

doi: 10.12097/gbc.2023.02.035

四川盆地蓬深 1 井—东坝 1 井区灯影组四段丘滩体储层地质特征及控制因素

岑永静¹, 梁锋¹, 王立恩¹, 刘倩虞¹, 何顺², 王时林², 韦恒叶²

CEN Yongjing¹, LIANG Feng¹, WANG Lien¹, LIU Qianyu¹, HE Shun², WANG Shilin²,
WEI Hengye²

1. 中石油西南油气田分公司川中北部采气管理处, 四川 遂宁 629000;

2. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500

1. PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Central and Northern Sichuan Gas Production Management Office, Suining 629000, Sichuan, China;

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

摘要: 灯影组是四川盆地中部重要的油气勘探层系, 为查明蓬深 1 井—东坝 1 井区灯影组四段 (简称灯四段) 储层特征及成因, 通过钻井岩心观察、岩石薄片鉴定及孔渗性实验对灯四段岩石类型、储集空间类型进行分析。结果显示, 研究区灯四段储集岩类型包括藻白云岩、泥—粉晶云岩、角砾云岩及砂屑云岩, 储集空间以次生溶蚀孔洞为主, 残留原生孔隙和改造裂缝次之, 溶蚀孔洞的发育具有沿裂缝及生物藻纹层分布的特点, 发育溶孔-孔隙-裂缝型复合储层特点。根据成因差异可将灯四段储层划分为埋藏岩溶型储层、表生-埋藏叠加改造型储层、构造-热液改造型储层 3 类, 其中表生-埋藏叠加改造型储层集中分布在灯四段顶部。丘滩体沉积控制储层物质组成, 发育早期格架孔, 控制储层纵向展布, 表生期溶蚀及埋藏岩溶作用控制次生溶孔的发育与平面分布, 裂缝发育沟通孤立孔隙, 促进流体溶蚀作用发生, 提高储层渗透率。

关键词: 灯影组四段; 储层特征; 礁滩体; 蓬菜气区; 四川盆地

中图分类号: P534.31; P618 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2024)10-1705-10

Cen Y J, Liang F, Wang L E, Liu Q Y, He S, Wang S L, Wei H Y. Geological characteristics and controlling factors of the fourth member of Dengying Formation in Pengshen well 1-Dongba well 1. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(10): 1705-1714

Abstract: The Dengying Formation is an important oil and gas exploration layer in the central Sichuan Basin. In order to investigate the reservoir characteristics and genesis of the fourth member of the Dengying Formation in the Pengshen well 1-Dongba well 1 area, the rock type and reservoir space type of the fourth member of the Dengying Formation were analyzed through drilling core observation, rock thin section identification and permeability experiments. The results show that the reservoir rock types in the fourth member of the Dengying Formation of the study area include algal dolomite, mud powder crystal dolomite, breccia dolomite, and sandstone dolomite. The reservoir space is mainly composed of secondary dissolution pores, followed by residual primary pores and modified fractures. The development of dissolution pores has the characteristics of distribution along fractures and biological algae layers, and the development of dissolution pore pore fracture composite reservoirs has the characteristics of dissolution pore pore fracture type. According to the differences in genesis, the fourth member of Dengying Formation reservoir can be divided into three types: burial karstification type reservoirs, surface-buried superimposed modified reservoirs and structural hydrothermal modified reservoirs. Among them, the surface-buried superimposed modified reservoirs are concentrated at the top of the fourth member of the

收稿日期: 2023-02-17; 修订日期: 2023-08-07

资助项目: 川中北部采气管理处项目《蓬深 1—东坝 1 井区灯四段岩相古地理条件及丘滩发育有利区优选》(编号: XNS 川中北 JS2022-84)

作者简介: 岑永静(1978-), 男, 高级工程师, 从事油气勘探开发管理工作。E-mail: 849988098@qq.com

Dengying Formation. The sedimentation of the reef-beach body controls the composition of reservoir materials, develops early framework pores, controls the longitudinal distribution of the reservoir, controls the development and planar distribution of secondary dissolution pores through surface and buried karst processes, communicates with isolated pores through fracture development, promotes fluid dissolution, and increases reservoir permeability

Key words: the fourth member of Dengying Formation; reservoir characteristics; reef beach body; Penglai gas area; Sichuan Basin

碳酸盐岩储层是中国常规油气增产的重要储层类型,而礁滩体储层是其重要组成部分,因储层孔渗性好、单井产能高的特点成为碳酸盐岩勘探的热点及重点领域(杨雨等, 2020),在塔里木盆地、四川盆地先后发现大量优质礁滩体储层,建立多个大型油气田(张玺华等, 2021)。前人针对礁滩体的形成机理、沉积环境、储层特征进行过大量研究,指出“礁”为造礁生物原地建造形成的具有地貌特点的岩体,“滩”不具备抗波浪生物组成,通常无固定形状(范秋海等, 2012)。不同沉积环境下礁滩体生长方式及储层分布存在明显差异,储集空间主要为后期溶蚀孔洞,不同沉积相带控制礁滩体展布的同时,控制着储集空间的形成与空间分布(宋金民等, 2017)。

四川盆地大型礁滩体储层在震旦系灯影组及二叠系—三叠系长兴组—飞仙关组中均有发育,其中灯影组包括灯二段及灯四段 2 套储层,并已发现多个大型油气田(朱讯等, 2019)。灯四段礁滩体主要分布于裂陷槽两侧,台缘带灯四段藻白云岩尤为发育(陈娅娜等, 2017)。礁滩体属于正向地貌,当地层出露于地表时,礁滩体容易发生溶蚀作用,有利于储层的形成(倪超等, 2016)。

高石梯—磨溪地区深层碳酸盐岩油气的发现证实了灯四段礁滩体储层的勘探潜力,储层的岩性主要为藻白云岩及溶孔白云岩(文龙等, 2017; 闫海军等, 2020; 夏青松等, 2021),储层的发育具有较强的非均质性(胡修权等, 2022),优质储层发育的控制因素多样,沉积相控制下礁滩体平面、纵向分布为主要影响因素(徐欣等, 2018),表生岩溶及潜流溶蚀作用分别控制上下段储层的发育(田兴旺等, 2019),后期构造一定程度上控制了储层高产。

高石梯—磨溪地区灯四段台缘带礁滩体的成功开发证实了台缘带油气勘探的巨大潜力,随着勘探的持续进行,针对灯四段礁滩体储层的勘探向埋藏更深的区域进行。蓬深 1 井及东坝 1 井在灯四段均获得油气显示,其中东坝 1 井在灯四下亚段测试日产气 $8.26 \times 10^4 \text{ m}^3$,蓬深 1 井灯四上亚段储层发育。

