

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

张自力¹, 乔艳萍¹, 豆霜¹, 李堃宇¹, 钟原¹, 武鲁亚¹, 张宝收¹, 戴鑫¹, 金鑫², 王斌², 宋金民²

[1. 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 四川成都 610041; 2. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学), 四川成都 610059]

摘要: 基于钻井岩心描述、薄片鉴定、测井资料以及三维地震资料, 对四川盆地蓬莱气区震旦系灯影组二段(灯二段)表生岩溶古地貌与储层发育规律进行系统研究。结果表明: ①蓬莱气区灯二段垂向上可划分为地表岩溶带、垂直渗流带、叠合带、水平潜流带和深部缓流带, 其中水平潜流带发育储层厚度最大。②采用双界面法恢复了蓬莱气区灯二段岩溶古地貌, 划分为4个一级古地貌单元: 岩溶高地、岩溶斜坡、岩溶洼地和岩溶盆地, 整体表现为“一高、一斜、两洼”的古地貌特征。③东部高石梯—磨溪地区为岩溶高地, 中部发育岩溶斜坡, 西北侧及西南侧为岩溶洼地。岩溶高地主要发育垂直渗流带, 岩溶斜坡主要发育水平潜流带。蓬莱气区灯二段储层的发育由岩溶古地貌与沉积相联合控制。④表生岩溶储层是四川盆地蓬莱气区灯二段的主要储层类型, 岩溶斜坡叠合丘滩体微相形成了优质储层。

关键词: 表生岩溶; 岩溶分带; 岩溶古地貌; 灯二段; 震旦系; 蓬莱气区; 四川盆地

中图分类号: TE121.2

文献标识码: A

Karst paleogeomorphology and reservoir control model of the 2nd member of Dengying Formation in Penglai gas area, Sichuan Basin, China

ZHANG Zhili¹, QIAO Yanping¹, DOU Shuang¹, LI Kunyu¹, ZHONG Yuan¹, WU Luya¹, ZHANG Baoshou¹, Dai Xin¹, JIN Xin², WANG Bin², SONG Jinmin²

(1. Research Institute of Exploration and Development, Southwest Oil & Gas Field Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: An integration of core and thin section observation, log and 3D seismic data is applied to systematically analyze the epigenetic karst paleogeomorphology and reservoir development pattern of the 2nd member of the Dengying Formation (hereafter referred to as Deng 2 Member) in the Penglai gas area, Sichuan Basin, China. Key findings are summarized as follows. First, the Deng 2 Member in the Penglai gas area can be vertically divided into the epigenetic karst zone, vertical vadose zone, superimposed zone, horizontal phreatic zone, and deep tranquil flow zone. Notably, the horizontal phreatic zone exhibits the thickest reservoirs; second, the karst paleogeomorphology of the Deng 2 Member was restored using the dual interface method. The results indicate that it can be categorized into four types of first-order paleogeomorphic units, namely karst highland, karst slope, karst depression, and karst basin, exhibiting one karst highland, one karst slope, and two karst depressions overall; third, the karst highland is situated in the Gaoshiti-Moxi area in the east, the karst slope is present in the central part of the study area, and the karst depressions are found on the northwest and southwest sides of the study area. The karst highland and karst slope primarily contain vertical vadose zones and horizontal phreatic zones, respectively. It is proposed that reservoirs in the Deng 2 Member of the Penglai gas area are jointly influenced by karst paleogeomorphology and sedimentary facies; fourth, epigenetic karst reservoirs emerge as the predominant reservoir type in the study area, with high-quality reservoirs occurring in the karst

收稿日期: 2023-09-02; 修回日期: 2023-12-07。

第一作者简介: 张自力(1986—), 男, 博士、高级工程师, 沉积盆地分析与油气地质。E-mail: zzl_kyy@petrochina.com.cn。

通信作者简介: 李堃宇(1990—), 男, 工程师, 天然气地质综合研究及勘探。E-mail: likunyu2018@petrochina.com.cn。

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目(2021DJ0501); 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2023ZZ16YJ01)。

slope with superimposed microfacies of mound-shoal complexes.

Key words: epigenetic karst, karst zonation, karst paleogeomorphology, Deng 2 Member, Sinian, Penglai gas area, Sichuan Basin

引用格式: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. DOI: 10. 11743/ogg20240114.

ZHANG Zhili, 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. DOI: 10. 11743/ogg20240114.

碳酸盐岩气藏在天然气储量和产量中占有重要地位,全球碳酸盐岩天然气可采储量约占天然气总可采储量的45%,其产量约占天然气总产量的60%,其中超过80%的碳酸盐岩气藏储层成因与岩溶有关^[1-2]。目前,塔里木盆地塔北隆起、塔中隆起和麦盖提斜坡等多个构造单元的奥陶系岩溶缝洞型储层研究取得了重大突破^[3-5];鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组风化壳古岩溶储层研究工作并取得突破^[6-7];四川盆地碳酸盐岩古岩溶储层近年来也不断取得研究进展,层位涉及震旦系、寒武系和二叠系等^[8-10],产量规模从早期的几亿方增加至目前的 $400 \times 10^8 \text{ m}^3$ 以上。越来越多的研究揭示了中国岩溶型碳酸盐岩气藏具有良好的勘探开发前景,是未来天然气增储上产的重要领域之一^[11-12]。

国内外将岩溶储层的发育期分为(准)同生岩溶期、表生岩溶期和埋藏岩溶期^[13-14],其中表生岩溶期溶蚀作用最为强烈,根据溶蚀程度及方向可分为:地表岩溶带、垂直渗流带、水平潜流带和深部缓流带^[14-15]。不同的岩溶古地貌发育的岩溶分带具有差异,进而影响着储层的分布^[16-17]。

Gs1井钻探揭示了四川盆地震旦系灯影组二段(灯二段)与上覆地层之间还存在1期不整合^[18],沉积末期受桐湾运动I幕影响,灯二段抬升至地表,表生岩溶作用强烈,形成不同岩溶古地貌^[19-20],并发育大规模的岩溶型储层。尽管前人针对蓬莱气区灯二段表生岩溶储层开展了一定程度研究,但针对该区表生期岩溶精细结构及垂向分布特征、古地貌发育情况和岩溶储层发育模式及主控因素的研究都有待深入。本文结合四川盆地蓬莱气区最新钻井资料,利用测井曲线、成像测井、岩心观察和薄片鉴定,建立单井岩溶识别模型、岩溶发育特征,结合工区三维地震资料,采用双界面法恢复岩溶古地貌,明确四川盆地蓬莱气区灯二段岩溶储层发育模式,以为蓬莱气区气藏开发提供支撑。

1 区域地质背景

蓬莱气区位于四川省境内,北起射洪市,南至遂宁

市船山区,西起德阳市中江县,东靠阆中市仪陇县,面积约 $8\,500 \text{ km}^2$ ^[21-22]。构造上蓬莱气区位于四川盆地中部靠西,川中古隆起带北斜坡上,西接川西坳陷带,北连北部低陡褶皱带(图1)。地势上具有西南高、东北低的斜坡特征,呈一个大型向北倾覆的单斜构造。蓬莱气区历史上发生过多期构造运动,震旦纪主要经历桐湾运动,表现为灯影组大规模抬升剥蚀,地层间为假整合接触^[23-24]。自下而上可划分为4段(图1):灯一段主要为泥晶白云岩;灯二段微生物发育,岩性主要为纹层叠层白云岩、凝块石白云岩、砂屑白云岩和葡萄花边白云岩;灯三段主要为蓝灰色泥页岩、粉砂岩与硅质岩等;灯四段微生物发育,多为硅化泥晶白云岩、硅化纹层叠层白云岩和凝块石白云岩等^[25-29]。

四川盆地灯影组微生物岩分布广泛,台缘或台内微生物丘与颗粒滩构成微生物丘滩体沉积^[30-31]。蓬莱气区灯二段可划分为微生物丘滩与滩间海2个沉积亚相,由西向东水体变浅,从台地边缘沉积转变为局限台地沉积。微生物丘滩亚相主要发育叠层石白云岩、凝块石白云岩、泡沫绵层白云岩、砂屑白云岩和葡萄花边白云岩^[32]。滩间海亚相发育在丘滩体之间,位于相对低洼和静水低能环境,主要发育暗色泥晶白云岩、粉屑泥晶白云岩以及泥质泥晶白云岩。

2 岩溶发育特征

2.1 岩溶特征

蓬莱气区灯二段表生期岩溶发育于在桐湾运动I幕后,四川盆地灯二段大面积抬升,地层遭受风化和大气淡水淋滤作用。相比(准)同生期岩溶受控于海平面升降,表生期岩溶暴露时间更长,岩溶作用更强烈,往往能形成较大规模的岩溶储层,并具有明显的垂向分带性^[14, 33-35]。研究区表生期岩溶发育典型的岩溶角砾(图2a),伴随泥质、钙质和硅质流体充填。岩溶流体早期沿裂缝溶蚀形成扩大缝、溶沟(图2b, c)。靠近潜水带地层岩溶作用强烈,发育蜂窝状(图2d)、顺层状

