

川中高石 1 井区灯影组二段早成岩期 岩溶特征及其对储集层的影响*

曾建军^{1,2} 谭秀成^{1,2} 赵东方^{1,2} 何如意^{1,2} 罗文军³
刘 耘³ 徐 伟³ 李绍瑞^{1,2} 邓 禹^{1,2} 吴 昊^{1,2}

1 西南石油大学油气藏地质及开发工程全国重点实验室, 四川成都 610500

2 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室西南石油大学研究分室, 四川成都 610500

3 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 四川成都 610041

摘 要 四川盆地震旦系灯影组二段储集层成因长期存在风化壳岩溶、准同生期岩溶及埋藏热液岩溶之争, 严重制约了储层预测模型的建立和勘探开发效益。鉴于此, 以高石 1 井区灯二段为例, 基于钻井岩心、岩石薄片、测井等资料, 识别并梳理出灯二段岩溶特征, 讨论岩溶差异性及其对储集层发育和保持的控制作用。结果表明: 灯二段发育高频暴露溶蚀面、组构选择性溶蚀孔洞、示顶底构造、花斑状和海绵状溶蚀构造及岩溶角砾等溶蚀组构, 这类溶蚀特征与高频向上变浅沉积序列密切相关, 且主要发育在沉积序列的中上部; 根据岩溶强度可识别出组构选择性溶蚀、岩溶分带以及整体角砾化 3 种岩溶序列; 高频旋回界面之下的沉积物具有 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值负偏、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值正偏特征。进一步分析发现, 灯二段孔洞型薄储集层与岩溶组构一样, 均发育在高频向上变浅沉积序列中上部, 且大量充填残余物的岩溶孔洞周缘具有泥晶套、纤维状环边胶接, 部分孔洞中可见示顶底构造, 指示岩溶孔洞形成后又重新进入海底成岩环境。结合高频旋回界面之下的沉积物具有碳氧同位素负偏、锶同位素正偏等特征, 认为这类孔洞型薄储集层的发育受控于高频海平面变化驱动下的早成岩期岩溶作用, 其在纵向上叠置而呈现出“薄层多套”的分布规律, 储集层相控特征明显; 不同强度的岩溶作用改变了孔洞的连通性, 其中组构选择性溶蚀阶段多形成相对孤立的小型溶孔洞, 因海底胶结作用使孔洞更趋孤立而长期保存, 而岩溶分带和整体角砾化阶段的溶蚀孔洞进一步连通, 后期更易遭受机械充填和化学胶结作用而使储集层非均质性增强, 甚至储集性能显著变差。上述研究结果不仅对古老深层优质储集层预测具有重要的指导作用, 同时也揭示出在不同强度岩溶作用改造下岩溶系统连通性对早成岩期溶蚀孔洞保持路径的控制, 为古老深层碳酸盐岩储集层的形成和保持提供了新的研究思路。

关键词 高频暴露 早成岩期岩溶 岩溶强度 孔洞型薄储集层 相控特征 灯影组 四川盆地

第一作者简介 曾建军, 男, 1999 年生, 硕士研究生, 地质学专业。E-mail: zengjianjun0804@163.com。

通讯作者简介 谭秀成, 男, 1970 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事碳酸盐岩沉积学与储层地质学研究。E-mail: tanxiucheng70@163.com。

中图分类号: P588.24⁺5 文献标志码: A

Characteristics of eogenetic karst and its influence on reservoir of the Member 2 of Dengying Formation from Wellblock GS1,

* 中国石油—西南石油大学创新联合体科技合作项目 (编号: 2020CX010300) 和国家自然科学基金青年基金项目 (编号: 42302169) 联合资助。[Co-funded by Science and Technology Cooperation Project of PetroChina-Southwest Petroleum University Innovation Consortium (No. 2020CX010300) and the Young Scientists Foundation of National Natural Science Foundation of China (No. 42302169)]

收稿日期: 2023-12-28 改回日期: 2024-03-05

central Sichuan Basin

ZENG Jianjun^{1,2} TAN Xiucheng^{1,2} ZHAO Dongfang^{1,2} HE Ruyi^{1,2} LUO Wenjun³
LIU Yun³ XU Wei³ LI Shaorui^{1,2} DENG Yu^{1,2} WU Hao^{1,2}

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

2 Southwest Petroleum University Division of Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, CNPC, Chengdu 610500, China

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

Abstract The genesis of reservoirs in Member 2 of the Sinian Dengying Formation in the Sichuan Basin has long been a subject of debate, including weathered crust karst, pene-sedimentary karst and buried hydrothermal karst, which significantly impedes the establishment of reservoir prediction model and the exploration and development benefit. This paper uses Member 2 of the Dengying Formation from Well-block Gaoshi 1 as a case study. By analyzing drilling core samples, thin sections, well logging data, etc., the karst characteristics of Member 2 of the Dengying Formation is identified and categorized. Furthermore, the variations in karst features and their impact on reservoir development and maintenance have been discussed. The results indicate that: (1) Member 2 of the Dengying Formation exhibits features such as high-frequency corrosion surface, fabric-selective corrosion cavity, geopetal structure, semi-dissociation zone, graniphyric textures, spongy corrosion structures, and karst breccias; (2) The dissolution characteristics are closely associated with the high-frequency shallower-upward sedimentary sequence, predominantly developing in the middle and upper parts of this sequence; (3) Based on the karst strength, three types of karst sequences can be identified: fabric selective corrosion, karst zonation, and integral brecciation; (4) Additionally, a negative bias in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ as well as a positive bias in $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, are observed at the high-frequency cycle interface. Further analysis indicates that the thin reservoir of Member 2 of the Dengying Formation is also developed in the middle and upper parts of the high-frequency shallower-upward sedimentary sequence. A significant number of residual karst caverns are filled with micritic envelopes and fibrous isopachous cements. Additionally, some of these caverns exhibit geopetal structures, indicating that they re-entered the submarine diagenetic environment after the formation of karst caverns. Considering the characteristics of negative carbon and oxygen isotope biases and positive strontium isotope biases at high-frequency cycle interfaces, it is proposed that the development of this kind of porous thin reservoir is primarily influenced by eogenetic karst processes driven by the high-frequency sea level changes. The vertical superposition exhibits a distribution pattern characterized by “multiple thin layers”, with distinct facies-controlling features. The karstification with different intensities change the connectivity of pores. Relatively isolated small dissolved pores are primarily formed during the fabric selective solution stage, where they remain more isolated and preserved for extended periods due to seabed cements. In contrast, during the karst zonation and integral brecciation stage, these dissolved pores become increasingly interconnected. In the later stages, they are more prone to mechanical filling and chemical bonding, which enhances reservoir heterogeneity and can significantly deteriorate reservoir performance. Furthermore, it has been revealed that the connectivity of the karst system controls the maintenance pathway of dissolution pores during the early diagenetic stage, under different karst strength transformation. This finding offers a new perspective for understanding the formation and preservation of ancient deep carbonate reservoirs.

Key words high-frequency exposure, eogenetic karst, karst strength, porous-type thin reservoir, facies-controlling feature, Dengying Formation, Sichuan Basin

About the first author ZENG Jianjun, born in 1999, master degree candidate, is engaged in research on geology. E-mail: zengjianjun0804@163.com.

About the corresponding author TAN Xiucheng, born in 1970, is a professor and Ph.D. advisor of Southwest Petroleum University. He is mainly engaged in researches on carbonate sedimentology and reservoir geology. E-mail: tanxiucheng70@163.com.

随着油气钻探向深部进军,大量实钻案例证实,在深层—超深层地层中仍然保存大量优质的孔洞型碳酸盐岩储集层,如美国 Wind River 盆地 Madison 组 (Moore *et al.*, 1995)、四川盆地灯影组 (罗冰等, 2015; 赵东方等, 2022)、塔里木盆地良里塔格组 (赵宗举等, 2004; 郑剑等, 2015) 等。对储集层成因机理的研究及相关预测模型建立是支撑该类储渗体规模效益勘探开发的关键,其中储集层成因研究的本质应是探寻其形成的初始动力,而后期多幕式的成岩改造仅是对前期储渗体的调整和优化,难以改变储渗体的时空分布规律 (谭秀成, 2007)。