对比高石梯—磨溪地区开发经验,蓬深 1 井—东坝 1 井区具备油气勘探的基础。

1 区域地质概况

四川盆地是在扬子克拉通之上形成的叠合盆地,具有典型的“富气贫油”的特点。根据构造差异可将盆地分为川西低陡褶皱带、川西南低陡构造带、川北低陡构造带、川中平缓构造带、川东高陡断褶带和川南低陡褶皱带(何顺等, 2020)(图 1-a)。蓬深 1—东坝 1 井区构造上处于川中平缓构造带,古今构造位置均处于加里东古隆起北部斜坡带,地表属于遂宁市射洪县金华镇境内。灯四段丘滩体沿台缘呈带状分布,晚震旦世,在桐湾运动 II 幕的影响下,灯四段发育区域不规则抬升,台缘带具有“北沉积、南侵蚀”的特征,灯四段抬升暴露,接受不同程度的风化剥蚀,发生普遍的表生岩溶作用,德阳-安岳台内裂陷控制优质烃源,与丘滩相储层形成良好的成藏配置关系。台缘带受川中古隆起古今构造继承性发育,成为油气有效聚集区。灯四段沉积形成于混积台地之上,台缘带以藻丘、颗粒滩、滩间海沉积为主,岩性包括藻灰色溶孔洞白云岩、深灰色藻云岩、藻砂屑云岩及藻凝块角砾云岩,纵向上与下伏灯三段蓝灰色泥岩呈整合接触,与上覆麦地坪组及筇竹寺组泥岩呈不整合接触(李安鹏等, 2023)(图 1-b)。

2 储层发育特征

2.1 储集岩类型

通过蓬深 1 井及东坝 1 井岩心、岩石薄片鉴定分析,灯四段岩性纵向上具明显差异,岩石类型包括角砾白云岩、藻凝块白云岩、藻叠层白云岩、藻纹层白云岩、砂屑白云岩、泥—粉晶白云岩,其中藻凝块白云岩为研究区灯四段最主要的储集岩类。

2.1.1 角砾白云岩

研究区钻井岩心观测结果显示,蓬深 1 井及东坝 1 井角砾白云岩纵向上分布较少,其中蓬深 1 井灯四段仅存在 2 套角砾白云岩,以薄层状分布于下

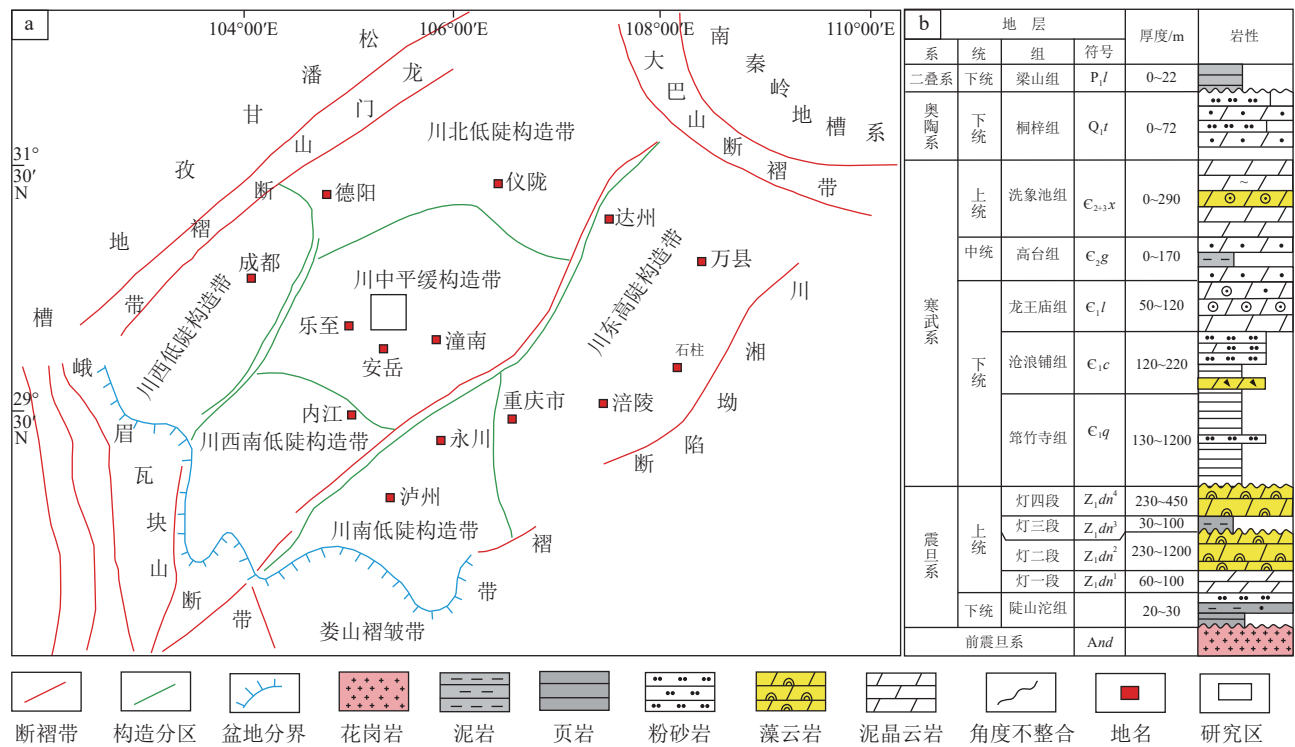
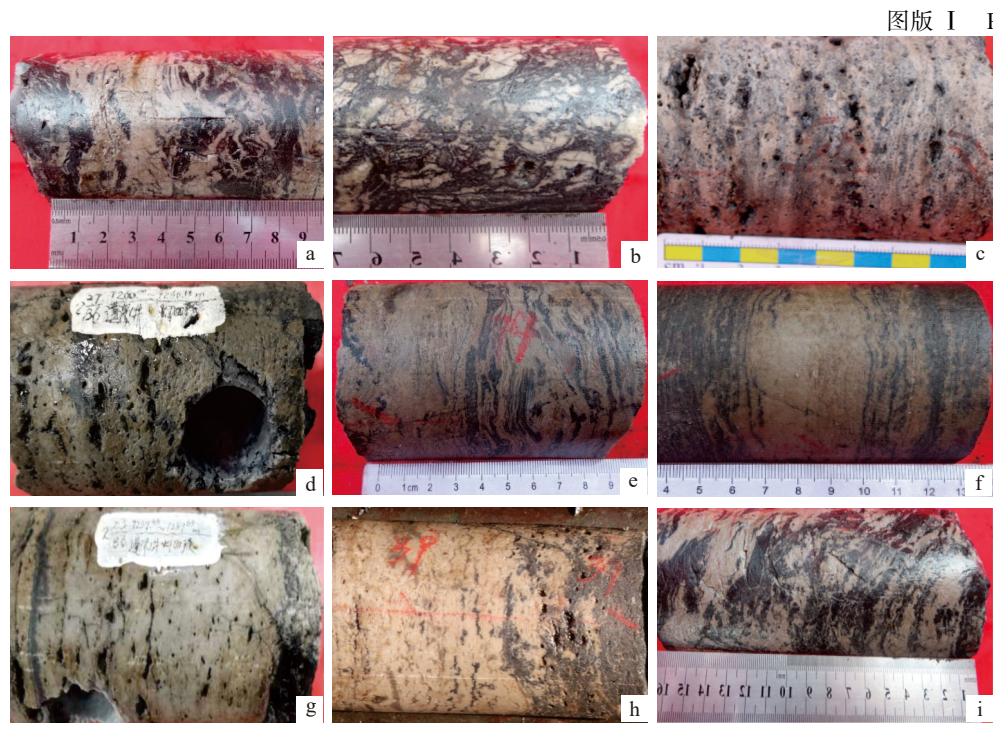


