

四川盆地蓬莱地区灯影组四段 超深层白云岩储集层特征及主控因素*

刘凯铭^{1,2} 王兴志^{1,2} 韦明洋^{1,2} 李 阳^{1,2}
陈 旺^{1,2} 王文之³ 李 勇³ 马 奎³

1 油气藏地质及开发工程国家重点实验室·西南石油大学, 四川成都 610500

2 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川成都 610500

3 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 四川成都 610041

摘要 作为四川盆地超深层油气资源的主力产层之一, 灯影组超深层碳酸盐岩储集层发育特征及其控制因素亟待进一步厘清。选取四川盆地内最新勘探突破的蓬莱地区灯影组四段超深层白云岩为主要研究对象, 在野外露头、钻井岩心、显微薄片、阴极发光、扫描电镜及物性测试数据等资料的基础上, 开展了储集层特征及主控因素等方面的研究。结果表明: (1) 蓬莱地区灯影组四段储集岩主要包括凝块石白云岩、叠层石白云岩、泡沫绵层白云岩和砂屑白云岩; 储集空间主要包括砂屑白云岩的晶间孔、晶间溶孔和溶洞, 凝块石白云岩、叠层石白云岩和泡沫绵层白云岩的原生格架孔洞和后期溶蚀作用形成的溶蚀孔缝等。(2) 凝块石白云岩和叠层石白云岩多发育孔洞缝型和孔洞型储集层, 均具有较好的物性, 孔隙度能达到 4% 以上, 但前者平均渗透率可达 $2.43 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 后者仅为 $0.35 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。(3) 综合分析成岩演化史, 认为灯影组四段储集层先后经历了沉积—准同生阶段、表生阶段、浅—中埋藏阶段和深层—超深层埋藏阶段的成岩改造。(4) 蓬莱地区灯影组四段储集层发育具有自台地内部向台地边缘逐渐减弱的分布规律, 总体上显示“相—断裂—溶蚀”三元综合成储模式。本研究明确了四川盆地蓬莱地区超深层白云岩储集层的特征及主控因素, 可为后续超深层油气资源勘探开发提供理论基础。

关键词 超深层碳酸盐岩 储集层特征 主控因素 灯影组 蓬莱地区 四川盆地

第一作者简介 刘凯铭, 男, 1997 年生, 西南石油大学硕士研究生, 研究方向为沉积学与储层地质学。
E-mail: Liu-kaiming-swpu@foxmail.com。

通讯作者简介 王兴志, 男, 1964 年生, 博士, 教授, 主要从事储层沉积学等方面的教学与研究工作。
E-mail: wxzswpu@163.com。

中图分类号: P588.24⁺5 文献标志码: A

Reservoir characteristics and main controlling factors of ultra-deep dolomite in the 4th Member of Sinian Dengying Formation in Penglai area, Sichuan Basin

LIU Kaiming^{1,2} WANG Xingzhi^{1,2} WEI Mingyang^{1,2} LI Yang^{1,2}
CHEN Wang^{1,2} WANG Wenzhi³ LI Yong³ MA Kui³

* 四川省自然科学基金重点项目“四川盆地深层—超深层白云岩溶蚀机理及成储效应”(编号: 24NSFSC0093) 资助。[Financially supported by the Natural Science Foundation of Sichuan Province “Solvation mechanism and storage effect of deep-ultra-deep dolomite in Sichuan Basin” (No. 24NSFSC0093)]

收稿日期: 2024-05-11 改回日期: 2024-11-16

1 State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation-Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

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

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

Abstract The Dengying carbonate reservoirs, as one of the primary producing units of ultra-deep hydrocarbon resources in the Sichuan Basin, is required for further studies on their characteristics and controlling factors. This paper focuses on the ultra-deep dolomite of the fourth member of the Dengying Formation in the recently explored Penglai area of the Sichuan Basin. The study examines the reservoir's petrological characteristics, pore spaces, classification of reservoir types, physical properties, diagenetic evolution, and the main controlling factors of the reservoirs. The analysis is based on field outcrop profiles, drilling cores, microsections, cathodoluminescence (CL) imaging, scanning electron microscopy (SEM) data, and physical property test results. The findings are as follows: (1) The primary lithologies of the fourth member of the Dengying Formation in the Penglai area include dolo-thrombolite, dolo-stromatolite, dolo-spongiomicrobialite, and sand-debris dolomite. The main reservoir spaces consist of primary framework pores and secondary dissolution pores formed by subsequent dissolution processes. (2) Fractured reservoirs, primarily composed of dolo-thrombolite and dolo-stromatolite reservoirs with partial bedding pore development, typically exhibit favorable physical properties. The average porosity can exceed 4%, with the average permeability of the former reaching $2.43 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, while the average permeability of the latter is only $0.35 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. (3) A comprehensive analysis of diagenetic evolution reveals that the microbial carbonate reservoirs of the fourth member of the Dengying Formation have undergone a sequence of stages: sedimentary-quasi-symbiotic, supergene, shallow-to-medium burial, and deep-to-ultra-deep burial stages. (4) Analysis of reservoir distribution patterns in the study area indicates that the reservoir distribution weakens from the platform interior to the platform edge. Overall, the ultra-deep dolomite in the fourth member of the Dengying Formation in the Penglai area follows a ternary reservoir model characterized by "sedimentary facies-fault-dissolution." This study provides key insights into the characteristics and controlling factors of the ultra-deep dolomite reservoirs in the Penglai area of the Sichuan Basin, offering significant guidance for future ultra-deep oil and gas exploration in the region.

Key words ultra-deep carbonates, reservoir characteristics, main controlling factors, Dengying Formation, Penglai area, Sichuan Basin

About the first author LIU Kaiming, born in 1997, is a master's student at Southwest Petroleum University, with research interests in sedimentology and reservoir geology. E-mail: Liu-kaiming-swpu@foxmail.com.

About the corresponding author WANG Xingzhi, born in 1964, Ph.D., professor, is mainly engaged in teaching and research in reservoir sedimentology. E-mail: wxzswpu@163.com.

当今世界对油气资源的需求日益增加,但随着浅层资源的逐渐减少,寻找更深层的资源已成为当前油气勘探的重要趋势(陈代钊和钱一雄, 2017)。国内外油气界将深度大于 6000 m 的目的层定义为超深层,而世界上最早的超深层油气勘探始于 20 世纪 50 年代的北美地区(石昕等, 2005; 操应长等, 2022; 贾承造和张水昌, 2023)。近十余

年来,全球深层—超深层油气新增可采储量达 5%~27% (贾爱林等, 2024)。中国的超深层油气藏勘探开发主要开展于近 20 年中,并先后在四川盆地、塔里木盆地等地区发现元坝、安岳、威远、克深、牛东等大型—特大型超深层油气藏(李剑等, 2019; 李亚林, 2024)。2020—2023 年,中国石油西南油气田分公司于川中古隆起蓬莱地区部署

的 PT101 井和 PT1 井在灯影组测试日产气均超过 $1 \times 10^6 \text{ m}^3$ ，再次实现继安岳气田后又一超深层领域勘探的重大突破，这充分说明中国沉积盆地超深层具有巨大的油气勘探潜力（孙龙德等，2013；马永生等，2020；洪海涛等，2020；王雅萍等，2024）。

不同于浅层油气藏，超深层油气藏往往面临更为复杂的地质条件，如四川盆地超深层油气藏地层时代古老，历经多期次构造演化，且深部面临更复杂的成岩环境（鲍志东等，2019），故其储集层具有极高的非均质性。前人针对四川盆地安岳、威远等高产超深层灯影组气藏的储集层开展了系列研究，认为四川盆地灯影组白云岩储集层主要受沉积相带、成岩作用、构造作用和海平面升降作用控制（斯春松等，2014；赵路子等，2020），或者微生物类型、沉积相、白云化作用、风化壳岩溶和埋藏热液改造是主要的影响因素（宋金民等，2017；张宇慧等，2023；马永生等，2024），也有学者认为复合圈闭对储集层有重要影响（马永生等，2024）。众多观点使得对蓬莱地区灯影组储集层特征及主控因素等目前仍未达成统一的认识，严重制约了下一步针对四川盆地等地区超深层油气资源勘探及优质储层预测。

蓬莱地区作为四川盆地全新的油气勘探区块，区内灯影组四段发育较为完整且主体部分埋深均大于 6000 m，这为超深层碳酸盐岩储集层特征及主控因素的研究提供了绝佳样本。为更好地与生产相结合，笔者基于野外露头、钻井岩心、显微薄片、阴极发光、扫描电镜及物性测试数据等地质资料，对蓬莱地区灯影组四段超深层碳酸盐岩储集层特征进行了系统分析，以明确控制该地区超深层储集层发育的主控因素，为后续超深层油气资源勘探开发提供理论参考。

1 区域地质概况

蓬莱地区西侧和北侧与德阳—安岳裂陷区毗邻（图 1-a），东侧和南侧紧邻川中古隆起主体区域，整体位于现今四川盆地川中平缓构造带北部（图 1-b）。四川盆地在地质历史时期经历了多期改造：自桐湾运动 II 幕至海西期，蓬莱地区多次发生抬升剥蚀（何登发等，2011；黄福喜等，2011；杜金虎等，2016；帅燕华等，2023）；印支早、中

期，盆地发生构造反转并形成东南隆起、西北沉降的格局（宋文海，1996；吴冲龙等，2006；杨柳等，2023）；印支晚期至燕山期，多次沉降和抬升使得侏罗系上部地层遭受大面积剥蚀（四川油气区石油地质志编写组，1989；许海龙等，2012），其中蓬莱地区相对于高一磨地区则发生沉降，形成现今的川中古隆起北翼的单斜构造。研究区内发育一系列走滑断裂带，震旦系、寒武系—奥陶系、二叠系为主要活动时期，具多期次叠加特征，剖面上以直立线性构造和花状构造为主，平面上发育斜列、雁列断层及马尾构造（邬光辉等，2023）。

灯影组沉积时期，蓬莱地区整体发育台地边缘相，根据岩性自下而上可分为 4 段（罗冰等，2015；王文之等，2016）：灯一段主要为陆表海沉积，微生物不发育；灯二段发育大规模富含微生物的台地边缘型碳酸盐岩，但灯二段沉积晚期的桐湾 I 幕运动使该地区发生抬升暴露；灯三段为富含碎屑岩的混积陆棚沉积；至灯四段沉积时期，在桐湾运动影响下发生海退，相对海平面再次下降，蓬莱地区水体变浅，微生物再次富集，区内发育微生物丘、颗粒滩和丘间 3 类亚相，其中微生物丘以发育微生物白云岩（凝块石白云岩、叠层石白云岩和泡沫绵层白云岩）为主，颗粒滩主要发育砂屑白云岩，丘间则多为泥—粉晶白云岩并在台地边缘地区形成丘—滩复合体（图 1-c）。

