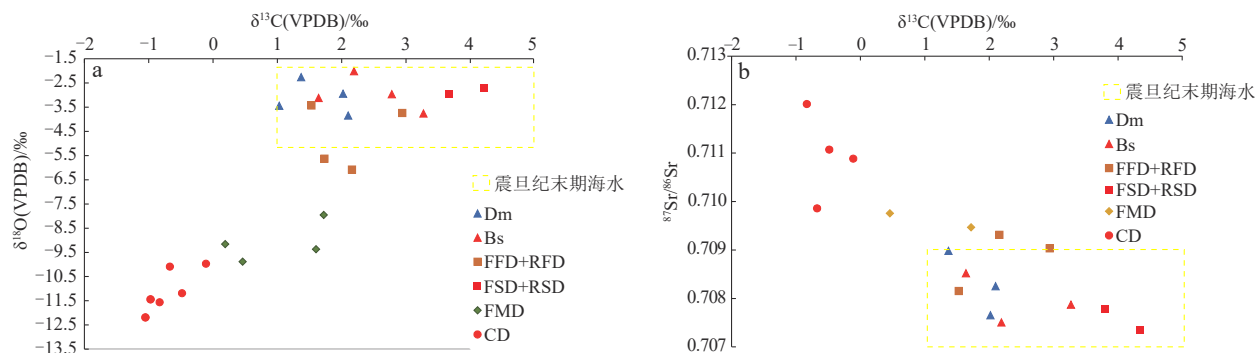


图5 川中蓬莱地区灯二段不同类型白云石碳-氧(a)和碳-锶(b)同位素特征

Fig. 5 Carbon-oxygen (a) and carbon-strontium (b) isotopes characteristics of various dolomites in the Deng 2 Member, Penglai area, central Sichuan Basin

Dm. 泥晶白云石;Bs. 粉晶白云石;CD. 粗晶白云石;FSD. 纤维状正延性白云石;RSD. 放射状正延性白云石;FFD. 纤维状负延性白云石;RFD. 放射状负延性白云石;FMD. 细-中晶白云石

钇元素含量)高、重稀土元素亏损和Y/Ho(钇/铈元素含量比)值低的特征,与海水有关的成岩流体则具有 $\Sigma \text{REE}+\text{Y}$ 值低、重稀土元素富集和Y/Ho比值高的特征^[34]。此外,铈(Ce)和铕(Eu)元素含量分别对氧化-还原环境和热液环境较为敏感,氧化环境中Ce常呈现负异常,热液流体中其Eu多为正异常^[34]。研究区灯二段不同成岩组分样品均采用澳大利亚后太古宙页岩(Post-Archean Australian Shale, PAAS)进行标准化,Ce异常程度(δCe)、Pr异常程度(δPr)和Eu异常程度(δEu)采用Nothdurft等(2004)的方法进行计算,具体公式为: $\delta \text{Ce} = (\text{Ce}/\text{Ce}^*)_{\text{N}} = \text{Ce}_{\text{N}} / (0.5\text{La}_{\text{N}} + 0.5\text{Pr}_{\text{N}})$, $\delta \text{Pr} = (\text{Pr}/\text{Pr}^*)_{\text{N}} = \text{Pr}_{\text{N}} / (0.5\text{Ce}_{\text{N}} + 0.5\text{Nd}_{\text{N}})$, $\delta \text{Eu} = (\text{Eu}/\text{Eu}^*)_{\text{N}} = \text{Eu}_{\text{N}} / (0.5\text{Sm}_{\text{N}} + 0.5\text{Gd}_{\text{N}})$ 。其中:La, Nd, Sm和Gd分别为镧、钕、钐和钆元素;N表示PAAS标准化;元素符号代表该元素的浓度,元素符号加下标N代表该元素的PAAS标准化浓度。 $\delta \text{Ce} < 1$ 和 $\delta \text{Pr} > 1$,指示Ce负异常; $\delta \text{Eu} > 1$ 指示Eu正异常。研究结果显示:① 沉积组分的 $\Sigma \text{REE}+\text{Y}$ 值为26.5~47.7 $\mu\text{g/g}$ (平均值为34.1 $\mu\text{g/g}$);② 稀土配分型式为左倾型,即轻稀土元素亏损、重稀土元素富集,Y/Ho比值为53.9~60.5;③ 存在Ce负异常

(δCe 平均值为0.56),Y正异常,与现代氧化海水的特征相似(图6a),指示其形成于氧化-弱氧化的海水中。FFD和RFD的 $\Sigma \text{REE}+\text{Y}$ 值为3.2~13.3 $\mu\text{g/g}$,配分型式为弱左倾型,Y/Ho比值为44.7~57.6,Ce弱负异常(δCe 平均值为0.80,图6b),指示其形成于弱氧化-还原的海水中。然而,FSD和RSD的 $\Sigma \text{REE}+\text{Y}$ 值为2.1~10.8 $\mu\text{g/g}$,配分型式为微弱平坦型,Y/Ho比值为40.0~91.4,无 δCe 负异常,且存在Eu正异常(δEu 平均值为1.36,图6c),指示其形成于强还原的海水中。然而,孔洞充填物晶粒白云石胶结物的 $\Sigma \text{REE}+\text{Y}$ 值为3.7~25.1 $\mu\text{g/g}$,Y/Ho比值为30.5~49.8,存在明显的Eu正异常(δEu 平均值为1.77),其中,细-中晶白云石(FMD)的配分型式为左倾型,而粗晶白云石为平坦型(图6d),指示这些外来成岩流体为热液。

4.4 U-Pb同位素年龄特征

为了厘清不同类型孔洞形成的绝对时间,本次研究对不同类型孔洞中的孔壁胶结物进行了U-Pb同位素定年分析。测试结果显示,组构选择性溶蚀孔和网格状溶蚀孔洞中的纤维状白云石胶结物形成时间为

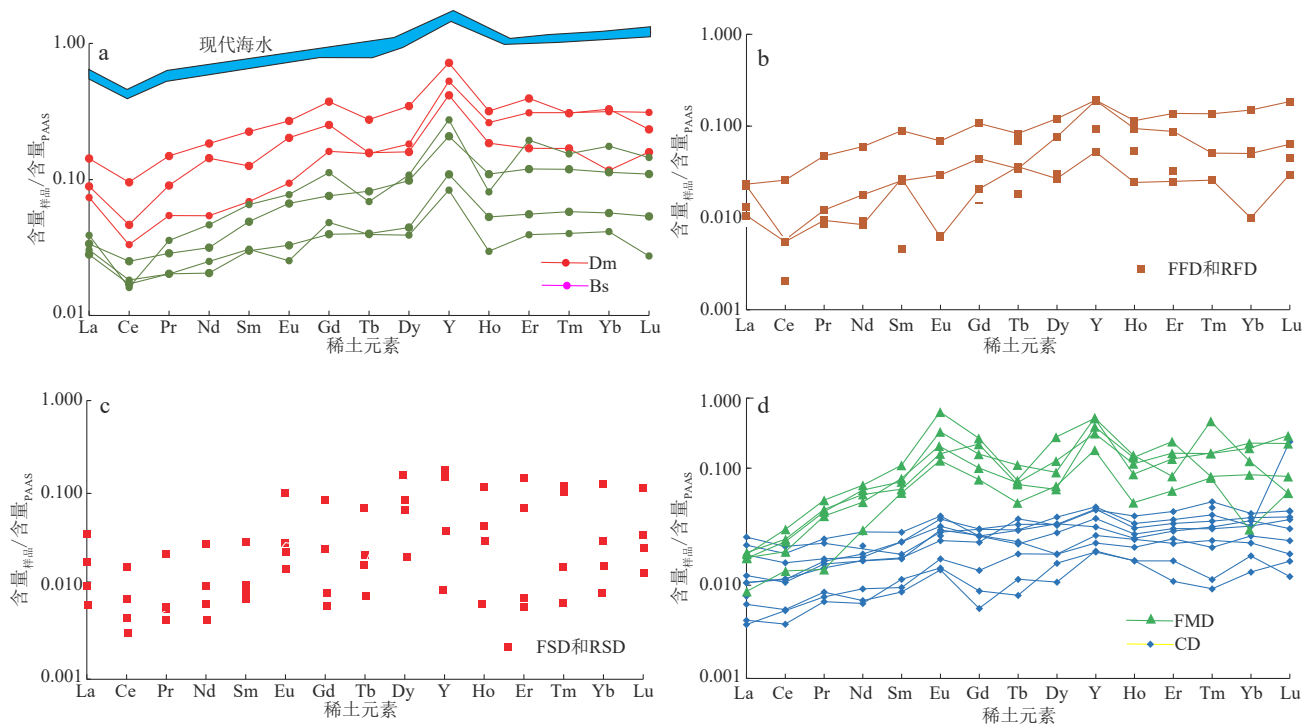


图6 川中蓬莱地区灯二段不同类型白云石PAAS标准化后的稀土元素配分型式

Fig. 6 PASS-normalized patterns of REEs in various dolomites in the Deng 2 Member, Penglai area, central Sichuan Basin