图 1 四川盆地地质图(a)及岩性综合柱状图(b)
Fig. 1 Regional geological map (a) and lithological composite column diagram (b) of Sichuan Basin



a.深灰角砾白云岩, ps1 井, 7269.61 ~ 7269.76 m; b.浅灰色角砾白云岩, ps1 井, 7276.3 ~ 7276.43 m; c.深灰色藻凝块白云岩, ps1 井, 7260.11 ~ 7260.28 m; d.深灰色藻凝块白云岩, ps1 井, 7260.11 ~ 7260.28 m; e.灰色藻叠层白云岩, ps1 井, 7267.29 ~ 7267.40 m; f.灰褐色藻纹层白云岩, ps1 井, 7265.86 ~ 7266.01 m; g.藻砂屑白云岩, ps1 井, 7259.43 ~ 7259.63 m; h.藻砂屑白云岩, ps1 井, 7261.9m; i.深灰色—灰色泥晶白云岩, ps1 井, 7270.46 ~ 7270.69 m

亚段及上亚段,呈灰色—深灰色,具泥晶结构,岩石致密(图版 I-a, b),单层厚度不超过 1 m。储集空间主要为粒间孔,岩心面孔率不超过 1%,储集性能差。

2.1.2 藻白云岩

藻白云岩是研究区发育最广泛的岩性之一,根据藻凝结体发育差异可以分为藻凝块白云岩(图版 I-c, d)、藻叠层白云岩(图版 I-e)及藻纹层白云岩(图版 I-f)3 类。藻白云岩在灯四段均有发育,主要集中于灯四段上部,总体厚度大,多呈深灰色—灰褐色,通常为厚层状,其中藻凝块白云岩岩性致密,岩心发育大量溶蚀孔洞,孔洞直径多在 2~10 mm 之间,偶见直径为 60 mm 的溶洞,多为白云石所充填,高角度缝发育,面孔率通常在 2% 以上,最高为 7%。纵向上,灯四段上部藻白云岩溶蚀作用强烈,溶蚀孔洞发育,形成溶孔洞白云岩,下部溶蚀孔洞发育较少。藻叠层白云岩及藻纹层白云岩相对致密,岩心观察溶蚀孔洞欠发育,高角度缝发育。

2.1.3 砂屑白云岩

砂屑白云岩发育较少,通常与藻白云岩共生,蓬深 1 井灯四段上亚段发育少量薄层藻砂屑白云岩,夹于藻白云岩层中,其中蓬深 1 井藻砂屑白云岩厚度在 8.5 m 左右,整体厚度薄。岩心表现为灰色—深灰色,溶蚀孔洞沿藻纹层发育(图版 I-g, h),多为白云石及沥青充填,岩心面孔率在 3% 左右。

2.1.4 粉晶白云岩

粉晶白云岩是研究区含量占比最高的储集岩类,根据 2 口井岩性纵向分布,粉晶白云岩在灯四段全段均有分布,灯四段底部深灰色硅质粉晶白云岩及粉晶白云岩混层发育,厚度在 140 m 左右,中部以深灰色泥粉晶白云岩发育为主,厚度在 125 m 左右。灯四段上部泥—粉晶白云岩以薄层分布于藻白云岩之间,呈深灰色,结合岩心观测统计结果,粉晶白云岩占总储集岩的 50% 以上。

2.1.5 泥晶白云岩

泥晶白云岩储层发育较差,根据 2 口井纵向岩性变化,主要集中发育于灯四段中上部,单层厚度常小于 1 m,通常藻白云岩互层发育,整体呈灰黑色,单层厚度薄,多层发育,具有泥晶结构,致密,可见浅灰色角砾(图版 I-i)。面孔率通常在 1% 以下。

2.2 储集空间类型

蓬深 1 井—东坝 1 井区灯影组经历早期埋藏成

岩及后期溶蚀、构造运动的共同作用,储集空间成因复杂、类型多样,横-纵向分布不均,根据成因差异可分为原生孔隙、次生溶孔及裂缝 3 类。

2.2.1 原生孔隙

灯四段储层在后期成岩作用改造下原生孔隙多被破坏或改造。研究区原生孔隙包括晶间孔(图版 II-a, b)、残留格架孔(图版 II-c)2 类,残留格架孔主要分布于微藻凝块白云岩中,镜下可见残留格架孔被沥青及白云石半充填,孔径大小在 0.2~2 mm 之间,由于储层长期受岩溶作用影响,研究区该类孔隙少见,主要在上亚段发育。晶间孔主要发育于泥—粉晶白云岩中,受白云石化作用及溶蚀作用影响,该类孔隙发育较少,镜下观察该类孔隙为沥青部分充填,孔隙直径多在 0.2 mm 以下。