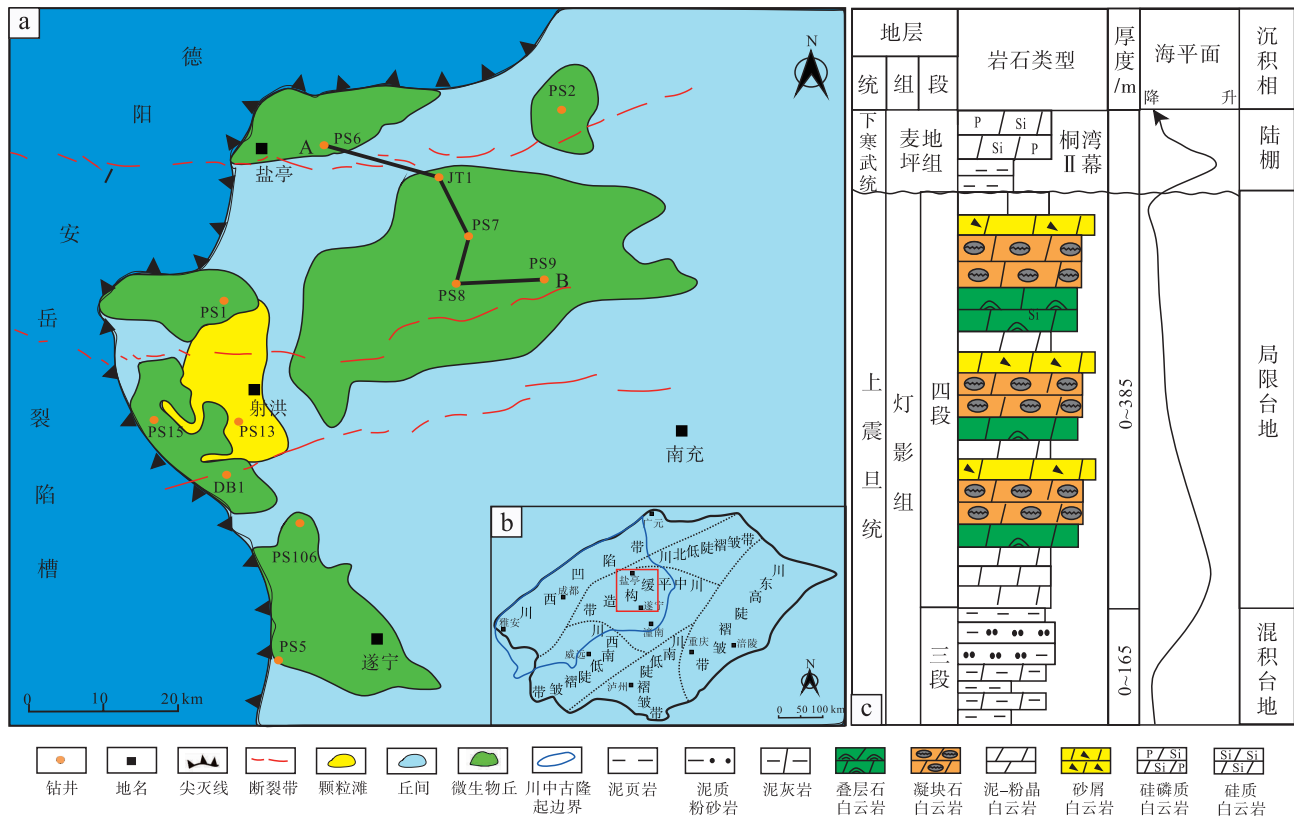
2 储集层特征

2.1 主要岩石类型及特征

基于邻区灯影组野外露头、区内钻井岩心的宏观与微观研究，认为蓬莱地区灯影组四段的储集岩主要有叠层石白云岩、凝块石白云岩、泡沫绵层白云岩和砂屑白云岩。

1) 叠层石白云岩。宏观上可见明暗相间的纹层，其中纹层呈水平—波状起伏（图 2-a，2-b），厚度略有变化，横向连续性好，纹层间可见顺层发育的孔、洞（图 2-c）。这类岩性是区内最主要的储集岩类之一，但若发生硅化作用，则储集性能明显降低（图 2-d）。

2) 凝块石白云岩。为灯影组最为发育和储集性能最好的一类储集岩。宏观上，呈灰白色—浅灰褐色或灰黑色—黑灰色，常具“花斑状”构造



a—灯影组四段沉积相图 (据马奎等, 2024; 有修改); b—研究区位置图 (据宋金民等, 2017; 李洪奎等, 2020; 罗焱等, 2022; 有修改); c—灯影组四段地层综合柱状图 (据罗冰等, 2015; 宋金民等, 2017; 李洪奎等, 2019; 罗焱等, 2022; 有修改)

图 1 四川盆地蓬莱地区灯影组四段沉积相及地层综合柱状图

Fig. 1 Sedimentary facies and comprehensive histogram of the Fourth Member of Dengying Formation in Penglai area, Sichuan Basin

(图 2-e) 或“雪花状”构造(图 2-f); 可见大量半充填的孤立孔洞(图 2-g), 大小一般 1~15 mm, 面孔(洞)率多大于 5%, 若有后期构造和溶蚀作用的改造, 可形成蜂窝状溶孔、溶洞(图 2-h)。微观上, 深色部分岩性均一致密, 主要由暗色、富含微生物的泥晶白云岩组成(图 2-i); 浅色部分由多期亮晶白云岩组成, 局部见硅质和沥青充填(图 2-j)。

3) 泡沫绵层白云岩。宏观上, 可见 0.1 mm 级的浅色“似颗粒”密集分布(图 2-k)。微观上, 为多个泡状体粘结形成, 多呈圆形、椭圆形, 部分为不规则形态, 边缘由于高度泥晶化或含有机质而呈暗黑色, 颗粒内部可见沥青与多期白云石半充填一充填(图 2-l)。

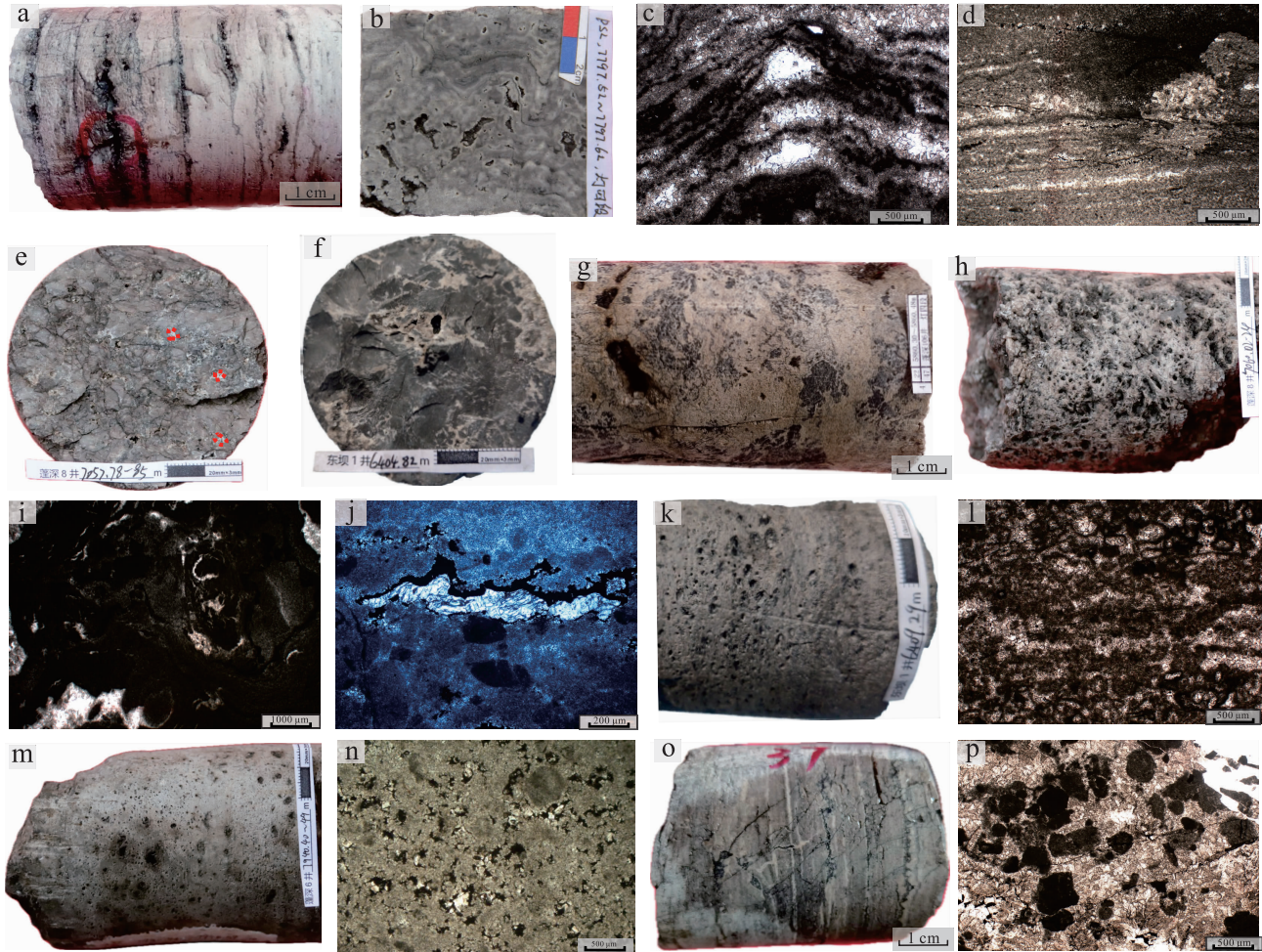
4) 砂屑白云岩。研究区内砂屑白云岩可分为 2 种: 一种宏观上岩心呈灰白色, 针孔发育(图 2-m), 微观下具明显的残余颗粒结构(图 2-n), 粒间多被细粒亮晶白云石胶结, 后期

溶解作用形成较多的粒间溶孔和粒内晶间溶孔, 孔径一般小于 1 mm, 储集性能好。另一种宏观上岩心较为致密, 颜色较暗(图 2-o), 微观下颗粒形态明显, 富含藻类, 其中富藻颗粒由泥晶白云岩构成, 呈暗黑色, 磨圆程度不高(图 2-p), 颗粒边缘较为模糊, 与胶结物呈渐变接触, 储集性能较好。

2.2 储集空间类型及特征

根据宏、微观形态及大小, 将蓬莱地区灯影组四段储集层的储集空间分为孔、洞、缝 3 个大类, 并在每个大类下依据其形成顺序及成因进一步分类。

1) 孔隙。可分为原生孔隙和次生孔隙 2 类。原生孔隙多受沉积环境及岩石组构控制, 按形成方式进一步分为粒间孔和格架孔 2 类: 粒间孔出现频率较低, 孔径大致为 0.1 mm, 常见于砂屑云岩中(图 3-a), 多形成于水动力较强的浅滩环境中的



a—叠层石白云岩，见明暗相间且平行的互层，PS7 井，7240.89 m；b—叠层石白云岩，见明显波状起伏的明暗互层，PS2 井，7797.52 m；c—叠层石白云岩，富藻层和富屑层间可见顺层格架孔，PS2 井，7797.52 m，单偏光；d—叠层石白云岩，纹层平行，可见局部硅化，PS7 井，7240.97 m，单偏光；e—凝块石白云岩，见花斑状构造，PS8 井，7057.78 m；f—凝块石白云岩，见雪花状构造，DB1 井，6404.82 m；g—凝块石白云岩，见孤立孔洞，PS106 井，5860.30 m；h—凝块石白云岩，见蜂窝状孔洞，PS8 井，7060.02 m；i—凝块石白云岩，溶蚀缝被白云石、沥青充填，PS8 井，7049.27 m，单偏光；j—凝块石白云岩，孔洞被白云石、沥青半充填，PS8 井，7053.46 m，单偏光；k—泡沫绵层白云岩，DB1 井，6409.29 m；l—泡沫绵层白云岩，内部可见格架孔，PS7 井，7240.10 m，单偏光；m—砂屑白云岩，见大量针孔发育，PS6 井，7940.40 m；n—砂屑白云岩，粒间溶孔发育，被沥青半充填，PS5 井，5547.31 m；o—砂屑白云岩，宏观上较为致密，PS7 井，7239.85 m；p—砂屑白云岩，可见大量富含藻类的颗粒，PS7 井，7239.49 m，单偏光