a. 沉积组分暗色Dm和亮色Bs; b. FFD和RFD胶结物; c. FSD和RSD胶结物; d. FMD和CD胶结物

PAAS. 澳大利亚后太古宙页岩; Dm. 泥晶白云石; Bs. 粉晶白云石; CD. 粗晶白云石; FSD. 纤维状正延性白云石; RSD. 放射状正延性白云石; FFD. 纤维状负延性白云石; RFD. 放射状负延性白云石; FMD. 细-中晶白云石

(541.4 ± 12.8) Ma (图 7a), 蜂窝状溶蚀孔洞中放射状白云石胶结物形成时间为 (532.5 ± 11.4) Ma (图 7b), 与前人测试结果 $545.0 \sim 542.0$ Ma^[35-36] 相似, 指示这些孔洞形成于成岩阶段早期。而高角度缝洞中的粗晶白云石胶结物形成时间为 (262.8 ± 3.4) Ma (图 7c), 与前人测试结果 $268.0 \sim 248.0$ Ma^[35-36] 相似, 说明这些缝洞形成于中-晚二叠世。

5 不同岩溶作用对白云岩储层的影响

5.1 同生期—准同生期溶蚀改造的丘滩体是灯二段优质白云岩储层形成的基础

基于岩相学、岩石学和地球化学的综合分析认为, 灯二段组构造选择性溶蚀孔和网格状溶蚀孔洞是同生期—准同生期大气淡水溶蚀的产物, 主要依据如下: ① 组构造选择性溶蚀孔和网格状溶蚀孔洞在研究区整个灯二段广泛发育, 主要分布在地层内部暴露面之下, 在纵向上具有顺层性、旋回性和韵律性的发育特征 (图 3), 指示其形成与周期性海平面变化驱动的暴露溶蚀有关^[37-39]。② 该类孔洞主要充填 FFD 和 RFD 胶结物。U-Pb 同位素定年显示其形成的绝对年龄为 (541.4 ± 12.8) Ma, 与灯影组沉积时间 ($551 \sim 541$ Ma) 相当, 指示这些孔洞形成于早成岩阶段。此外, FFD 和 RFD 的晶体具有较高的长/宽比, 单个晶体的最大生长方向平行于 c 轴, 表现为锐菱面体^[30], 在阴极发光下不发光或者发暗红色弱光, 分别被解释为文石和高镁方解石前驱体经拟晶白云石化的产物^[30, 40]。而前人研究认为四川盆地震旦纪末期以“文石海”或“文石-白云

石海”为主, 其沉积物 (如鲕粒) 的原生矿物以文石和高镁方解石沉积为主^[31]。FFD 和 RFD 原岩为文石和高镁方解石, 说明其成岩环境未脱离沉积期海水, 为同生期—准同生期成岩阶段。③ FFD 和 RFD 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\Sigma \text{REE} + \text{Y}$ 的配分模式与围岩相似, 但 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值轻微增大 (图 5, 图 6), 指示这些胶结物的成岩流体主要为同期海水, 但受少量大气淡水的影响。④ 岩石学特征指示灯二段沉积组分主要由富有机质泥晶白云石和贫有机质粉晶白云石组成, 其中泥晶白云石中微生物组分丰富 (如 EPS 胞外聚合物和微生物菌体), 常见纳米级球状和哑铃状等典型微生物白云石^[40], 为微生物成因白云石^[41-42]。相对于泥晶白云石, 粉晶白云石中缺乏微生物组分和特殊形态的白云石, 是直接沉淀于海水的矿物, 其原生矿物多为文石和高镁方解石^[31, 43], 而文石和高镁方解石在地表淡水环境中不稳定, 极易溶蚀^[37]。研究区灯二段丘滩沉积的古地貌较高, 易频繁暴露地表, 其沉积组分中大量的文石和高镁方解石为同生期—准同生期溶蚀奠定了物质基础 (图 8a)。

组构造选择性溶蚀孔主要发育在丘核-丘坪微相组合中, 多被限定在单个米级沉积旋回的中-上部, 指示其形成与短期的周期性海平面变化 (多与五级层序有关) 驱动的暴露溶蚀密切相关^[37]。而网格状溶蚀孔洞发育在丘基-丘核和丘核-丘坪微相组合中, 切割多个米级旋回地层 (图 3), 指示其形成多与中-长期的周期性海平面变化 (多与四级层序有关) 驱动的暴露溶蚀密切相关^[37]。在短期的周期性海平面变化驱动下, 丘滩暴露时间短, 大气淡水溶蚀强度相对较弱, 溶蚀对象主要为石膏、文石或高镁方解石等不稳定组分, 并发生组构造选择性溶蚀 (图 8b)^[37]。受中-长期海平面下降的影

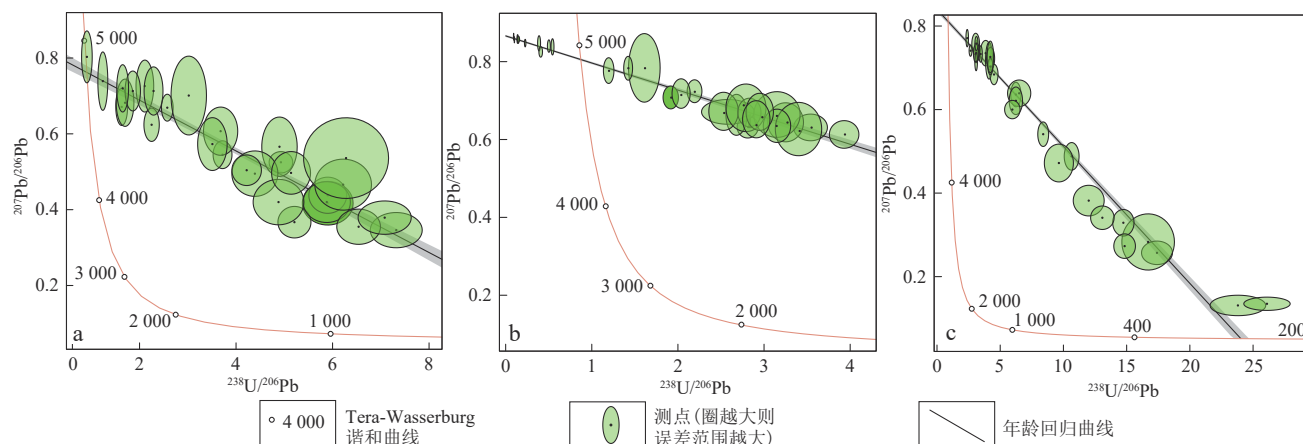


图7 川中蓬萊地区灯二段不同类型白云石激光原位U-Pb同位素年龄

Fig. 7 In situ U-Pb isotopic dating via laser ablation for various dolomites in the Deng 2 Member, Penglai area, central Sichuan Basin
a. 纤维状白云石胶结物 (541.4 ± 12.8) Ma, PT1井, 埋深 5 789.31 m; b. 放射状白云石胶结物 (532.5 ± 11.4) Ma, PT1井, 埋深 5 742.04 m; c. 粗晶白云石胶结物 (262.8 ± 3.4) Ma, PT101井, 埋深 5 724.40 m