2.2.2 次生溶孔

在长期埋藏岩溶影响下,灯四段储层溶蚀孔隙大量发育,包括格架溶孔、晶间溶孔及粒间溶孔 3 类(图版 II-d~g),岩心可见宏观溶洞,格架溶孔主要发育于藻白云岩中,孔隙直径在 0.5~6 mm 之间,通常形状不规则,储集性能好,灯四段上部岩心藻白云岩中可见大量的溶洞,溶洞直径大小在 2~10 mm 之间,少量直径达 6 cm,溶洞密集发育段呈蜂窝状,是灯四段上部储集岩的主要储集空间。粒间溶孔在藻白云岩、泥—粉晶云岩及藻砂屑云岩中均有发育,其中粉晶云岩中孔隙直径通常在 0.2~1 mm 之间,镜下可见粒间溶孔为白云石及沥青半充填,在灯四段下部泥—粉晶云岩中集中发育,晶间溶孔主要分布于粉晶云岩中,是研究区的次级储集空间。

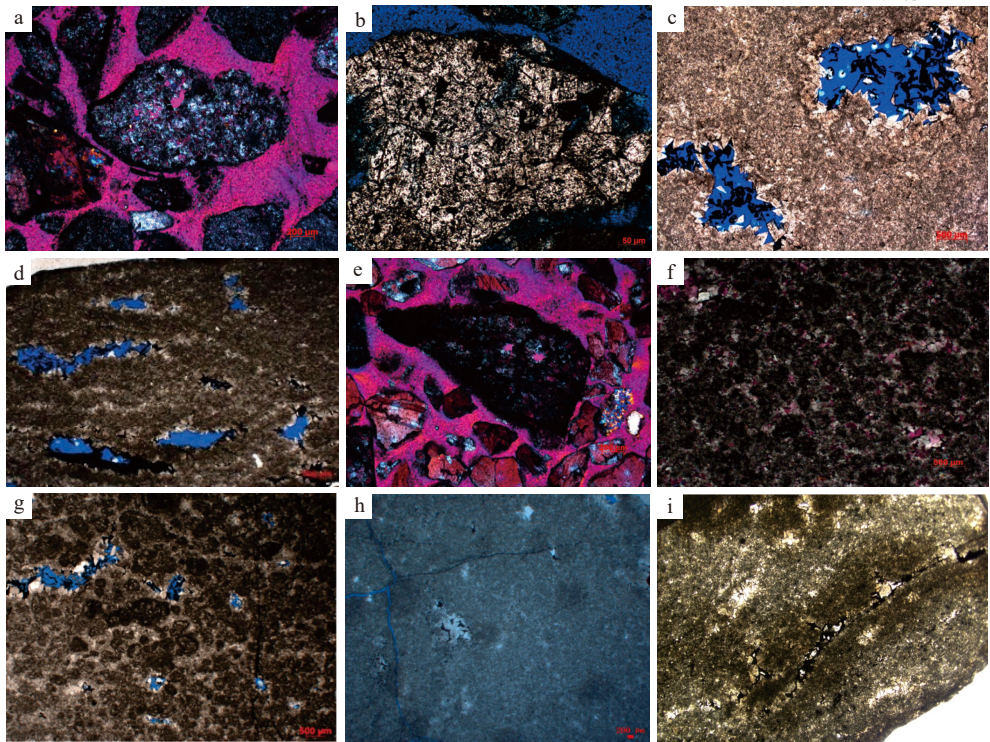
2.2.3 裂缝

根据成因差异,灯四段发育构造缝及溶蚀缝 2 类(图版 II-h, i)。岩心观察及岩石薄片鉴定显示,构造裂缝较平直,纵向延伸远,集中分布于藻凝块云岩中,方向多样,构成复杂网络系统,多被沥青所充填。镜下观察溶蚀缝宽度差异大,总体介于 0.01~0.3 mm 之间,溶蚀缝多断续分支,局部呈弥漫状,多为溶蚀裂缝被白云石全充填或半充填,同时可见构造缝于溶蚀交织现象。未充填裂缝为有效储集进空间,同时也作为油气渗流通道,是造成储层渗透率局部增高的主要原因。

2.3 储层物性特征

物性特征是储层评价的重要内容,直接决定储层有效性。通过对蓬深 1 井柱塞及全直径样进孔渗

图版 II Plate II



a. 粉晶云岩, ps1 井, 晶间孔, 7547 m; b. 粉晶云岩, ps1 井, 晶间孔, 7238 m; c. 藻凝块云岩, ps1 井, 格架孔, 7261 m; d. 藻凝块云岩, ps1 井, 格架溶孔, 7262.41 m; e. 粉晶云岩, ps1 井, 晶间孔, 7541 m; f. 藻砂屑云岩, ps1 井, 粒间溶孔, 7261.9 m; g. 藻砂屑云岩, ps1 井, 溶蚀孔 7260.11 m; h. 粉晶白云岩, ps1, 构造缝、溶缝, 7259.33 m; i. 藻凝块云岩, ps1 井, 溶蚀缝, 7263.45 m