图 2 四川盆地蓬莱地区灯影组四段主要储集岩类型

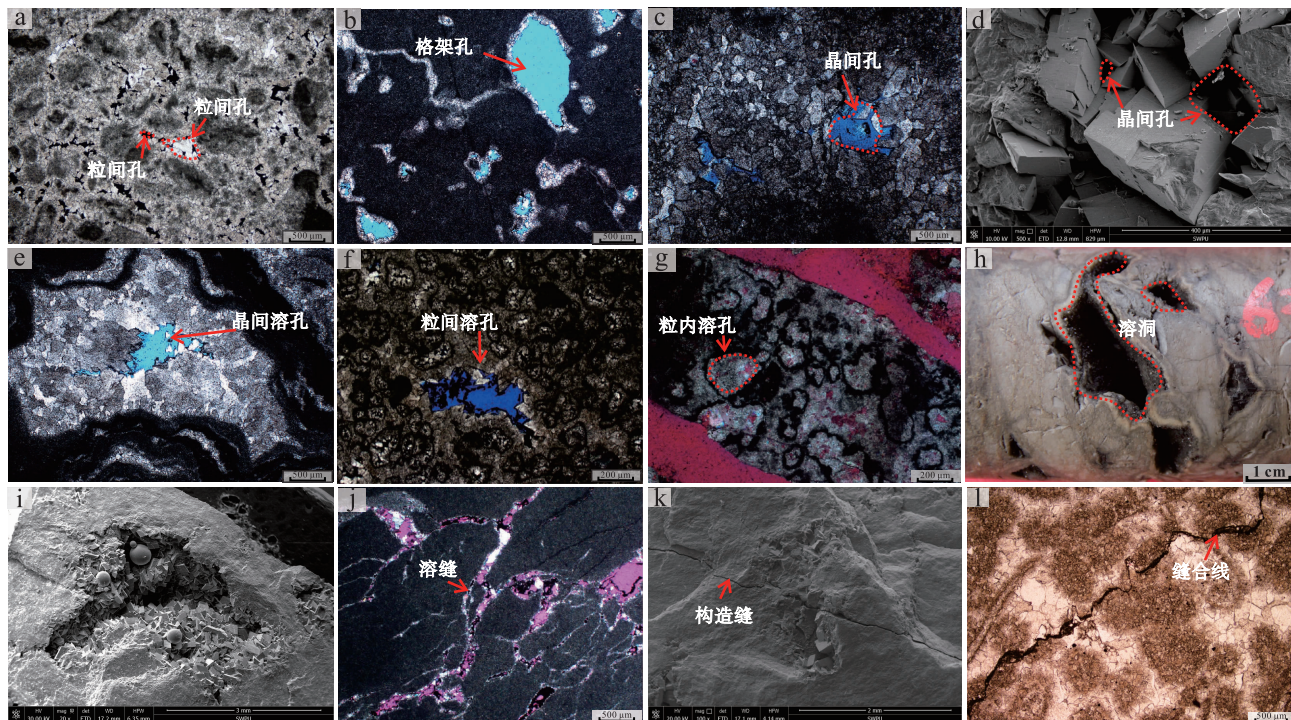
Fig. 2 Main reservoir rock types of the Fourth Member of Dengying Formation in Penglai area, Sichuan Basin

内碎屑或藻颗粒之间；格架孔多为同生—准同生期微生物产生的气泡或藻类粘结而成，多呈网格状或窗格状(图 3-b)。次生孔隙主要分为晶间孔、晶间溶孔、粒间溶孔和粒内溶孔 4 类：晶间孔形态较为规则，多呈棱角状或多边形状(图 3-c, 3-d)，孔径 0.01 ~ 0.10 mm；晶间溶孔形态不规则(图 3-e)，大小不等，孔径最大 0.30 mm，多为 0.02~0.10 mm；粒间溶孔形态不规则，边缘常呈不规则溶蚀港湾状(图 3-f)，孔径 0.05~0.40 mm，

且当溶蚀作用很强烈时，可形成超大孔隙；粒内溶孔孔径 0.05~0.20 mm，常被沥青、石英、后期白云石等充填(图 3-g)。

2) 溶洞。多为次生成因，是在成岩过程中经溶蚀作用形成的，为灯四段最重要的储集空间类型。通常直径大于 2 mm，其中小洞 2~5 mm，中洞 5~20 mm，大洞大于 20 mm。在灯四段的岩心中，溶洞较为发育，形态多样，直径变化较大(图 3-h, 3-i)。

3) 裂缝。是一种特殊的储集空间类型，既可



a—粒间孔, 砂屑白云岩, 沥青和白云石充填, PS9 井, 6893.90 m, 单偏光; b—格架孔, 凝块石白云岩, PS2 井, 7799.06 m, 单偏光; c—晶间孔, 粉晶白云岩, PS2 井, 7781.86 m, 单偏光; d—晶间孔, PS2 井, 7797.19 m, 扫描电镜照片; e—晶间溶孔, 叠层石白云岩, 港湾状溶蚀, PS2 井, 7779.84 m, 单偏光; f—粒间溶孔, 泡沫绵层白云岩, 马牙状溶蚀, DB1 井, 6409.43 m; g—粒内溶孔, 泡沫绵层白云岩, PS15 井, 6856 m, 正交偏光; h—溶洞, 凝块石白云岩, 见硅质充填, PS2 井, 7786.05 m; i—溶洞, 粒状沥青充填, 叠层石白云岩, PS2 井, 7790.05 m, 扫描电镜照片; j—溶缝, 凝块石白云岩, 白云石和沥青充填, PS9 井, 6966.63 m, 正交偏光; k—构造缝, PS8 井, 7048.24 m; l—缝合线, 砂屑白云岩, 沥青充填, PS1 井, 6782.65 m, 单偏光

图 3 四川盆地蓬莱地区灯影组四段主要储集空间类型

Fig. 3 Main reservoir space types of the Fourth Member of Dengying Formation in Penglai area, Sichuan Basin

作为储集空间, 也可作为各类流体的渗流通道。根据成因可将裂缝划分为溶缝(图 3-j)、构造缝(图 3-k)和缝合线(图 3-l) 3 类。在长期构造运动影响下, 研究区裂缝虽较为发育, 但分布不均且规模较小。此外, 大部分裂缝都被白云石、有机质以及石英等半充填和全充填。

2.3 储集层类型及特征

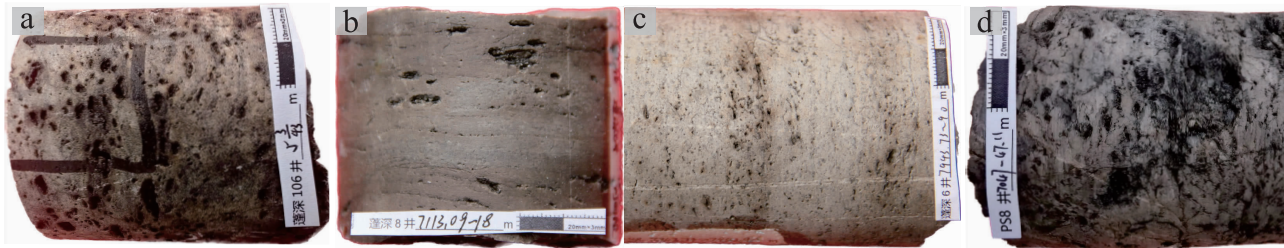
根据储集空间的类型及其组合特征, 将蓬莱地区灯影组四段的储集层划分为孔洞型、孔隙型和孔洞缝型储集层 3 类。

1) 孔洞型储集层。是研究区最主要且最发育的储集层类型, 多见于凝块石白云岩和叠层石白云岩中, 格架孔洞及溶蚀孔洞是主要的储集空间。根据孔洞形态进一步分为蜂窝状孔洞(图 4-a)、顺层孔洞(图 4-b)和孤立孔洞(图 3-h) 3 类, 孔径一般介于 2~20 mm 之间, 部分岩心可见 20 mm 以

上较大型溶孔溶洞, 但连通性较差。此类储集层孔洞较为密集, 分布均匀, 其中蜂窝状孔洞常见于凝块石白云岩中, 多呈圆形或椭圆形, 顺层孔洞常见于叠层石白云岩中, 多为顺层拉长的扁圆或椭圆形, 而孤立孔洞常见于凝块石白云岩中, 泡沫绵层白云岩中偶见, 多呈不规则圆形或椭圆形。

2) 孔隙型储集层。多见于砂屑白云岩中, 储集空间主要为粒间溶孔、晶间孔、晶间溶孔, 见少量粘连格架孔。孔径通常小于 2 mm, 宏观上类似“针孔”(图 4-c)。一般情况下, 该类储集层多为原生孔隙经后期溶蚀改造形成, 裂缝发育较少。

3) 孔洞缝型储集层。在研究区较为常见, 多见于凝块石白云岩中, 次生溶孔和溶洞是主要的储集空间。相比于孔、洞, 裂缝虽然也作为储集空间, 但其主要是作为孔洞间联通的渗流通道(图 4-d)。与单一孔洞型储集层相比, 孔洞缝型储集层储集性能具有更高的优势, 其中孔、洞的存



a—孔洞型储集层，蜂窝状孔洞，PS106井，5864.91 m；b—孔洞型储集层，顺层孔洞，PS8井，7113.09 m；c—孔隙型储集层，宏观上多为针孔，PS6井，7943.73 m；d—孔洞缝型储集层，见垂直缝和水平缝与孔洞，PS8井，7047.00 m

图4 四川盆地蓬莱地区灯影组四段主要储集层类型

Fig. 4 Main reservoir types of the Fourth Member of Dengying Formation in Penglai area, Sichuan Basin

在极大地提高了储集性能，而裂缝的存在又为孔洞之间的连通提供了保障。该类储集层的发育受到沉积相和构造作用的共同控制，在研究区储集性能最好。

2.4 物性特征

蓬莱地区灯影组四段超深层碳酸盐岩124个岩样分析结果表明，其孔隙度为1.18%~11.69%。由于前人认为孔隙度小于2%时，碳酸盐岩储集层几乎不发育（陈泓位等，2024；赵虎等，2024），因此去除孔隙度小于2%的数据后，共得到有效数据104个，占比83.9%。孔隙度有效数据范围在2.00%~11.69%之间，平均值4.38%；渗透率在 $0.018 \times 10^{-3} \sim 16.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间，平均渗透率为 $1.64 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。进一步分析表明，凝块石白云岩物性最好，平均孔隙度4.38%，平均渗透率 $2.43 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；叠层石白云岩次之，平均孔隙度4.4%，平均渗透率 $0.35 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；泡沫绵层白云岩平均孔隙度2.88%，平均渗透率为 $0.15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；砂屑白云岩平均孔隙度2.33%，平均渗透率为 $0.34 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ （图5-a，5-b）。综合分析认为，研究区内储集岩储集性能以凝块石白云岩最好，叠层石白云岩、泡沫绵层白云岩和砂屑白云岩相对次之。

孔渗相关性分析结果表明，多数样品的孔隙度和渗透率呈正相关性（图5-c，5-d）。孔洞缝型储集层的孔隙度和渗透率均较高，是孔洞和裂缝共同影响所致。孔洞型储集层孔隙度较高，渗透率相对较低，是裂缝发育较差所致。孔隙型储集层的孔隙度较高而渗透率低，是裂缝不发育造成储集层连通性较差所致。故研究区内以孔洞缝型储集层物性最好，孔洞型储集层和孔隙型储集层虽各有优势，但物性上略低于孔洞缝型储集层。