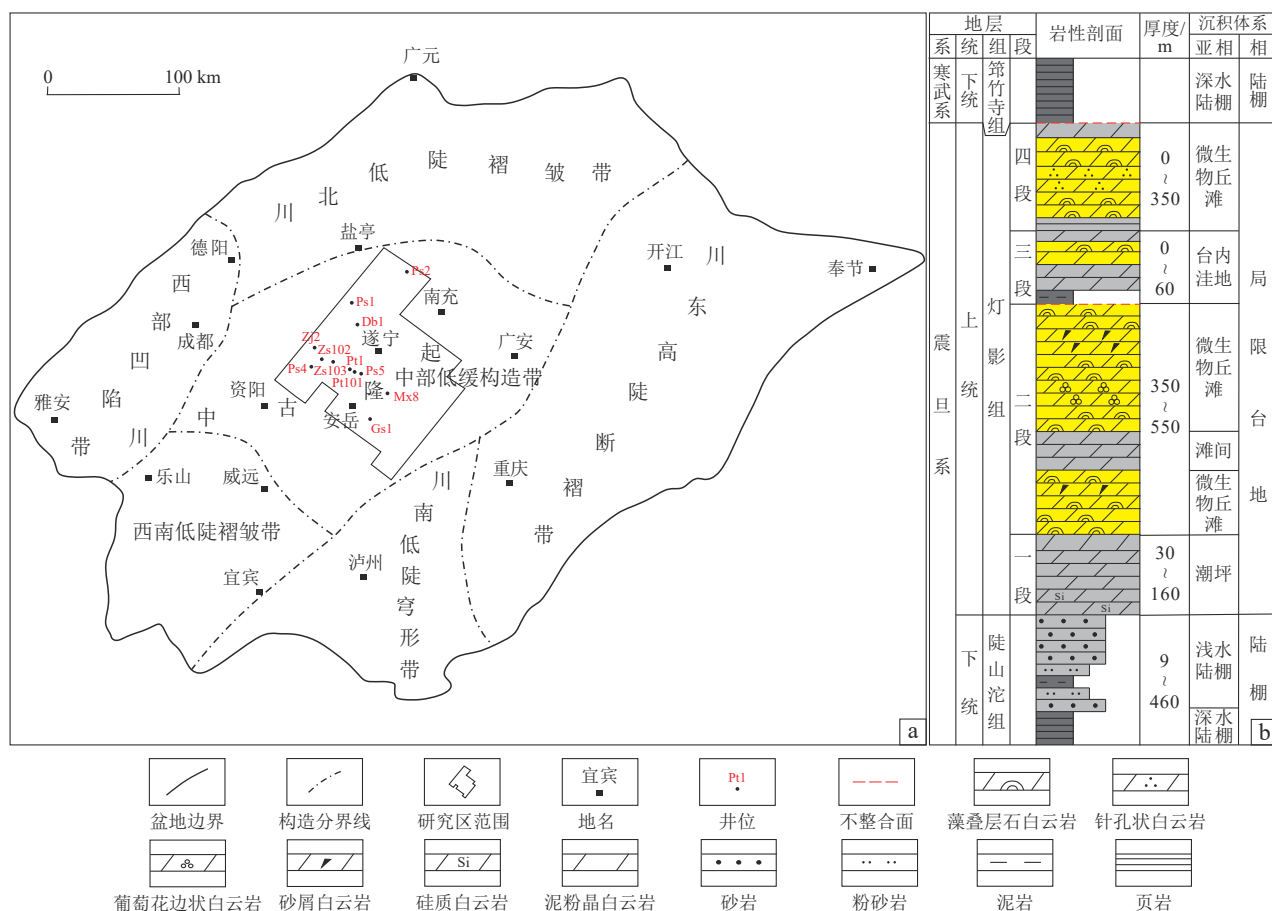


图1 四川盆地蓬莱气区构造位置(a)及震旦系地层综合柱状图(b)

Fig. 1 Map showing the structural position of the Penglai gas area, Sichuan Basin (a) and composite stratigraphic column of the Sinian strata in the area (b)

溶蚀孔洞(图2e)及岩溶洞穴(图2f),部分孔洞中可见上覆地层沉积物机械充填。根据岩心、薄片资料、测井解释和成像测井特征,结合研究区实际情况,自上而下识别为5个垂向岩溶带(表1):地表岩溶带、垂直渗流带、叠合带、水平潜流带和深部缓流带,并建立相应特征识别模板(图3)。

地表岩溶带受风化剥蚀影响,残余风化壳中被上覆泥质沉积物充填,自然伽马(GR)呈“钟形”“箱形”高值曲线(> 70 API),声波时差(AC)普遍大于 $50 \mu s/m$,密度(DEN)、中子测井曲线具有低-中等孔隙度响应特征 [$DEN > 2.7 g/cm^3$, 补偿中子孔隙度(CNL) $> 1\%$],成像测井表现为角砾混杂堆积的无规则斑点或斑块特征。

垂直渗流带通常发育高角度溶缝、溶沟,对比地表岩溶带 GR 曲线为中-低值(> 20 API),三孔隙度曲线值下降,其中 AC 为中度($> 40 \mu s/m$), CNL 为中-高值($> 2\%$), DEN 曲线层状降低($2.3 \sim 2.7 g/cm^3$),电阻率显著增大,并有“正差异”特征,成像测井图像可见正弦曲线状暗色条带,串珠状黑斑。

叠合带测井曲线特征与垂直渗流带相似, GR 为中-低值(> 20 API),三孔隙度测井曲线具有中-高孔隙度特征 ($AC > 40 \mu s/m$, $DEN > 2.7 g/cm^3$, $CNL > 1\%$),区别为成像测井图像可见交错状暗色条带和杂乱分布的暗斑。

水平潜流带以发育大量层状溶蚀孔洞为主要特征,常规测井曲线显示局部扩径, GR 表现为稳定中-低值(> 20 API),与垂直渗流带相比, AC 表现为中-高值($> 42 \mu s/m$),电阻率曲线表现为明显“正差异”,成像测井上呈水平层状暗色条带,伴随不规则状斑块。

深部缓流带溶蚀孔洞欠发育,测井曲线呈致密碳酸盐岩特征: GR 为中-低值(> 20 API), DEN 接近地层骨架值($> 2.8 g/cm^3$), AC 和 CNL 曲线表现为低孔、低渗特征 ($AC < 40 \mu s/m$, $CNL < 1\%$),深、浅侧向电阻率曲线重合,成像测井表现为光滑的亮色块状。

2.2 岩溶垂向结构

蓬莱气区灯二段表生岩溶发育的过程中,在长期大气淡水淋滤、地表水渗流和地下水溶蚀-侵蚀作用

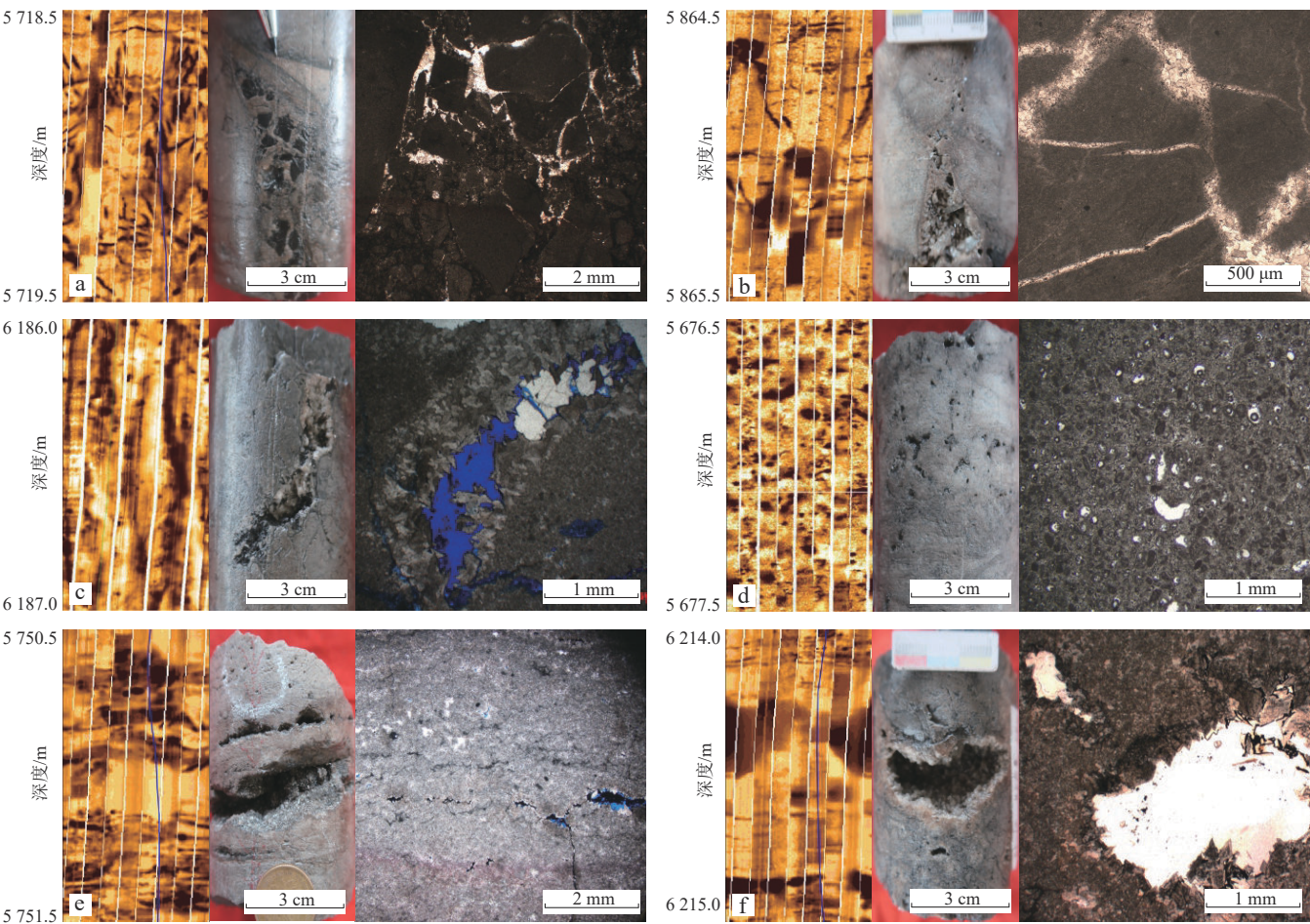


图2 四川盆地蓬莱气区灯二段表生岩溶特征

Fig. 2 Epigenetic karst characteristics of the Deng 2 Member, Penglai gas area, Sichuan Basin

a. Pt103 井,埋深 5 719. 07 ~ 5 719. 25 m,岩溶角砾,泥质充填;b. Pt102 井,埋深 5 865. 44 ~ 5 865. 50 m,泥晶白云岩,网状溶蚀;c. Ps4 井,埋深 6 186. 32 ~ 6 186. 53 m,凝块石白云岩,溶沟;d. Ps5 井,埋深 5 677. 25 ~ 5 677. 34 m,砂屑白云岩,蜂窝状溶蚀孔;e. Pt1 井,埋深 5 750. 83 ~ 5 750. 90 m,泥晶白云岩,水平层状溶蚀孔洞;f. Ps4井,埋深 6 214. 13 ~ 6 214. 27 m,凝块石白云岩,溶洞
(各小图中,左、中、右分别是成像测井图像、岩心照片和岩心铸体和普通薄片照片。)