作为古老深层白云岩孔洞型储集层的代表,四川盆地震旦系灯影组二段气藏先后在高磨台缘及蓬萊地区试获高产工业气流,揭示了盆地内灯二段孔洞型白云岩储集层具有巨大的勘探潜力 (杨跃明等, 2016; 张本健等, 2023)。自灯二段气藏进入勘探开发以来,前人对该储集层形成机理开展了大量研究,但由于灯二段埋深大、年代老、遭受的构造运动以及成岩作用复杂,目前仍具争议 (周吉羚等, 2015)。现已报道的形成机理包括表生或风化壳岩溶控储 (莫静等, 2013; 李勇等, 2019)、准同生期岩溶控储 (周进高等, 2015; 徐哲航等, 2020) 以及多期岩溶叠合控储 (王兴志等, 1996; 张玺华等, 2023) 等,且以表生或风化壳岩溶控储理论为主导。然而,近期在对蓬探 1 井区北部和西部斜坡带拓展勘探的过程中,围绕风化壳岩溶理论体系开展的钻探工作未能取得理想成效,孔洞型白云岩储集层占比大大减小,储集层非均质性增强,制约了灯二段储集层规模效益勘探开发。随着灯二段系统岩心资料的丰富,逐渐揭示出灯二段内幕孔洞型储集层受多级层序界面约束的内幕岩溶控制,暗示这类储集层可能是早期相控岩溶成因,而非传统认为的桐湾 I 幕风化壳岩溶。鉴于此,文中以系统取心资料丰富的高石 1 井区灯二段为例,在总结前人研究成果的基础上,基于岩心、薄片资料以及测井资料等,对灯二段内幕高频相控岩溶特征

进行梳理,探讨不同岩溶特征在向上变浅旋回中的组合形式,并分析岩溶与孔洞型储集层的关系。期望研究结果能为此类储集层的预测提供理论指导,同时为古老深层碳酸盐岩储集层的形成和早成岩期岩溶理论提供新的视角和材料。

1 区域地质背景

新元古代中晚期,随着 Rodinia 大陆发生裂解 (Li *et al.*, 2008), 华南板块逐渐演化成一个巨大的陆内裂谷盆地 (王剑, 2000)。成冰纪末期,“Marinona 雪球事件”结束引起相对海平面快速上升,在全球范围内发生大规模海侵 (Hoffman and Schrag, 2002; Hoffman *et al.*, 2017), 致使扬子板块呈现出西北缘为浅水台地、东南缘为深水盆地的古地理格局 (Jiang *et al.*, 2011)。至灯影组沉积期,相对海平面上升至最高,四川盆地及周缘以发育陆缘滨浅海相碳酸盐沉积为主 (魏国齐等, 2015; 罗垚等, 2022)。根据岩性特征,灯影组自下而上可划分为 4 段:灯一段主要发育大套的泥晶云岩,含少量微生物云岩;灯二段和灯四段以发育微生物云岩和颗粒云岩为主,其中灯四段含硅质云岩;灯三段则多具混积特征,主要发育泥质粉砂岩、泥质云岩,局部发育砂岩或砂质砾岩。受灯二段沉积末期及灯四段沉积末期发生的桐湾 I、II 幕抬升构造运动影响,盆地内灯影组遭受不同程度的剥蚀,地层厚度差异较大 (朱东亚等, 2014; 汪泽成等, 2017)。本次研究对象为高石 1 井区灯二段,该井区位于川中古隆起中斜平缓构造带 (图 1),灯二段整体为浅水碳酸盐岩台地沉积。

2 主要岩石类型及沉积序列

2.1 主要岩石类型

基于细致的宏、微观分析,川中高石 1 井区灯影组二段主要发育 (含微生物) 泥晶云岩、叠层石云岩、凝块云岩、(粘结) 颗粒云岩以及岩溶角

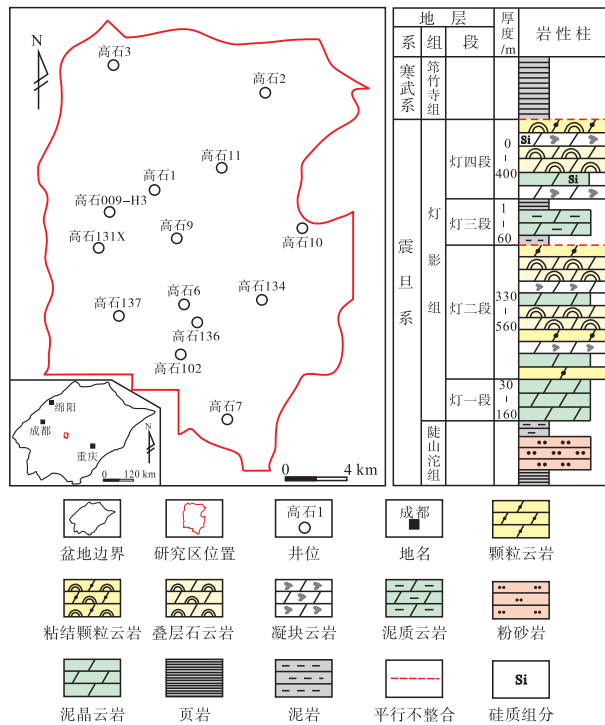


图 1 川中高石 1 井区构造位置及震旦纪地层特征

Fig. 1 Tectonic location and the Sinian stratigraphic characteristics of Wellblock GS1 in central Sichuan Basin

砾云岩, 其中(粘结)颗粒云岩和凝块云岩内发育大量孤立的溶蚀孔洞, 是灯二段主要的储集岩类。

1) (含微生物) 泥晶云岩。呈深灰色, 具泥晶结构(图 2-a)。宏观上具块状构造, 岩性致密。镜下可见少量暗色微生物组构, 呈凝絮状或纹层状分散其中。此外, 局部泥晶基质受重结晶作用影响, 可出现粉晶。

2) 叠层石云岩。该类岩石由明暗相间的纹层构成, 具纹层结构, 其中暗纹层富有机质, 由泥晶白云石和微生物组构组成, 亮纹层贫有机质, 为细—粉晶白云石。依据纹层产状, 可将其划分为平直状叠层石云岩(图 2-b) 和丘状叠层石云岩(图 2-c)。宏观上, 前者纹层近乎平直, 横向上延续性好, 后者纹层呈明显丘状起伏, 连续性相对较差。在镜下, 前者明暗层间界线多呈低幅度起伏(图 2-b), 局部具渐变的特征, 后者纹层局部具明显的形变特征, 呈缓丘形起伏。

3) 凝块云岩。该类岩石含不规则的凝块组构, 组构内富含有机质, 呈暗色。根据凝块组构的含量及形态特征, 可细分为分散状凝块云岩(图 2-d)、顺层状凝块云岩(图 2-e) 和格架状凝块云岩(图 2-

f, 2-g) 3 类。分散状凝块云岩的凝块组构含量小于 40%, 多呈斑点状散布在泥—粉晶白云石基质中; 顺层状凝块云岩的凝块组构含量为 40%~80%, 呈条带状分布于基质中, 相较于叠层石云岩, 其条带厚度横向上差异明显; 格架状凝块云岩的凝块组构含量大于 80%, 彼此间搭连成生物格架。另外, 顺层状和格架状凝块云岩遭受岩溶作用改造, 形成凝块间残余溶孔(洞)(图 2-e, 2-f, 2-g)。

4) (粘结) 颗粒云岩。呈灰色—深灰色, 断口粗糙, 随微生物组构含量增多而颜色变深。颗粒分选、磨圆较好, 具微生物粘结特征。该类岩石受岩溶作用改造明显, 形成了大量的组构选择性溶蚀孔(洞)(图 2-h, 2-i)。

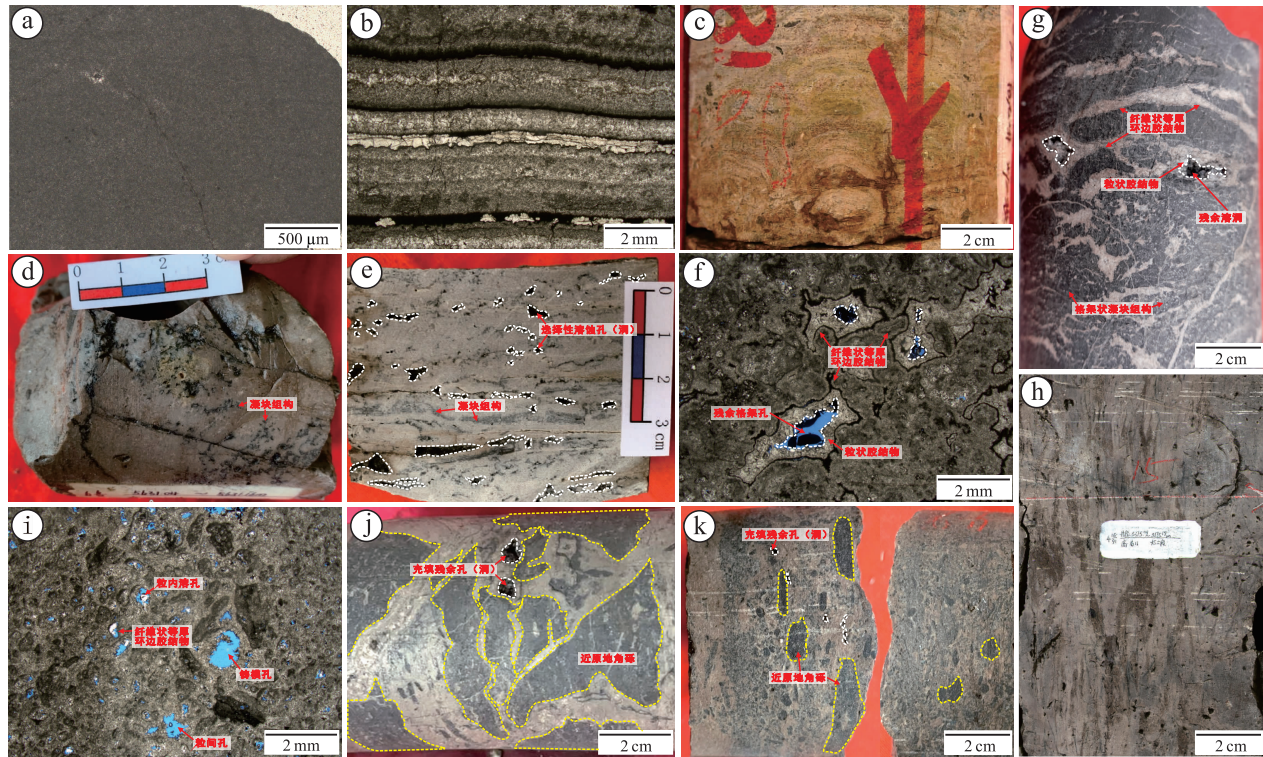
5) 岩溶角砾云岩。研究区主要发育近原地角砾云岩(图 2-j) 和溶洞充填角砾云岩(图 2-k)。前者角砾成分单一, 多棱角分明, 相邻角砾间大致可拼接, 另有部分角砾边缘不规则, 呈塑性变形假象; 后者成分复杂, 角砾具一定磨圆性, 多与碳酸盐岩砂以及泥质混合充填在溶洞中。