3 成岩作用类型及储层演化

3.1 成岩作用类型

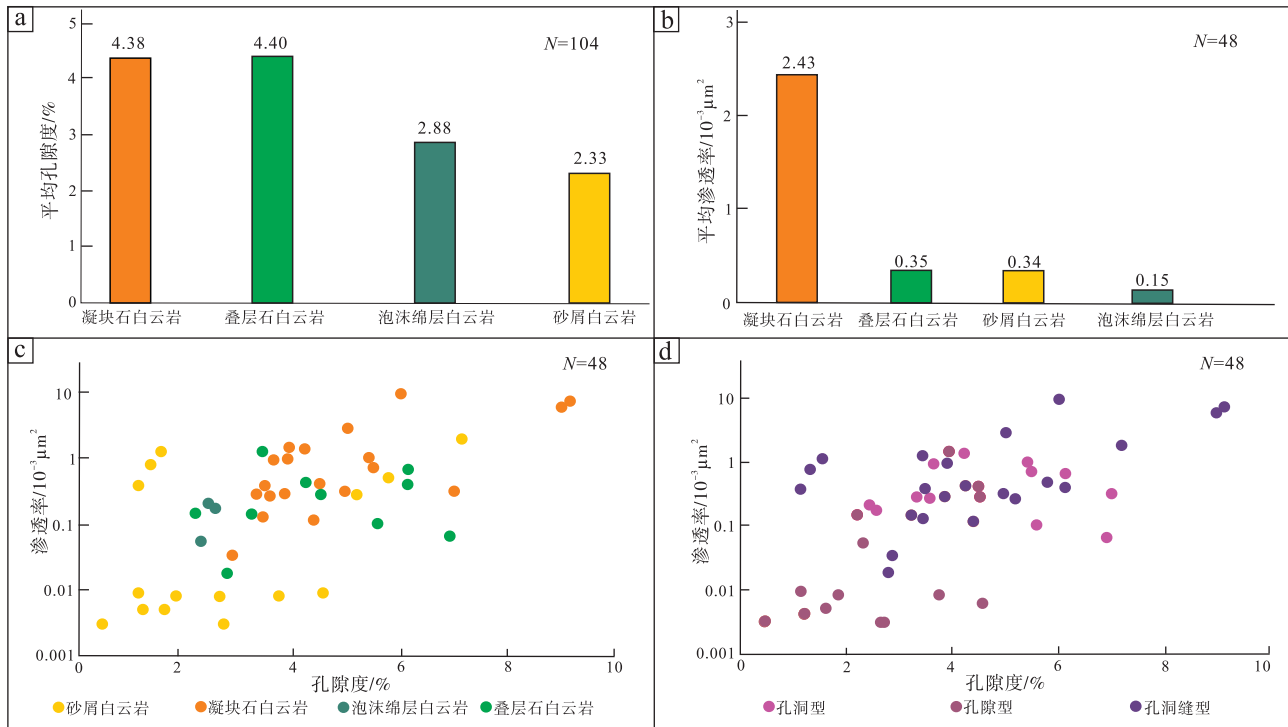
蓬莱地区灯四段成岩作用主要分为建设性和破坏性2类。破坏性成岩作用对储集层的发育起破坏作用，会降低储集层物性，主要包括压实作用、胶结作用和硅化作用。建设性成岩作用对储集层的发育起正向作用，会增加储集层物性，主要包括重结晶作用和溶蚀作用。

3.1.1 破坏性成岩作用

1) 压实作用。沉积物在沉积成岩全过程中均受到压实作用的影响。沉积早期多为机械压实作用，但由于原生充填的白云石对孔隙具有一定的支撑作用，从而在一定程度上降低了压实作用对原始孔隙度的影响。随着埋藏深度的增加，温度、压力变化更加复杂，沉积物遭受压实作用而发生破碎和形变（图6-a），并使孔隙度降低。

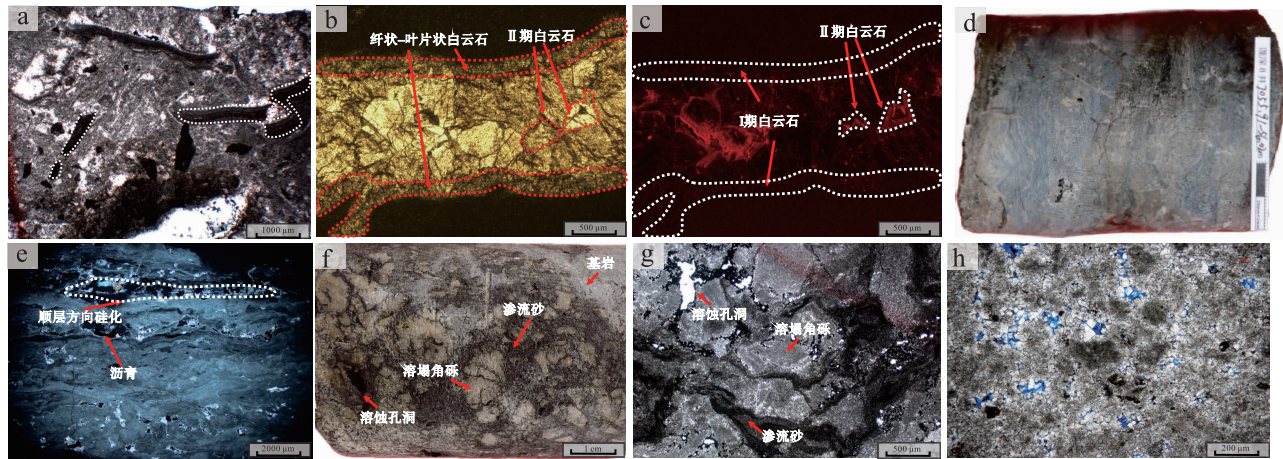
2) 胶结作用。研究区内可在原始结构保存较好的原生格架孔中见到胶结物充填孔隙，这可使原生孔隙度降低。此外，在较大的溶蚀孔隙中可见多期次的胶结物充填（图6-b，6-c），而这些胶结物均会使储集层的储集性能降低。

3) 硅化作用。在研究区，硅化作用对储集层的破坏在叠层石白云岩中最为明显，表现为顺层方向具有较强的硅化作用，也可见到整段岩心被硅化的现象（图6-d，6-e）。硅化的成因可能与准同生期藻类腐烂时产生的酸性环境有关。硅化作用可使岩石更加致密从而导致储集空间被破坏，此外大量的硅质发育也使后期的溶蚀作用受到阻碍。



a—超深层碳酸盐岩平均孔隙度柱状图；b—超深层碳酸盐岩平均渗透率柱状图；c—储集岩孔渗相关性散点图；d—储集层孔渗相关性散点图
图 5 四川盆地蓬莱地区灯影组四段储集层物性特征

Fig. 5 Reservoir physical properties diagram of the Fourth Member of Dengying Formation in Penglai area, Sichuan Basin



a—压实作用造成沉积物破碎形变, PS9 井, 6984.77 m, 单偏光; b—早期孔洞中充填纤状-叶片状白云石, PS2 井, 7756.25 m, 单偏光; c—孔洞中见 2 期白云石胶结物, PS2 井, 7756.25 m, CL; d—岩心发生大面积硅化, PS8 井, 7055.91 m; e—顺层方向发生硅化, 孔洞间可见沥青充填, PS8 井, 7057.59 m, 正交偏光; f—岩心上见渗流砂和溶塌角砾, PS106 井, 5851.82 m; g—渗流砂和溶塌角砾, PS106 井, 5851.82 m, 单偏光; h—重结晶作用形成的残余砂屑白云岩内部见晶间孔, PS5 井, 5540.43 m, 单偏光

图 6 四川盆地蓬莱地区灯影组灯四段成岩作用类型

Fig. 6 Diagenesis types of the Fourth Member of Dengying Formation in Penglai area, Sichuan Basin

3.1.2 建设性成岩作用

1) 溶蚀作用。是研究区最主要的建设性成岩作用, 早期溶蚀主要为准同生溶蚀和表生岩溶作用。在沉积期, 藻类的死亡会释放某些气体, 使部

分沉积物发生溶蚀而造成孔洞扩大。桐湾运动致使沉积物发生抬升并遭受大气淡水淋滤, 从而发育溶孔、溶洞等溶蚀孔洞(图 6-f, 6-g)。随着埋藏深度增加, 埋藏溶蚀作用逐渐增强。有机质热成熟时

释放的有机酸会对白云岩产生溶蚀，增加储集层孔隙度。埋藏有机酸溶蚀可将原有孔洞进行溶蚀扩大或形成新的溶蚀孔洞，并出现沥青残留(图 3-i)，虽然沥青的残留会使储集层孔隙度降低，但整体而言，溶蚀作用产生的大量孔洞可以使储集层性能变好。

2) 重结晶作用。研究区灯影组四段的重结晶作用多见于砂屑白云岩中，镜下可见砂屑颗粒经过重结晶作用后转变为较大的晶粒。同时，重结晶过程中的晶粒变大可促使岩石中原有的较小晶间孔变为较大晶间孔(图 6-h)。因此，重结晶作用不仅提高了储集层的孔隙度和渗透率，而且也为后期的溶蚀改造提供了条件。

3.2 储集层演化

对蓬莱地区灯四段储集层成岩演化进行分析，认为其储集层演化主要包括 4 个阶段：同生—准同生阶段，表生阶段，浅—中埋藏阶段和深—超深层埋藏阶段(图 7)。

1) 同生—准同生阶段。该阶段主要受沉积作用、溶蚀作用和胶结作用影响。首先，在沉积阶段

发育大量原生格架孔、粒间微孔和粒间孔，孔隙度约 50%(图 8-a)。至准同生期，微生物死亡和分解产生的微生物气体使沉积物中形成“鸟眼孔”，同时生物气溶解后形成的酸性环境可对沉积物进行溶蚀，孔洞中见呈叶片状的白云石胶结物(图 6-b, 6-c)。该阶段的孔隙度可大幅度下降至约 15%(罗冰等, 2015)。

2) 表生阶段(震旦纪末期)。桐湾运动 II 幕期间，研究区地层抬升暴露，灯四段顶部遭受表生溶蚀作用而产生选择性溶蚀，其中鸟眼孔和格架孔等原生孔隙发生溶蚀扩大(图 8-b)，可见溶塌角砾和渗流砂(图 6-f, 6-g)。该阶段，灯四段孔洞以各类溶孔及粒间孔为主，孔隙度有所提高，可达 15%~20%(罗冰等, 2015; 李毕松等, 2023)。

3) 浅—中埋藏阶段(表生阶段后至早侏罗世前)。随着时间推移，地壳下沉，灯四段再次被埋藏。至奥陶纪，埋藏深度达 1500~2000 m，古原油开始生成(施春华等, 2022)，孔洞中可发生一定程度的重结晶(图 8-c)，早期形成的格架孔和鸟眼孔逐渐被亮晶白云石半充填，且部分白云岩的裂

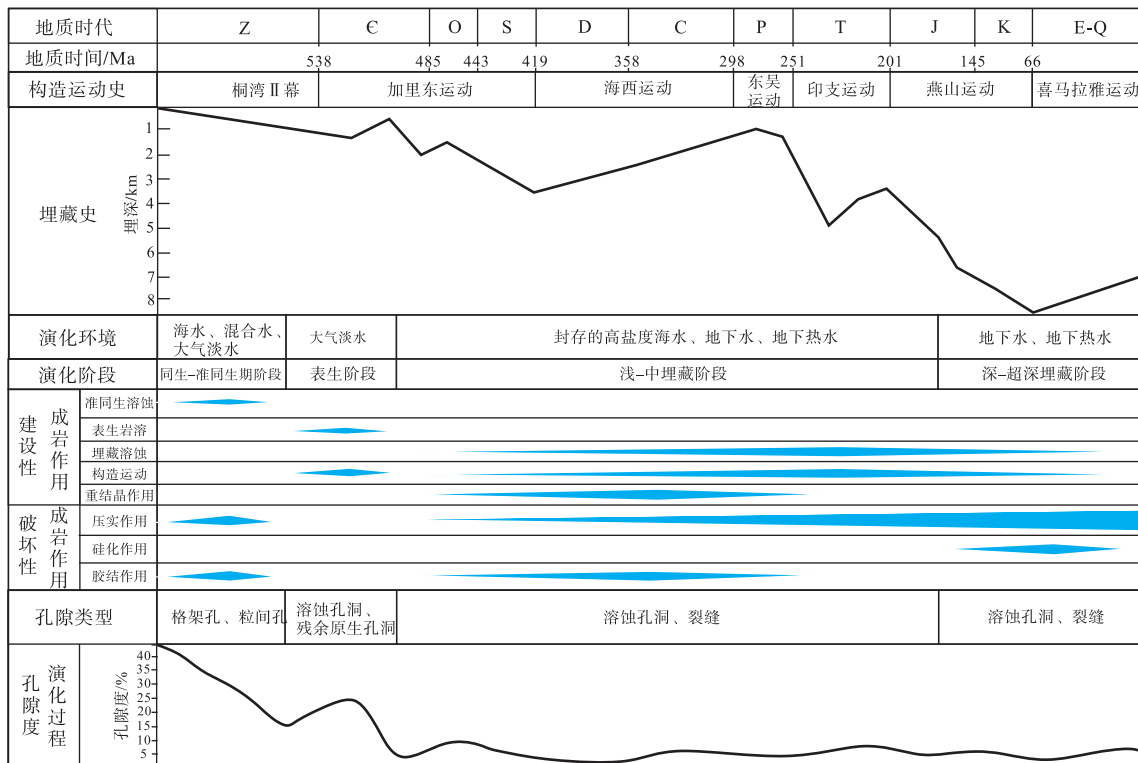


图 7 四川盆地蓬莱地区灯影组四段成岩演化 (据王兴志等, 2000; 罗冰等, 2015; 周正, 2016; 有修改)