性分析, 柱塞样孔隙度介于 0.81%~4.67% 之间(图 2-a), 平均 2.36%, 其中孔隙度大于 2% 的样品占样品

数的 59%, 平均孔隙度为 3.15%, 样品渗透率介于 0.003~8.73 mD 之间, 平均 1.07 mD(图 2-b), 全直径

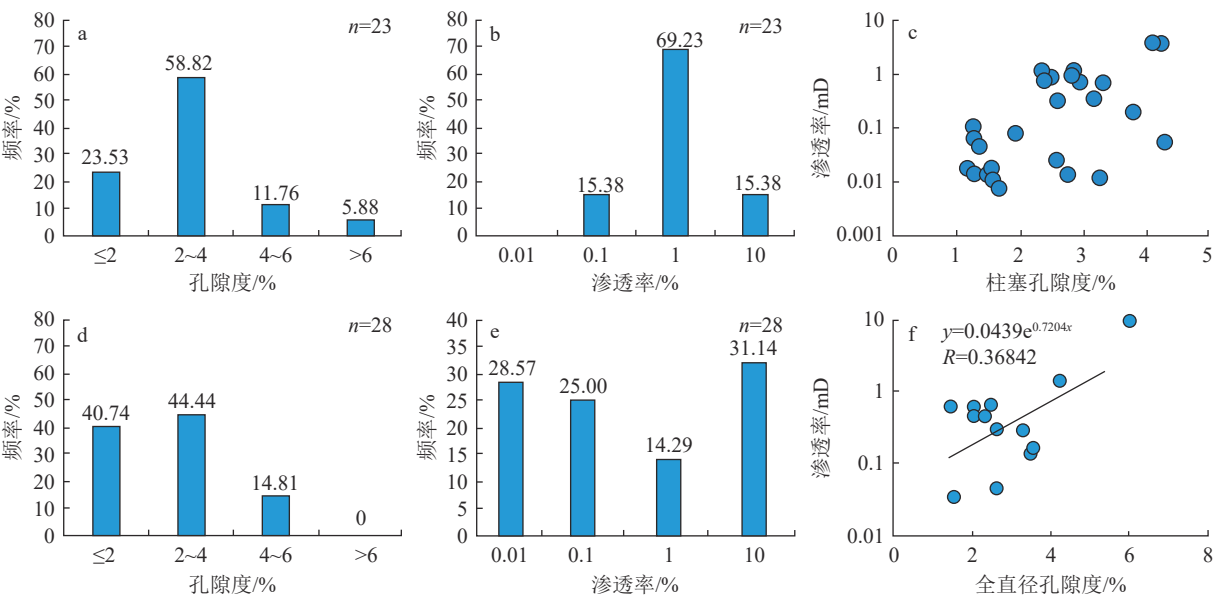


图 2 灯四段储层孔渗性特征

Fig. 2 Porosity and permeability characteristics of the Deng 4 reservoir

a—柱塞样孔隙度分布直方图; b—柱塞样渗透率分布直方图; c—柱塞样孔隙度-渗透率关系图; d—全直径样孔隙度分布直方图; e—全直径样渗透率分布直方图; f—全直径样孔隙度-渗透率关系图

样孔隙度介于 0.3%~6.03% 之间(图 2-d), 平均 2.32%; 其中大于 2% 的孔隙度占 76.46%, 平均孔隙度 3.2%; 渗透率分布在 0.003~9.78 mD 之间(图 2-f), 平均 1.14 mD, 根据实验结果, 灯四段储层具有低孔、低渗的特点。

对常规孔隙型储层而言, 孔隙度与渗透率之间具有较好的相关性, 对于岩溶性储层, 储层孔渗性不具有直接相关性。研究区全直径样及柱塞样孔渗性测试结果显示, 灯四段碳酸盐岩样品孔渗率相关性较差(图 2-c,f), 体现了储层的强非均质性, 结合岩心及薄片观察结果, 储层原生孔隙、溶蚀孔洞及微裂缝均有发育, 造成孔渗性的非均质性, 指示灯四段储层具有孔隙-溶孔-裂缝型储层特点。

3 储层成因类型

根据灯四段储集岩储集空间成因类型差异, 灯四段发育埋藏岩溶型、表生-埋藏叠加改造型及构造-热液改造型 3 种类型的储层。

3.1 埋藏岩溶型储层

灯四段储层具有形成时间早、整体厚度大的特点。灯四段上、下亚段储层发育明显, 在早期构造运动的影响下, 下亚段始终处于埋藏状态, 在长期深埋过程中, 岩石易溶矿物在地层水溶蚀作用下, 发育大量溶蚀孔, 形成埋藏岩溶型储层。从岩石薄片、岩心储集空间观察结果及纵向分布看, 埋藏岩溶型储层纵向上主要集中于下亚段的水平潜流带中, 上亚段不存在单独的埋藏岩溶型储层。

结合储层纵向分布及岩相对应关系, 埋藏岩溶型储层主要分布于颗粒滩及藻丘相中, 储集岩性包括粉晶白云岩及藻云岩 2 类。储层的平面及纵向分布具有显著的特点, 岩心表现上, 埋藏岩溶型储层溶蚀孔洞表现为横向上具有平行、沿藻纹层带分布的特点(图版 III-a, b), 孔隙通常具有针孔状特点, 纵向不连通, 成像测井图(图版 III-c)显示, 溶蚀孔洞具有顺层分布特点, 通常溶孔孔径差异不大。岩石薄片观察显示, 在具纹层状白云岩中, 溶蚀孔洞的发育具有沿藻纹层平行分布的特点, 岩心及薄片鉴定显示多为白云石及沥青半充填, 造成储集性能降低, 是灯四段下部储层的主要形成方式。

3.2 表生-埋藏岩溶叠加改造型储层

灯四段沉积晚期, 水体较浅, 礁滩体形成后, 受桐湾运动的影响, 四川盆地中部地区出现大面积抬

升, 灯影组埋藏大幅度降低, 部分地层出露于地表之上, 在大气水淋滤影响下发育垂直渗流带及大量的表生溶蚀孔洞, 通常这部分溶蚀孔较大(图版 III-d, e)。桐湾运动后, 灯影组再次发生深埋藏, 在地层水及酸性流体的共同作用下, 早期表生形成的溶蚀孔洞再次扩大, 同时形成大量小型溶蚀孔, 构成表生-埋藏岩溶叠加改造型储层。

这类储层主要分布于灯四段上部的丘滩复合体中, 储层岩性主要为藻凝块云岩, 同时含有藻叠层云岩及藻纹层云岩, 储集空间主要为溶孔、溶洞及微裂缝。根据岩心及岩石薄片观察结果, 在渗流带, 经过岩溶作用的叠加改造, 岩心上发育蜂窝状的溶蚀孔洞, 孔隙直径较大, 部分大型溶蚀孔中可见小型的溶蚀角砾(图版 III-d)。单层纵向连续性较好, 且厚度较厚。结合整体观察, 溶蚀孔洞具有顶部大, 向下逐渐减小的趋势, 存在一定表生岩溶的特点。镜下观察发现, 溶蚀孔大量发育, 见白云石及沥青半充填, 成像测井(图版 III-f)显示, 溶蚀孔洞与裂缝搭配好, 溶孔溶洞之间通过裂缝相连通。结合孔隙度测试结果, 表生-埋藏岩溶叠加改造型储层孔隙度较大, 最大孔隙度在 12% 以上, 渗透率普遍在 0.1 mD 以上, 为研究区最优质的储层类型。