2.2 沉积序列

岩心观察表明, 高石 1 井区灯二段以丘滩复合体沉积为主, 并可在纵向上识别出多个向上变浅沉积序列。单套沉积序列厚度较小, 呈分米—米级旋回叠置(图 3)。研究区内可识别出(含微生物)泥晶云岩—叠层石云岩—格架状凝块云岩—角砾云岩(图 3 中的序列 I)、(含微生物)泥晶云岩—叠层石云岩—(粘结)颗粒云岩—角砾云岩(图 3 中的序列 II) 以及(含微生物)泥晶云岩—(粘结)颗粒云岩(图 3 中的序列 III) 等最为典型的向上变浅沉积序列。典型的沉积序列构成特征为: 底部为丘基微相, 以发育(含微生物)泥晶云岩为主, 是初始海平面快速上升背景下的低能沉积; 向上微生物活动逐渐增强, 其相互黏结、缠绕生长, 形成初具抗浪结构的生物格架; 中上部发育大量的叠层石云岩和凝块云岩, 构成了丘滩体的主体——丘核; 随着微生物向上建隆, 相对海平面持续下降和水动力增强, 先期形成的微生物岩再次破碎, 形成顶部的(粘结)颗粒云岩。

3 岩溶特征

川中高石 1 井区灯影组二段高频暴露溶蚀面、



a—泥晶云岩，普通薄片（-），高石 1 井，灯二段，5666 m；b—平直状叠层石云岩，普通薄片（-），高石 6 井，灯二段，5359.18 m；c—丘状叠层石云岩，岩心，高石 2 井，灯二段，5390.29~5360.36 m；d—分散状凝块云岩，岩心，高石 6 井，灯二段，5631.04~5631.11 m；e—顺层状凝块云岩，发育顺层状溶孔（洞），岩心，高石 11 井，灯二段，5380.17~5380.23 m；f—格架状凝块云岩，见残余格架孔，蓝色铸体（-），高石 11 井，灯二段，5380.28 m；g—格架状凝块云岩，见残余格架孔，岩心，高石 009-H3 井，灯二段，5474.00~5474.13 m；h—颗粒云岩，发育孤立的溶蚀孔洞，岩心，高石 11 井，灯二段，5375.05~5375.19 m；i—颗粒云岩，发育残余粒内孔、铸模孔，蓝色铸体（-），高石 11 井，灯二段，5375.19 m；j—原岩被溶缝切割形成近原地角砾云岩，溶缝内部被白云石全充填，高石 009-H3 井，灯二段，5453.62~5453.77 m；k—溶洞充填角砾云岩，高石 11 井，灯二段，5378.20~5378.30 m

图 2 川中高石 1 井区灯影组二段主要岩石类型

Fig. 2 Main rock types of the Member 2 of Dengying Formation of Wellblock GS1 in central Sichuan Basin

组构造选择性溶蚀、示顶底构造、花斑状岩溶、海绵状溶蚀体以及岩溶角砾等岩溶组构广泛发育。这类溶蚀特征与向上变浅沉积序列密切相关。

3.1 岩溶组构特征

3.1.1 高频暴露溶蚀面

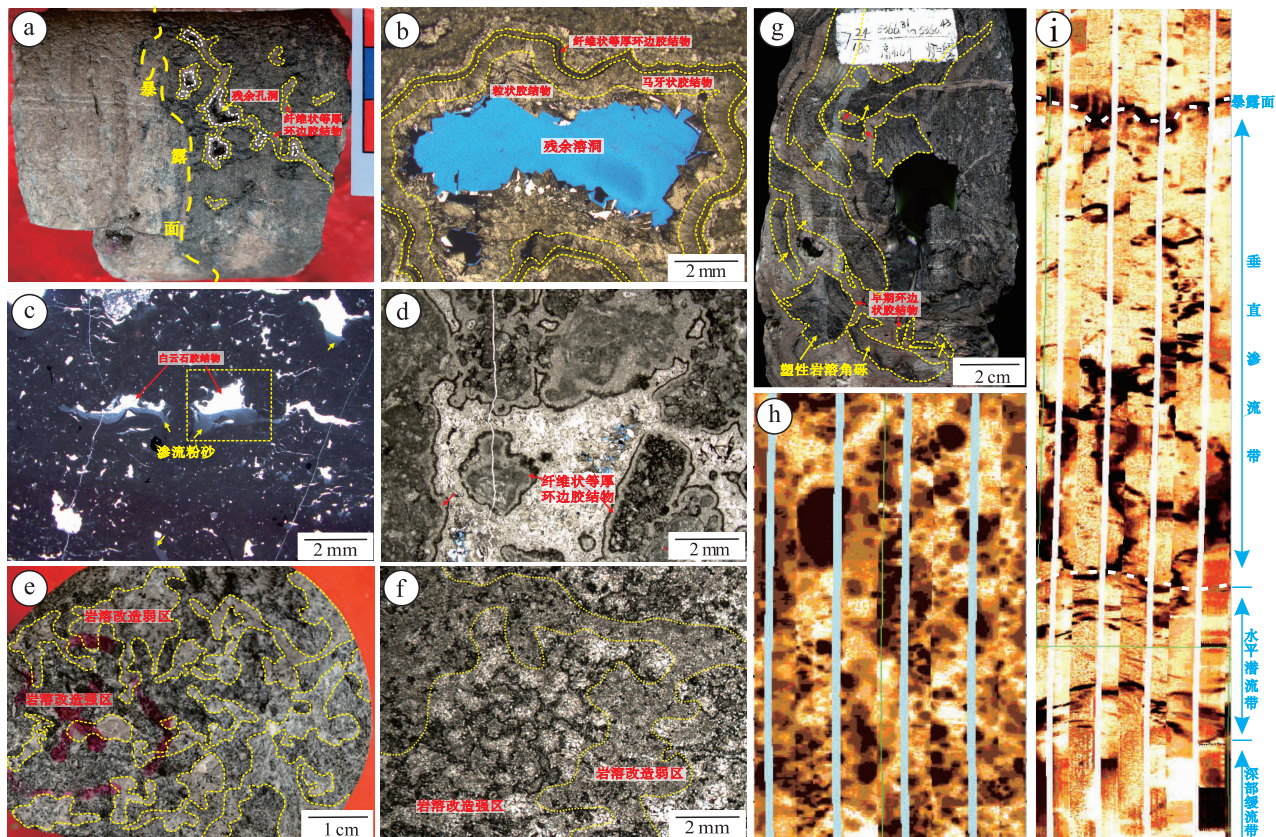
暴露溶蚀面在灯二段中普遍发育，但暴露时间一般较短，未见风化壳和古土壤。宏观上呈不规则的岩性突变面(图 4-a)，界面之下岩溶特征明显，并以溶蚀孔（洞）和优势岩溶通道切割的岩溶角砾为特征，而界面之上叠覆后期高频旋回的初始海侵沉积物，岩性多为泥—粉晶云岩或平直状叠层石云岩等低能沉积物，岩性相对致密，溶蚀特征不明显。此外，界面之下碳氧同位素呈负偏、⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值呈正偏(图 3)。