表 1 四川盆地蓬莱气区灯二段岩溶分带^[6,14-18]

Table 1 Karst zonation within the Deng 2 Member, Penglai gas area, Sichuan Basin^[6, 14-18]

岩溶分带	岩溶流体	发育部位	特征
地表岩溶带	大气淡水淋滤、风化剥蚀	地表	发育岩溶风化残积物、上覆沉积混合物
垂直渗流带	大气淡水淋滤、地表渗流	近地表,地表岩溶带与叠合带之间	发育垂向岩溶通道
叠合带	地表渗流、地下径流	垂直渗流带与水平潜流带之间过渡带	受表生期潜水面升降控制,发育多期次网状岩溶通道
水平潜流带	地下径流	潜水面附近,叠合带与深部缓流带之间	发育横向岩溶通道
深部缓流带	无	最低潜水面之下	岩溶不发育

下,岩溶地层垂向上具有明显分带性。结合前人对岩溶相带的研究认识^[14, 36],根据岩心、薄片资料和测井解释,以研究区 Ps5 井为例(图 4),对灯二段岩溶垂向结构进行精细刻画,具体特征如下。

地表岩溶带由于暴露地表,通常发育岩溶风化残积物,部分地区的地表岩溶带完全遭受剥蚀。其中

Ps5 井在灯二段顶部发育地表岩溶带且厚度较薄(厚度约 3 m),与灯三段平行不整合接触。受地表水渗流影响,该带发育溶蚀孔洞,成像测井图像可见少量岩溶角砾,孔洞内被泥质沉积物充填,GR 值整体较高。

垂直渗流带发育地层潜水面之上,以大气淡水和地表水渗流作用为主。Ps5 井垂直渗流带主要发育在

岩溶相带	GR/API	AC/ (μs/m)	CNL/%	DEN/ (g/cm ³)	RT-RXO/ (Ω·m)	成像测井	孔隙产状	AC(μs/m) GR/API	CNL/% DEN(g/cm ³)	RT(Ω·m) RXO(Ω·m)	成像测井图像	产状
地表 岩溶带	高值 >70	高值 >50	中值 1~2	中-高值 >2.7	正差异	可见密集 不规则 斑块或斑 点	不规则溶 蚀孔洞, 泥质角砾 混杂堆积	0 150 2 3 4	0 0.7 9.5 20 000	0 2 20 000		
垂直 渗流带	中-低值 40~20	中值 40~42	中-高值 >2	中值, 层 状降低 2.3~2.7	正差异	可见串珠 状黑斑, 高角度暗 色条带	高角度溶 沟、缝, 垂 向连续性 好					
水平 潜流带	中-低值 40~20	中-高值 >42	高值 >3	中值, 层 状降低 2.3~2.7	正差异	发育密集 水平、低 角度暗色 条带	水平层状 溶蚀, 横 向连续性 好					
深部 缓流带	中-低值 40~20	低值 <40	低值 <1	接近 骨架值 >2.8	重合	零星发育 暗色斑点 或呈块状 亮色	溶蚀发育 少, 岩性 致密或星 点状发育					
叠合带	中-低值 40~20	中值 40~42	中值 1~2	中值, 层 状降低 2.3~2.7	正差异	可见垂直 和水平暗 色条带交 错	发育网状 缝洞, 溶 蚀具有周 期性					

图3 四川盆地蓬莱气区灯二段岩溶分带识别图版

Fig. 3 Identification plot of the karst zones within the Deng 2 Member, Penglai gas area, Sichuan Basin

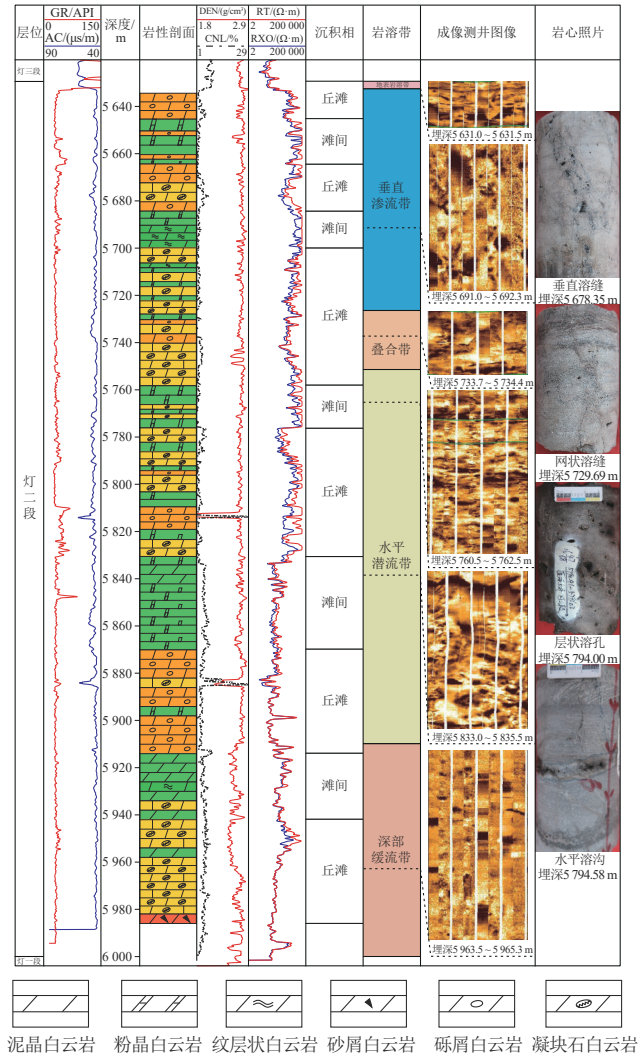


图4 四川盆地蓬莱气区Ps5井灯二段岩溶垂向分带特征

Fig. 4 Vertical zonation of the karst in the Deng 2 Member in well Ps5, Penglai gas area, Sichuan Basin

灯二段顶面下3~97 m,厚度约94 m。岩性以泡沫绵层白云岩、细-粉晶白云岩为主,局部发育纹层白云岩。地表流体沿高角度断裂系统向下渗流,对地层中裂缝等优势通道进行溶蚀改造,形成扩容缝和溶沟,缝宽0.3~1.0 cm。溶蚀孔洞较发育,孔径最大可达0.3 cm。储集空间纵向连通性较好,孔洞内被白云石、泥质和沥青半-全充填。

叠合带是垂直渗流与水平潜流之间的过渡带,表生期岩溶受潜水面周期升降影响,孔洞发育具有明显多期次特征。Ps5井叠合带发育较薄,厚度约25 m,岩性以泡沫绵层白云岩和凝块石白云岩为主。潜水面下降期,岩溶流体以垂向溶蚀为主,潜水面上升期以横向溶蚀为主,周期性溶蚀相互叠置,发育形成网状溶蚀缝洞,成像测井图像可见网状交错暗色条带。

水平潜流带发育在潜水面附近,是岩溶作用最活跃的区域。Ps5井水平潜流带位于灯二段中部,厚约159 m,距离灯二段顶面97 m。岩性以凝块石白云岩、细晶白云岩为主,局部含泡沫绵层白云岩。受地层压力梯度影响,地下岩溶流体溶解和侵蚀作用增强,发育大量水平层状分布的溶蚀孔洞、溶沟和岩溶洞穴,孔洞发育规模较大,直径最大可达13 cm。储层横向连通性好,孔洞内被白云石、硅质和沥青局部充填,充填程度较低。根据溶蚀发育程度、产状可以进一步判断潜水面位置及地下水流动方向。

深部缓流带发育在最低潜水面之下,地下流体活动性减弱,岩溶不发育。Ps5井深部缓流带位于灯二段底部,距离灯二段顶面281 m,厚约90 m。岩性为凝块石白云岩和纹层状泥晶白云岩,整体较为致密,储集