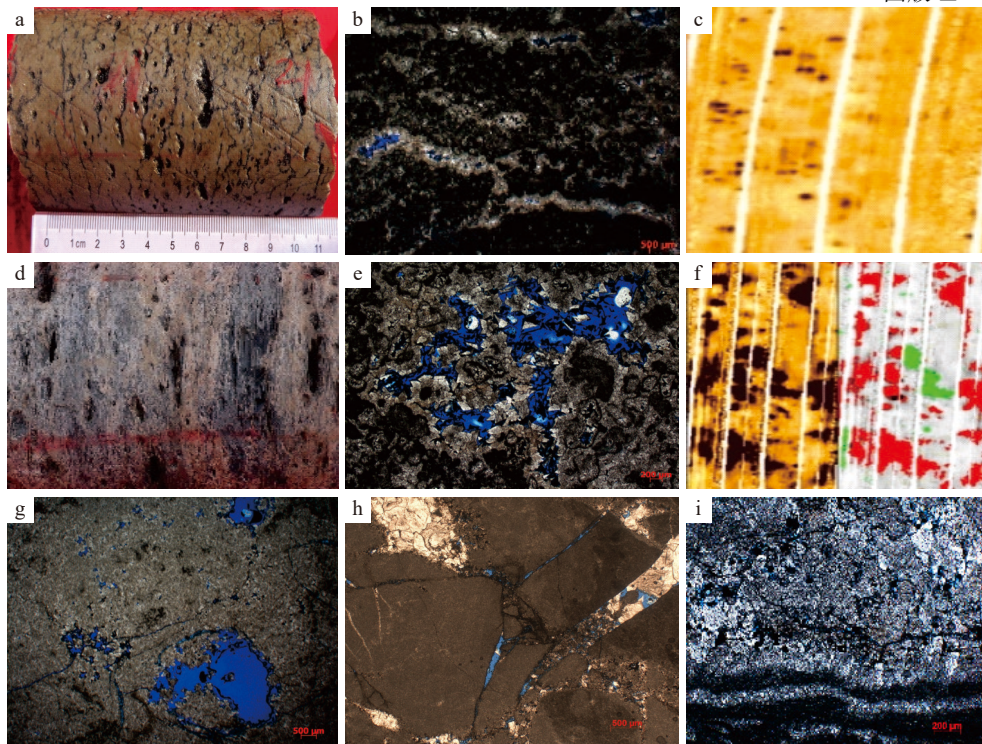
3.3 构造-热液改造型储层

溶蚀作用是灯四段储集空间主要的形成控制因素。灯四段形成后受多起构造运动改造, 地层发育大量裂缝, 同时受周缘裂陷槽的影响, 灯四段发育构造-热液改造型储层。这类储层通常不单独存在, 灯四段经历长期深埋及多期构造运动, 岩心观察发现大量裂缝, 形成裂缝性储层, 在原生孔隙及溶蚀孔洞欠发育段, 裂缝可单独作为储集空间形成裂缝性储层, 在靠近裂陷槽的情况下, 这些裂缝为深部热液的上流提供了通道, 在储层埋藏过程中, 深部热液沿裂缝发育运移, 发生热液交代作用, 镜下观察显示, 在构造裂缝及微裂缝为热液白云石所充填, 同时可见鞍状白云石存在, 发育晶间溶蚀孔, 镜下观察可见大量半充填微裂缝沟通彼此孤立的溶蚀孔洞, 溶蚀孔边缘圆滑, 具有港湾状的特点(图版 III-g-i), 表明这部分孔隙的形成与深部热液有关。由此产生以热液溶蚀缝洞为主的构造-热液型储层。

4 储层形成控制因素

灯四段储层具有形成时间早、后期改造强的特

图版 III Plate III



a. 粉晶云岩, ps1 井, 顺层溶蚀, 7259.20 ~ 7259.33 m; b. 藻纹层云岩, ps1 井, 沿藻纹层溶蚀, 7245.2 m; c. 藻纹层云岩, ps1 井, 成像测井溶蚀孔顺层分布, 7245.2 m; d. 藻叠层云岩, ps1 井, 顺层溶蚀孔, 7254.6 m; e. 泡沫棉层状藻云岩, ps1 井, 格架孔, 6409.43 m; f. ps1 井, 溶蚀孔与裂缝沟通, 7236.9 m; g. 粉晶云岩, ps1 井, 溶蚀孔 6410.61 m; h. 角砾白云岩, ps1, 构造缝、溶缝, 6709.3 m; i. 藻叠层云岩, ps1 井, 裂缝沟通孤立孔, 7272.4 m

点, 灯四段地层沉积形成后经历表生、埋藏岩溶作用及后期构造改造的联合作用, 共同控制储集空间形成, 因此成岩作用、沉积作用、构造运动等均为灯四段储层行程的控制因素。

4.1 沉积相对储层的控制

沉积相决定储层物质组成, 是决定储层形成的关键性因素(张玺华等, 2019)。沉积相指示沉积水体能量, 强水动力环境有利于造礁生物生长, 通常发育藻丘及颗粒滩相带, 发育藻白云岩、藻叠层云岩、藻纹层云岩等, 弱水动力条件下通常发育滩间海, 主要岩性为泥晶云岩。灯四段沉积形成后, 早期溶蚀作用开始发生, 对于原生孔隙较发育的粉晶云岩及藻白云岩而言, 藻纹层的存在加速了溶蚀作用的发生, 为储层发育的有利相带, 而弱水动力环境下发育的滩间海相带, 岩性致密, 不利于优质储层的发育(图3)。根据东坝1—蓬深13—蓬深1井沉积相连井对比图可知, 藻丘集中分布于灯四上亚段, 结合纵向上沉积相的差异, 将不同的沉积相纵向组合划分为不同的沉积旋回, 以滩间海—藻丘为一个沉积旋回, 优质储层发育于沉积旋回的中上部。

4.2 成岩作用对储层发育的影响

灯四段主要储集空间为后期溶蚀孔洞, 而表生岩溶及埋藏岩溶作用是储层形成的关键性因素, 决定了优质储层的分布(兰才俊等, 2019)。桐湾运动Ⅱ幕时期灯四段发生第一次大规模抬升, 该期构造运动造成灯四段部分地层出露地表, 接受风化剥蚀及地表水的淋滤作用, 形成早期储集空间, 决定了初期岩溶的强度及分布; 随着灯四段持续的埋藏作用, 地层热液流体及有机酸的作用促使岩溶作用进一步发生, 对藻丘相发育的白云岩而言, 溶蚀作用进一步发育, 在扩大早期孔洞的同时, 对易溶组分进一步溶蚀, 在藻丘储集体中形成新的储集空间, 有效增加纵向岩溶作用发生范围, 提高了灯四段储层品质。

4.3 构造作用对优质储层的促进

根据前文所述, 灯四段不同深度段储层中溶蚀孔洞是主要的储集空间, 对于表生-埋藏岩溶叠加改造型储层、埋藏岩溶性储层而言, 裂缝可以促进岩溶作用的发生, 有利于储集空间发育。灯影组形成后, 先后受桐湾运动及后期多期次构造运动的影响(王静怡等, 2016), 地层发生褶皱抬升作用, 结合岩心及