3.1.2 组构选择性溶蚀孔（洞）

格架状凝块云岩和(粘结)颗粒云岩中分别发育大量(扩溶)格架孔(图 2-f)、粒内溶孔(图 2-i)以及小型溶洞(图 2-h)，孔(洞)多呈孤立状，周缘具泥晶套，通常被解释为蓝细菌等微生物在孔(洞)内壁钻孔、分泌细粒沉积物的结果(Bathurst, 1966)。孔洞内部被多期白云石胶结物半充填，其中第 1 期为纤维状等厚环边胶结，第 2 期为马牙状胶结，第 3 期为粒状胶结(图 2-f, 2-g; 图 4-b)。部分溶蚀孔(洞)中下部被渗流粉砂充填，上部为白云石胶结，呈示顶底构造(图 4-c)。

3.1.3 花斑状或海绵状溶蚀体

花斑状或海绵状溶蚀体广泛发育在(粘结)颗粒云岩中。岩心上其由浅色和暗色斑块斑杂分布构成，其中浅色部分原岩组构保存较好，岩溶作用改



a—暴露溶蚀面，下部（右）为岩溶角砾云岩，上部（左）为泥晶云岩，岩心，高石 6 井，灯二段，5378.62~5378.69 m；b—小型溶洞，洞壁见纤维环边胶结，蓝色铸体（-），高石 009-H3 井，灯二段，5546.78 m；c—示顶底构造，普通薄片（-），高石 6 井，灯二段，5379.73 m；d—角砾云岩，角砾间溶洞周缘具泥晶套和纤维状环边胶结物，蓝色铸体（-），高石 11 井，灯二段，5377.30 m；e—花斑状溶蚀，浅色斑块为围岩，深色斑块为岩溶漫流优势通道，岩心，高石 11 井，灯二段，5376.65 m；f—颗粒云岩，组构选择性溶蚀和渗流充填呈现泥晶化特征，普通薄片（-），高石 6 井，灯二段，5385.4 m；g—塑性角砾，角砾之间大致可拼接，角砾周缘生长早期环边状胶结物，岩心，高石 6 井，灯二段，5366.31~5366.43 m；h—成像测井中的海绵状溶蚀体，主要由大量中小型、孤立的溶蚀孔洞组成，高石 1 井，灯二段，5461.4~5362.4 m；i—成像测井中的岩溶分带特征，高石 134 井，灯二段，5531~5535 m

图 4 川中高石 1 井区灯影组二段早成岩期岩溶特征

Fig. 4 Characteristics of eogenetic karst of the Member 2 of Dengying Formation of Wellblock GS1 in central Sichuan Basin

列(图 3)，其中单期岩溶序列规模有限，溶蚀持续时间相对较短。依据岩溶改造强度，研究区内可识别出组构选择性溶蚀序列、岩溶分带溶蚀序列以及整体角砾化溶蚀序列 3 种岩溶序列类型，且不同岩溶序列内岩溶组构特征差异明显(图 5)。

3.2.1 组构选择性溶蚀序列

整体上，该类序列受岩溶改造较弱，表现为流体对原生孔隙进行扩溶改造，在序列中上部形成组构选择性溶蚀孔(洞)(图 2-f；图 4-b)以及花斑状溶蚀(图 4-e)。镜下可在孔(洞)中识别出泥晶套(图 2-f)、示顶底构造(图 4-c)以及早期纤维状环边胶结物(图 4-b)等早期成岩组构。这类岩溶组构在纵向上多呈旋回叠置，单个序列顶部以

选择性溶蚀孔(洞)和海绵状溶蚀为特征，向下仅发育花斑状溶蚀，或无明显溶蚀特征(图 5-a)。

3.2.2 岩溶分带溶蚀序列

该序列岩溶作用强度进一步增加，溶缝和溶沟开始大量出现，可因岩溶优势通道切割而呈现近原地角砾化。由上至下可在该序列内识别出近原地角砾化带、垂直渗流带、水平潜流带以及深部缓流带(图 4-i；图 5-b)。

1) 近原地角砾化带。高频暴露溶蚀面之下岩溶作用改造强烈，溶缝的发育极大地提高了岩溶系统的连通性，岩溶通道彼此切割使得基岩角砾化特征明显。

2) 垂直渗流带。潜水面之上，岩溶水在重力

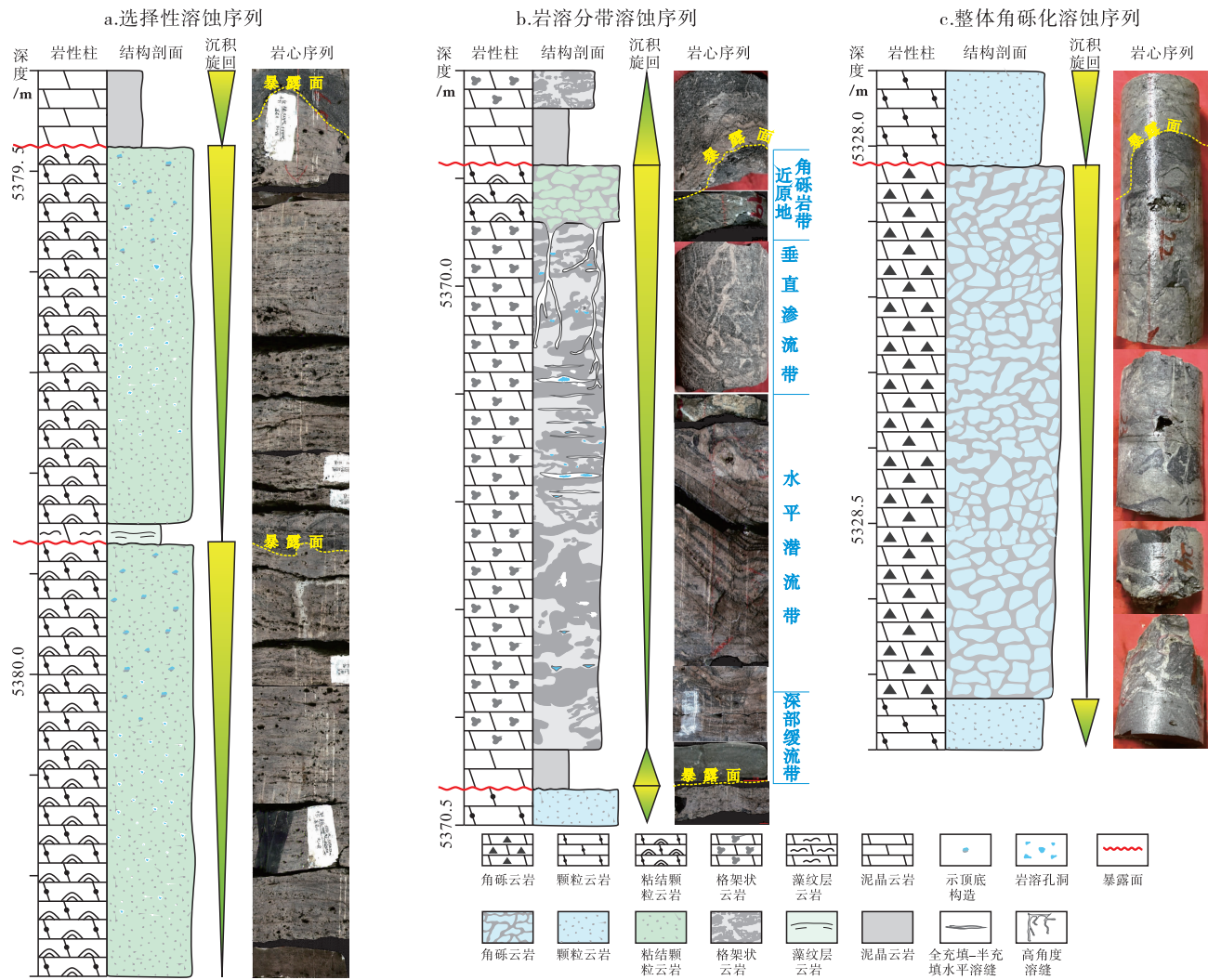


图 5 川中高石 1 井区米级岩溶序列特征

Fig. 5 Characteristics of meter-level karst sequence of Wellblock GS1 in central Sichuan Basin

作用下向下流动，并对流经区域附近的岩石进行溶蚀和机械离散，逐渐形成垂直溶沟、溶缝和囊状溶洞(图 5-b)，而不溶残余充填在溶蚀孔(洞)下部，形成典型的示顶底构造。渗流带内的溶沟、溶缝若为机械离散和被不溶残余充填，则仍继承发育花斑状构造；若在准同生期为纤维状白云石多期充填，也可形成穿层的“葡萄花边”构造(图 5-b)。