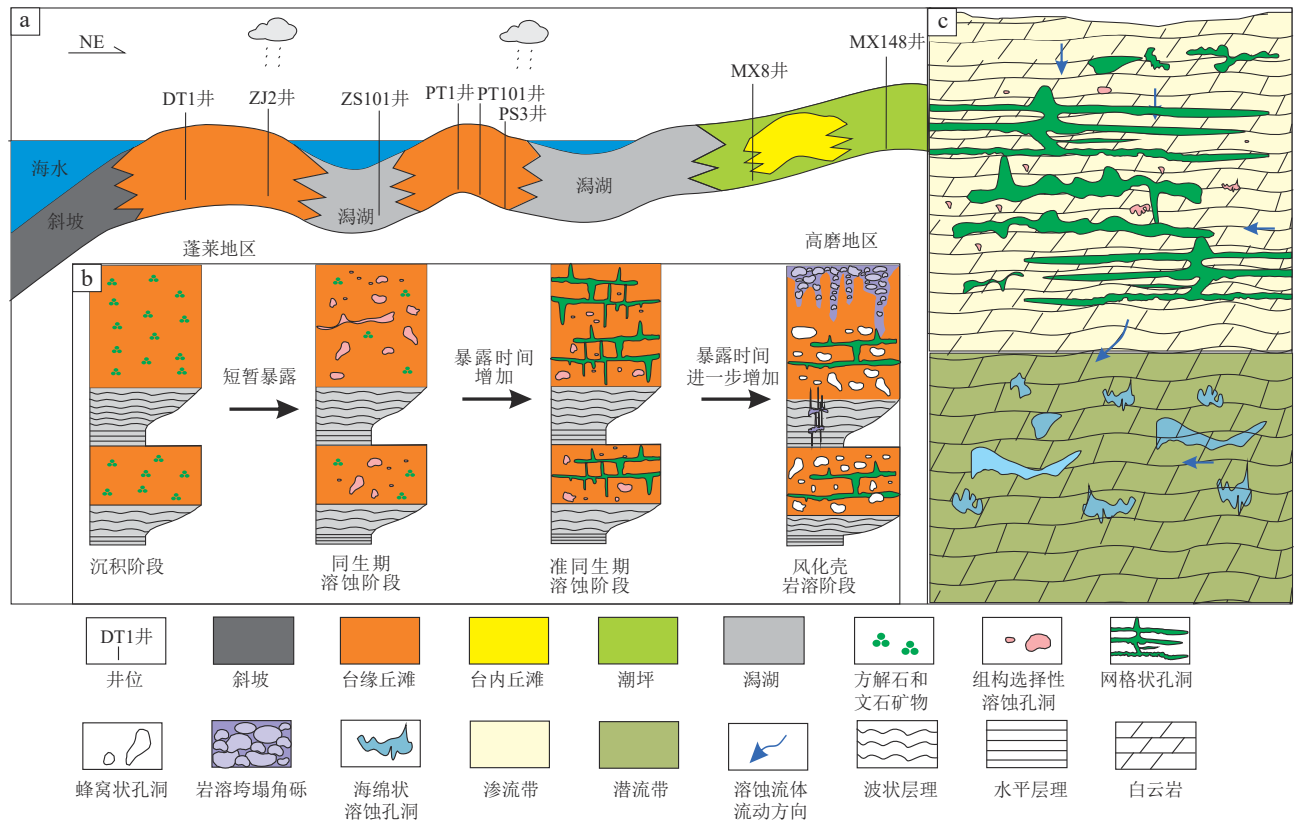


图8 川中蓬莱地区灯二段同生期—准同生期暴露溶蚀发育模式和成因示意图^[11]

Fig. 8 Schematic diagrams showing the developmental pattern and genesis of syngenetic to penecontemporaneous exposure and dissolution in the Deng 2 Member, Penglai area, central Sichuan Basin^[11]

a. 海平面变化驱动下的同生期—准同生期溶蚀模式(古地貌恢复据文献^[11]修改); b. 暴露溶蚀的演化阶段及孔洞特征; c. 准同生期溶蚀发育特征和孔洞分布

响,丘滩体暴露时间和溶蚀强度均增强,主要发生岛屿型或者滨岸型溶蚀(岩溶)^[38-39]。这些溶蚀环境具有明显的渗流带和潜流带的岩溶分带特征^[38-39]。在渗流带,溶蚀流体以径流的大气淡水为主,形成网格状溶洞(图9c);在潜流带,溶蚀流体以紊流混合水为主,形成海绵状溶蚀孔洞(图8c)。由此可见,组构选择性溶蚀孔和网格状溶蚀孔洞形成于同生期—准同生期的淡水溶蚀,受沉积相带和周期性海平面波动共同控制(图8)。

研究区灯二段白云岩储层主要出现在丘滩沉积中,在纵向上具有明显旋回性和韵律性的发育特征(图4),指示其储层的发育与同生期—准同生期溶蚀作用密切相关。然而,灯二段丘滩储层的物性表现出极强的非均质性,甚至以低孔、低渗储层为主^[11],这与同生期—准同生期溶蚀形成的滩控储层特征并不一致^[37-39]。分析认为,同生期—准同生期溶蚀改造的丘滩体是灯二段优质白云岩储层形成的基础,但并非储层发育的关键(表1),主要表现在以下几个方面:①灯二段丘滩沉积虽然普遍受同生期—准同生期溶蚀改造,但相关孔洞未

受后期溶蚀作用的叠加改造,多被纤维状白云石和晶粒状白云石胶结物半充填或者完全充填(图4),多表现为低孔、低渗的特征。大量研究也表明灯二段的滩/地比远远大于储/地比,说明丘滩沉积并非全是储层^[23-25]。②灯二段白云岩储层的储集空间类型多样,虽然同生期—准同生期溶蚀形成的孔洞是储集空间类型之一,但并非主要储集空间(图3,图4)。③虽然灯二段丘滩沉积并非全是储层,但优质储层主要发育在丘滩沉积中,说明同生期—准同生期溶蚀改造的丘滩体有利于后期成岩流体的叠加改造(图3),是优质储层形成的基础。

5.2 风化壳岩溶作用的叠加改造是灯二段优质白云岩储层形成的关键

受桐湾运动的影响,在蓬莱地区普遍缺失灯三段和灯四段,灯二段直接与麦地坪组呈不整合接触(图9a),指示其经历了强烈的风化壳岩溶改造^[11]。综合分析认为,角砾化溶洞和蜂窝状溶洞是风化壳岩溶改造的产物,主要依据如下:①角砾化溶洞和蜂窝状溶洞主要分布在灯二段上部(图3),且见上覆麦地坪