Fig. 7 Diagenesis evolution diagram of the Fourth Member of Dengying Formation in Penglai area, Sichuan Basin

(modified from Wang *et al.*, 2000; Luo *et al.*, 2015; Zhou, 2016)

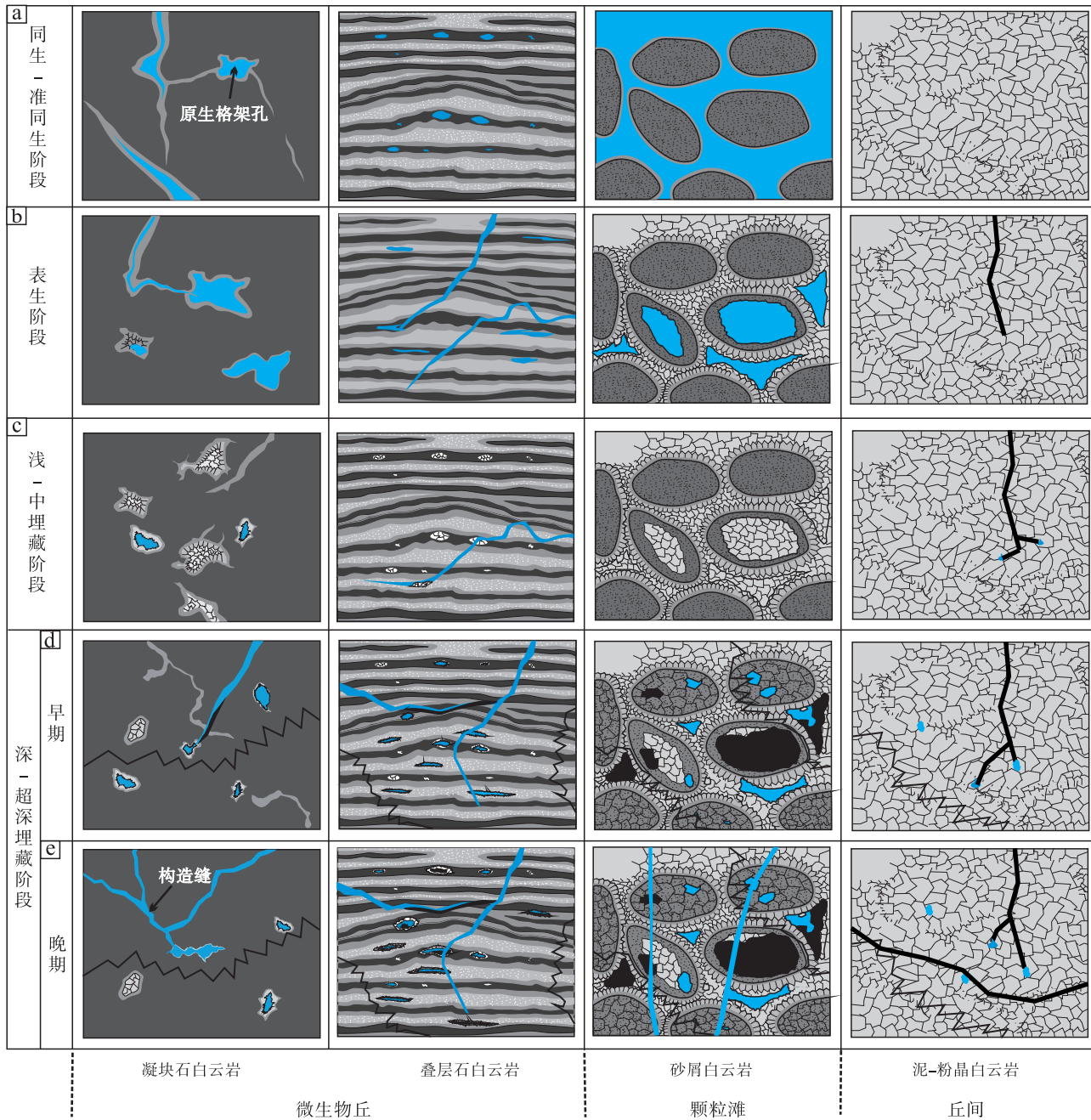


图 8 四川盆地蓬莱地区灯影组四段孔隙演化

Fig. 8 Pore evolution of the Fourth Member of Dengying Formation in Penglai area, Sichuan Basin

缝和孔洞中可发生第 2 期亮晶白云石胶结(图 6-b, 6-c), 造成孔隙度降低至 5% ~ 10% (谷一凡, 2020)。早侏罗世之前, 埋藏深度进一步增大, 可达 2000~4000 m, 此时埋藏溶蚀作用较为明显, 早期孔洞及孔洞中的充填物被有机酸部分溶解, 后被少量硅质和沥青充填一半充填(图 6-e)。之后, 随着有机酸浓度的降低, 地层中流体的酸碱性质发生变化, 导致早期孔隙中发生白云石沉淀, 这造成

孔隙度进一步降低至 4% (王兴志等, 2000; 周正, 2016)。

4) 深-超深层埋藏阶段(中-晚侏罗纪至现今)。中-晚侏罗世, 地层进入超深层埋藏阶段, 埋深超过 6000 m。此时孔隙中的液态烃发生裂解, 裂解过程中形成的有机酸溶蚀仍对储集层产生影响, 可形成一定数量的溶蚀孔洞和缝合线(图 8-d), 并发生沥青充填; 此外, 在含 Si 热液

主导下会发生硅化作用（杨磊磊等，2024）。至后期，受喜马拉雅运动影响，研究区地层再次发生抬升，灯影组地层发育大量裂缝（图 3-k；图 8-e），这极大地改善了储集层的渗透性。

自埋藏至今，多期构造运动造成研究区灯影组四段经历了反复的抬升与沉降。在抬升剥蚀、大气淋滤及地层压实、溶蚀、充填、重结晶等多种作用的多期次影响下，灯四段储集空间不断被破坏和改善，形成了现今所见的各种裂缝、溶孔、溶洞等储集空间，孔隙度稳定在 4% 左右（王兴志等，2000；周正，2016）。

4 储集层展布特征

由图 9 可见，蓬莱地区储集层整体较为发育。从单井上看，储集层多分布于灯四段中部，整体较为密集。区内以孔洞型储集层和孔洞缝型储集层较为发育，横向连续性较好，分布较广。从微生物丘一滩内部向外，储集层的厚度有所减小，相反，在微生物丘一滩内部储集层发育较好。如 PS9 井，由于靠近微生物丘一滩边缘，其储集层发育相对较差，而 JT1 井处于微生物丘一滩中心，主要发育凝块石白云岩和叠层石白云岩等，储集层类型以孔洞型储集层和孔洞缝型储集层为主，厚度较大。

5 储集层主控因素分析

储集层的形成演化及分布是多种因素共同影响和控制的结果。超深层储集层由于其埋藏深度大、温度和压力高，形成条件复杂，因此其控制因素也更为复杂。综合分析，认为蓬莱地区灯影组四段储集层主要表现为沉积相（沉积作用）-断裂（构造作用）-溶蚀（成岩作用）三元综合成储模式。

5.1 沉积相（沉积作用）

沉积相不仅决定储集岩石类型，还影响着原生孔隙的分布及后期成岩作用。蓬莱地区在灯四段沉积时期主要位于台地边缘，微生物丘、颗粒滩和丘间沉积发育（图 10），以发育凝块石白云岩、叠层石白云岩、泡沫绵层白云岩、砂屑白云岩和泥一粉晶白云岩等为主。微生物丘亚相和颗粒滩亚相中的格架孔、粒间孔等原生孔隙发育，这些孔隙在被亮晶白云石弱充填后大多保留下来，成为现今灯影组

储集层中主要的储集空间。丘间亚相泥一粉晶白云岩在沉积时晶间孔虽然发育，但后期强压实作用导致晶间孔大幅缩小，现今储集性能差。

沉积相与物性关系（图 11）研究表明：研究区灯四段中微生物丘亚相以凝块石白云岩、叠层石白云岩、泡沫绵层白云岩为主，孔渗性最高，物性最好，属于最有利于储集层形成与演化的沉积相带；颗粒滩亚相以砂屑白云岩为主，物性较好，属于较有利于储集层形成与演化的沉积相带；而丘间亚相以泥一粉晶白云岩为主，物性最差，属于较一般的储集相带。

5.2 断裂（构造作用）

构造作用对蓬莱地区灯四段储集层的发育具有重要影响。

一是控制古地貌及沉积相带的展布（邬光辉等，2023；文龙等，2024）。灯影组沉积时期，与桐湾运动有关的拉张断裂在四川盆地形成了槽台相间的沉积格局，研究区主体处于德阳—安岳拉张槽东侧边缘浅水区（图 1-a），属于台地边缘相带。该区域是微生物大规模分布的相带，有利于微生物丘和颗粒滩的发育（金振奎等，2013；谢武仁等，2021），从而为区内丘一滩复合型储集层的发育奠定了基础（赵文智等，2022）。

二是影响裂缝的分布。构造运动的抬升与沉降，可以使地层中形成大量裂缝（图 3-k）。灯四段沉积末期的桐湾 II 幕运动，使研究区整体抬升暴露并遭受大气淡水的淋滤作用，大气淡水沿构造裂缝向下运移，对地层进行溶蚀，形成一定数量的溶蚀孔洞（图 3-h）。同时，裂缝的存在可以增强孔洞间油气的运移：从垂向上看，图 4-d 裂缝发育，其孔隙度和渗透率分别达 5.63% 和 $0.62 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，物性较好，而图 4-b 不发育裂缝，其孔隙度和渗透率分别为 3.22% 和 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，物性较裂缝发育处差；从平面上看（图 1-a），PS1 井远离断裂带，其岩石平均渗透率为 $0.42 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；而 PS9 井靠近断裂带，其岩石平均渗透率可达 $1.28 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，明显高于远离断裂带的 PS1 井，这也是其裂缝更为发育所致。