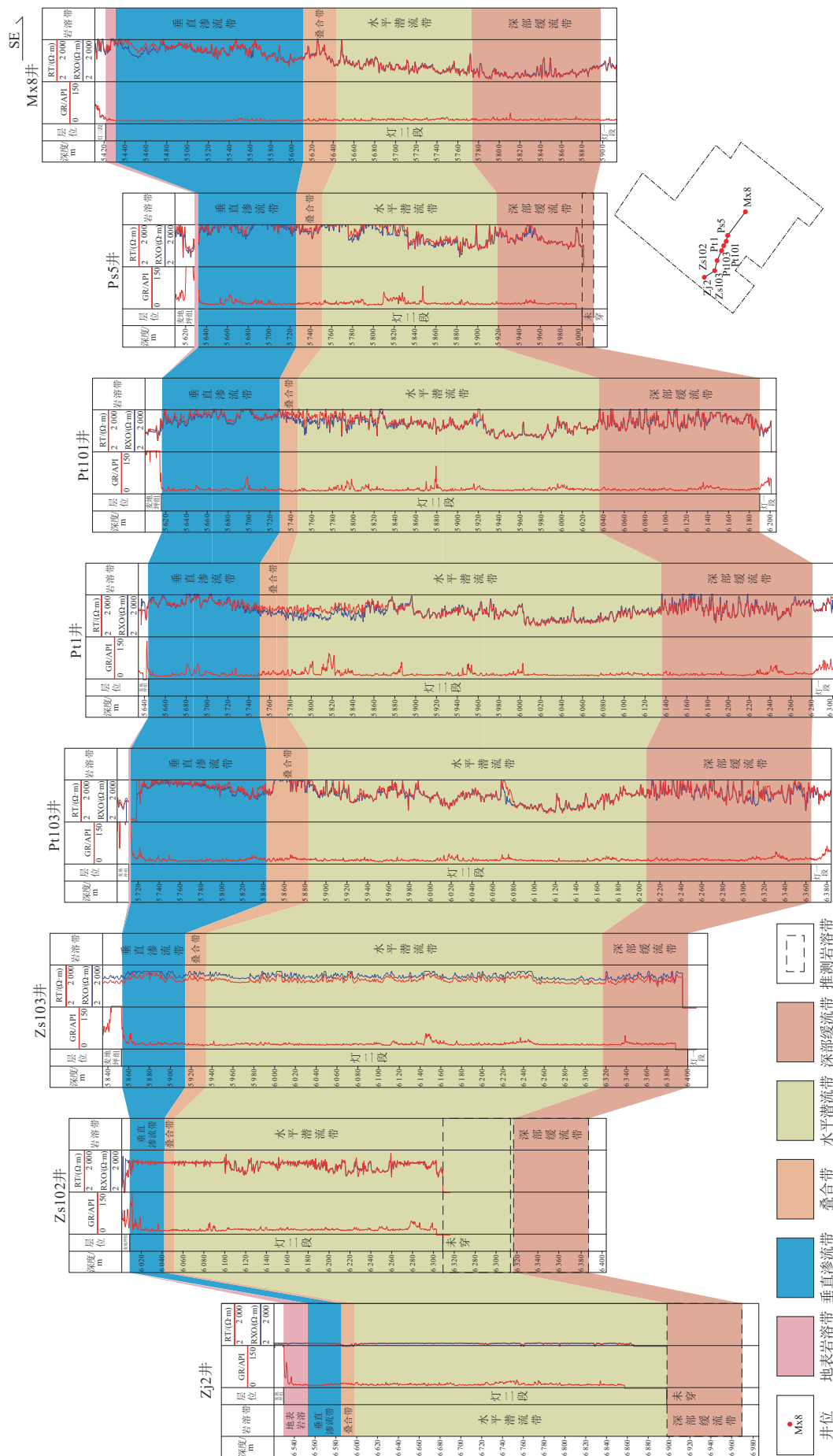


图 5 四川盆地蓬莱气区过 Zj2—Zs102—Pt103—Pt1—Ps5—Mx8 井灯二段岩溶分带连井剖面

Fig. 5 Profile crossing wells Zj2, Zs102, Pt103, Pt1, Ps5, and Mx8 showing karst zonation within the Deng 2 Member, Penglai gas area, Sichuan Basin

空间以原生粒间孔、裂缝为主,溶蚀孔洞不发育。

2.3 岩溶横向展布

在岩溶垂向结构特征认识的基础上,依据不同岩溶带识别标志,对研究区内灯二段勘探主体区域进行横向对比分析(图5),岩溶横向展布具有以下特征。局部地区灯二段由于未完全剥蚀,仍保留较薄的地表岩溶带。垂直渗流带由西北向东南逐渐增厚,在高石梯—磨溪地区厚度达到最大,达234.80 m,推测在表生岩溶期研究区东南侧位于岩溶高部位,以大气淡水 and 地表水垂向渗流为主。叠合带表现出北西、南东薄,中部厚的特点,反应表生期位于研究区中部水动力变化明显,受水动力影响潜水面发生周期性升降。水平潜流带由西北向东南逐渐减薄,水平溶蚀作用减弱,中部发育厚度最大,平均达338.25 m,水平溶蚀作用最强。研究区中部发育较厚深部缓流带,认为其是地层厚度较大,岩溶流体难以到达地层底部所致。综上表明在表生岩溶期,灯二段地层整体表现为:蓬莱气区东南一带古地貌相对较高,以垂向溶蚀作用为主,向西北地势逐渐降低,以水平溶蚀作用为主,地下岩溶流体为北西流向。

3 岩溶古地貌特征

3.1 岩溶古地貌划分

本研究采用的双界面法^[14, 37],综合了层拉平法、残厚法^[38]和印模法^[39]的优点,实现了对研究区古地貌较高精度的恢复。其中,界面的选取是双界面法恢复古地貌的核心,选取结果直接关系到古地貌恢复的精度^[37, 40]。灯一段是灯二段岩溶风化壳下第一个完整发育的小层,本研究选取灯一段底界作为下伏基准

面。沧浪铺组在蓬莱气区内对灯二段顶部古地貌起到“填平补齐”的沉积作用,具备距离风化壳近、易于识别追踪等特点,选取沧浪铺组顶界作为上覆基准面。通过公式: $H=H_1-H_2$ (其中, H 为灯二段古地貌高程,m; H_1 为基准点厚度,即研究区内沧浪铺组顶界深度减去灯一段底界深度的最大值,m; H_2 为沧浪铺顶界深度减去灯二段顶界深度,m),实现灯二段古地貌定量刻画。依据双界面法恢复的相对高程值、地貌形态等将蓬莱气区灯二段岩溶古地貌划分为岩溶高地、岩溶斜坡、岩溶洼地和岩溶盆地共4个一级岩溶古地貌单元(表2)。

3.2 岩溶古地貌特征

古地貌恢复结果表明蓬莱气区的基本地貌格局呈西低东高,岩溶高地、岩溶斜坡、岩溶洼地和岩溶盆地由南东向北西依次展布(图6)。研究区地震剖面显示,灯二段顶界自东向西被削截,并被灯三段超覆,灯二段与灯三段之间不整合接触在地震上有清楚的显示。岩溶高地主要分布于研究区东侧高石梯—磨溪地区,古地貌相对高程较高(高程>2 100 m),主要发育高地平原,局部发育残丘、浅凹,地震剖面显示出较为平缓的强反射同相轴(图7),反映表生期岩溶作用较弱。岩溶斜坡主要分布于研究区中部,其中岩溶陡坡位于岩溶高地周缘,紧邻高地平原,分布范围较窄,为古地貌相对高差增大区,坡降值较大(坡降>5%),古水流动力增强,表生期岩溶作用强烈,地震剖面可见强烈的杂乱反射特征(图7)。岩溶缓坡紧邻岩溶洼地,是陡坡与洼地过渡区,分布范围较广,古地貌相对高差下降,坡降值较岩溶陡坡减小(2%<坡降<5%),古水流动力减弱,杂乱反射特征较岩溶陡坡减弱(图7)。岩溶洼地和盆地分布于研究区西北部 and 西部,古地貌相对高程进一步降低(高程<1 700 m),岩溶几乎不发

表2 四川盆地蓬莱气区灯二段岩溶古地貌划分^[37, 41]

Table 2 Classification of the karst paleogeomorphology in the Deng 2 Member, Penglai gas area, Sichuan Basin^[37, 41]

古地貌单元		划分标准	岩溶流体	岩溶带	地貌主成因
一级	二级				
岩溶高地	残丘	整体呈丘状,底部直径<20 km	大气淡水淋滤	发育垂直渗流带	风化-溶蚀作用
	浅凹	高地内部相对低洼的凹陷区,内部较为平缓,坡降≤1%	地表径流		溶蚀作用
	高地平原	高地内部地势平坦的区域,坡降<0.5%	大气淡水淋滤		溶蚀作用
岩溶斜坡	岩溶陡坡	大范围分布的陡坡,坡降>5%	地下径流	发育水平潜流带	溶蚀-侵蚀作用
	岩溶缓坡	大范围分布的缓坡,2%≤坡降≤5%			溶蚀-侵蚀作用
岩溶洼地	—	盆地内的相对低洼区,最大开口直径>20 km	地表径流	岩溶带欠发育	溶蚀-沉淀作用
岩溶盆地	—	主要在川西北盆地边缘地带,为盆地内最高程最低的区域,与广海相连	停滞水	岩溶带不发育	沉淀作用

注:坡降=(高程增量/水平增量)×100%;“—”表示无。

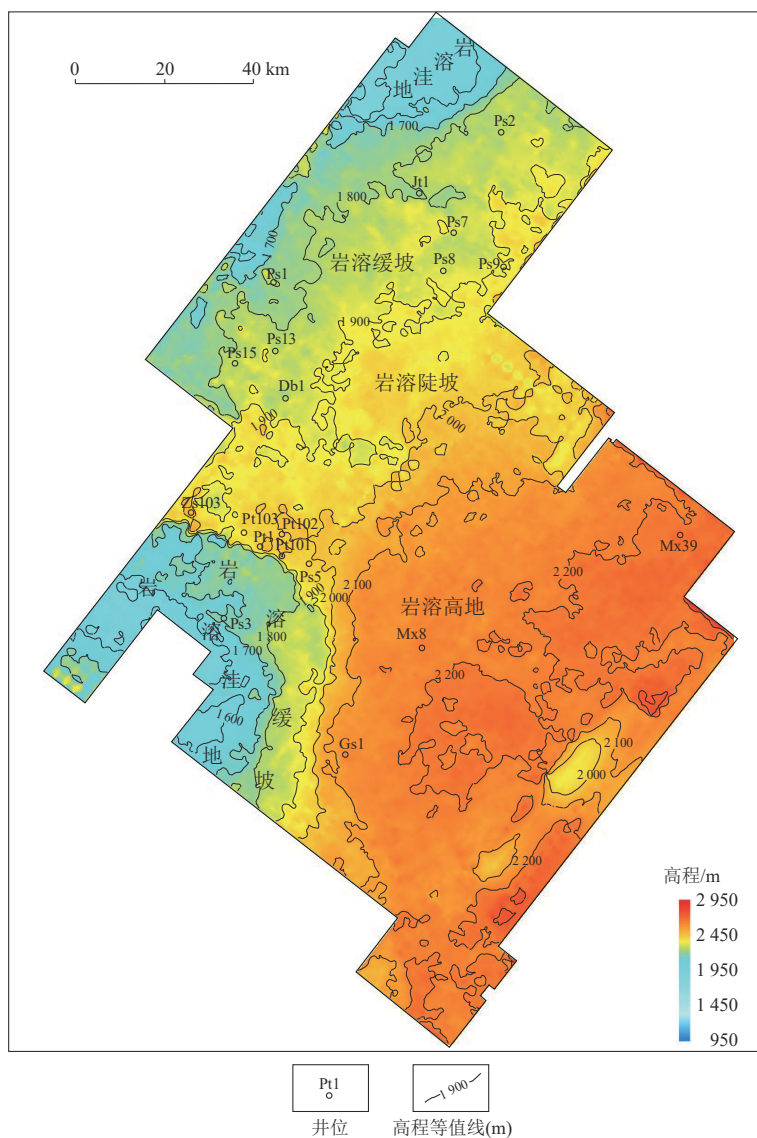


图 6 四川盆地蓬莱气区灯二段岩溶古地貌

Fig. 6 Karst paleogeomorphology map of the Deng 2 Member, Penglai gas area, Sichuan Basin