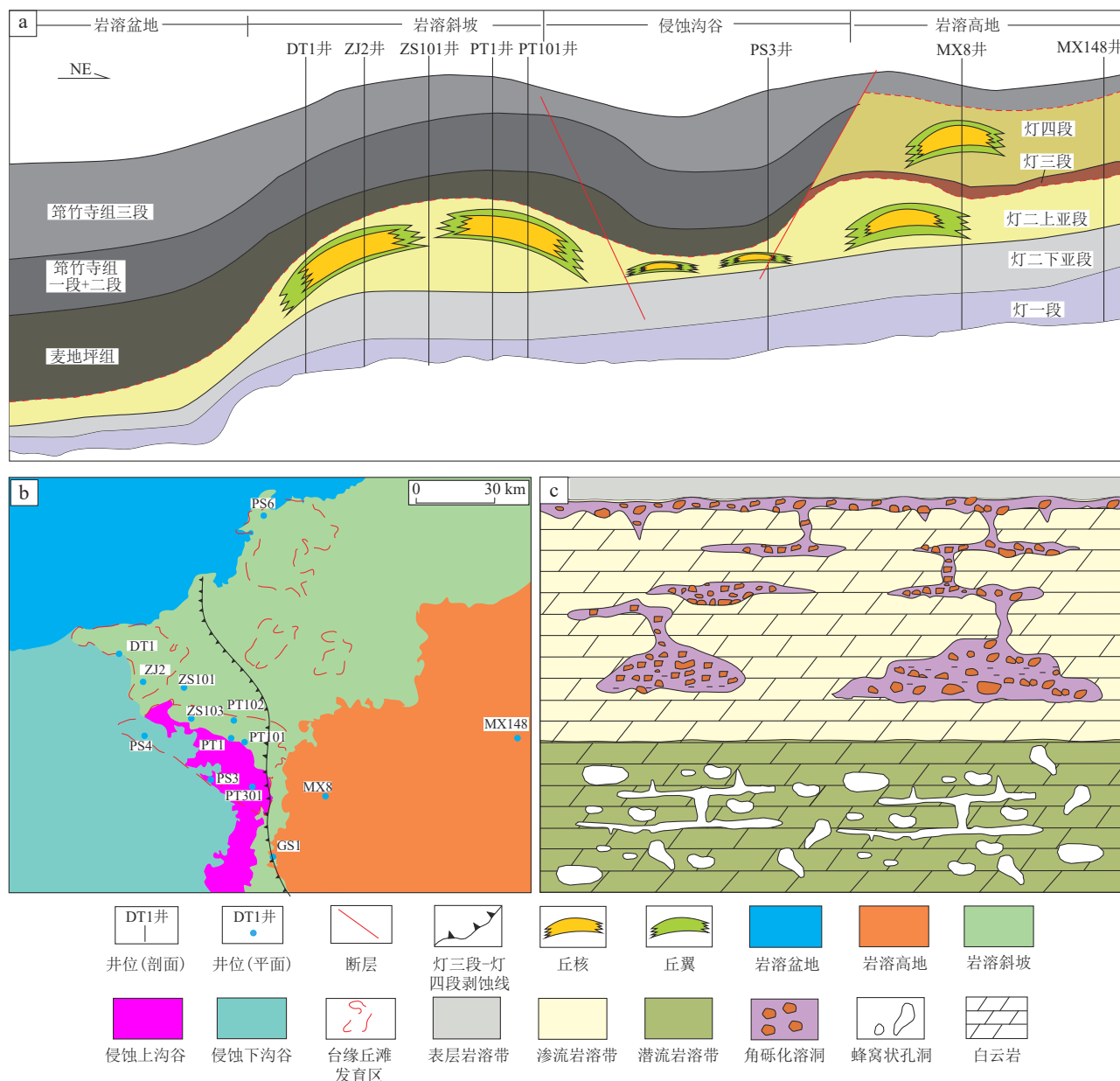


图9 川中蓬莱地区灯二段风化壳岩溶发育模式和成因示意图

Fig. 9 Schematic diagrams showing the developmental pattern and genesis of weathered-crust karstification in the Deng 2 Member, Penglai area, central Sichuan Basin

a. 地层侵蚀及不整合面发育特征; b. 岩溶古地貌和丘滩分布(古地貌据文献[11]修改); c. 风化壳岩溶发育特征和孔洞分布

组的泥和粉砂等细粒陆源沉积物充填(图4f),说明其形成与桐湾运动引起的风化壳岩溶改造有关^[44-45]; ②在区域上,角砾化溶洞主要分布在岩溶高地和岩溶斜坡,而蜂窝状溶洞则主要分布在岩溶斜坡,具有明显的岩溶古地貌控制的特征;③岩溶角砾和蜂窝状溶洞多被FSD和RSD充填。FSD和RSD的矿物学特征与灯二段海水沉淀的FFD和RFD明显不同,其晶体具有较低长/宽比,局部含丰富的盐水包裹体,单个晶体的最大生长方向垂直于c轴,表现为等轴或钝菱面体^[30],在阴极发光下见明暗相间的环带状生长纹层,多被解释

为原生白云石胶结物^[46-47]。角砾化溶洞和蜂窝状溶洞被原生白云石充填,说明其形成环境已经脱离灯二段沉积时的海水(主要以文石和高镁方解石沉积为主)。进一步分析发现,FSD和RSD的 $\Sigma \text{REE}+\text{Y}$ 的配分模式也与围岩不同,具有无明显Ce负异常,轻微Eu正异常的特征(图6)。在现代氧化海水中,Ce³⁺多被氧化为不溶于水的Ce⁴⁺,而Ce⁴⁺极易吸附在Fe-Mn氧化物或有机质等颗粒中,这使得氧化海水多表现出Ce负异常^[32-34]。然而,FSD和RSD无明显Ce负异常,指示其形成于缺氧的海水环境。此外,洋中脊的热液活动可

持续为海洋产生 Eu^{2+} , 但 Eu^{2+} 会迅速被氧化为 Eu^{3+} , 而 Eu^{3+} 易吸附在 Fe-Mn 氧化物上, 这往往导致海水表现出微不足道的 Eu 负异常^[46]。如果在缺氧的海洋环境中, Eu 就多以 Eu^{2+} 形式存在, 并导致相关沉积物表现出 Eu 正异常的特征^[46]。这些特征说明 FSD 和 RSD 形成于极度缺氧环境, 这可能与桐湾运动 I 幕后深部缺氧海水大规模上涌, 并改变了浅层海水性质有关^[48]。

FSD 和 RSD 的地球化学数据(海水成因)和 U-Pb 同位素定年数据 $[(532.5 \pm 11.4)\text{Ma}]$ 指示灯二段风化壳岩溶发生在早成岩阶段, 这与经典表生期岩溶的溶蚀机理存在明显差异^[38], 主要表现在以下几个方面: ① 改造对象不同。灯二段风化壳岩溶改造对象是未经历强烈压实和埋藏胶结作用的多孔丘滩白云岩, 而后的改造对象是经历深埋藏再抬升的致密灰岩^[38]。② 岩溶通道不同。灯二段风化壳岩溶通道主要是丘滩体中的先存孔洞, 而后者主要是沿裂缝、节理面和层理面进行运移^[38]。③ 暴露时间不同。经典表生期岩溶的暴露时间普遍较长(长达数十个百万年)^[38], 而灯二段风化壳岩溶的暴露时间相对较短。这些差异使得灯二段风化壳岩溶具有一定的相控特征, 其形成的储集空间并非传统认识上的大型缝洞, 而是蜂窝状溶洞为主。前人研究认为灯二段的风化壳岩溶同样受岩溶古地貌控制, 岩溶储层主要发育在岩溶斜坡上(图 9b)^[11]。在岩溶高地主要发育渗流岩溶带, 大气淡水沿裂缝和先存孔洞呈线性流动, 形成角砾化溶洞, 整体物性较差; 在岩溶斜坡主要发育潜流岩溶带, 大气淡水沿丘滩中的先存孔洞呈漫流式流动, 形成蜂窝状溶洞, 整体物性较好(图 9c)^[11]。类似的孔洞成因在四川盆地二叠系茅口组也有报道^[49]。由此可见, 角砾化溶洞和蜂窝状溶洞形成于早成岩期的风化壳岩溶, 受岩溶古地貌和沉积相带共同制约(图 9)。

风化壳岩溶作用是否对灯影组白云岩储层具有贡献一直存在争论^[11-14]。本次研究认为风化壳岩溶是灯二段储层形成的关键, 主要依据如下: ① 灯二段风化壳岩溶发生在成岩作用早期, 其改造形成的蜂窝状溶洞是研究区灯二段最主要的储集空间(图 3)。② 早成岩期的风化壳岩溶主要受岩溶古地貌和丘滩发育程度的共同控制。物性分析发现, 研究区灯二段白云岩储层主要发育在丘滩沉积中, 但岩溶高地丘滩的平均测井孔隙度为 2.05 %^[11], 具有储层厚度小和物性差的特征, 而岩溶斜坡丘滩的平均测井孔隙度为 3.75 % (图 3), 具有储层厚度大和物性好的特征, 指示岩溶古地貌控制了灯二段优质白云岩储层的形成。③ 风化壳岩溶的影响深度一般不超过 200 m^[46], 主要控制了灯二上亚段储层的发