3) 水平潜流带。潜水面附近，岩溶水呈近水平流动，先期形成水平状花斑特征，但由于海水的混入导致混合后的流体溶蚀能力进一步增强(袁道先等, 2016)，最终在潜流带内形成了多套近水平溶缝系统。随着后期高频海侵或潜流带内流体逐渐达到饱和，可在岩溶系统中形成对生的“葡萄花边”(图 5-b)。岩溶系统若为垮塌角砾、短距

离搬运角砾等充填，则不发育“葡萄花边”构造。

4) 深部缓流带。该带一般位于岩溶序列的下部。由于运移至缓流带中的岩溶流体已达到饱和一过饱和，溶蚀能力弱，且流速缓慢，因此，岩溶特征不明显，主要表现为流体对原始颗粒结构的岩溶改造以及对基质孔隙的胶结，岩心上具花斑状溶蚀特征(图 4-e)，微观上可见典型的泥晶化现象(图 4-f)。

3.2.3 整体角砾化溶蚀序列

若岩溶作用强度进一步增强，则单旋回岩溶系统上部角砾化、下部洞穴系统混合充填会逐渐导致整个旋回呈现角砾化特征，加之后期沉积物加载和地静压力的影响，引发岩溶系统坍塌而形成似层状的角砾岩。角砾的颜色和成分多样，大小混杂，呈次圆状一

次棱角状，具多源和磨圆特征(图 2-k)。角砾间充填碳酸盐岩砂及小的角砾，剩余空间也被化学胶结物或后期海侵的细粒沉积充填(图 2-k；图 5-c)。

4 讨论

4.1 早成岩期岩溶的识别

早成岩期岩溶通常是指颗粒滩、微生物丘等浅水环境的碳酸盐沉积物在相对海平面周期性下降的过程中，发生短暂的暴露并遭受大气淡水改造(陈景山等，2007；芦飞凡等，2020)。不同于晚成岩期岩溶裂缝疏导体系，早成岩期岩溶主要以原生孔隙作为流体运移通道(Xiao *et al.*, 2016)，其在岩石内部以漫流的方式对岩石进行溶蚀改造

(Che *et al.*, 2019)。伴随这类岩溶作用的发生，序列内部可出现多种典型识别标志：(1)高频叠置的暴露溶蚀面；(2)组构选择性溶蚀孔(洞)及示顶底构造；(3)海绵状、花斑状溶蚀体；(4)岩溶角砾；(5)相控特征明显的米级岩溶序列等(谭秀成等，2015；芦飞凡等，2020)。

研究区灯二段高频暴露溶蚀面发育(图 4-a；图 5)，界面之上为后期初始海侵的低能沉积物，之下常见组构选择性溶蚀孔(洞)(图 2-e, 2-i；图 4-b)、示顶底构造(图 4-c)、花斑状和海绵状溶蚀体(图 4-e, 4-h)以及岩溶角砾(图 4-d, 4-g)等。暴露溶蚀面在纵向上高频叠置，约束的单旋回厚度多为分米级至米级。此外，在溶蚀孔

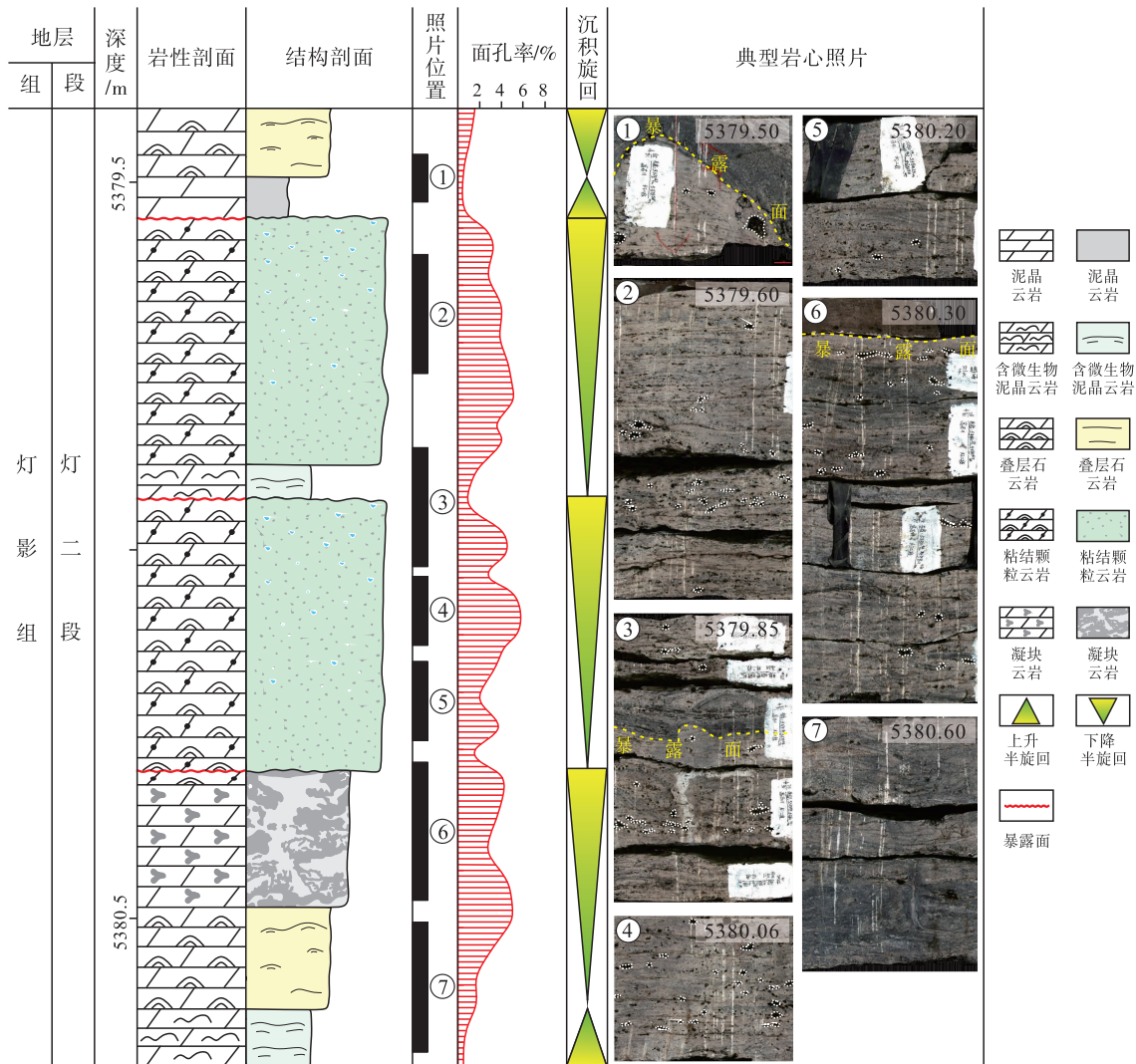


图 6 川中高石 11 井灯影组二段 5379.4~5380.7 m 沉积旋回与储集层分布

Fig. 6 Sedimentary cycle and reservoir distribution of the Member 2 of Dengying Formation of Well GS11

(5379.4~5380.7 m) in central Sichuan Basin

(洞) 及岩溶角砾周缘可见泥晶套及纤维状环边胶结物(图 2-f; 图 4-b, 4-d, 4-g), 说明向上变浅序列在经受岩溶改造后, 又重新回到了海底成岩环境; 微生物作用和海水胶结在孔(洞)内再次出现, 指示岩溶作用发生在准同生期。

高石 6、高石 11 以及高石 009-H3 井岩心分析也揭示其岩溶与向上变浅沉积序列密切相关, 且主要分布于沉积序列的中上部, 尤其是(粘结)颗粒云岩和格架状凝块云岩中(图 5), 表明此类岩溶作用受丘滩相控制。地球化学测试结果也与上述岩石学特征一致。由于同位素分馏作用, 大气淡水中富含 ^{12}C 、 ^{16}O 以及陆源 Sr, 因此当岩石在经受大气淡水淋滤后 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值负偏, 而 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值增大(Land, 1980; Kirmaci and Akdağ, 2005; 刘存革等, 2007)。研究区灯二段 C、O、Sr 同位素测试结果显示暴露面之下岩石出现 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值负偏、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值正偏的特征(图 3), 进一步印证了这类岩溶与向上变浅沉积序列密切相关, 存在显著的相控特征。

综上所述, 研究区灯二段内广泛发育早成岩期岩溶组构, 并且岩溶整体呈现出旋回性和相控性规律。

4.2 早成岩期岩溶对储集层的改造

研究区灯二段储集层主要发育在(粘结)颗粒云岩与格架状凝块云岩中, 现今所保存的优质孔隙型储集层多分布在向上变浅沉积序列的中上部(图 6), 揭示出孔隙型薄储渗体与向上变浅沉积序列和相控岩溶密切相关。高频向上变浅沉积序列多呈旋回叠置, 造成灯二段孔隙型薄储层具薄而多套的特征(图 6)。这类孔(洞)多具海底胶结和准同生期成岩组构, 也验证了灯二段孔隙型储集层形成于准同生期。横向上, 这类储集层受丘滩建隆形成的沉积期地貌控制, 因而具有较强的非均质性。