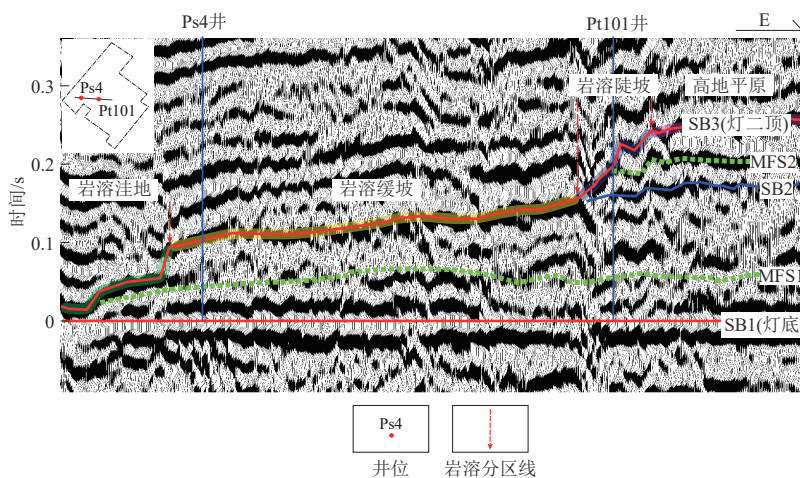


图 7 四川盆地蓬莱气区过 Ps4 井-Pt101 井地震反射及地质解释剖面

Fig. 7 Seismic reflection profile with geological interpretation crossing wells Ps4 and Pt101 in the Penglai gas area, Sichuan Basin
SB. 层序界面; MFS. 最大海泛面

育,以外源流体沉淀为主,受拉张槽沉积格局影响,原始沉积较薄,地震剖面上显示为低洼的薄地层,同相轴无明显侵蚀特征。

整体上看,蓬莱气区灯二段岩溶古地貌呈现“一高、一斜、两洼”的特征,其中“一高”指川中高石梯—磨溪地区的岩溶高地,“一斜”指位于拉张槽东侧的岩溶斜坡,“两洼”指拉张槽北段及中段的岩溶洼地。

4 岩溶古地貌对储层控制作用

4.1 岩溶型储层发育特征

蓬莱气区灯二段以微生物丘滩和滩间海亚相沉积

为主,储层岩性主要为凝块石白云岩(图8a,c)和砂屑白云岩(图8b),局部发育纹层白云岩和细晶白云岩储层。原生储集空间以粒间孔、晶间孔和微生物格架孔为主(图8d,e)。由于表生期岩溶作用影响,原生储集空间遭受进一步改造,并发育大量次生储集空间,以粒间溶孔、凝块石间溶蚀孔洞和溶缝为主(图8f—i),是灯二段主要的油气储集空间,形成岩溶孔隙洞型、岩溶缝洞型和岩溶洞穴型储层。不同岩溶带储层发育特征具有明显差异:地表岩溶带发育风化残积物,溶蚀孔洞后期遭受上覆地层泥质沉积物及岩溶角砾充填程度高(图2a),储集物性较差,孔隙度通常小于3%。垂直渗流带主要发育高角度溶蚀扩大缝,伴有少量溶孔和溶沟(图2c),纵向连通性强,白云石和沥青半充填,储层

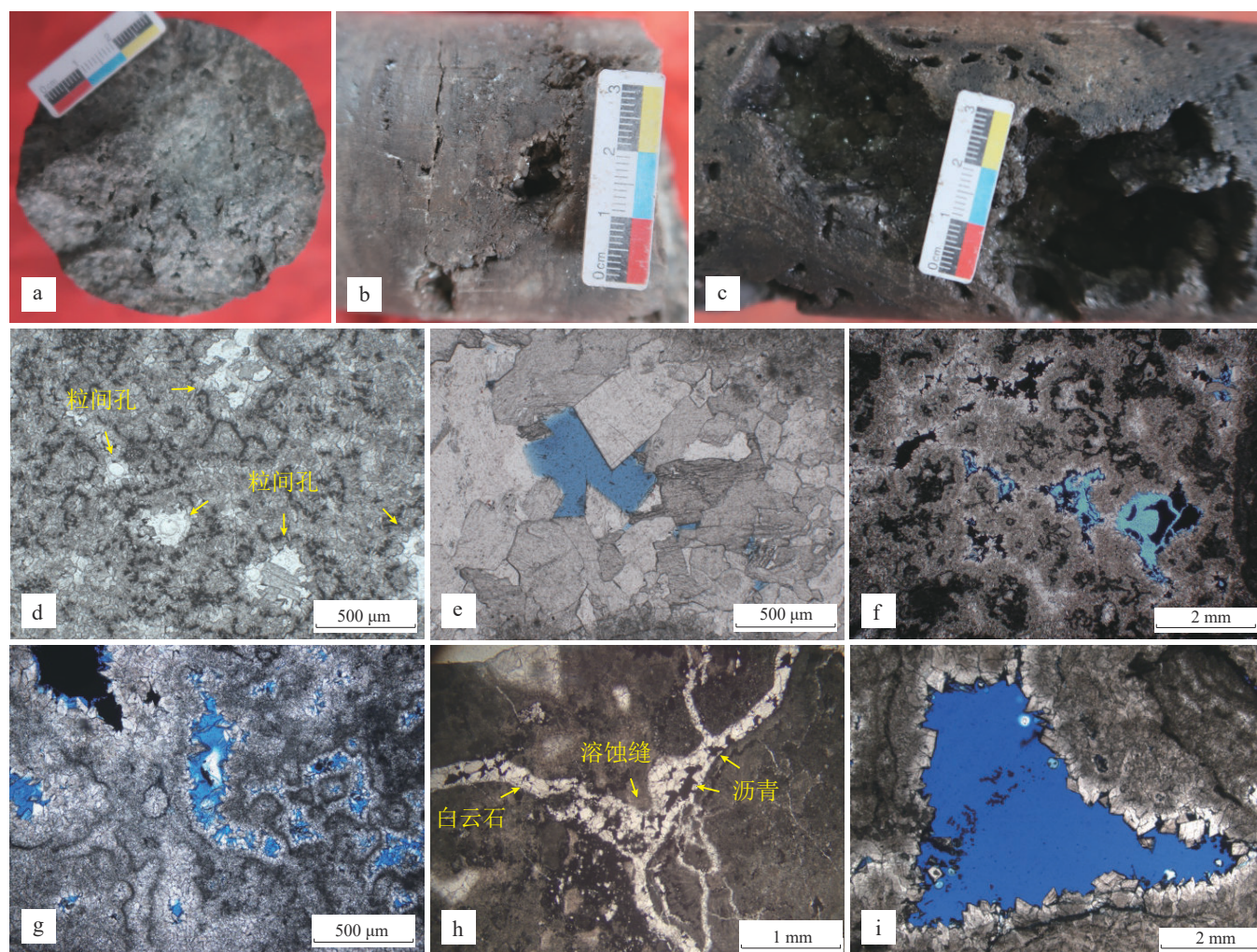


图8 四川盆地蓬莱气区灯二段储层发育特征照片

Fig. 8 Reservoir development of the Deng 2 Member, Penglai gas area, Sichuan Basin

- a. PS5井,埋深5 819.84 m,凝块石白云岩,岩溶孔隙洞储层,岩心;b. PT102井,埋深5 877.94 m,砂屑白云岩,岩溶缝洞储层,岩心;c. Ps101井,埋深5 755.04 m,凝块石白云岩,岩溶孔隙洞储层,岩心;d. PT103井,埋深5 945.99 m,泡沫绵层白云岩,粒间孔,蓝色铸体薄片(-);e. PS3井,埋深5 769.46 m,中-粗晶白云岩,晶间孔,蓝色铸体薄片(-);f. ZS101井,埋深6 233.54 m,凝块石白云岩,格架孔,蓝色铸体薄片(-);g. ZS101井,埋深6 265.64 m,泡沫绵层白云岩,溶蚀孔洞,蓝色铸体薄片(-);h. ZS103井,埋深6 015.78 m,凝块石白云岩,溶蚀缝,白云石、沥青充填,蓝色铸体薄片(-);i. PT101井,埋深5 755.06 m,凝块石白云岩,岩溶洞穴,蓝色铸体薄片(-)

