

川东地区中二叠统茅口组二段上亚段台缘带沉积演化特征及勘探潜力

牟月¹, 谭秀成^{1,2}, 罗冰^{3,4}, 李明隆¹, 徐发波⁴, 易娟子⁴, 吴永宏⁴, 杨文杰¹, 郭杰¹, 肖笛^{1,2}

(1. 中国石油天然气集团有限公司碳酸盐岩储层重点实验室, 四川成都610500; 2. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 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; 4. 中国石油西南油气田公司重庆气矿, 重庆400707)

摘要:四川盆地茅口组二段上亚段(茅二上亚段)台缘带勘探潜力巨大,近年来在川中—川西北地区不断取得突破,但川东地区研究相对薄弱,台缘带展布特征尚不清晰。在川东地区开展小层划分对比的基础上,研究了台缘带展布和演化规律,并提出有利油气勘探区带。结果表明:①茅二上亚段在岩性组合和测井上具有2期四级旋回,据此划分出2个小层。1小层和2小层均为镶边碳酸盐岩台地沉积体系,主要发育台缘滩、滩间潟湖、台内滩和半局限海亚相。②1小层和2小层台缘带展布特征相似,邻水—丰都和大竹—忠县两带台缘滩均呈北西—南东向展布。1小层两带台缘滩分异显著,被带状滩间潟湖分隔;2小层台缘滩侧向迁移,平面分布面积扩大,两带滩体在东部连片发育。③台缘滩体叠合准同生期岩溶和白云石化作用是优质储层发育的主要原因。邻水—丰都和大竹—忠县台缘滩带是有利储集层发育区,斜坡—海槽和滩间潟湖是烃源岩发育的有利区。大竹—忠县台缘滩油气勘探潜力大,是新的油气勘探有利区域。

关键词:有利区带;台地边缘;沉积演化;碳酸盐岩;茅口组;川东地区

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Sedimentary evolution and hydrocarbon exploration potential of platform-margin zones in the upper sub-member of the 2nd member of the Middle Permian Maokou Formation, eastern Sichuan Basin

MU Yue¹, TAN Xiucheng^{1,2}, LUO Bing^{3,4}, LI Minglong¹, XU Fabo⁴, YI Juanzi⁴,
WU Yonghong⁴, YANG Wenjie¹, GUO Jie¹, XIAO Di^{1,2}

(1. Key Laboratory of Carbonate Reservoirs, CNPC, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610051, China; 4. Chongqing Gas Field, Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Chongqing 400707, China)

Abstract: Platform-margin zones in the upper sub-member of the 2nd member of the Maokou Formation (also referred to as the Mao 2 Member) in the Sichuan Basin exhibit enormous hydrocarbon exploration potential, with constant breakthroughs having been made in the central to northwestern Sichuan Basin. However, the distribution pattern of platform-margin zones in the eastern Sichuan Basin remains unclear due to limited studies. Focusing on the eastern Sichuan Basin, we conduct sub-layer division and correlation, investigate the distribution and evolutionary pattern of the platform-margin zones therein, and propose hydrocarbon play fairways. The results indicate that the upper sub-member of the Mao 2 Member in the eastern Sichuan Basin exhibits two fourth-order eustatic cycles, as evidenced by lithologic assemblages and logs. Based on this finding, the upper sub-member can be divided into sub-layers 1 and 2. Both sub-layers consist of the sedimentary systems of rimmed carbonate platform facies, with major sedimentary subfacies including platform-margin

收稿日期:2024-08-11;修回日期:2024-12-16。

第一作者简介:牟月(2000—),女,硕士研究生,沉积学。E-mail: 17830338219@163.com。

通信作者简介:谭秀成(1970—),男,教授、博士研究生导师,沉积学及碳酸盐岩储层地质。E-mail: tanxiucheng70@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(42172166);中国石油天然气股份有限公司上游领域基础性前瞻性项目(2021DJ0501);中国石油—西南石油大学创新联合体科技合作项目(2020CX010300)。

shoals, inter-shoal lagoons, intra-platform shoals, and semi-restricted seas. The platform-margin zones in both sub-layers show similar distribution patterns, with platform-margin shoals along the Linshui-Fengdu and Dazhu-Zhongxian platform-margin zones spreading in the NW-SE direction. During the deposition of sub-layer 1, platform-margin shoals in both platform-margin zones display pronounced differentiation, separated by banded inter-shoal lagoons. During the deposition of the sub-layer 2, platform-margin shoals display lateral migration and an expanded planar distribution area, manifesting a contiguous development in the eastern part. The superimposition of penecontemporaneous karstification and dolomitization on platform-margin shoals is identified as the main cause of the formation of high-quality reservoirs. The Linshui-Fengdu and Dazhu-Zhongxian platform-margin zones are favorable for reservoir development, while slope-troughs and inter-shoal lagoons emerge as favorable areas for source rock development. The platform-margin shoals along the Dazhu-Zhongxian platform-margin zone exhibit great hydrocarbon exploration potential, serving as a new hydrocarbon play fairway.