此外，古隆起的抬升可导致热液流体温度降低，使流体处于不饱和状态，进而增强对碳酸盐岩矿物的溶解能力（马永生等，2014）。

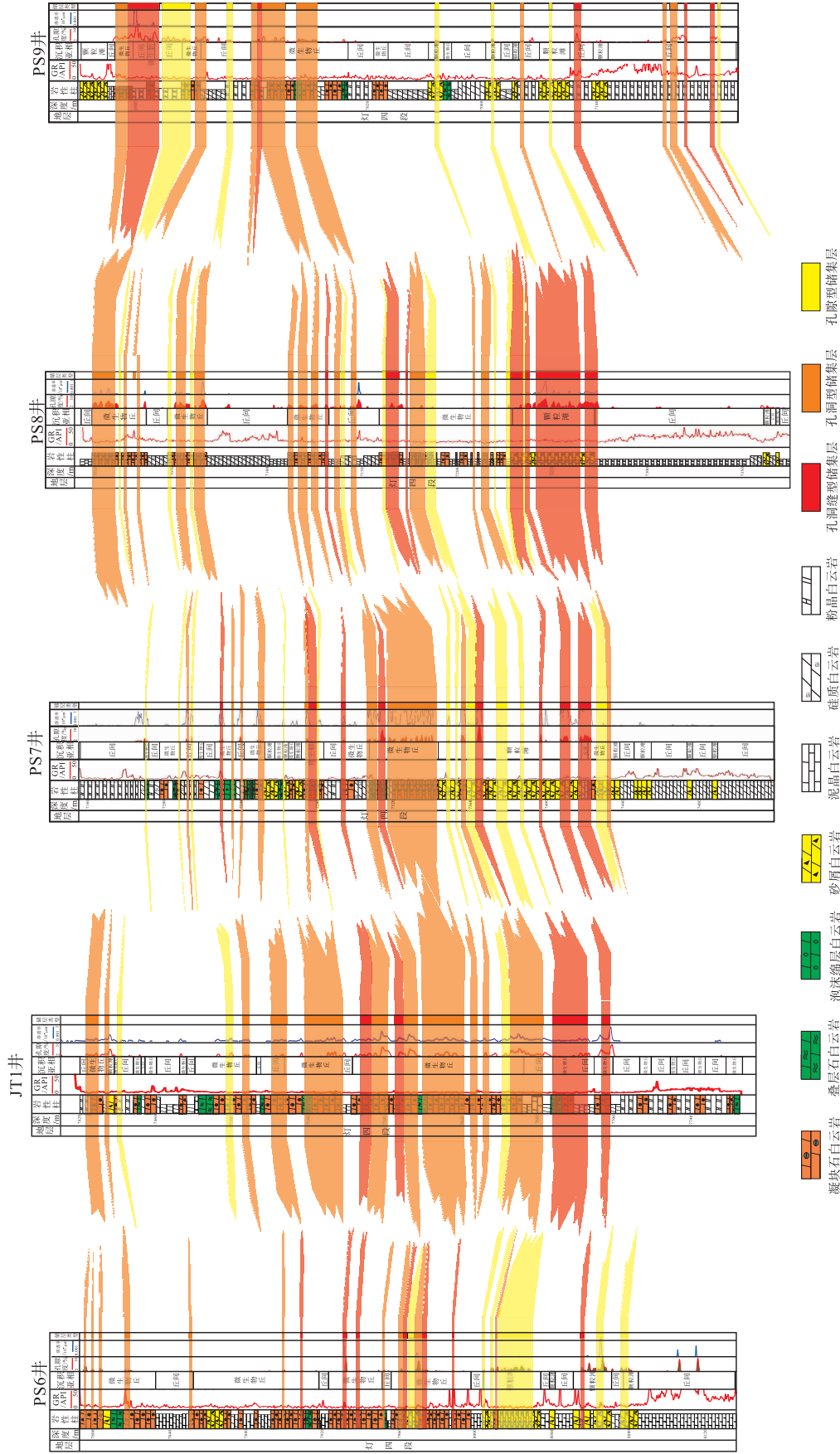
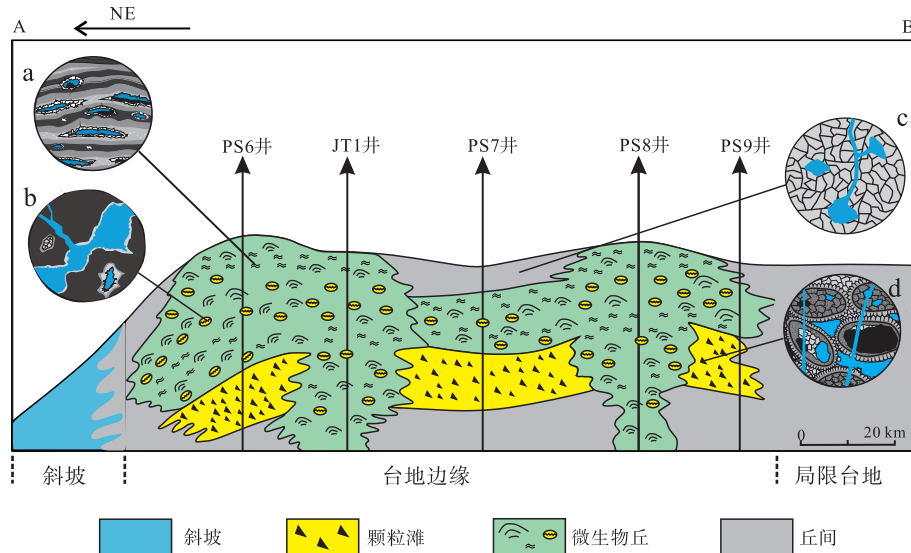


图 9 四川盆地蓬萊地区灯影组四段储集层连井剖面
 Fig. 9 Reservoir cross well profile of the Fourth Member of Dengying Formation in Penglai area, Sichuan Basin



a—微生物丘亚相内叠层石白云岩发育顺层格架孔、洞；b—微生物丘亚相内凝块石白云岩发育溶孔、溶洞，可见溶蚀缝；c—颗粒滩亚相内砂屑白云岩发育粒内溶孔、晶间溶孔、粒间孔、晶间孔及溶缝；d—云坪亚相内泥—粉晶白云岩沿裂缝发育溶蚀孔、溶洞

图 10 四川盆地蓬莱地区灯影组四段相控储集空间分布模式（剖面位置见图 1-a）

Fig. 10 Reservoir spaces controlled by sedimentary facies of the Fourth Member of Dengying Formation in Penglai area, Sichuan Basin (profiles location seen in Fig. 1-a)

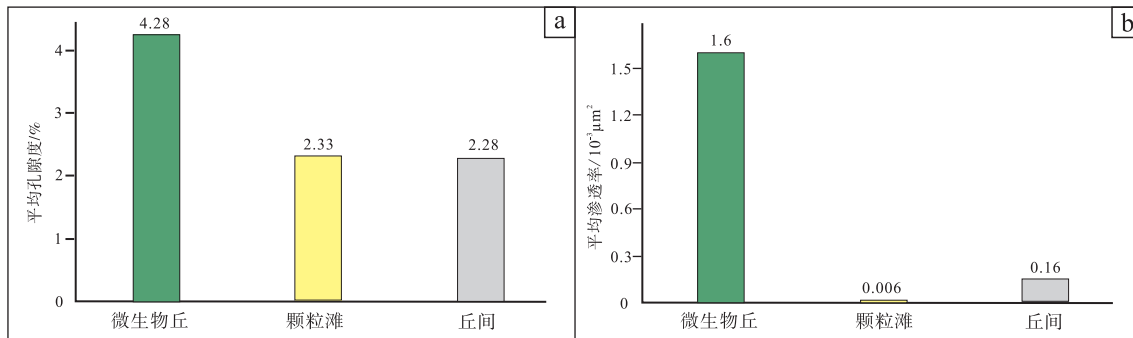
5.3 溶蚀（成岩作用）

在蓬莱地区灯四段所经历的成岩作用中，溶蚀作用对储集层的改善最为重要，而溶蚀作用又可分为表生溶蚀和埋藏溶蚀 2 类。

表生溶蚀主要是同生—准同生期地层抬升、间歇暴露后，沉积物遭受选择性溶蚀而形成溶孔、溶洞(图 3-h)。钻井过程中的井漏和放空现象，证明了较大型溶洞的存在（单秀琴等，2016；金民东，2017）。此外，在研究区灯四段顶部岩心中可见分选较差的溶塌角砾和沿裂缝充填的渗流砂(图 6-f)，镜下可见未被充填的溶蚀孔洞

(图 6-g)。溶蚀作用形成的溶孔、溶洞及溶缝，极大地提高了储集层的储集空间，增强了储集层的质量。

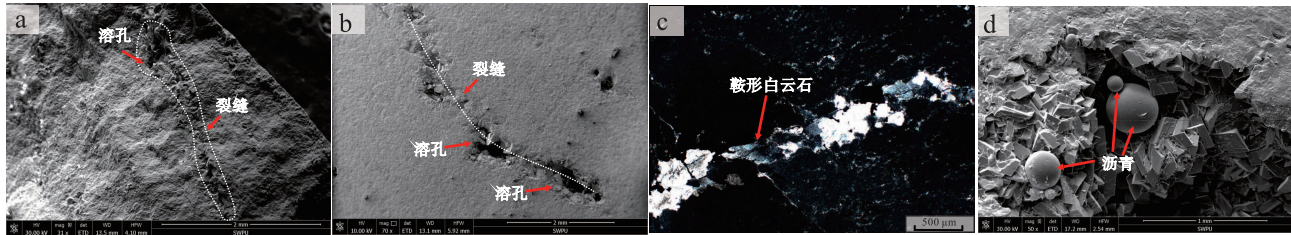
埋藏溶蚀主要发生在深—超深层埋藏阶段，热液流体沿裂缝运移过程中对白云岩中残余的原生孔洞进行溶蚀(图 12-a, 12-b)，这一过程会对先存孔缝进行改造，并形成新的溶孔、溶洞(图 3-i)。在这些新生成的溶蚀孔洞中可见半充填—全充填的鞍形白云石(图 12-c) 及粒状沥青(图 12-d)，其中具有波状消光特点且晶体较大的鞍形白云石往往指示较深的埋藏环境及较快的晶体生长速度（徐哲航，2023），而沥青则是古油藏裂解的直接产



a—各沉积亚相平均孔隙度柱状图；b—各沉积亚相平均渗透率柱状图

图 11 四川盆地蓬莱地区灯影组四段不同沉积亚相物性统计

Fig. 11 Physical properties of different sedimentary subfacies of the Fourth Member of Dengying Formation in Penglai area, Sichuan Basin



a—沿裂缝形成溶孔, PS1 井, 7260.86 m; b—沿裂缝形成溶孔, PS2 井, 7796.89 m; c—鞍状白云石见波状消光, PS9 井, 6971.65 m, 正交偏光; d—溶洞中见粒状沥青充填, PS2 井, 7790.05 m, 扫描电镜照片

图 12 四川盆地蓬莱地区灯影组四段成岩作用特征

Fig. 12 Diagenesis characteristics of the Fourth Member of Dengying Formation in Penglai area, Sichuan Basin

物, 其充注得益于溶蚀作用对储集空间的进一步改造 (刘树根等, 2021; 马行陟等, 2022; 宋泽章等, 2023)。鞍形白云石和沥青充填物会在一定程度上降低储集性, 但总体来讲, 埋藏溶蚀产生的大量溶蚀孔洞可以使区内储集层的物性增加。

6 结论

1) 四川盆地蓬莱地区灯影组四段储集岩类型为凝块石白云岩、叠层石白云岩、泡沫绵层白云岩和砂屑白云岩等, 储集空间类型主要为孔隙、溶洞和裂缝。储集层主要为低孔—低渗型, 以凝块石白云岩物性最好, 叠层石白云岩、泡沫绵层白云岩和砂屑白云岩孔渗性次之。储集层类型主要分为孔洞型、孔隙型和孔洞缝型, 以孔洞型储集层分布最广, 孔洞型储集层和孔洞缝型储集层储集性能最好。

2) 蓬莱地区灯影组四段在成岩过程中主要受到压实作用、胶结作用、硅化作用、溶蚀作用和重结晶作用影响, 其中压实作用、胶结作用和硅化作用属于破坏性成岩作用, 而溶蚀作用和重结晶作用属于建设性成岩作用。