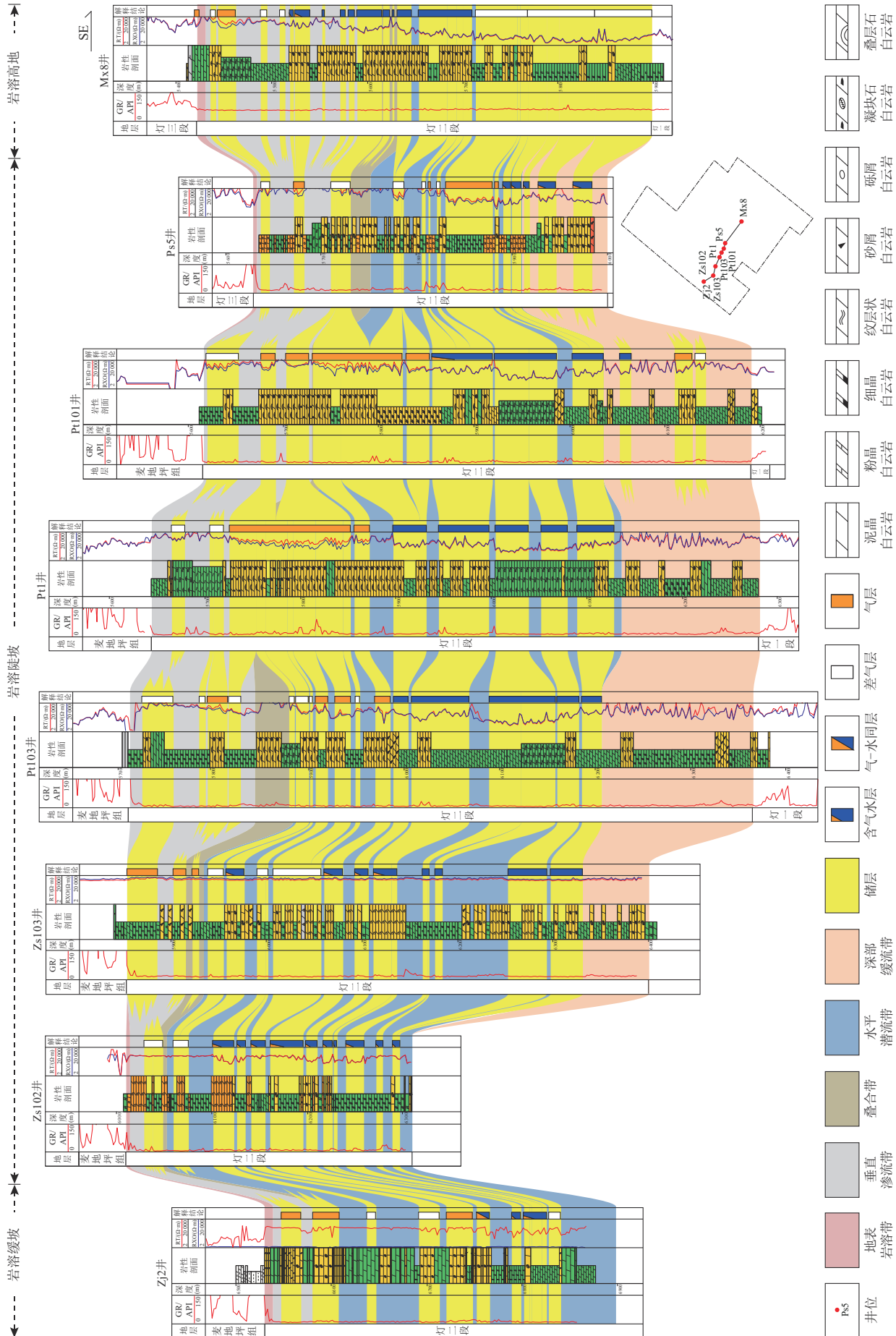


图 9 四川盆地蓬莱气区过 Zj2—Zs102—Zs103—Pt1—Pt101—Ps5—Mx8 井灯二段储层连井剖面
Fig. 9 Profile crossing wells Zj2, Zs102, Zs103, Pt1, Pt101, Ps5, and Mx8 showing reservoirs of the Deng 2 Member, Penglai gas area, Sichuan Basin

非均性质强,以岩溶缝洞型储层为主,岩心全直径孔隙度差异较大,通常大于3%,个别样品超过10%。叠合带整体厚度较薄,以发育网状溶蚀缝为主(图2b),孔隙度通常介于3%~5%。水平潜流带储层发育最好,以孔洞型和洞穴型岩溶储层为主,发育蜂窝状、层状溶蚀孔洞(图2d,e)和大型岩溶洞穴(图2f),横向连通性好,充填程度低,是油气聚集和储存最有利部位,岩心全直径孔隙度通常大于5%。深部缓流带受溶蚀改造

作用弱,岩性致密少孔,储层不发育,孔隙度普遍小于2%。

4.2 岩溶型储层展布

以ZJ2井—MX8井过井剖面(图9)为例,储层纵向上主要发育于水平潜流带,横向上集中发育于岩溶陡坡,岩溶缓坡次之,岩溶高地储层分布较为稀疏。根据研究区内十余口钻井资料统计分析(图10b,c),蓬莱

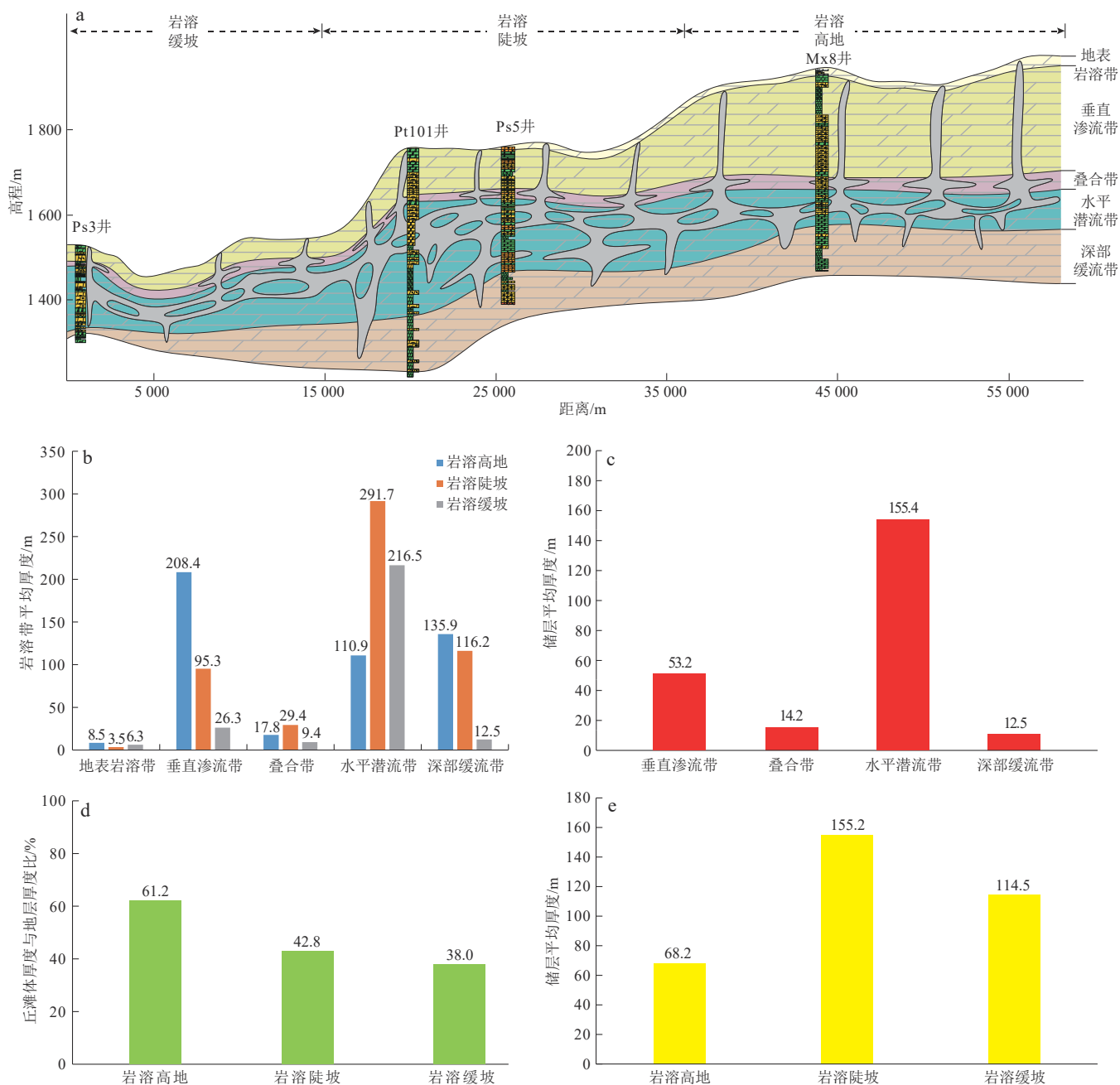


图10 四川盆地蓬莱气区灯二段岩溶发育模式

Fig. 10 Developmental model of karst within the Deng 2 Member, Penglai gas area, Sichuan Basin

a. 蓬莱气区灯二段岩溶发育模式(岩性图例见图9); b. 不同地貌岩溶带厚度统计; c. 岩溶带储层平均厚度; d. 不同古地貌丘滩体厚度比; e. 不同古地貌储层平均厚度

气区灯二段古地貌控制岩溶分带纵向展布,进而控制岩溶型储层发育。根据前述资料总结蓬莱气区灯二段岩溶发育模式,古地貌控制下发育的岩溶分带存在差异:岩溶高地主要发育垂直渗流带,水平潜流带发育厚度较薄;岩溶斜坡主要发育厚层的水平潜流带,其中岩溶缓坡厚度略低于陡坡。而岩溶型储层受控于岩溶带展布,储层主要发育于水平潜流带,垂直渗流带次之,叠合带与深部缓流带储层发育较少。究其原因,岩溶储层发育与古地貌控制下的水动力强弱有关^[37,42]:岩溶斜坡地势上具有较大的高差和坡降,地下水力梯度减小,溶蚀-侵蚀作用增强,形成良好的储集层;岩溶高地相对地势高,主要接受大气淡水淋滤和地表水渗流,储层溶蚀改造作用较弱。