Key words: play fairway, platform margin, sedimentary evolution, carbonate rocks, Maokou Formation, eastern Sichuan Basin

引用格式:牟月,谭秀成,罗冰,等.川东地区中二叠统茅口组二段上亚段台缘带沉积演化特征及勘探潜力[J].石油与天然气地质,2025,46(1):211-229. DOI:10.11743/ogg20250115.

MU Yue, TAN Xiucheng, LUO Bing, et al. Sedimentary evolution and hydrocarbon exploration potential of platform-margin zones in the upper sub-member of the 2nd member of the Middle Permian Maokou Formation, eastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(1): 211-229. DOI: 10.11743/ogg20250115.

四川盆地中二叠统茅口组天然气勘探历史悠久,早期以裂缝系统为勘探对象,在川南地区发现了一批岩溶缝洞型灰岩气藏以及卧龙河、威远等裂缝-孔隙型气藏^[1-2]。2003年,中国石化在开江-梁平海槽东侧台缘带的普光构造上发现了以二叠系和三叠系礁滩白云岩为储层的普光气田,探明地质储量达4 121×10⁸ m³,之后围绕开江-梁平海槽边缘先后发现了普光、元坝和龙岗等礁滩油气藏^[3-5],充分显示出台缘带礁滩储层的油气资源前景。随着茅口组热次盆、构造-热液白云岩成因等理论的提出,沿15°基底断裂分布的层状孔隙型白云岩储层成为新的勘探热点^[6-7]。近5年来,以角探1井为代表的滩相白云岩储层获得重大勘探突破,“一缘两高带”成为茅口组新的勘探焦点^[8]。随着勘探力度的不断加大,蓬阳1、蓬阳3和蓬深6等井台缘滩相白云岩储层相继取得突破^[9],川中-川西北地区台缘带的认识逐渐清晰,明确了茅口组二段上亚段(茅二上亚段)台缘带受基底断裂控制,呈北西-南东向展布^[1, 10],并与此前刻画的层状孔隙型白云岩储层时-空分布一致^[6-7]。至此,四川盆地茅口组的勘探思路从最初的寻找岩溶缝洞型储层拓展至寻找规模性台缘滩相白云岩储层^[1, 11]。

相较于川中-川西北台缘带,川东地区台缘带的展布研究较为滞后,早期钻井多以寻找石炭系孔隙型气藏为目标,先后发现了卧龙河、相国寺、大池干井和五百梯等一批石炭系大-中型气藏^[12-13],尽管部分井钻

遇茅二上亚段白云岩储层,但未引起足够重视,制约了该地区油气勘探进程^[14]。随着15°基底断裂白云岩带的发现^[7],众多学者开始关注川东地区这套白云岩储层成因,并证实白云岩储层发育受到台缘滩相控制^[15-17],但迄今对于川东地区茅二上亚段台缘滩带及其控制的白云岩展布特征仍缺乏系统刻画。

此外,传统观点认为川东地区台缘带主要分布在邻水-丰都一带^[10],然而本次老井复查发现,邻水-丰都以北的中台子、洋渡溪和沙坪场等构造带茅二上亚段也存在优质滩相储层。与此同时,川东地区最新地震资料显示,邻水-丰都台缘带北侧具有规模性滩带发育的响应特征,有必要对川东地区台缘带分布开展精细刻画。因此,本文在前人研究的基础上开展川东地区老井复查,结合最新的钻井和地震资料对四川盆地东部邻水-丰都地区茅二上亚段沉积特征开展研究,并对茅二上亚段进行小层划分,进一步落实台缘滩展布和演化规律,厘清白云岩储层平面分布特征,明确有利储集区带,以期推进川东地区茅口组天然气勘探开发进程。