3) 蓬莱地区灯影组四段储集层演化过程可分为 4 个阶段: 同生—准同生期阶段形成大量原生孔隙; 表生阶段形成各类溶孔、溶洞; 浅—中埋藏阶段形成少量孔、洞等储集空间; 深层—超深层埋藏阶段是孔、洞、缝等储集空间大量形成的阶段。

4) 对蓬莱地区灯影组四段储集层展布特征进行分析发现, 整体上台地内部井位储集层较台缘地区发育更好, 具有自台地内部向台缘储集层发育逐渐减弱的分布规律。

5) 蓬莱地区灯影组四段超深层白云岩储集层

主要表现为沉积相 (沉积作用)—断裂 (构造作用)—溶蚀 (成岩作用) 三元综合成储模式。沉积作用控制储集层岩石类型及其内部结构, 微生物丘亚相最利于储集层的形成与演化, 颗粒滩亚相次之; 构造运动控制沉积相带和断裂的分布, 可对储集层物性进行改善; 而成岩过程中的溶蚀作用可增加、改善岩石中储集空间, 是形成优质储集层的关键。

致谢 感谢中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司在野外工作和资料使用方面的大力支持。感谢审稿专家对文稿提出建设性修改完善建议。

参考文献 (References)

- 鲍志东, 季汉成, 梁婷, 韦明洋, 史燕青, 李宗峰, 鲁锴, 向鹏飞, 张华, 严睿, 郭玉鑫, 李卓伦, 万谱, 杨志波, 麻晓东, 刘锐, 刘灿星, 钟旭临, 郭晓琦, 蔡忠贤, 张水昌. 2019. 中新元古界原生白云岩: 以中国典型台地区为例. 古地理学报, 21(6): 869-884. [Bao Z D, Ji H C, Liang T, Wei M Y, Shi Y Q, Li Z F, Lu K, Xiang P F, Zhang H, Yan R, Guo Y X, Li Z L, Wan P, Yang Z B, Ma X D, Liu R, Liu C X, Zhong X L, Guo X Q, Cai Z X, Zhang S C. 2019. Primary dolostones of the Meso-Neoproterozoic: cases on typical platforms in China. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 21(6): 869-884]
- 操应长, 远光辉, 杨海军, 王艳忠, 刘可禹, 管念民, 意克来, 王健. 2022. 含油气盆地深层—超深层碎屑岩油气勘探现状与优质储集层成因研究进展. 石油学报, 43(1): 112-140. [Cao Y C, Yuan G H, Yang H J, Wang Y Z, Liu K Y, Zan N M, Xi K L, Wang J. 2022. Current situation of oil and gas exploration and research progress of the origin of high-quality reservoirs in deep-ultra-deep clastic reservoirs of petroliferous basins. Acta Petrolei Sinica, 43(1): 112-140]
- 陈代钊, 钱一雄. 2017. 深层—超深层白云岩储集层: 机遇与挑战. 古地理学报, 19(2): 187-196. [Chen D Z, Qian Y X. 2017. Deep

- or super-deep dolostone reservoirs: opportunities and challenges. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 19(2): 187-196]
- 陈泓位, 王时林, 和源, 王君, 秦启荣, 赵建民. 2024. 四川盆地中北部 DB1 井区灯影组四段沉积相及储层特征. *油气地质与采收率*, 31(3): 31-41. [Chen H W, Wang S L, He Y, Wang J, Qin Q R, Zhao J M. 2024. Sedimentary facies and reservoir characteristics of fourth Member of Dengying Formation in Well DB1 area, north-central Sichuan Basin. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 31(3): 31-41]
- 杜金虎, 汪泽成, 邹才能, 徐春春, 沈平, 张宝民, 姜华, 黄土鹏. 2016. 上扬子克拉通内裂陷的发现及对安岳特大型气田形成的控制作用. *石油学报*, 37(1): 1-16. [Du J H, Wang Z C, Zou C N, Xu C C, Shen P, Zhang B M, Jiang H, Huang S P. 2016. Discovery of intra-cratonic rift in the Upper Yangtze and its control effect on the formation of Anyue giant gas field. *Acta Petrolei Sinica*, 37(1): 1-16]
- 谷一凡. 2020. 川中地区震旦系灯影组四段微生物白云岩储层特征及成因机理. 西南石油大学博士学位论文. [Gu Y F. 2020. Characteristics and genesis of microbial dolomite reservoirs in fourth member of Sinian Dengying Formation, central Sichuan Basin, SW China. Doctoral dissertation of Southwest Petroleum University]
- 何登发, 李德生, 张国伟, 赵路子, 樊春, 鲁人齐, 文竹. 2011. 四川多旋回叠合盆地的形成与演化. *地质科学*, 46(3): 589-606. [He D F, Li D S, Zhang G W, Zhao L Z, Fan C, Lu R Q, Wen Z. 2011. Formation and evolution of multi-cycle superposed Sichuan Basin, China. *Chinese Journal of Geology*, 46(3): 589-606]
- 洪海涛, 田兴旺, 孙奕婷, 马奎, 李庚, 王云龙, 杨岱林, 彭瀚霖, 罗冰, 周刚, 薛玖火, 叶茂, 山述娇. 2020. 四川盆地海相碳酸盐岩天然气富集规律. *中国地质*, 47(1): 99-110. [Hong H T, Tian X W, Sun Y T, Ma K, Li G, Wang Y L, Yang D L, Peng H L, Luo B, Zhou G, Xue J H, Ye M, Shan S J. 2020. Hydrocarbon enrichment regularity of marine carbonate in Sichuan Basin. *Geology in China*, 47(1): 99-110]
- 黄福喜, 陈洪德, 侯明才, 钟怡江, 李洁. 2011. 中上扬子克拉通加里东期(寒武-志留纪)沉积层序充填过程与演化模式. *岩石学报*, 27(8): 2299-2317. [Huang F X, Chen H D, Hou M C, Zhong Y J, Li J. 2011. Filling process and evolutionary model of sedimentary sequence of Middle-Upper Yangtze craton in Caledonian(Cambrian-Silurian). *Acta Petrologica Sinica*, 27(8): 2299-2317]
- 贾爱林, 闫海军, 唐海发, 王忠楠, 刘群明. 2024. 中国深层、超深层气藏开发关键技术及对策建议. *天然气工业*, 44(1): 119-127. [Jia A L, Yan H J, Tang H F, Wang Z N, Liu Q M. 2024. Key technologies and counter measures for deep and ultra-deep gas reservoir development in China. *Natural Gas Industry*, 44(1): 119-127]
- 贾承造, 张水昌. 2023. 中国海相超深层油气形成. *地质学报*, 97(9): 2775-2801. [Jia C Z, Zhang S C. 2023. The formation of marine ultra-deep petroleum in China. *Acta Geologica Sinica*, 97(9): 2775-2801]
- 金民东. 2017. 高磨地区震旦系灯影组四段岩溶型储层发育规律及预测. 西南石油大学博士学位论文. [Jin M D. 2017. Karst reservoir of fourth member of Dengying Formation in Moxi-Gaoshiti area: development regularity and forecasting. Doctoral dissertation of Southwest Petroleum University]
- 金振奎, 石良, 高白水, 余宽宏. 2013. 碳酸盐岩沉积相及相模式. *沉积学报*, 31(6): 965-979. [Jin Z K, Shi L, Gao B S, Yu K H. 2013. Carbonate facies and facies models. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(6): 965-979]
- 李毕松, 金民东, 朱祥, 代林呈, 杨毅. 2023. 川东北地区灯影组四段储层成岩作用及孔隙演化. *地质前缘*, 30(6): 32-44. [Li B S, Jin M D, Zhu X, Dai L C, Yang Y. 2023. Reservoir diagenesis and porosity evolution of the 4th member of the Dengying Formation in northeastern Sichuan Basin. *Earth Science Frontiers*, 30(6): 32-44]
- 李洪奎, 李忠权, 龙伟, 万双双, 丁啸, 王适择, 王圻仲. 2019. 四川盆地纵向结构及原型盆地叠合特征. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 46(3): 257-267. [Li H K, Li Z Q, Long W, Wan S S, Ding X, Wang S Z, Wang Q Z. 2019. Vertical configuration of Sichuan Basin and its superimposed characteristics of the prototype basin. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 46(3): 257-267]
- 李剑, 余源琦, 高阳, 杨桂茹, 李明鹏, 杨慎. 2019. 中国陆上深层—超深层天然气勘探领域及潜力. *中国石油勘探*, 24(4): 403-417. [Li J, She Y Q, Gao Y, Yang G R, Li M P, Yang S. 2019. Onshore deep and ultra-deep natural gas exploration fields and potentials in China. *China Petroleum Exploration*, 24(4): 403-417]
- 李亚林. 2024. 超深层油气地震勘探技术进展. *石油地球物理勘探*, 59(4): 915-924. [Li Y L. 2024. Ultra-deep oil and gas reservoir seismic prospecting technologies progress. *Oil Geophysical Prospecting*, 59(4): 915-924]
- 刘树根, 李泽奇, 邓宾, 孙玮, 李智武, 丁一, 宋金民, 吴娟. 2021. 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. *天然气工业*, 41(8): 102-112. [Liu S G, Li Z Q, Deng B, Sun W, Li Z W, Ding Y, Song J M, Wu J. 2021. 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. *Natural Gas Industry*, 41(8): 102-112]
- 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 Petrolei Sinica*, 36(4): 416-426]
- 罗垚, 谭秀成, 赵东方, 罗文军, 刘耘, 肖笛, 乔占峰, 曾伟. 2022. 埃迪卡拉系微生物碳酸盐岩沉积特征及其地质意义: 以川中磨溪 8 井区灯影组四段为例. *古地理学报*, 24(2): 278-291. [Luo Y, Tan X C, Zhao D F, Luo W J, Liu Y, Xiao D, Qiao Z F, Zeng W. 2022. Sedimentary characteristics of the Ediacaran microbial carbonates and their geological implications: a case study of the Member 4 of Dengying Formation from Wellblock MX8 in central Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 24(2): 278-