育。而研究区灯二上亚段丘滩段储层明显好于灯二下亚段丘滩段储层^[11]。综上所述, 风化壳岩溶叠加改造的丘滩是灯二段白云岩优质储层形成的关键(表 1)。

5.3 热液作用对灯二段白云岩储层改造具有双重作用

高角度缝洞主要分布在深大断裂附近, 其边壁多被粗晶白云石胶结物充填。粗晶白云石具有明显的波状消光, $\delta^{18}\text{O}$ 值负偏($-12.19\% \sim -10.09\%$)、较高的盐水包裹体均一温度(平均值为 $173.8\text{ }^{\circ}\text{C}$)以及 Eu 正异常(δEu 平均值为 1.77)等特征, 指示其为热液成因。U-Pb 同位素定年显示, 粗晶白云石形成的绝对年龄为 $(262 \pm 3)\text{Ma}$, 这与海西晚期(二叠纪中-晚期)峨眉山地幔柱火山-岩浆活动的年龄大致相当, 而研究区又位于峨眉山大火山岩省的中带^[20], 说明该期热液活动与峨眉山火山-岩浆活动有关。然而与火山活动有关的热液流体来源多样, 包括深部地层卤水、深循环大气淡水或海水以及岩浆水等^[50-51]。粗晶白云石具有较高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(平均值为 0.710 980)和较低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值($-1.05\% \sim -0.11\%$), 基本可排除岩浆水(其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值低)^[28-29]和深循环海水(中二叠世海水的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $2\% \sim 5\%$)^[28]。粗晶白云石的 Y/Ho 平均比值为 36.5, 处于大气淡水和海水之间(大气淡水的 Y/Ho 值一般在 $26.0 \sim 28.0$, 而海水的 Y/Ho 比值一般在 $44.0 \sim 72.0$ ^[33-34]), 指示该期热液流体多为大气淡水和深层卤水的混合流体。受峨眉山地幔柱隆升的影响, 研究区地层抬升暴露地表, 大气淡水通过深大断裂进入深部碎屑岩地层, 并与该地层中的卤水混合, 形成高温流体, 最后沿走滑断裂进入灯二段并改造储层(图 10a)。

CO_2 的大量供给被认为是热液溶蚀持续发生的重要驱动机制^[51-52]。热液中的 CO_2 普遍存在有机和无机 2 种成因, 其中有机 CO_2 主要来源于有机质裂解和硫酸盐热化学还原反应(TSR, $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-30\% \sim -10\%$), 而无机 CO_2 多来源于深部碳酸盐岩热裂解($\delta^{13}\text{C}$ 值在 $0 \sim 3\%$)和火山-岩浆活动脱气($\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-4\% \sim 0$)^[51-52]。蓬莱地区灯二段缝洞中的粗晶白云石的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布在 $-1.05\% \sim -0.11\%$, 相关气藏中 CO_2 组分的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布在 $-0.98\% \sim -0.14\%$ ^[53], 说明这些 CO_2 多为无机成因。由于研究区灯影组下伏地层以碎屑岩为主^[19], 碳酸盐岩热裂解的可能性较小, 因此这些无机 CO_2 多来自火山-岩浆活动脱气。

热液作用对白云岩储层的改造问题是目前碳酸盐岩储层领域研究的热点和难点^[7-9]。部分学者认为热液作用主要形成热液白云石, 并充填灯二段早期孔洞

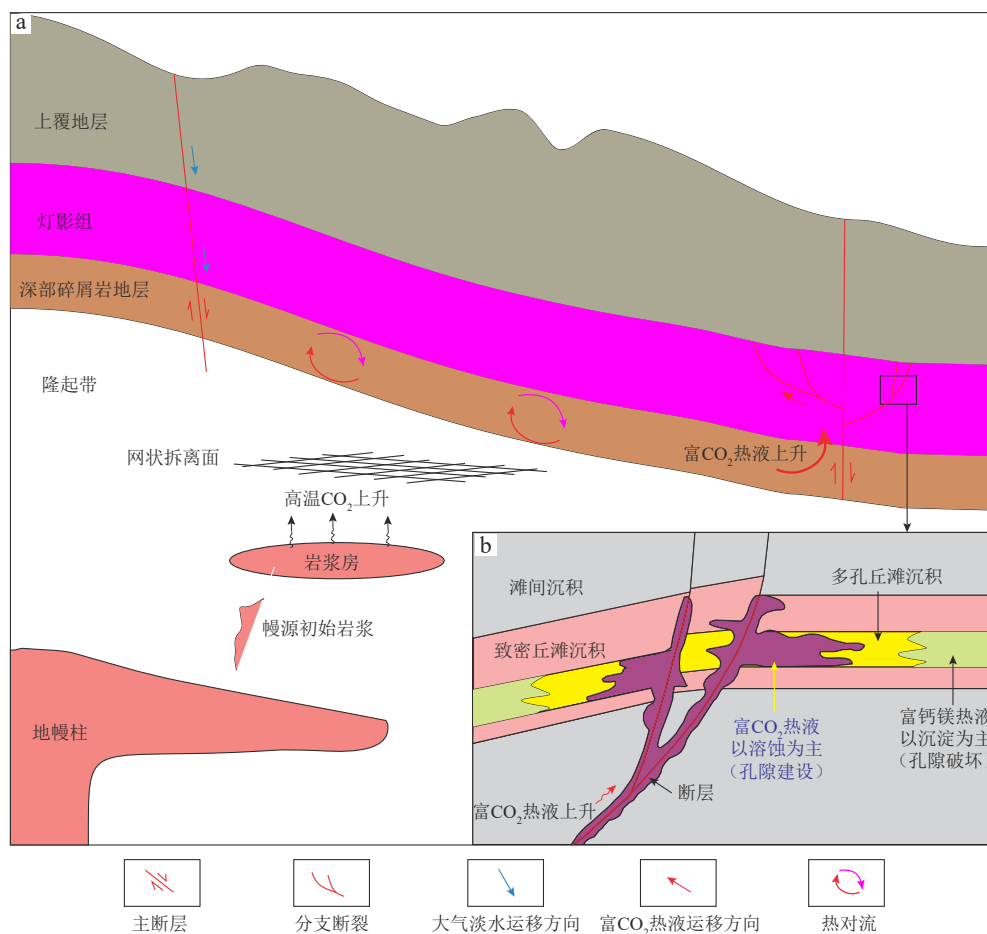


图10 川中蓬莱地区灯二段富CO₂热液溶蚀机制及模式

Fig. 10 Schematic diagrams showing the mechanism and model of CO₂-rich hydrothermal dissolution in the Deng 2 Member, Penglai area, central Sichuan Basin

a. 富CO₂热液溶蚀驱动机制及流体迁移特征;b. a图的局部放大,在断裂带附近以溶蚀为主,增加和调整孔隙,在邻近地质体中以沉淀为主,破坏先存孔隙

破坏储层^[14-16]。本次研究认为富CO₂热液对灯二段白云岩储层改造具有双重作用,但利大于弊,主要表现在:①热液流体活动常伴随着构造破裂的发生,这些构造破裂形成的裂缝改善了储层物性。②富CO₂热液流体对埋藏阶段白云岩具有较强的溶蚀能力,可沿裂缝形成大量高角度缝洞,增加了储集空间。然而在热液流体侧向迁移过程中,随着CO₂的不断消耗和钙、镁离子的逐渐富集,其流体性质逐渐发生变化,从以溶蚀为主逐渐变为以沉淀为主,破坏早期孔隙^[50](图10b)。因此,在离CO₂源较近的断裂发育区域,主要发生溶蚀作用形成高角度缝洞,但在远离CO₂源的区域则主要发生沉淀作用破坏储层。③由于热液作用多发生在相对封闭的埋藏成岩环境中,具有“此溶蚀、彼沉淀”的特征。根据质量守恒原理,热液溶蚀的增孔能力有限,与热液有关的黄铁矿、石英、方铅矿、闪锌矿和萤石等外来热液矿物沉淀甚至对储层具有一定的破坏作用。

尽管如此,热液溶蚀对白云岩储层的调整作用仍不可忽视,是控制灯二段白云岩优质储层分布的重要因素(表1)。前人研究也发现,在距走滑断裂越近的位置钻井,其储层(孔隙度>2%)和优质储层(孔隙度为4%~12%)越发育^[23]。