1 区域地质概况

研究区位于四川盆地东部,构造上属于川东高陡构造带(图1a)。地理位置上西起华蓥,东达石柱,南起江北,北至梁平(图1b)。本文基于研究区190余口测井、4口取心井、13口岩屑录井和4条野外露头资料,

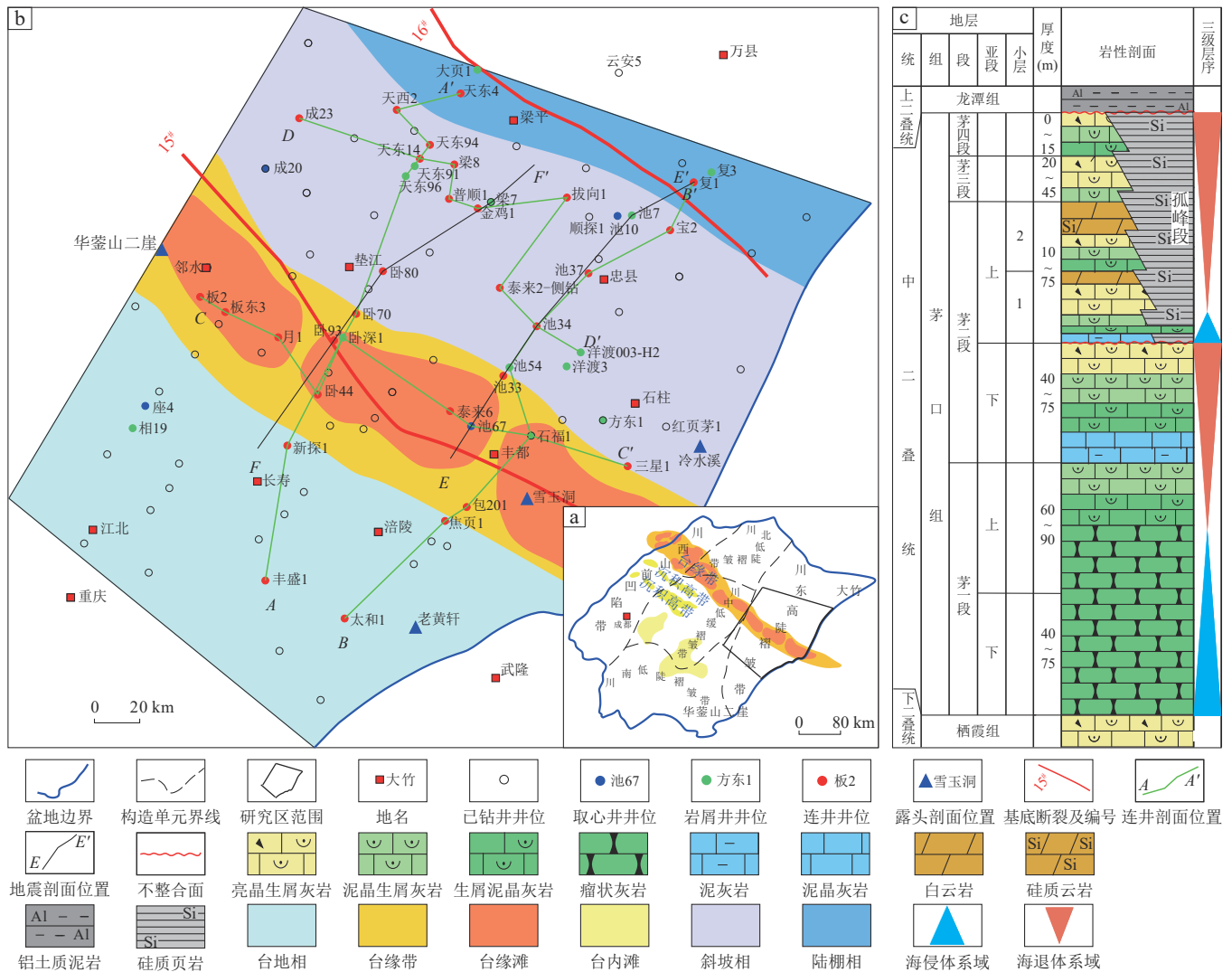


图1 川东地区茅口组区域地质图及地层综合柱状图(图1b据文献[10]修改)。

Fig. 1 Regional geological map and composite stratigraphic column of the Maokou Formation in the study area (Fig. 1b modified after reference [10])

a. 四川盆地构造分区简图; b. 研究区区域地质图; c. 茅口组综合柱状图

对茅二上亚段进行精细相带刻画。

对比华南地区与全球海平面变化,华南地区中二叠世经历了2期大规模海侵-海退旋回^[18],且盆内露头剖面Fischer图解结果显示茅口组发育2个完整的、规模较大的实际可容空间旋回,代表了2次显著的海平面升降旋回^[19]。此外,大量层序地层研究结果均指出四川盆地茅口组主要发育2个三级层序^[20]。结合研究区茅口组层序响应特征,茅二上亚段底界面在盆内差异响应特征最明显,界面之上具有大规模海侵沉积特征,据此以茅二上亚段底界面为界线,将茅口组划分为上、下2个三级层序。