- 291]
- 马行陟,戴博凯,柳少波,鲁雪松,范俊佳,刘强,杨帆. 2022. 川中地区北部震旦系灯二段储层沥青特征及意义. 天然气地球科学, 33(8): 1251-1262. [Ma X Z, Dai B K, Liu S B, Lu X S, Fan J J, Liu Q, Yang F. 2022. Characteristics and significance of reservoir solid bitumen in the Second member of Sinian Dengying Formation in the north of central Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 33(8): 1251-1262]
- 马永生,蔡勋育,赵培荣. 2014. 元坝气田长兴组—飞仙关组礁滩相储层特征和形成机理. 石油学报, 35(6): 1001-1011. [Ma Y S, Cai X Y, Zhao P R. 2014. Characteristics and formation mechanisms of reef-shoal carbonate reservoirs of Changxing-Feixianguan Formations, Yuanba gas field. *Acta Petrolei Sinica*, 35(6): 1001-1011]
- 马永生,黎茂稳,蔡勋育,徐旭辉,胡东风,曲寿利,李根生,何登发,肖贤明,曾义金,饶莹. 2020. 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. 石油与天然气地质, 41(4): 655-672, 683. [Ma Y S, Li M W, Cai X Y, Xu X H, Hu D F, Qu S L, Li G S, He D F, Xiao X M, Zeng Y J, Rao Y. 2020. Mechanisms and exploitation of deep marine petroleum accumulations in China: advances, technological bottlenecks and basic scientific problems. *Oil & Gas Geology*, 41(4): 655-672, 683]
- 马永生,蔡勋育,黎茂稳,李慧莉,朱东亚,邱楠生,庞雄奇,曾大乾,康志江,马安来,石开波,张军涛. 2024. 深层—超深层海相碳酸盐岩成储成藏机理与油气藏开发方法研究进展. 石油勘探与开发, 51(4): 692-707. [Ma Y S, Cai X Y, Li M W, Li H L, Zhu D Y, Qiu N S, Pang X Q, Zeng D Q, Kang Z J, Ma A L, Shi K B, Zhang J T. 2024. Research advances on the mechanisms of reservoir formation and hydrocarbon accumulation and the oil and gas development methods of deep and ultra-deep marine carbonates. *Petroleum Exploration and Development*, 51(4): 692-707]
- 石昕,戴金星,赵文智. 2005. 深层油气藏勘探前景分析. 中国石油勘探, 10(1): 1-10. [Shi X, Dai J X, Zhao W Z. 2005. Analysis of deep oil and gas reservoirs exploration prospect. *China Petroleum Exploration*, 10(1): 1-10]
- 帅燕华,李剑,田兴旺,陈竹新,张斌,魏彩云. 2023. 四川盆地川中—川西震旦系—三叠系天然气成藏分析及勘探意义. 地质学报, 97(5): 1526-1543. [Shuai Y H, Li J, Tian X W, Chen Z X, Zhang B, Wei C Y. 2023. Accumulation mechanisms of Sinian to Triassic gas reservoirs in the central and western Sichuan basin and their significance for oil and gas prospecting. *Acta Geologica Sinica*, 97(5): 1526-1543]
- 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 Petrolei Sinica*, 37(1): 17-29]
- 施春华,山述娇,郝靖,罗冰,曹剑. 2022. 四川盆地震旦—寒武系高演化烃源岩无机地球化学特征与评价. 石油实验地质, 44(3): 505-514. [Shi C H, Shan S J, Hao J, Luo B, Cao J. 2022. Inorganic geochemical characteristics and evaluation of Sinian-Cambrian post-mature source rocks in Sichuan Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 44(3): 505-514]
- 斯春松,郝毅,周进高,倪超,潘立银. 2014. 四川盆地灯影组储层特征及主控因素. 成都理工大学学报(自然科学版), 41(3): 266-273. [Si C S, Hao Y, Zhou J G, Ni C, Pan L Y. 2014. Characteristics and controlling factors of reservoir in Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 41(3): 266-273]
- 四川油气区石油地质志编写组. 1989. 中国石油地质志(卷十)·四川油气区. 北京: 石油工业出版社. [Compilation Group of Petroleum Geology in Sichuan Oil and Gas Areas. 1989. *China Petroleum Geology (Vol. 10): Sichuan Oil and Gas Regions*. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 宋金民,刘树根,李智武,罗平,杨迪,孙玮,彭瀚霖,余永强. 2017. 四川盆地上震旦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]
- 宋文海. 1996. 乐山—龙女寺古隆起大中型气田成藏条件研究. 天然气工业, 16(S1): 13-26, 105-106. [Song W H. 1996. Reservoir-forming conditions research on the known large-medium gas fields in Sichuan Basin, NGI Supplementary Issue. *Natural Gas Industry*, 16(S1): 13-26, 105-106]
- 宋泽章,葛冰飞,王文之,田兴旺,朱光有,杨岱林,张宝收. 2023. 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. 地球科学, 48(2): 517-532. [Song Z Z, Ge B F, Wang W Z, Tian X W, Zhu G Y, Yang D L, Zhang B S. 2023. 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. *Earth Science*, 48(2): 517-532]
- 孙龙德,邹才能,朱如凯,张云辉,张水昌,张宝民,朱光有,高志勇. 2013. 中国深层油气形成、分布与潜力分析. 石油勘探与开发, 40(6): 641-649. [Sun L D, Zou C N, Zhu R K, Zhang Y H, Zhang S C, Zhang B M, Zhu G Y, Gao Z Y. 2013. Formation, distribution and potential of deep hydrocarbon resources in China. *Petroleum Exploration and Development*, 40(6): 641-649]
- 王文之,杨跃明,文龙,罗冰,罗文军,夏茂龙,孙赛男. 2016. 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. 中国地质, 43(1): 306-318. [Wang W Z, Yang Y M, Wen L, Luo B, Luo W J, Xia M L, Sun S N. 2016. A study of sedimentary characteristics of microbial carbonate: a case study of the Sinian Dengying Formation in Gaomo area, Sichuan basin. *Geology in China*, 43(1): 306-318]
- 王兴志,穆曙光,方少仙,黄继祥,侯方浩. 2000. 四川盆地西南部震旦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 Sichuan. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(4): 549-554]
- 王雅萍, 鲍志东, 张连进, 杨东凡, 文雯, 钟原, 唐攀. 2024. 四川盆地蓬莱地区埃迪卡拉系灯影组二段微生物岩储层成岩作用: 对优质储层形成与演化的启示. *地质力学学报*, 30(4): 579-594. [Wang Y P, Bao Z D, Zhang L J, Yang D F, Wen W, Zhong Y, Tang P. 2024. Diagenesis of microbial dolomite reservoirs in the second Member of Dengying Formation of Ediacaran in the Penglai area, Sichuan Basin: insights into the formation and evolution of high quality reservoirs. *Journal of Geomechanics*, 30(4): 579-594]
- 文龙, 周刚, 孙峥, 严威, 卞从胜, 汪泽成, 张本健, 张亚, 张自力, 刘伟, 曾旭, 李传新, 田兴旺, 谢忱. 2024. 四川盆地及周缘前震旦系裂谷特征与油气地质意义. *天然气工业*, 44(1): 26-39, 201. [Wen L, Zhou G, Sun Z, Yan W, Bian C S, Wang Z C, Zhang B J, Zhang Y, Zhang Z L, Liu W, Zeng X, Li C X, Tian X W, Xie C. 2024. Characteristics and petroleum geological significance of pre-Sinian rifts in the Sichuan Basin and its periphery. *Natural Gas Industry*, 44(1): 26-39, 201]
- 吴冲龙, 杜远生, 梅廉夫, 周江羽, 孔春芳. 2006. 中国南方印支—燕山期复合盆山体系与盆地原型改造. *石油与天然气地质*, 27(3): 305-315. [Wu C L, Du Y S, Mei L F, Zhou J Y, Kong C F. 2006. Composite basin-and-range system and reformation of basin prototype in Indosinian-Yanshanian in South China. *Oil & Gas Geology*, 27(3): 305-315]
- 邹光辉, 邹禹, 徐伟, 周刚, 钟原, 严威, 马兵山, 王剑. 2023. 四川盆地川中古隆起北斜坡震旦系走滑断裂分布及其勘探意义. *天然气工业*, 43(7): 35-43. [Wu G H, Zou Y, Xu W, Zhou G, Zhong Y, Yan W, Ma B S, Wang J. 2023. Distribution and petroleum exploration significance of Sinian strike-slip faults in the northern slope of Central Sichuan paleo-uplift. *Natural Gas Industry*, 43(7): 35-43]
- 谢武仁, 杨威, 汪泽成, 魏国齐, 马石玉, 郝涛, 苏楠, 李文正, 武赛军, 王小丹. 2021. 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. *地质科学*, 56(3): 867-883. [Xie W R, Yang W, Wang Z C, Wei G Q, Ma S Y, Hao T, Su N, Li W Z, Wu S J, Wang X D. 2021. 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. *Chinese Journal of Geology*, 56(3): 867-883]
- 徐哲航. 2023. 四川盆地震旦系灯影组微生物岩储层形成机理与主控因素. 中国石油大学(北京)博士学位论文. [Xu Z H. 2023. Formation-mechanism and controlling factors of the microbialite-dominated reservoir in the Ediacaran Dengying Formation of the Sichuan Basin. Doctoral dissertation of China University of Petroleum (Beijing)]
- 许海龙, 魏国齐, 贾承造, 杨威, 周天伟, 谢武仁, 李传新, 罗贝维. 2012. 乐山—龙女寺古隆起构造演化及对震旦系成藏的控制. *石油勘探与开发*, 39(4): 406-416. [Xu H L, Wei G Q, Jia C Z, Yang W, Zhou T W, Xie W R, Li C X, Luo B W. 2012. Tectonic evolution of the Leshan-Longnüsi paleo-uplift and its control on gas accumulation in the Sinian strata, Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 39(4): 406-416]
- 杨磊磊, 魏国, 于志超, 鲁雪松, 周慧, 王珊, 李昌伟. 2024. 四川盆地灯影组多类型流体多期次改造作用下孔隙度演化的定量研究. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 48(3): 15-26. [Yang L L, Wei G, Yu Z C, Lu X S, Zhou H, Wang S, Li C W. 2024. Quantitative study on porosity evolution under multi-stage reformation of multi-type fluids in Dengying Formation, Sichuan Basin. *Journal of China University of Petroleum(Natural Science Edition)*, 48(3): 15-26]
- 杨柳, 臧殿光, 王伦, 陈伟, 何宇霖, 黄东山, 徐姣, 郑虹, 周跃宗, 刘泽彬. 2023. 川中地区基底断裂对震旦系—古生界沉积控制作用及油气地质意义. *石油物探*, 62(4): 751-763. [Yang L, Zang D G, Wang L, Chen W, He Y L, Huang D S, Xu J, Zheng H, Zhou Y Z, Liu Z B. 2023. Control of basement faults on Sinian-Paleozoic sedimentation in the Central Sichuan Basin and its petroleum geological significance. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 62(4): 751-763]
- 张宇慧, 朱正平, 罗文军, 潘仁芳, 刘曦翔. 2023. 四川盆地高石梯地区震旦系灯影组四段微生物碳酸盐岩微相组合发育特征与储层主控因素分析. *现代地质*, 37(5): 1282-1292. [Zhang Y H, Zhu Z P, Luo W J, Pan R F, Liu X X. 2023. Development characteristics and reservoir controlling factors of microbial carbonate microfacies longitudinal assemblage in the Dengying Formation (the 4th Member) of Sinian System in Gaoshiti area, Sichuan Basin. *Geoscience*, 37(5): 1282-1292]
- 赵虎, 王宏川, 赵容容, 陈伟, 李居正, 安虹伊, 莫倩雯, 戴菁芸. 2024. 四川盆地北斜坡灯影组四段优质丘滩体储层识别及有利区预测. *天然气地球科学*, 35(7): 1123-1135. [Zhao H, Wang H C, Zhao R R, Chen W, Li J Z, An H Y, Mo Q W, Dai J Y. 2024. Identification and favorable area for exploration of hilly-shoal high-quality reservoir in the fourth member of Dengying Formation in the northern slope of Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 35(7): 1123-1135]
- 赵路子, 汪泽成, 杨雨, 段书府, 魏国齐, 罗冰, 文龙, 马石玉, 冯庆付, 刘静江, 孙夕平, 谢武仁. 2020. 四川盆地蓬探 1 井灯影组灯二段油气勘探重大发现及意义. *中国石油勘探*, 25(3): 1-12. [Zhao L Z, Wang Z C, Yang Y, Duan S F, Wei G Q, Luo B, Wen L, Ma S Y, Feng Q F, Liu J J, Sun X P, Xie W R. 2020. Important discovery in the second member of Dengying Formation in Well Pengtan1 and its significance, Sichuan Basin. *China Petroleum Exploration*, 25(3): 1-12]
- 赵文智, 沈安江, 乔占峰, 张建勇, 倪新锋. 2022. 中国碳酸盐岩沉积储层理论进展与海相大油气田发现. *中国石油勘探*, 27(4): 1-15. [Zhao W Z, Shen A J, Qiao Z F, Zhang J Y, Ni X F. 2022. Theoretical progress in carbonate reservoir and discovery of large marine oil and gas fields in China. *China Petroleum Exploration*, 27(4): 1-15]
- 周正. 2016. 川中地区震旦系灯影组储层研究. 西南石油大学博士学位论文. [Zhou Z. 2016. Study on reservoir of the Sinian Dengying Formation in central Sichuan, China. Doctoral dissertation of Southwest Petroleum University]