5.4 储层分布预测

上述研究表明,研究区灯二段白云岩储层的发育不仅受同生期—准同生期溶蚀改造的丘滩体控制,还受风化壳岩溶和热液溶蚀的共同制约。因此,本次研究根据沉积相带、岩溶古地貌和走滑断裂的发育情况,对蓬莱地区灯二上亚段白云岩储层进行了初步的类型划分(划分为3类)和预测(图11)。

Ⅲ类储集层以孔隙型储层为主,表现为储层累计厚度小(<25 m)、孔隙度低(2%~5%)和渗透率低(<0.01×10⁻³ μm²)的特征,该类储层主要发育在岩溶

表 1 川中蓬莱地区灯二段多期溶蚀作用特征及控储效应

Table 1 Characteristics and reservoir-controlling effects of multistage dissolution in the Deng 2 Member, Penglai area, central Sichuan Basin

溶蚀作用类型	储层岩石学特征	分布规律	储层空间类型	典型胶结物类型	溶蚀机理	控储效应
同生期—准同生期溶蚀	向上变浅的沉积旋回的叠层石白云岩、凝块石白云岩和泡沫状绵层石白云岩	在台缘和台内丘滩广泛分布,呈多套叠置、韵律性分布	组构选择性溶蚀孔和网格状溶蚀孔洞	FFD+RFD+晶粒白云石	周期性海平面变化驱动的短暂暴露;溶蚀流体以大气淡水 and 混合水为主	形成孔隙-孔洞型储层,是储层形成的基础
风化壳岩溶	岩溶角砾白云岩、凝块石白云岩、泡沫状绵层石白云岩和砂屑白云岩	主要分布岩溶斜坡之下的丘滩沉积中	溶洞和蜂窝状溶蚀孔洞	FSD+RSD+晶粒白云石	桐湾运动引起的长时间暴露;溶蚀流体为大气淡水	形成孔洞型储层,是储层形成的关键
热液溶蚀	构造角砾白云岩、凝块石白云岩、泡沫状绵层石白云岩和砂屑白云岩	主要分布在东西向走滑断裂附近的丘滩沉积中	高角度缝洞	粗晶白云石+石英+萤石、方铅矿和闪锌矿	与峨眉山火山活动引起的热事件有关;溶蚀流体为富CO ₂ 热液	形成缝洞型储层,是储集空间重新分配的重要控制因素

注:FFD为纤维状负延性白云石;RFD为放射状负延性白云石;FSD为纤维状正延性白云石;RSD为放射状正延性白云石。

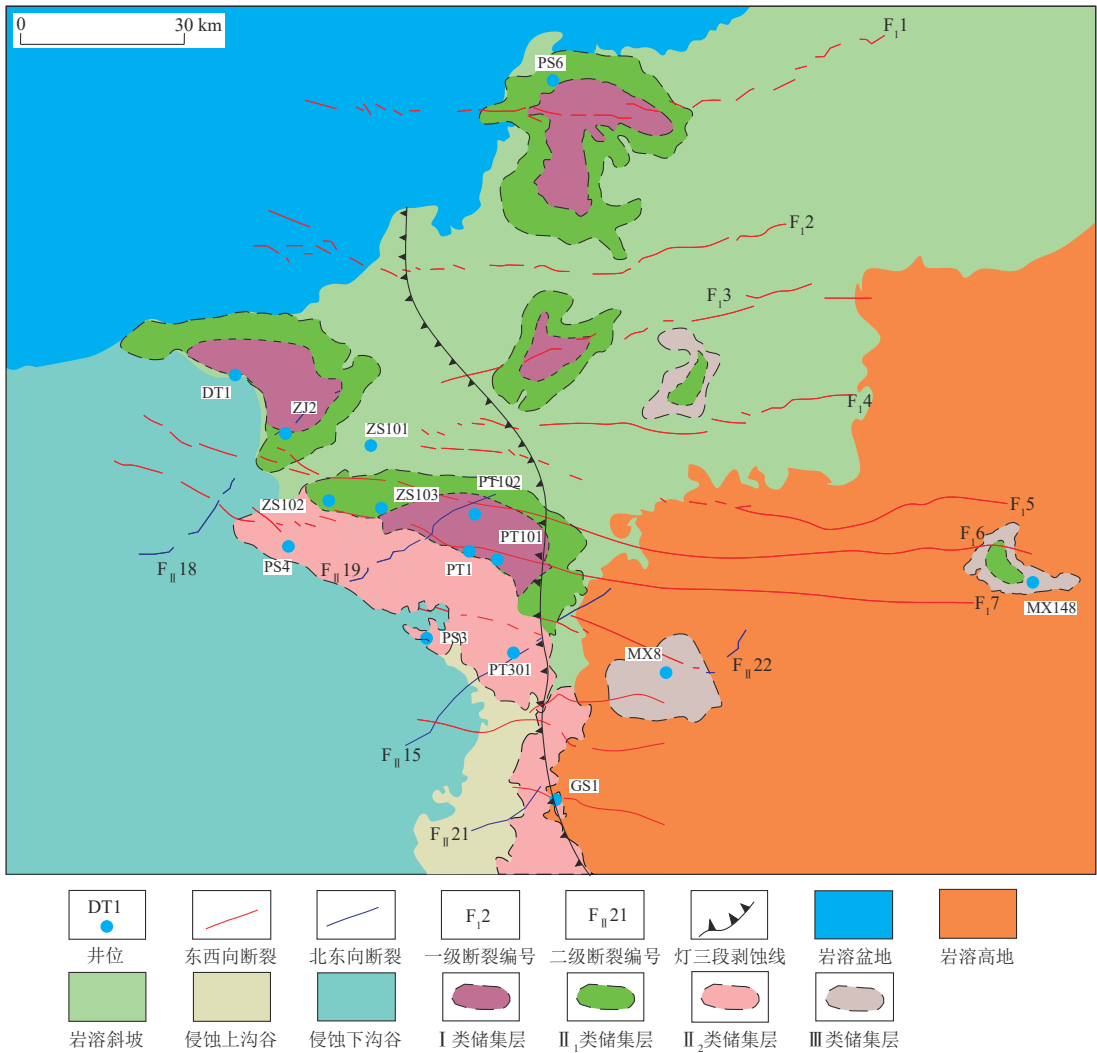


图 11 川中蓬莱地区灯二上亚段储集层分布预测与评价

Fig. 11 Mapping and assessment of reservoirs in the upper sub-member of Deng 2 Member, Penglai area, central Sichuan Basin

高地和岩溶斜坡的丘间-丘基-丘核和丘核-丘坪微相组合中;Ⅱ类储集层以孔洞型储层或者缝洞型储层为主,表现为储层厚度较大(25~50 m)、孔隙度较高(5%~8%)和渗透率较高($0.01 \times 10^{-3} \sim 0.10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)的特征,该类储层主要发育在岩溶斜坡台缘丘滩和台内丘滩的丘基-丘核和丘核-丘坪微相组合中;Ⅰ类储集层

以孔洞-缝洞型储层为主,表现为储层厚度大(50 ~ 100 m)、孔隙度高(5% ~ 12%)、渗透率高($0.10 \times 10^{-3} \sim 10.00 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)的特征,主要发育在岩溶斜坡且距走滑断裂较近的丘基-丘核和丘核-丘坪微相组合中。

6 结论

1) 川中蓬莱地区灯二段白云岩储集岩主要包括凝块石白云岩、泡沫状绵层石白云岩、叠层石白云岩、藻黏结颗粒白云岩和角砾白云岩,储集空间多由构造选择性溶蚀孔、网格状溶蚀孔洞、蜂窝状溶蚀孔洞和高角度缝洞组成。灯二段白云岩储层主要经历了同生期—准同生期溶蚀、与加里东早期桐湾运动有关的风化壳岩溶以及与海西晚期峨眉山火山活动有关的热液溶蚀作用的叠加改造。

2) 同生期—准同生期溶蚀改造的丘滩沉积是灯二段白云岩储层形成的基础。海平面变化驱动的同生期—准同生期溶蚀在丘滩沉积中形成了大量构造选择性溶蚀孔和网格状溶蚀孔洞,具有顺层密集分布、多套叠置和韵律性发育等特征。这些孔洞和丘滩是后期建设性成岩流体的主要运移通道和改造对象,为灯二段优质白云岩储层的发育奠定了基础。