在岩溶作用改造强度适中的背景下, 大气淡水对原生残余孔隙以及易溶组构进行组构选择性溶蚀改造, 扩溶孔隙(图 5-a; 图 7-b), 从而可优化储层储集性能。据相关研究统计, 若早成岩期岩溶作用于(微生物)颗粒云岩中, 可使孔隙度增加 10% 左右(罗冰等, 2015)。另外, 组构选择性岩溶序列内溶缝/沟欠发育, 当沉积序列重回海底成岩环境后, 早期纤维状胶结物的生长将喉道堵塞, 导致流体交换受阻(图 7-c), 胶结作用与溶蚀作

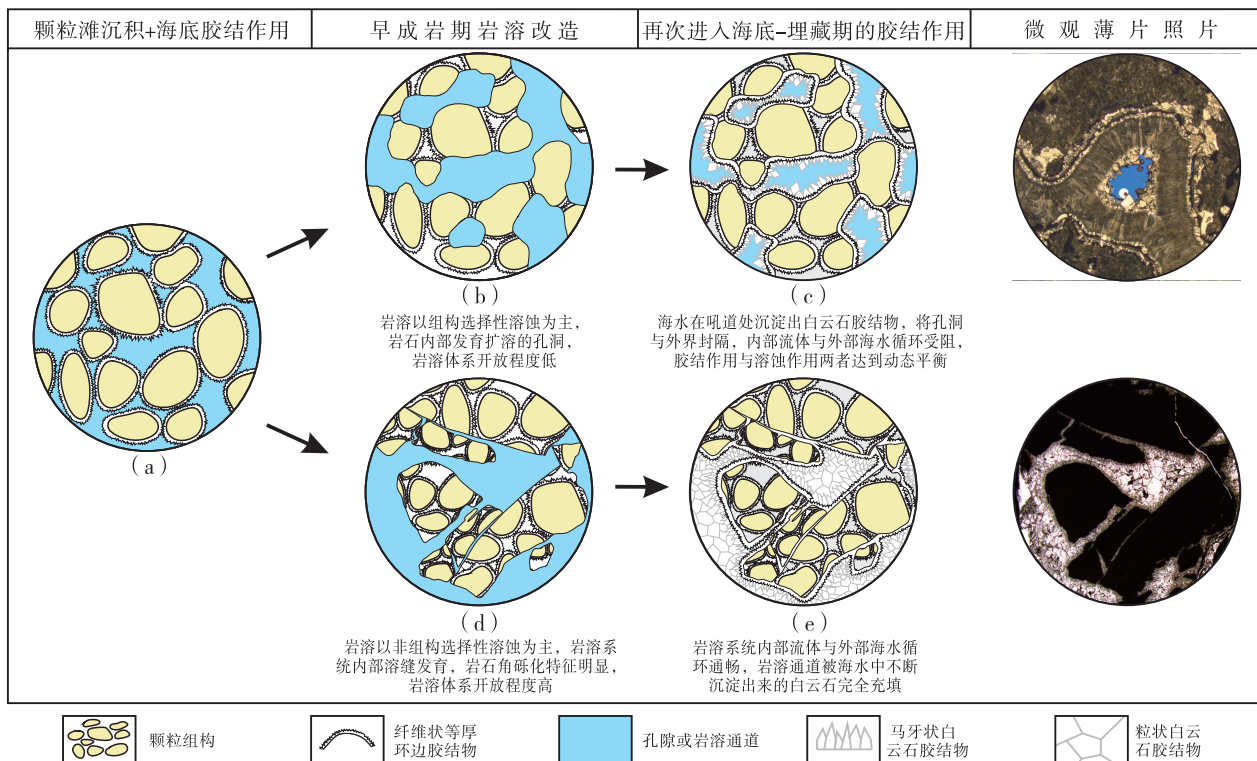


图 7 早成岩期岩溶强度对储集层储集性能的影响

Fig. 7 Influence of eogenetic karst strength on reservoir performance

用两者达到动态平衡后，最终使得大量孤立的、充填残余的孔（洞）长久保留。反之，岩溶作用强度大，形成大量的溶缝/沟、溶洞(图 5-b)，溶蚀可使孔（洞）系统完全连通(图 7-d)，这不仅可使岩溶系统整体垮塌而丧失储集性能(图 5-c)，也可在后期因孔洞系统连通性好、流体交换活跃、活跃的胶结充填而使孔隙丧失(图 7-e)。综上所述，适度的岩溶改造是研究区灯二段孔洞型储集层形成和保存的关键，孔洞系统连通性对孔（洞）是否长期保持具有至关重要的作用。

4.3 由桐湾 I 幕构造抬升引发的风化壳岩溶对储集层的影响需重新评估

前文已述及，灯二段储集层的发育主要受控于高频海平面变化驱动下的早期暴露岩溶。然而，关于前人所强调的风化壳岩溶特征及其对储集层的影响，尚值得进一步研究。为此，笔者选取研究区内唯一过灯二/三段界限的取心井——高石 009-H3 井对其展开讨论。

基于岩心、薄片以及成像测井资料的观察，高石 009-H3 井灯二段顶部岩溶具有以下特征

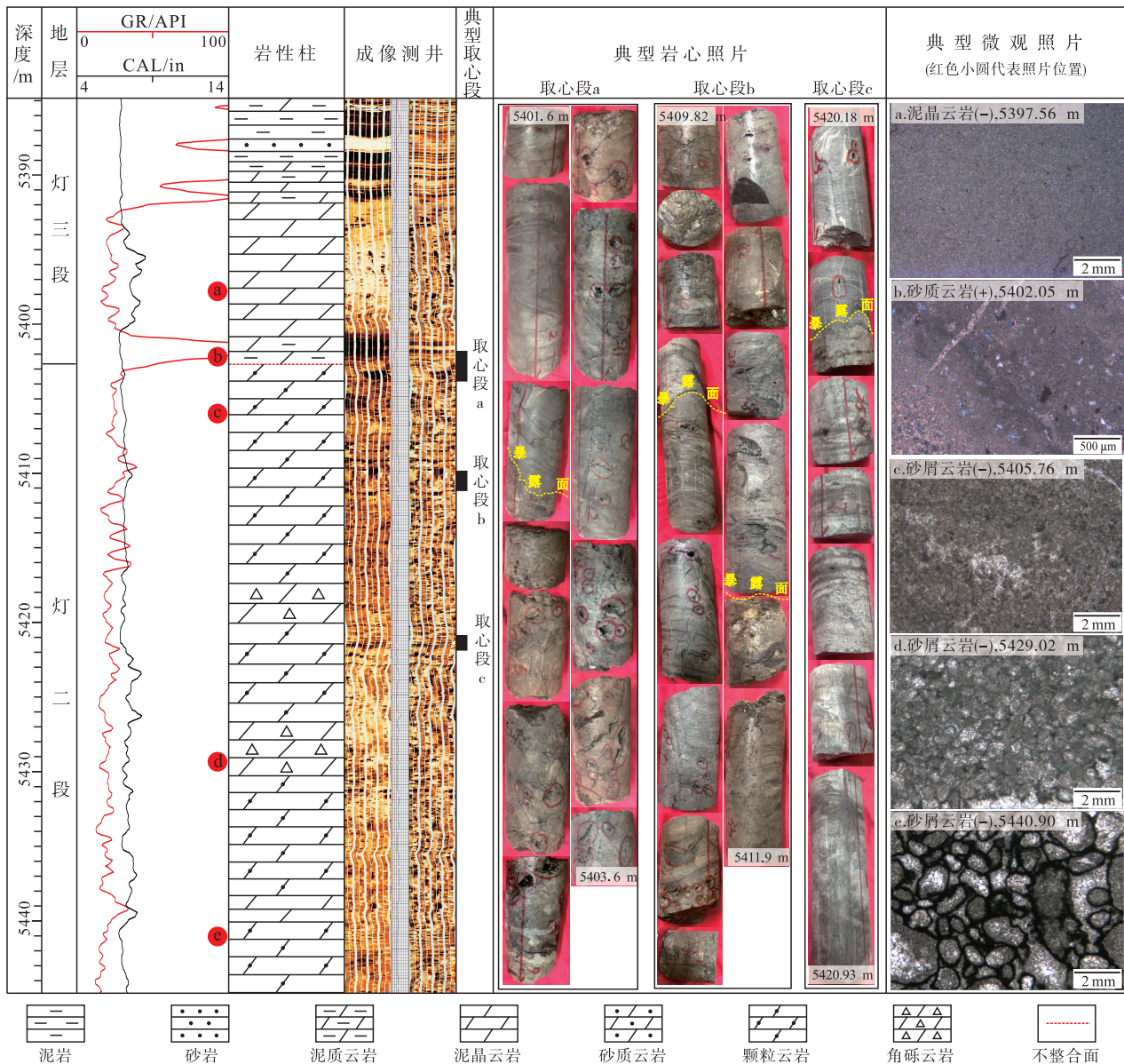


图 8 川中高石 009-H3 井灯影组二段顶部岩溶特征 (5385~5445 m)