4.3 岩溶古地貌控储模式

蓬莱气区灯二段台缘丘滩相在3个岩溶地貌单元均有发育:岩溶高地叠加发育局限台地和台缘丘滩;岩溶陡坡和缓坡主要叠合发育台缘丘滩。前人研究认为,灯二段储层主要受台地边缘微生物丘滩相控制^[43-45],根据岩心、薄片资料,测井解释及不同沉积相带的储层分析,储层发育并非完全受沉积相控制(图10a)。统计显示(图10d),岩溶高地发育丘滩体厚度大,占比61.2%;岩溶陡坡和缓坡发育丘滩体厚度较小,占比分别为42.8%和38.0%;如果储层发育仅受沉积相控制,则岩溶高地储层厚度应高于岩溶陡坡和缓坡。但根据不同地貌单元储层厚度统计显示(图10e),岩溶陡坡储层最为发育,岩溶缓坡次之,岩溶高地发育最薄,与前述假设相悖,故灯二段储层发育并非单一受控于沉积相,而应考虑表生期的岩溶改造。位于岩溶陡坡地貌处,表生期岩溶作用最强,经过溶蚀改造后储层厚度明显优于其他地貌单元,平均厚度达155.2 m,岩溶缓坡次之,平均厚度达114.5 m。相反,岩溶高地部位丘滩体厚度发育相较其它地貌单元更厚,但由于表生期遭受的溶蚀改造作用较弱,发育的岩溶型储层厚度较薄,平均厚度为68.2 m。

综上所述,蓬莱气区灯二段岩溶储层发育主要受控于不同古地貌下的表生岩溶作用,岩溶斜坡是有利的古地貌单元,发育厚层水平潜流带,地下流体以溶蚀-侵蚀作用为主,在表生期岩溶过程中沿优势储集空间发生扩容改造形成岩溶型储层。其次受控于有利沉积相带的分布,台缘丘滩体是有利的储集相带,丘滩体内部发育的晶间孔、粒间孔和微生物格架孔可作为良好的原生储集空间,同时为表生期岩溶储层改造提供了良好的物质基础。

5 结论

1) 露头证据、岩心资料和镜下鉴定表明,蓬莱气区灯二段受桐湾运动 I 幕影响,表生期岩溶作用强烈,纵向上发育地表岩溶带、垂直渗流带、叠合带、水平潜流带和深部缓流带。其中,水平潜流带岩溶作用强烈,以水平溶蚀-侵蚀为主;垂直渗流带次之,以垂向溶蚀为主。

2) 蓬莱气区灯二段储集空间以溶蚀孔洞、溶缝和溶沟为主。其中,水平潜流带储层最为发育,以岩溶孔洞型、洞穴型储层为主;垂直渗流带和叠合带储层发育次之,以岩溶缝洞型储层为主;地表岩溶带和深部缓流带储层不发育。

3) 蓬莱气区灯二段基本地貌格局呈西低东高,具有“一高、一斜、两洼”的特征。其中,“一高”指川中高石梯—磨溪地区的岩溶高地,岩溶较发育;“一斜”指研究区中部位于拉张槽东侧的岩溶斜坡,进一步分为陡坡和缓坡,岩溶最发育;“两洼”指研究区西侧,张槽北段及中段的岩溶洼地,岩溶不发育。

4) 蓬莱气区灯二段岩溶储层主要受控于古地貌,有利的地貌单元对储层的岩溶改造起到了主导作用;其次受控于沉积相,有利的沉积相带为储层改造提供了物质基础。岩溶斜坡叠合台缘丘滩体亚相联合控制了优质储层的形成和分布。

致谢:感谢3位匿名审稿专家的宝贵意见和帮助。本次研究得到中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目(2021DJ0501)和中国石油天然气股份有限公司重大科技专项项目(2023ZZ16YJ01)的资助。

参 考 文 献

- [1] 马新华, 闫海军, 陈京元, 等. 四川盆地安岳气田震旦系气藏叠合岩溶发育模式与主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1281-1294, 1333.
MA Xinhua, YAN Haijun, CHEN Jingyuan, et al. Development patterns and constraints of superimposed karst reservoirs in Sinian Dengying Formation, Anyue Gas Field, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1281-1294, 1333.
- [2] 余义常, 郭睿, 林敏捷, 等. 中东地区碳酸盐岩储层孔喉结构特征及开发对策——以伊拉克X油田M组为例[J]. 石油学报, 2023, 44(2): 369-384.
YU Yichang, GUO Rui, LIN Minjie, et al. Pore throat structure characteristics and development countermeasures of carbonate reservoirs in the Middle East: A case study of M Formation in X oilfield in Iraq[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(2): 369-384.

- [3] 田亮, 李佳玲, 焦保雷. 塔河油田12区奥陶系油藏溶洞充填机理及挖潜方向[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(3): 52-60.
TIAN Liang, LI Jialing, JIAO Baolei. Filling mechanism and potential tapping direction of Ordovician karst reservoirs in Block-12 of Tahe Oilfield [J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(3): 52-60.
- [4] 曹彦清, 张友, 沈安江, 等. 塔里木盆地古城地区奥陶系碳酸盐岩成储与油气成藏[J]. 海相油气地质, 2020, 25(4): 303-311.
CAO Yanqing, ZHANG You, SHEN Anjiang, et al. Carbonate reservoir formation and hydrocarbon accumulation of Ordovician in Gucheng area, Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2020, 25(4): 303-311.
- [5] 郑和荣, 田景春, 胡宗全, 等. 塔里木盆地奥陶系岩相古地理演化及沉积模式[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 733-745.
ZHENG Herong, TIAN Jingchun, HU Zongquan, et al. Lithofacies palaeogeographic evolution and sedimentary model of the Ordovician in the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 733-745.
- [6] 何江, 方少仙, 侯方浩, 等. 风化壳古岩溶垂向分带与储集层评价预测——以鄂尔多斯盆地中部气田区马家沟组马五₁亚段为例[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(5): 534-542.
HE Jiang, FANG Shaoxian, HOU Fanghao, et al. Vertical zonation of weathered crust ancient karst and the reservoir evaluation and prediction——A case study of M₅⁵-M₅¹ sub-members of Majiagou Formation in gas fields, central Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(5): 534-542.
- [7] 胥旺, 邓虎成, 雷涛, 等. 鄂尔多斯盆地东北部大牛地气田马家沟组不同性质断裂对表生岩溶的控制作用[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(3): 431-444.
XU Wang, DENG Hucheng, LEI Tao, et al. Control of different faults on supergene karst in the Majiagou Formation of Daniudi Gas Field, northeastern Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(3): 431-444.
- [8] 杨帆, 刘立峰, 冉启全, 等. 四川盆地磨溪地区灯四段风化壳岩溶储层特征[J]. 岩性油气藏, 2020, 32(2): 43-53.
YANG Fan, LIU Lifeng, RAN Qiquan, et al. Characteristics of weathering crust karst reservoir of Deng 4 member in Moxi area, Sichuan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(2): 43-53.
- [9] 李毕松, 苏建龙, 蒲勇, 等. 四川盆地元坝地区二叠系茅口组相控岩溶刻画及预测[J]. 岩性油气藏, 2024, 36(1): 69-77.
LI Bisong, SU Jianlong, PU Yong, et al. Facies-controlled karst characterization and effective reservoir prediction of Permian Maokou Formation in Yuanba area, Sichuan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36(1): 69-77.
- [10] 杨琴琴, 司马立强, 王亮, 等. 四川盆地龙女寺地区龙王庙组碳酸盐岩岩溶地层测井响应特征[J]. 海相油气地质, 2023, 28(1): 11-21.
YANG Qinqin, SIMA Liqiang, WANG Liang, et al. Logging response characteristics of carbonate karst strata of Longwangmiao Formation in Longnvsi area, Sichuan Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2023, 28(1): 11-21.
- [11] 史今雄, 赵向原, 潘仁芳, 等. 川中地区震旦系灯影组碳酸盐岩天然裂缝特征及其对气井产能影响[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 393-405.
SHI Jinxiong, ZHAO Xiangyuan, PAN Renfang, et al. Characteristics of natural fractures in carbonate reservoirs and their impacts on well productivity in the Sinian Dengying Formation, central Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 393-405.
- [12] 潘继平. 中国油气勘探开发新进展与前景展望[J]. 石油科技论坛, 2023, 42(1): 23-31, 40.
PAN Jiping. New progress and outlook of China's oil and gas exploration and development [J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2023, 42(1): 23-31, 40.
- [13] KLIMCHOUK A. Morphogenesis of hypogenic caves [J]. Geomorphology, 2009, 106(1/2): 100-117.
- [14] 张宇, 赵伦, 李长海, 等. 古岩溶油气储层研究进展[J]. 中国岩溶, 2022, 41(5): 808-824.
ZHANG Yu, ZHAO Lun, LI Changhai, et al. Research progress of paleokarst oil and gas reservoirs [J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(5): 808-824.
- [15] 柴寒冰. 磨溪地区灯影组灯四段持续性古隆起背景下的古岩溶储层结构特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
CHAI Hanbing. Structural characteristics of paleokarst reservoirs under the background of persistent paleo-uplift of the Dengying member of Dengying Formation in Moxi [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [16] 漆立新, 云露. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶发育特征与主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 1-12.
QI Lixin, YUN Lu. Development characteristics and main controlling factors of the Ordovician carbonate karst in Tahe Oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 1-12.
- [17] 谭秀成, 聂勇, 刘宏, 等. 陆表海碳酸盐岩台地沉积期微地貌恢复方法研究——以四川盆地磨溪气田嘉二²亚段A层为例[J]. 沉积学报, 2011, 29(3): 486-494.
TAN Xiucheng, NIE Yong, LIU Hong, et al. Research on the method of recovering microtopography of epeiric carbonate platform in depositional stage: A case study from the layer A of Jia 2² Member in Moxi Gas Field, Sichuan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(3): 486-494.
- [18] 罗贝维, 贾承造, 魏国齐, 等. 四川盆地地震旦统灯影组风化壳古岩溶特征及模式分析[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(3): 8-19.
LUO Beiwei, JIA Chengzao, WEI Guoqi, et al. Characteristics and models of weathering paleo-karst in Upper Sinian, Sichuan Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(3): 8-19.
- [19] 李伟, 刘静江, 邓胜徽, 等. 四川盆地及邻区震旦纪末—寒武纪早期构造运动性质与作用[J]. 石油学报, 2015, 36(5): 546-556, 563.
LI Wei, LIU Jingjiang, DENG Shenghui, et al. The nature and