3) 与桐湾运动有关的风化壳岩溶叠加改造是灯二段白云岩储层形成的关键。风化壳岩溶改造形成的角砾化溶洞,对储层优化改造有限,但其形成的蜂窝状溶蚀孔洞,是研究区灯二段储层的主要储集空间。灯二段风化壳岩溶改造发生在成岩早期,与经典表生期岩溶存在较大差异,不仅与岩溶古地貌有关,还受丘滩发育程度的控制。因此岩溶斜坡上的丘滩是灯影组油气勘探的重要目标。

4) 与海西晚期峨眉山火山活动有关的热液溶蚀对灯二段白云岩储层具有双重改造作用,主要表现为在深大断裂附近溶蚀形成大量高角度缝洞,但其溶蚀的产物又在相邻的地质体中沉淀并封堵孔隙。该溶蚀作用重新分配和调整了储集空间,对灯二段优质储层分布具有重要意义,是灯影组油气勘探的新方向。

参 考 文 献

- [1] 赵文智, 沈安江, 郑剑锋, 等. 塔里木、四川及鄂尔多斯盆地白云岩储层孔隙成因探讨及对储层预测的指导意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(9): 1925–1939.
ZHAO Wenzhi, SHEN Anjiang, ZHENG Jianfeng, et al. The porosity origin of dolostone reservoirs in the Tarim, Sichuan and Ordos basins and its implication to reservoir prediction [J]. Science China Earth Sciences, 2014, 44(9): 1925–1939.
- [2] 周进高, 徐哲航, 黄世伟, 等. 碳酸盐岩沉积储层研究前沿与未来发展方向[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 929–953.
ZHOU Jingao, XU Zhehang, HUANG Shiwei, et al. Frontiers and trends in the research on carbonate sedimentology and reservoir geology[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 929–953.
- [3] 李阳, 薛兆杰, 程喆, 等. 中国深层油气勘探开发进展与发展方向[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 45–57.
LI Yang, XUE Zhaojie, CHENG Zhe, et al. Progress and development directions of deep oil and gas exploration and development in China[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 45–57.
- [4] 马永生, 黎茂稳, 蔡勋育, 等. 中国海相深层油气富集机理与勘探开发: 研究现状、关键技术瓶颈与基础科学问题[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(4): 655–672, 683.
MA Yongsheng, LI Maowen, CAI Xunyu, et al. Mechanisms and exploitation of deep marine petroleum accumulations in China: Advances, technological bottlenecks and basic scientific problems [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 655–672, 683.
- [5] 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 等. 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[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(3): 278–293.
ZOU Caineng, DU Jinhu, XU Chunchun, et al. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 278–293.
- [6] EHRENBERG S N, WALDERHAUG O, BJØRLYKKE K. Carbonate porosity creation by mesogenetic dissolution: Reality or illusion?[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(2): 217–233.
- [7] CAI Chunfang, HU Guoyi, LI Hongxia, et al. Origins and fates of H_2S in the Cambrian and Ordovician in Tazhong area: Evidence from sulfur isotopes, fluid inclusions and production data [J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, 67: 408–418.
- [8] HAO Fang, ZHANG Xuefeng, WANG Cunwu, et al. The fate of CO_2 derived from thermochemical sulfate reduction (TSR) and effect of TSR on carbonate porosity and permeability, Sichuan Basin, China[J]. Earth-Science Reviews, 2015, 141: 154–177.
- [9] BIEHL B C, REUNING L, SCHOENHERR J, et al. Impacts of hydrothermal dolomitization and thermochemical sulfate reduction on secondary porosity creation in deeply buried carbonates: A case study from the Lower Saxony Basin, northwest Germany [J]. AAPG Bulletin, 2016, 100(4): 597–621.
- [10] TAN Qian, SHI Zejin, HU Xiuquan, et al. Diagenesis of microbialites in the Lower Cambrian Qingxudong Formation, South China: Implications for the origin of porosity in deep microbial carbonates [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 51: 166–182.
- [11] 张自力, 乔艳萍, 豆霜, 等. 四川盆地蓬莱气区震旦系灯影组二段岩溶古地貌与控储模式[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 200–214.
ZHANG Zili, QIAO Yanping, DOU Shuang, et al. Karst paleogeomorphology and reservoir control model of the 2nd member of Dengying Formation in Penglai gas area, Sichuan Basin, China[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 200–214.
- [12] 杨雨, 黄先平, 张健, 等. 四川盆地寒武系沉积前震旦系顶界岩溶地貌特征及其地质意义[J]. 天然气工业, 2014, 34(3): 38–43.
YANG Yu, HUANG Xianping, ZHANG Jian, et al. Features and

- geologic significances of the top Sinian karst landform before the Cambrian deposition in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(3): 38–43.
- [13] 刘宏, 罗思聪, 谭秀成, 等. 四川盆地震旦系灯影组古岩溶地貌恢复及意义[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(3): 283–293.
LIU Hong, LUO Sicong, TAN Xiucheng, et al. Restoration of paleokarst geomorphology of Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin and its significance, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(3): 283–293.
- [14] 陈娅娜, 沈安江, 潘立银, 等. 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[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(5): 704–715.
CHEN Yana, SHEN Anjiang, PAN Liyin, et al. Features, origin and distribution of microbial dolomite reservoirs: A case study of 4th Member of Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(5): 704–715.
- [15] 王文之, 杨跃明, 文龙, 等. 微生物碳酸盐岩沉积特征研究——以四川盆地高磨地区灯影组为例[J]. *中国地质*, 2016, 43(1): 306–318.
WANG Wenzhi, YANG Yueming, WEN Long, et al. A study of sedimentary characteristics of microbial carbonate: A case study of the Sinian Dengying Formation in Gaomo area, Sichuan Basin [J]. *Geology in China*, 2016, 43(1): 306–318.
- [16] 宋金民, 刘树根, 李智武, 等. 四川盆地上震旦统灯影组微生物碳酸盐岩储层特征与主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(4): 741–752.
SONG Jinmin, LIU Shugen, LI Zhiwu, et al. Characteristics and controlling factors of microbial carbonate reservoirs in the Upper Sinian Dengying Formation in the Sichuan Basin, China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(4): 741–752.
- [17] 刘树根, 宋金民, 罗平, 等. 四川盆地深层微生物碳酸盐岩储层特征及其油气勘探前景[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(2): 129–152.
LIU Shugen, SONG Jinmin, LUO Ping, et al. Characteristics of microbial carbonate reservoir and its hydrocarbon exploring outlook in the Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2016, 43(2): 129–152.
- [18] 马兵山, 梁瀚, 邬光辉, 等. 四川盆地中部地区多期次走滑断层的形成及演化[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(2): 333–345.
MA Bingshan, LIANG Han, WU Guanghui, et al. Formation and evolution of the strike-slip faults in the central Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(2): 333–345.
- [19] 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.
- [20] 冯明友, 强子同, 沈平, 等. 四川盆地高石梯—磨溪地区震旦系灯影组热液白云岩证据[J]. *石油学报*, 2016, 37(5): 587–598.
FENG Mingyou, QIANG Zitong, SHEN Ping, et al. Evidences for hydrothermal dolomite of Sinian Dengying Formation in Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2016, 37(5): 587–598.
- [21] 刘树根, 孙玮, 罗志立, 等. 兴凯地裂运动与四川盆地地下组合油气勘探[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 40(5): 511–520.
LIU Shugen, SUN Wei, LUO Zhili, et al. Xingkai taphrogenesis and petroleum exploration from Upper Sinian to Cambrian Strata in Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2013, 40(5): 511–520.
- [22] 刘静江, 刘慧荣, 李文皓, 等. 四川盆地裂陷槽研究新进展——关于裂陷槽成因机制与形成时间的探讨[J]. *地质论评*, 2021, 67(3): 767–786.
LIU Jingjiang, LIU Huirong, LI Wenhao, et al. New progress in the study of aulacogen in Sichuan Basin——A discussion on the genetic mechanism and formation time of the aulacogen [J]. *Geological Review*, 2021, 67(3): 767–786.
- [23] 张本健, 马华灵, 李文正, 等. 四川盆地蓬莱气区灯二段储集层特征及主控因素[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(11): 1899–1915.
ZHANG Benjian, MA Hualing, LI Wenzheng, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors in the second member of the Dengying Formation in the Penglai Gas Field, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(11): 1899–1915.
- [24] 张玺华, 彭瀚霖, 文龙, 等. 四川盆地西北部灯影组深水沉积的发现及油气地质意义[J]. *天然气勘探与开发*, 2020, 43(4): 10–21.
ZHANG Xihua, PENG Hanlin, WEN Long, et al. Discovery of deep-water deposits in Northwest Sichuan Basin during Dengyingian period: Implications for petroleum geology [J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2020, 43(4): 10–21.
- [25] 聂晶, 周刚, 张亚, 等. 川中古隆起北斜坡灯影组二段储层成岩流体演化及成储效应[J]. *地质学报*, 2025, 99(3): 879–896.
NIE Jing, ZHOU Gang, ZHANG Ya, et al. Diagenetic fluid evolution and reservoir formation effect of the second member of Dengying Formation in the northern slope of central Sichuan paleo-uplift [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2025, 99(3): 879–896.
- [26] GODEAU N, DESCHAMPS P, GUIHOU A, et al. U–Pb dating of calcite cement and diagenetic history in microporous carbonate reservoirs: Case of the Urgonian Limestone, France [J]. *Geology*, 2018, 46(3): 247–250.
- [27] FURUYAMA S, KANO A, KUNIMITSU Y, et al. Diagenetic overprint to a negative carbon isotope anomaly associated with the Gaskiers glaciation of the Ediacaran Doushantuo Formation in South China [J]. *Precambrian Research*, 2016, 276: 110–122.
- [28] VEIZER J, ALA D, AZMY K, et al. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater [J]. *Chemical Geology*, 1999, 161(1/3): 59–88.
- [29] WARREN J. Dolomite: Occurrence, evolution and economically important associations [J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 52(1/3): 1–81.
- [30] HU Yongjie, CAI Chunfang, LIU Dawei, et al. Formation, diagenesis and palaeoenvironmental significance of Upper Ediacaran fibrous dolomite cements [J]. *Sedimentology*, 2020, 67(2): 1161–1187.
- [31] WANG Jingbin, HE Zhiliang, ZHU Dongya, et al. Petrological and geochemical characteristics of the botryoidal dolomite of