Fig. 8 Karst characteristics at top of the Member 2 of Dengying Formation of Well GS 009-H3 (5385~5445 m) in central Sichuan Basin

(图 8): (1) 灯二/三段界线为不规则的暴露溶蚀面, 上部是灯三段的泥晶云岩和砂质云岩, 下部是灯二段的砂屑云岩, 岩石受岩溶作用改造强烈, 内部分布大量中、大型孤立溶洞 (见图 8 中取心段 a), 与早期高频暴露溶蚀形成的选择性溶蚀孔洞、花斑状溶蚀等典型特征相区别; (2) 结合成像测井资料可识别出这类岩溶特征在纵向的分布相对有限, 仅发育在界线之下 10 m 范围内; (3) 向下, 岩石受溶蚀改造强度明显减小, 内部开始出现高频暴露面以及小型的组构选择性溶蚀孔 (洞) (见图 8 中取心段 b, c), 岩溶逐渐向早期高频暴露溶蚀作用过渡。上述特征说明高石 009-H3 井灯二段顶部岩溶纵向发育规模有限, 加之在灯二/三界线附近缺少典型的风化残积层, 由此笔者认为研究区内灯二段顶部岩溶仅是 IV 级及以上海平面变化下的暴露岩溶对早期高频暴露溶蚀孔 (洞) 叠合改造的结果, 而并未形成新的风化壳岩溶储集层。因此, 关于风化壳岩溶对研究区灯二段孔洞型储集层的影响可能需要重新评估, 灯二段孔洞型储集层的预测模式应由找寻古岩溶斜坡向沉积期微地貌的恢复转变。

5 结论

1) 川中高石 1 井区灯影组二段受早成岩期岩溶作用改造明显, 在向上变浅沉积序列的中上部发育暴露溶蚀面、组构选择性溶蚀孔 (洞)、花斑状和海绵状溶蚀构造及岩溶角砾等多种典型早期暴露岩溶现象。依据暴露时间和溶蚀作用强度的不同, 米级岩溶序列可出现选择性溶蚀、岩溶分带或整体角砾化的特征。

2) 早成岩期岩溶对储集层的影响主要体现在 2 个方面: (1) 灯影组二段储集层多分布在米级岩溶旋回的中上部, 储集层的发育具显著的相控性和旋回性, 整体呈现出“薄层多套, 累计厚度大”、“非均质性强”的特征; (2) 储集层储集性能与岩溶强度和暴露时间密切相关, 当岩溶时间与强度适中时, 大气淡水在沉积序列内部形成大量组构选择性溶蚀孔 (洞), 大大地提高了孔隙度, 改善了储集层的储集性能; 当岩溶时间和强度过度时, 孔洞系统连通性进一步地增加, 甚至造成沉积序列发生垮塌, 岩溶通道更易被海水胶结物以及海侵携带的细粒沉积物充填, 从而使得储集性能变差。

3) 在灯影组二段现今的储集层中, 早成岩期岩溶作用形成的孔洞仍能得以保存, 并且具备良好的储集性能, 进一步佐证了早成岩期岩溶作用对川中地区灯影组二段储集层的发育具有明显地控制, 由此不仅对古老深层碳酸盐岩储集层的预测具科学指导作用, 同时还为古老碳酸盐岩储集层的形成及孔洞的保持提供了新的研究思路, 应给予重视。

参考文献 (References)

- 陈景山, 李忠, 王振宇, 谭秀成, 李凌, 马青. 2007. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩古岩溶作用与储层分布. 沉积学报, 25(6): 858-868. [Chen J S, Li Z, Wang Z Y, Tan X C, Li L, Ma Q. 2007. Paleokarstification and reservoir distribution of Ordovician carbonates in Tarim Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 25(6): 858-868]
- 李勇, 王兴志, 冯明友, 曾德铭, 谢圣阳, 凡睿, 王良军, 曾韬, 杨雪飞. 2019. 四川盆地北部及周缘地区震旦系灯影组二段、四段储集层特征及成因差异. 石油勘探与开发, 46(1): 52-64. [Li Y, Wang X Z, Feng M Y, Zeng D M, Xie S Y, Fan R, Wang L J, Zeng T, Yang X F. 2019. Reservoir characteristics and genetic differences between the second and fourth members of Sinian Dengying Formation in northern Sichuan Basin and its surrounding areas. Petroleum Exploration and Development, 46(1): 52-64]
- 刘存革, 李国蓉, 张一伟, 韩拥强, 吕海涛, 杨新勇, 崔泽宏. 2007. 锶同位素在古岩溶研究中的应用: 以塔河油田奥陶系为例. 地质学报, 81(10): 1398-1406. [Liu C G, Li G R, Zhang Y W, Han Y Q, Lü H T, Yang X Y, Cui Z H. 2007. Application of strontium isotope to the study of paleokarst: an case from Ordovician in the Tahe oilfield, Tarim Basin. Acta Geologica Sinica, 81(10): 1398-1406]
- 芦飞凡, 谭秀成, 钟原, 罗冰, 张本健, 张亚, 李明隆, 肖笛, 王小芳, 曾伟. 2020. 四川盆地西北部二叠系栖霞组准同生期砂糖状白云岩特征及成因. 石油勘探与开发, 47(6): 1134-1148, 1173. [Lu F F, Tan X C, Zhong Y, Luo B, Zhang B J, Zhang Y, Li M L, Xiao D, Wang X F, Zeng W. 2020. Origin of the penecontemporaneous sucrosic dolomite in the Permian Qixia Formation, northwestern Sichuan Basin, SW China. Petroleum Exploration and Development, 47(6): 1134-1148, 1173]
- 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 carbon-