- role of late Sinian-early Cambrian tectonic movement in Sichuan Basin and its adjacent areas[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(5): 546-556, 563.
- [20] 李博媛, 张殿伟, 庞雄奇, 等. 川北米仓山地区震旦系灯影组差异化岩溶作用分析[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(11): 2075-2084.
- LI Boyuan, ZHANG Dianwei, PANG Xiongqi, et al. Differential karstification analysis of the Sinian Dengying Formation in northern Sichuan[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(11): 2075-2084.
- [21] 赖锦, 王贵文. 川中蓬莱地区须二段气藏特征及有利含气区预测[J]. *岩性油气藏*, 2012, 24(5): 43-49, 54.
- LAI Jin, WANG Guiwen. Gas reservoir characteristics of the second member of Xujiahe Formation and prediction of favorable gas bearing zones in Penglai area, central Sichuan Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2012, 24(5): 43-49, 54.
- [22] 杨雨, 文龙, 宋泽章, 等. 川中古隆起北部蓬莱气区多层系天然气勘探突破与潜力[J]. *石油学报*, 2022, 43(10): 1351-1368, 1394.
- YANG Yu, WEN Long, SONG Zezhang, et al. Breakthrough and potential of natural gas exploration in multi-layer system of Penglai gas area in the north of central Sichuan paleo-uplift[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(10): 1351-1368, 1394.
- [23] 陈宗清. 论四川盆地地下古生界5次地壳运动与油气勘探[J]. *中国石油勘探*, 2013, 18(5): 15-23.
- CHEN Zongqing. On five crustal movements and petroleum exploration in Lower Paleozoic, Sichuan Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2013, 18(5): 15-23.
- [24] 李宗银, 姜华, 汪泽成, 等. 构造运动对四川盆地震旦系油气成藏的控制作用[J]. *天然气工业*, 2014, 34(3): 23-30.
- LI Zongyin, JIANG Hua, WANG Zecheng, et al. Control of tectonic movement on hydrocarbon accumulation in the Sinian strata, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(3): 23-30.
- [25] 李柯然, 宋金民, 刘树根, 等. 四川盆地灯影组微生物岩组构造元素富集特征及意义[J/OL]. *沉积学报*. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.042>.
- LI Keran, SONG Jinmin, LIU Shugen, et al. Element enrichment characteristics and paleoenvironmental significance of microbial rock fabric in Late Ediacaran strata from the Sichuan Basin[J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.042>.
- [26] 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.
- [27] 金鑫, 宋金民, 刘树根, 等. 四川盆地周缘灯影组风暴沉积特征及其地质意义[J]. *天然气工业*, 2021, 41(10): 39-49.
- JIN Xin, SONG Jinmin, LIU Shugen, et al. Characteristics and geological implications of Dengying Formation tempestites in the periphery of the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(10): 39-49.
- [28] LI Keran, SONG Jinmin, YAN Haijun, et al. Carbonate microfacies classification model based on dual neural network: A case study on the fourth member of the Upper Ediacaran Dengying Formation in the Moxi Gas Field, Central Sichuan Basin[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15(24): 1773.
- [29] 沈安江, 胡安平, 张杰, 等. 微生物碳酸盐岩“三因素”控储地质认识和分布规律[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(3): 582-596.
- SHEN Anjiang, HU Anping, ZHANG Jie, et al. “Three-factor” driven microbial carbonate reservoirs and their distribution[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(3): 582-596.
- [30] 刘静江, 李伟, 张宝民, 等. 上扬子地区震旦纪沉积古地理[J]. *古地理学报*, 2015, 17(6): 735-753.
- LIU Jingjiang, LI Wei, ZHANG Baomin, et al. Sedimentary palaeogeography of the Sinian in Upper Yangtze Region[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2015, 17(6): 735-753.
- [31] 黄擎宇, 胡素云, 潘文庆, 等. 台内微生物丘沉积特征及其对储层发育的控制——以塔里木盆地柯坪—巴楚地区下寒武统肖尔布拉克组为例[J]. *天然气工业*, 2016, 36(6): 21-29.
- HUANG Qingyu, HU Suyun, PAN Wenqing, et al. Sedimentary characteristics of intra-platform microbial mounds and their controlling effects on the development of reservoirs: A case study of the Lower Cambrian Xiaorbukake Fm in the Keping-Bachu area, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(6): 21-29.
- [32] 任佳鑫, 宋金民, 刘树根, 等. 四川盆地灯影组二段微生物丘滩体结构类型与沉积模式[J]. *石油学报*, 2023, 44(2): 312-328.
- REN Jiaxin, SONG Jinmin, LIU Shugen, et al. Framework and sedimentary model of microbial mound-bank complex in Member 2 of Dengying Formation, Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(2): 312-328.
- [33] 倪新锋, 张丽娟, 沈安江, 等. 塔北地区奥陶系碳酸盐岩古岩溶类型、期次及叠合关系[J]. *中国地质*, 2009, 36(6): 1312-1321.
- NI Xinfeng, ZHANG Lijuan, SHEN Anjiang, et al. Paleokarstification types, karstification periods and superimposition relationship of Ordovician carbonates in northern Tarim Basin[J]. *Geology in China*, 2009, 36(6): 1312-1321.
- [34] 张长建, 吕艳萍, 张振哲. 塔里木盆地塔河油田西部斜坡区中下奥陶统古岩溶洞穴发育特征[J]. *石油实验地质*, 2022, 44(6): 1008-1017, 1047.
- ZHANG Changjian, LYU Yanping, ZHANG Zhenzhe. Features of Middle-Lower Ordovician paleo-karst caves in western slope area, Tahe oil field, Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2022, 44(6): 1008-1017, 1047.
- [35] 杨明磊, 诸丹诚, 李涛, 等. 川南地区中二叠统茅口组颗粒滩对早成岩期岩溶储层的控制[J]. *现代地质*, 2020, 34(2):

- 356-369.
- YANG Minglei, ZHU Dancheng, LI Tao, et al. Control of eogenetic karst reservoir by shoals in middle Permian Maokou Formation, southern Sichuan Basin [J]. *Geoscience*, 2020, 34 (2): 356-369.
- [36] 陈胜, 张哨楠, 邓礼正, 等. 鄂尔多斯盆地塔巴庙地区奥陶系古岩溶研究[J]. 物探化探计算技术, 2007, 29(3): 239-243.
- CHEN Sheng, ZHANG Shaonan, DENG Lizheng, et al. The research on Ordovician palaeokarst in Tabamiao area of Ordos Basin [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2007, 29(3): 239-243.
- [37] 闫海军, 彭先, 夏钦禹, 等. 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, 2020, 41(6): 658-670, 752.
- YAN Haijun, PENG Xian, XIA Qinyu, et al. 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*, 2020, 41(6): 658-670, 752.
- [38] 庞艳君, 代宗仰, 刘善华, 等. 川中乐山—龙女寺古隆起奥陶系风化壳古地貌恢复方法及其特征[J]. 石油地质与工程, 2007, 21(5): 8-10, 15.
- PANG Yanjun, DAI Zongyang, LIU Shanhua, et al. Restoration method of Ordovician weathering crust paleo-geomorphology of Leshan-Longnv Temple paleohigh and its features in central Sichuan [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2007, 21(5): 8-10, 15.
- [39] 杜金虎, 汪泽成, 邹才能, 等. 古老碳酸盐岩大气田地质理论与勘探实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2015: 18.
- DU Jinhu, WANG Zecheng, ZOU Caineng, et al. *Geologic theory and exploration practice of ancient large carbonates gas field* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015: 18.
- [40] 陈兆芹, 刘景彦, 董火祥, 等. 松辽盆地东南隆起区古地貌恢复方法与效果[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(23): 9937-9946.
- CHEN Zhaoqin, LIU Jingyan, DONG Huoxiang, et al. Restoration methods and effects of paleogeomorphology in the northeastern part of the southeast uplift of Songliao Basin [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(23): 9937-9946.
- [41] 张坦, 贾梦瑶, 孙雅雄, 等. 四川盆地南部中二叠统茅口组岩溶古地貌恢复及特征[J]. 岩性油气藏, 2024, 36(1): 111-120.
- ZHANG Tan, JIA Mengyao, SUN Yaxiong, et al. Restoration and characteristics of karst paleogeomorphology of Middle Permian Maokou Formation in southern Sichuan Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2024, 36(1): 111-120.
- [42] 曾韬, 季少聪, 夏文谦, 等. 川北元坝地区茅口组顶面古地貌恢复与岩溶发育特征[J]. 中国岩溶, 2022, 41(6): 860-868, 879.
- ZENG Tao, JI Shaocong, XIA Wenqian, et al. Reconstruction of karst paleo-geomorphology and paleo-water system on the top of Maokou Formation in Yuanba area, northern Sichuan Basin [J]. *Carsologica Sinica*, 2022, 41(6): 860-868, 879.
- [43] 张玺华, 李勇, 张本健, 等. 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[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2023, 50(3): 301-312.
- ZHANG Xihua, LI Yong, ZHANG Benjian, et al. Characteristics and formation mechanism of high quality reservoir of the second member of the Dengying Formation in Zhongjiang-Penglai area, Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2023, 50 (3): 301-312.
- [44] 李勇, 王兴志, 冯明友, 等. 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[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(1): 52-64.
- LI Yong, WANG Xingzhi, FENG Mingyou, et al. Reservoir characteristics and genetic differences between the second and fourth members of Sinian Dengying Formation in northern Sichuan Basin and its surrounding areas [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(1): 52-64.
- [45] 欧家强, 李祖兵, 杨洋, 等. 四川盆地蓬探1井区震旦系灯影组二段储层特征及主控因素[J]. 天然气地球科学, 2022, 33 (12): 1997-2007.
- OU Jiaqiang, LI Zubing, YANG Yang, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of the second member of the Dengying Formation in Pengtan 1 well area, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(12): 1997-2007.

(编辑 梁 慧)