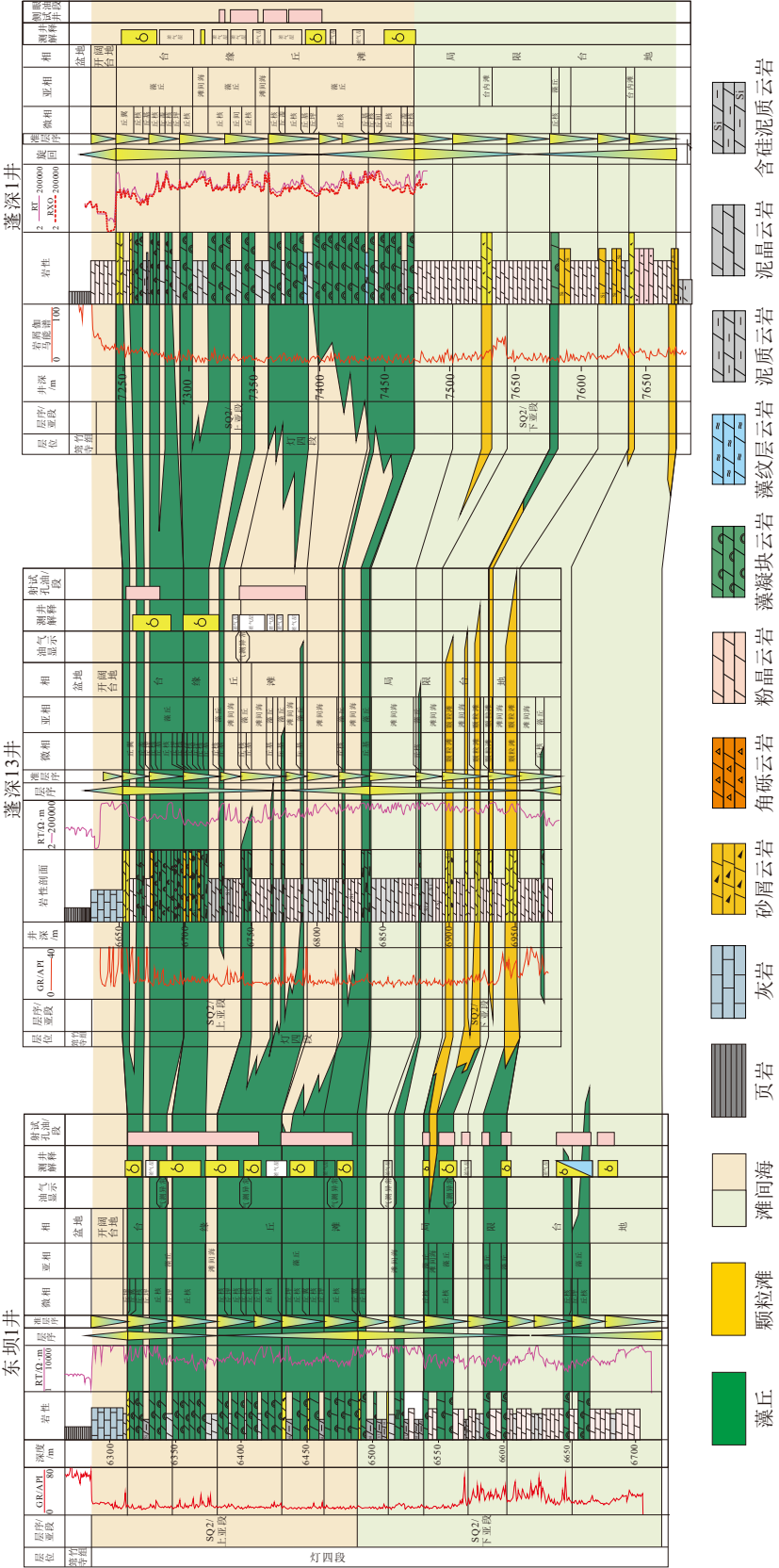


图 3 东坝1井-蓬深13井-蓬深1井沉积相连井对比图

Fig. 3 Comparison diagram of sedimentary connected wells among Dongba well 1, Pengshen well 13 and Pengshen well 1

岩石薄片观察结果,白云岩地层中形成大量的构造、非构造裂缝(图版 II-h)。对上亚段储层而言,早期裂缝加速沟通的地表水与储层的接触,为地表水的下渗与溶蚀提供了通道,同时在埋藏过程中,层内裂缝沟通彼此孤立的孔隙,这些裂缝加速了岩溶作用的发生,在增加储集空间的同时,能有效提高储层渗透率,增强储层有效性。结合勘探开发成果,目前最优质储层集中分布于上亚段的中上部,普遍具有孔隙度、渗透率及含油性高的特点,结合实验测试结果,造成储层渗透率快速增加的原因主要为裂缝。

5 结 论

(1)四川盆地蓬深1井—东坝1井灯四段储集岩类型包括藻白云岩、泥—粉晶云岩、角砾云岩、砂屑云岩4类,储集空间以溶蚀孔洞为主,原生孔隙和裂缝次之,为典型的溶孔-孔隙-裂缝型储层。研究区灯四段储层分为埋藏岩溶型储层、表生-埋藏叠加改造型储层、构造-热液改造型储层3类。

(2)沉积相决定储层物质组成及原生储集空间的形成,控制储层的纵向展布,早期表生溶蚀及埋藏岩溶作用控制次生溶孔形成及优质储层展布,裂缝的存在促进了岩溶作用的发生,对提高储层渗透率至关重要。