- ates 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]
- 莫静, 王兴志, 冷胜远, 林刚, 熊剑文, 谢林, 周正. 2013. 川中地区震旦系灯影组储层特征及其主控因素. *中国地质*, 40(5): 1505-1514. [Mo J, Wang X Z, Leng S Y, Lin G, Xiong J W, Xie L, Zhou Z. 2013. Reservoir characteristics and control Factors of Sinian Dengying Formation in central Sichuan. *Geology in China*, 40(5): 1505-1514]
- 谭秀成. 2007. 多旋回复杂碳酸盐岩储层地质模型: 以川中磨溪构造嘉二气藏为例. 成都理工大学博士学位论文. [Tan X C. 2007. Geological Model of Complicated Carbonate Reservoir with Multi-cycle: Exemplified by Jia2 Gas Pool of Moxi Structure of Middle Sichuan. Doctoral dissertation of Chengdu University of Technology]
- 谭秀成, 肖笛, 陈景山, 李凌, 刘宏. 2015. 早成岩期喀斯特化研究新进展及意义. *古地质量报*, 17(4): 441-456. [Tan X C, Xiao D, Chen J S, Li L, Liu H. 2015. New advance and enlightenment of eogenetic karstification. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 17(4): 441-456]
- 汪泽成, 赵文智, 胡素云, 徐安娜, 江青春, 姜华, 黄士鹏, 李秋芬. 2017. 克拉通盆地构造分异对大油气田形成的控制作用: 以四川盆地震旦系—三叠系为例. *天然气工业*, 37(1): 9-23. [Wang Z C, Zhao W Z, Hu S Y, Xu A N, Jiang Q C, Jiang H, Huang S P, Li Q F. 2017. Control of tectonic differentiation on the formation of large oil and gas fields in craton basins: a case study of Sinian-Triassic of the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 37(1): 9-23]
- 王剑. 2000. 华南新元古代裂谷盆地演化: 兼论与 Rodinia 解体的关系. 北京: 地质出版社. [Wang J. 2000. Sedimentary Evolution of Neoproterozoic Rift Basin in Southern China: Discussion on the Relationship with Rodinia Breakup. Beijing: Geological Publishing House]
- 王兴志, 黄继祥, 侯方浩, 刘仲宣, 吕中刚, 夏绍文. 1996. 四川资阳及邻区震旦系灯影组储层段沉积及层序地层学特征. *西南石油学院学报*, 18(3): 3-11. [Wang X Z, Huang J X, Hou F H, Liu Z X, Lü Z G, Xiao Z W. 1996. Characteristics of deposition and sequence stratigraphy of reservoir interval in Sinian Dengying Formation in Ziyang and its neighboring area. *Journal of Southwest Petroleum Institute*, 18(3): 3-11]
- 魏国齐, 谢增业, 宋家荣, 杨威, 王志宏, 李剑, 王东良, 李志生, 谢武仁. 2015. 四川盆地川中古隆起震旦系—寒武系天然气特征及成因. *石油勘探与开发*, 42(6): 702-711. [Wei G Q, Xie Z Y, Song J R, Yang W, Wang Z H, Li J, Wang D L, Li Z S, Xie W R. 2015. Features and origin of natural gas in the Sinian-Cambrian of central Sichuan paleo-uplift, Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 42(6): 702-711]
- 徐哲航, 兰才俊, 郝芳, 陈浩如, 杨伟强, 马肖琳, 邹华耀. 2020. 四川盆地震旦系灯影组不同古地理环境下丘滩储集体的差异性. *古地质量报*, 22(2): 235-250. [Xu Z H, Lan C J, Hao F, Chen H R, Yang W Q, Ma X L, Zou H Y. 2020. Difference of mound-bank complex reservoir under different palaeogeographic environment of the Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 22(2): 235-250]
- 杨跃明, 文龙, 罗冰, 王文之, 山述娇. 2016. 四川盆地乐山—龙女寺古隆起震旦系天然气成藏特征. *石油勘探与开发*, 43(2): 179-188. [Yang Y M, Wen L, Luo B, Wang W Z, Shan S J. 2016. Hydrocarbon accumulation of Sinian natural gas reservoirs, Leshan-Longnüsi paleohigh, Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 43(2): 179-188]
- 袁道先, 蒋勇军, 沈立成, 蒲俊兵, 肖琼. 2016. 现代岩溶学. 北京: 科学出版社. [Yuan D X, Jiang Y J, Shen L C, Pu J B, Xiao Q. 2016. Modern Karstology. Beijing: Science Press]
- 张本健, 马华灵, 李文正, 张亚, 张自力, 严威, 曾乙洋, 王鑫, 钟原, 李莹宇, 谷明峰, 杨岱林, 徐哲航. 2023. 四川盆地蓬莱气区灯二段储集层特征及主控因素. *天然气地球科学*, 34(11): 1899-1915. [Zhang B J, Ma H L, Li W Z, Zhang Y, Zhang Z L, Yan W, Zeng Y Y, Wang X, Zhong Y, Li K Y, Gu M F, Yang D L, Xu Z H. 2023. Reservoir characteristics and main controlling factors in the second member of the Dengying Formation in the Penglai Gas Field, Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 34(11): 1899-1915]
- 张玺华, 李勇, 张本健, 蒋航, 彭瀚霖, 马奎, 徐少立, 张新. 2023. 四川盆地中江—蓬莱地区灯二段储层特征及优质储层成因机制. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 50(3): 301-312. [Zhang X H, Li Y, Zhang B J, Jiang H, Peng H L, Ma K, Xu S L, Zhang X. 2023. Characteristics and formation mechanism of high quality reservoir of the second member of the Dengying Formation in Zhongjiang-Penglai area, Sichuan Basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 50(3): 301-312]
- 赵东方, 谭秀成, 罗文军, 王小芳, 徐伟, 罗思聪, 唐大海, 罗垚, 曾伟. 2022. 早成岩期岩溶特征及其对古老深层碳酸盐岩储层的成因启示: 以川中地区磨溪 8 井区灯影组四段为例. *石油学报*, 43(9): 1236-1252. [Zhao D F, Tan X C, Luo W J, Wang X F, Xu W, Luo S C, Tang D H, Luo Y, Zeng W. 2022. Karst characteristics at early diagenetic stage and their enlightenment for the origin of ancient deep carbonate reservoirs: a case study of the Member 4 of Dengying Formation in Moxi 8 well area, central Sichuan. *Acta Petrologica Sinica*, 43(9): 1236-1252]
- 赵宗举, 李宇平, 吴兴宁, 陈学时, 俞广, 贺训云, 王双才. 2004. 塔里木盆地塔中地区奥陶系特大型岩性油气藏成藏条件及勘探潜力. *中国石油勘探*, 9(5): 12-20. [Zhao Z J, Li Y P, Wu X N, Chen X S, Yu G, He X Y, Wang S C. 2004. Conditions for migration and accumulation of Ordovician giant lithologic oil and gas reservoirs in Tazhong region and exploration potential. *China Petroleum Exploration*, 9(5): 12-20]
- 郑剑, 王振宇, 杨海军, 苏东坡, 张正红, 朱波. 2015. 高频层序格架内礁型微地貌特征及其控储机理: 以塔中东部地区上奥陶统为例. *地质学报*, 89(5): 942-956. [Zheng J, Wang Z Y, Yang H J, Su D P, Zhang Z H, Zhu B. 2015. The control mechanism of micro-topography in the high frequency sequence framework to reef-bank complex reservoir: an example from the Upper Ordovician Liang-

- litage Formation in eastern Tazhong area. *Acta Geologica Sinica*, 89(5): 942-956]
- 周吉羚,李国蓉,高鱼伟,雷和金,符浩. 2015. 川南地区震旦系灯影组白云岩地球化学特征及形成机制. *东北石油大学学报*, 39(3): 67-75. [Zhou J L, Li G R, Gao Y W, Lei H J, Fu H. 2015. Geochemistry and origin of dolomites of the Sinian Dengying Formation in south Sichuan area. *Journal of Northeast Petroleum University*, 39(3): 67-75, 5]
- 周进高,姚根顺,杨光,张建勇,郝毅,王芳,谷明峰,李文正. 2015. 四川盆地安岳大气田震旦系—寒武系储层的发育机制. *天然气工业*, 35(1): 36-44. [Zhou J G, Yao G S, Yang G, Zhang J Y, Hao F, Wang F, Gu M F, Li W Z. 2015. Genesis mechanism of the Sinian-Cambrian reservoirs in the Anyue gas field, Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 35(1): 36-44]
- 朱东亚,金之钧,张荣强,张殿伟,何治亮,李双建. 2014. 震旦系灯影组白云岩多级次岩溶储层叠合发育特征及机制. *地学前缘*, 21(6): 335-345. [Zhu D Y, Jin Z J, Zhang R Q, Zhang D W, He Z L, Li S J. 2014. Characteristics and developing mechanism of Sinian Dengying Formation dolomite reservoir with multi-stage karst. *Earth Science Frontiers*, 21(6): 335-345]
- Bathurst R G C. 1966. Boring algae, micrite envelopes and lithification of molluscan biosparites. *Geological Journal*, 5(1): 15-32.
- Che Z Q, Tan X C, Deng J T, Jin M D. 2019. The characteristics and controlling factors of facies-controlled coastal eogenetic karst: insights from the Fourth Member of Neoproterozoic Dengying Formation, Central Sichuan Basin, China. *Carbonates and Evaporites*, 34(4): 1771-1783.
- Hoffman P F, Schrag D P. 2002. The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change. *Terra Nova*, 14(3): 129-155.
- Hoffman P F, Abbot D S, Ashkenazy Y, Benn D I, Brocks J J, Cohen P A, Cox G M, Creveling J R, Donnadieu Y, Erwin D H, Fairchild I J, Ferreira D, Goodman J C, Halverson G P, Jansen M F, Le Hir G, Love G D, MacDonald F A, Maloof A C, Partin C A, Ramstein G, Rose B E J, Rose C V, Sadler P M, Tziperman E, Voigt A, Warren S G. 2017. Snowball Earth climate dynamics and Cryogenian geology-geobiology. *Science Advances*, 3(11): e1600983.
- Jiang G Q, Shi X Y, Zhang S H, Wang Y, Xiao S H. 2011. Stratigraphy and paleogeography of the Ediacaran Doushantuo Formation (ca. 635-551 Ma) in south China. *Gondwana Research*, 19(4): 831-849.
- Kirmaci M Z, Akdağ K. 2005. Origin of dolomite in the Late Cretaceous-Paleocene limestone turbidites, Eastern Pontides, Turkey. *Sedimentary Geology*, 181: 39-57.
- Land L S. 1980. The isotopic and trace element geochemistry of dolomite: The state of the art (in concepts and models of dolomitization). *Special Publication-Society of Economic Paleontologists and Mineralogists*, 28: 87-110
- Li Z X, Bogdanova S V, Collins A S, Davidson A, De Waele B, Ernst R E, Fitzsimons I C W, Fuck R A, Gladkochub D P, Jacobs J, Karlstrom K E, Lu S, Natapov L M, Pease V, Pisarevsky S A, Thrane K, Vernikovsky V. 2008. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: a synthesis. *Precambrian Research*, 160(1-2): 179-210.
- Moore C, Crockett J, Hawkins C. 1995. The Deep Madden Field, a super deep Madison gas reservoir, Wind River Basin, Wyoming (Abstract). *AAPG Bulletin*.
- Xiao D, Tan X C, Xi A H, Liu H, Shan S J, Xia J W, Cheng Y, Lian C B. 2016. An inland facies-controlled eogenetic karst of the carbonate reservoir in the Middle Permian Maokou Formation, southern Sichuan Basin, SW China. *Marine and Petroleum Geology*, 72: 218-233.

(责任编辑 张西娟; 英文审校 刘贺娟)