- Dengying Formation in the Yangtze Craton, South China: Constraints on terminal Ediacaran “dolomite seas”[J]. *Sedimentary Geology*, 2020, 406: 105722.
- [32] NOTHDURFT L D, WEBB G E, KAMBER B S. Rare earth element geochemistry of Late Devonian reefal carbonates, Canning Basin, Western Australia: Confirmation of a seawater REE proxy in ancient limestones [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(2): 263–283.
- [33] LING Hongfei, CHEN Xi, LI Da, et al. Cerium anomaly variations in Ediacaran-earliest Cambrian carbonates from the Yangtze Gorges area, South China: Implications for oxygenation of coeval shallow seawater [J]. *Precambrian Research*, 2013, 225: 110–127.
- [34] 赵彦彦, 李三忠, 李达, 等. 碳酸盐(岩)的稀土元素特征及其古环境指示意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2019, 43(1): 141–167. ZHAO Yanyan, LI Sanzhong, LI Da, et al. Rare earth element geochemistry of carbonate and its paleoenvironmental implications [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2019, 43(1): 141–167.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 何治亮, 高志前, 张军涛, 等. 层序界面类型及其对优质碳酸盐岩储层形成与分布的控制[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(6): 853–859. HE Zhiliang, GAO Zhiqian, ZHANG Juntao, et al. Types of sequence boundaries and their control over formation and distribution of quality carbonate reservoirs [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(6): 853–859.
- [38] 谭秀成, 肖笛, 陈景山, 等. 早成岩期喀斯特化研究新进展及意义[J]. *古地学报*, 2015, 17(4): 441–456. TAN Xiucheng, XIAO Di, CHEN Jingshan, et al. New advance and enlightenment of eogenetic karstification [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2015, 17(4): 441–456.
- [39] VACHER H L, MYLROIE J E. Eogenetic karst from the perspective of an equivalent porous medium [J]. *Carbonates and Evaporites*, 2002, 17(2): 182–196.
- [40] 由雪莲, 孙枢, 朱井泉, 等. 微生物白云岩模式研究进展[J]. *地质前缘*, 2011, 18(4): 52–64. YOU Xuelian, SUN Shu, ZHU Jingquan, et al. Progress in the study of microbial dolomite model [J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(4): 52–64.
- [41] DUPRAZ C, REID R P, BRAISSANT O, et al. Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats [J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 96(3): 141–162.
- [42] PERRI E, TUCKER M. Bacterial fossils and microbial dolomite in Triassic stromatolites [J]. *Geology*, 2007, 35(3): 207–210.
- [43] CORSETTI F A, KIDDER D L, MARENCO P J. Trends in oolite dolomitization across the Neoproterozoic–Cambrian boundary: A case study from Death Valley, California [J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 191(3/4): 135–150.
- [44] 汪泽成, 姜华, 王铜山, 等. 四川盆地桐湾期古地貌特征及成藏意义[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(3): 305–312. WANG Zecheng, JIANG Hua, WANG Tongshan, et al. Paleogeomorphology formed during Tongwan tectonization in Sichuan Basin and its significance for hydrocarbon accumulation [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(3): 305–312.
- [45] 杨帅, 陈洪德, 钟怡江, 等. 川西南地区晚震旦世微生物岩及其对桐湾运动 I 幕的响应[J]. *岩石学报*, 2017, 33(4): 1148–1158. YANG Shuai, CHEN Hongde, ZHONG Yijiang, et al. Microbolite of Late Sinian and its response for Tongwan movement episode I in southwest Sichuan, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(4): 1148–1158.
- [46] SHUSTER A M, WALLACE M W, VAN SMEERDIJK HOOD A, et al. The Tonian beek spring dolomite: Marine dolomitization in a shallow, anoxic sea [J]. *Sedimentary Geology*, 2018, 368: 83–104.
- [47] HOOD A V S, WALLACE M W, DRYSDALE R N. Neoproterozoic aragonite-dolomite seas? Widespread marine dolomite precipitation in Cryogenian reef complexes [J]. *Geology*, 2011, 39(9): 871–874.
- [48] CUI Huan, XIAO Shuhai, CAI Yaoping, et al. Sedimentology and chemostratigraphy of the terminal Ediacaran Dengying Formation at the Gaojiashan section, South China [J]. *Geological Magazine*, 2019, 156(11): 1924–1948.
- [49] XIAO Di, TAN Xiucheng, XI Aihua, et al. An inland facies-controlled eogenetic karst of the carbonate reservoir in the Middle Permian Maokou Formation, southern Sichuan Basin, SW China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 72: 218–233.
- [50] DAVIES G R, SMITH L B, Jr. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(11): 1641–1690.
- [51] 左银辉, 郑紫芸, 邵大力, 等. 二氧化碳成因、成藏主控因素及脱气模式研究综述[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(29): 12356–12367. ZUO Yinhuai, ZHENG Ziyun, SHAO Dali, et al. Reviews on CO₂ genesis, controlling factors of hydrocarbon accumulation and degassing model [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(29): 12356–12367.
- [52] ZHANG Tongwei, ZHANG Mingjie, BAI Baojun, et al. Origin and accumulation of carbon dioxide in the Huanghua Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. *AAPG Bulletin*, 2008, 92(3): 341–358.
- [53] 朱联强, 柳广弟, 宋泽章, 等. 川中古隆起北斜坡不同地区灯影组天然气差异及其影响因素——以蓬探1井和中江2井为例[J]. *石油科学通报*, 2021, 6(3): 344–355. ZHU Lianqiang, LIU Guangdi, SONG Zezhang, et al. The differences in natural gas from the Dengying Formation in different areas of the north slope of the central Sichuan Paleozoic uplift and its controlling factors—Taking Pengtan-1 and Zhongjiang-2 wells as examples [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2021, 6(3): 344–355.