References

- Chen Y A, Shen A J, Pan L Y, et al. 2017. 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*, 44(5): 704–715(in Chinese with English abstract).
- Fan Q H, Zhang L J, Zhu Y F, et al. 2012. The identification and study of reef-banks complex in Middle Ordovician in Wellblock HD 23 in Tarim Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(4): 247–254(in Chinese with English abstract).
- He S, Qin Q R, Wang J S, et al. 2020. Fracture properties and development mechanisms of Sinian Dengying-4 Member in Central Sichuan[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 27(4): 60–66(in Chinese with English abstract).
- Hu X Q, Lu H J, Yi C, et al. 2022. A study of reservoir architecture of Dengying formation in Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin[J]. *Carsologica Sinica*, 41(6): 847–859(in Chinese with English abstract).
- Lan C J, Xu Z H, Ma X L, et al. 2019. Development and distribution of mound-shoal complex in the Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin and its control on reservoirs[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 40(9): 1069–1084(in Chinese with English abstract).
- Li A P, Gao D, Hu M Y, et al. 2023. Deposition model and main factors controlling depositional processes for microbialites in the Fourth Member, Dengying Formation, Central Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, (4): 1080–1096(in Chinese with English abstract).
- Ni C, Li Y, Yu S Y, et al. 2016. Morphology and palaeoecology of the earliest Silurian reef in Shiqian, Northeast Guizhou[J]. *Chinese Journal of Geology*, 51(3): 978–989(in Chinese with English abstract).
- Song J M, Liu S G, Li Z W, et al. 2017. Characteristics and controlling factors of microbial carbonate reservoirs in the Upper Sinian Dengying Formation in the Sichuan Basin, China[J]. *Oil & Gas Geology*, 38(4): 741–752(in Chinese with English abstract).
- Tian X W, Zhang X H, Peng H L, et al. 2019. Productivity Differences of Gas Reservoirs in the Fourth Member of Sinian Dengying Formation in Gaoshiti-Moxi Area, Central Sichuan Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 40(6): 673–679(in Chinese with English abstract).
- Wang J Y, Hu M Y, Gao D, et al. 2016. Reservoir characteristics and control factors of fourth Member of Dengying Formation in central Sichuan Basin[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 23(6): 697–702(in Chinese with English abstract).
- Wen L, Wang W Z, Zhang J, et al. 2017. Classification of Sinian Dengying Formation and sedimentary evolution mechanism of Gaoshiti-Moxi area in central Sichuan Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(4): 1285–1294(in Chinese with English abstract).
- Xia Q S, Huang C G, Yang Y R, et al. 2021. Reservoir characteristics and main controlling factors of oil and gas accumulation of Dengying Formation, Sinian System, in Gaoshiti-Moxi area, Sichuan Basin[J]. *Geological Review*, 67(2): 441–458(in Chinese with English abstract).
- Xu X, Hu M Y, Gao D. 2018. Sedimentary characteristics and main control factors for microbialite of the fourth Member of Dengying Formation in Moxi-Gaoshiti area, central Sichuan basin[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 30(2): 25–34(in Chinese with English abstract).
- Yan H J, Peng X, Xia Q Y, et al. 2020. Distribution features of ancient karst landform in the fourth Member of the Dengying Formation in the Gaoshiti-Moxi region and its guiding significance for gas reservoir development[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 41(6): 658–670, 752(in Chinese with English abstract).
- Yang Y, Wen L, Xie J R, et al. 2020. Progress and direction of marine carbonate gas exploration in Sichuan Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 25(3): 44–55(in Chinese with English abstract).
- Zhang X H, Tian X W, Yang D L, et al. 2021. Genesis and characteristics of marine carbonate reservoirs in Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 44(3): 1–10(in Chinese with English abstract).
- Zhang X H, Peng H L, Tian X W, et al. 2019. Influence of difference among bioherm beach facies reservoirs on exploration model: An example from Sinian Dengying Formation, central Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 42(2): 13–21(in Chinese with English abstract).
- Zhu X, Gu Y F, Jiang Y Q, et al. 2019. Characteristics and reservoir body classification & evaluation of Sinian Dengying karst reservoirs in the

Gaoshiti Block of central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 39(3): 38–46(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈娅娜, 沈安江, 潘立银, 等. 2017. 微生物白云岩储集层特征、成因和分布——以四川盆地震旦系灯影组四段为例[J]. 石油勘探与开发, 44(5): 704–715.
- 范秋海, 张丽娟, 朱永峰, 等. 2012. 塔里木盆地 HD23 井区中奥陶统生物礁滩体的识别与研究[J]. 地学前缘, 19(4): 247–254.
- 何顺, 秦启荣, 王家树, 等. 2020. 川中地区震旦系灯影组四段裂缝特征及发育机理[J]. 特种油气藏, 27(4): 60–66.
- 胡修权, 鲁洪江, 易驰, 等. 2022. 川中高石梯—磨溪地区震旦系灯影组储层构型研究[J]. 中国岩溶, 41(6): 847–859.
- 兰才俊, 徐哲航, 马肖琳, 等. 2019. 四川盆地震旦系灯影组丘滩体发育分布及对储层的控制[J]. 石油学报, 40(9): 1069–1084.
- 李安鹏, 高达, 胡明毅, 等. 2023. 川中地区灯影组四段微生物岩沉积模式及主控因素[J]. 沉积学报, (4): 1080–1096.
- 倪超, 李越, 于深洋, 等. 2016. 黔东北石炭志留纪最早期生物礁的形态学和古生态学[J]. 地质科学, 51(3): 978–989.
- 宋金民, 刘树根, 李智武, 等. 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[J]. 石油与天然气地质, 38(4): 741–752.
- 田兴旺, 张玺华, 彭瀚霖, 等. 2019. 川中高石梯—磨溪地区震旦系灯影组四段气藏产能差异[J]. 新疆石油地质, 40(6): 673–679.
- 王静怡, 胡明毅, 高达, 等. 2016. 川中地区灯影组四段储层特征及主控因素[J]. 断块油气田, 23(6): 697–702.
- 文龙, 王文之, 张健, 等. 2017. 川中高石梯—磨溪地区震旦系灯影组碳酸盐岩岩石类型及分布规律[J]. 岩石学报, 33(4): 1285–1294.
- 夏青松, 黄成刚, 杨雨然, 等. 2021. 四川盆地高石梯—磨溪地区震旦系灯影组储层特征及主控因素[J]. 地质论评, 67(2): 441–458.
- 徐欣, 胡明毅, 高达. 2018. 磨溪—高石梯地区灯影组四段微生物岩沉积特征及主控因素[J]. 中国海上油气, 30(2): 25–34.
- 闫海军, 彭先, 夏钦禹, 等. 2020. 高石梯—磨溪地区灯影组四段岩溶古地貌分布特征及其对气藏开发的指导意义[J]. 石油学报, 41(6): 658–670, 752.
- 杨雨, 文龙, 谢继容, 等. 2020. 四川盆地海相碳酸盐岩天然气勘探进展与方向[J]. 中国石油勘探, 25(3): 44–55.
- 张玺华, 彭瀚霖, 田兴旺, 等. 2019. 川中地区震旦系灯影组丘滩相储层差异性对勘探模式的影响[J]. 天然气勘探与开发, 42(2): 13–21.
- 张玺华, 田兴旺, 杨岱林, 等. 2021. 四川盆地海相碳酸盐岩储层成因及特征[J]. 天然气勘探与开发, 44(3): 1–10.
- 朱讯, 谷一凡, 蒋裕强, 等. 2019. 川中高石梯区块震旦系灯影组岩溶储层特征与储渗体分类评价[J]. 天然气工业, 39(3): 38–46.