茅口组沉积早期,四川盆地整体沉积环境稳定,研究区发生广泛海侵,茅一段发育典型的瘤状灰岩(眼球眼皮状灰岩)沉积,茅一段顶部-茅二下亚段过

渡为灰-深灰色生屑灰岩^[21]。茅口组沉积中、晚期受峨眉地幔柱隆升以及板块拉张活动的影响,四川盆地构造-沉积分异现象明显^[22],在川中-川东北地区形成一系列内高带,简称为“一缘两高带”,其控制了滩相储层的规模发育^[8, 10, 23]。研究区位于“一缘”的南部,茅二上亚段一茅四段沉积时期主要沉积(云质)亮晶生屑灰岩、(硅质)云岩、泥晶生屑灰岩、泥晶灰岩和泥灰岩;在研究区北部,茅二上亚段一茅四段岩性出现显著分异,以硅质泥页岩为主,为前人研究认为的“孤峰段”,与茅口组碳酸盐岩属于同期异相^[24]。中二叠世末期受东吴运动引起的构造抬升影响,茅口组顶部出露地表,形成区域性暴露不整合面,茅口组之上覆盖上二叠统龙潭组滨岸-潮坪沉积,岩性以泥页岩为主^[25](图1c)。

2 茅二上亚段小层划分

在碳酸盐岩沉积地层中,泥质含量的高低可以反映沉积时期水体的深浅,而自然伽马(GR)测井曲线能反映泥质含量的高低,因而常用来判断沉积地层的旋回特征^[18]。然而,在台缘带中泥质含量低,GR值变化范围小,旋回变化难以识别,可以将GR测井曲线转化为INPEFA曲线,让隐藏在测井曲线中的地层旋回特征信息显现化^[26],即利用INPEFA曲线的趋势和拐点可以辅助判断层序的变化^[27]。通常情况下,INPEFA曲线中一个完全正趋势(曲线值从左向右增加)对应一个基准面上升半旋回,代表一次海侵过程;一个完全负趋势(曲线值从右向左减少)对应一个基准面下降半旋回,代表一次海退过程;拐点则指示一个层序界面或层序内的特征界面^[19]。

古代海相碳酸盐岩碳、氧稳定同位素组成能近似地反映同时期古海洋同位素的组成,从而反映当时的古气候和古环境,因此除了应用测井和岩性进行地层划分外,在古海洋领域还可以应用碳、氧同位素作为地

层划分对比的重要依据^[28]。海相碳酸盐沉积物的碳、氧稳定同位素特征可能由于与成岩流体的相互作用而发生改变,一般来说,盐度升高, $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值增大;而淡水淋滤可使 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值降低^[29-30]。

针对台地边缘带厚层颗粒滩发育、沉积物能量变化不显著以及旋回特征难以识别的问题,本文以相对海平面变化沉积旋回为指导,结合岩性、电性(INPEFA曲线)、地球化学(碳、氧同位素)等特征综合分析,对研究区190余口井进行小层划分与对比,最终将茅二上亚段自下而上划分为1和2两个小层:①1小层GR值整体较高,结合INPEFA曲线可识别出2个中期旋回;岩性以泥晶灰岩、生屑泥晶灰岩为主,顶部为一套泥晶生屑灰岩,与2小层底部的生屑泥晶灰岩分开;顶部碳、氧同位素值负偏不明显,可能与暴露时间短有关。②2小层总体上为海退过程,GR值总体相对较低,其变化难以识别,但通过INPEFA曲线,仍能识别出2个中期旋回;岩性主要为(硅质)云岩、亮晶生屑灰岩;顶部由于受到准同生期暴露淡水淋滤作用影响,碳、氧同位素值具有明显负偏移的特征,茅三段底部又出现明显正偏移,表明进入了下一期旋回(图2)。

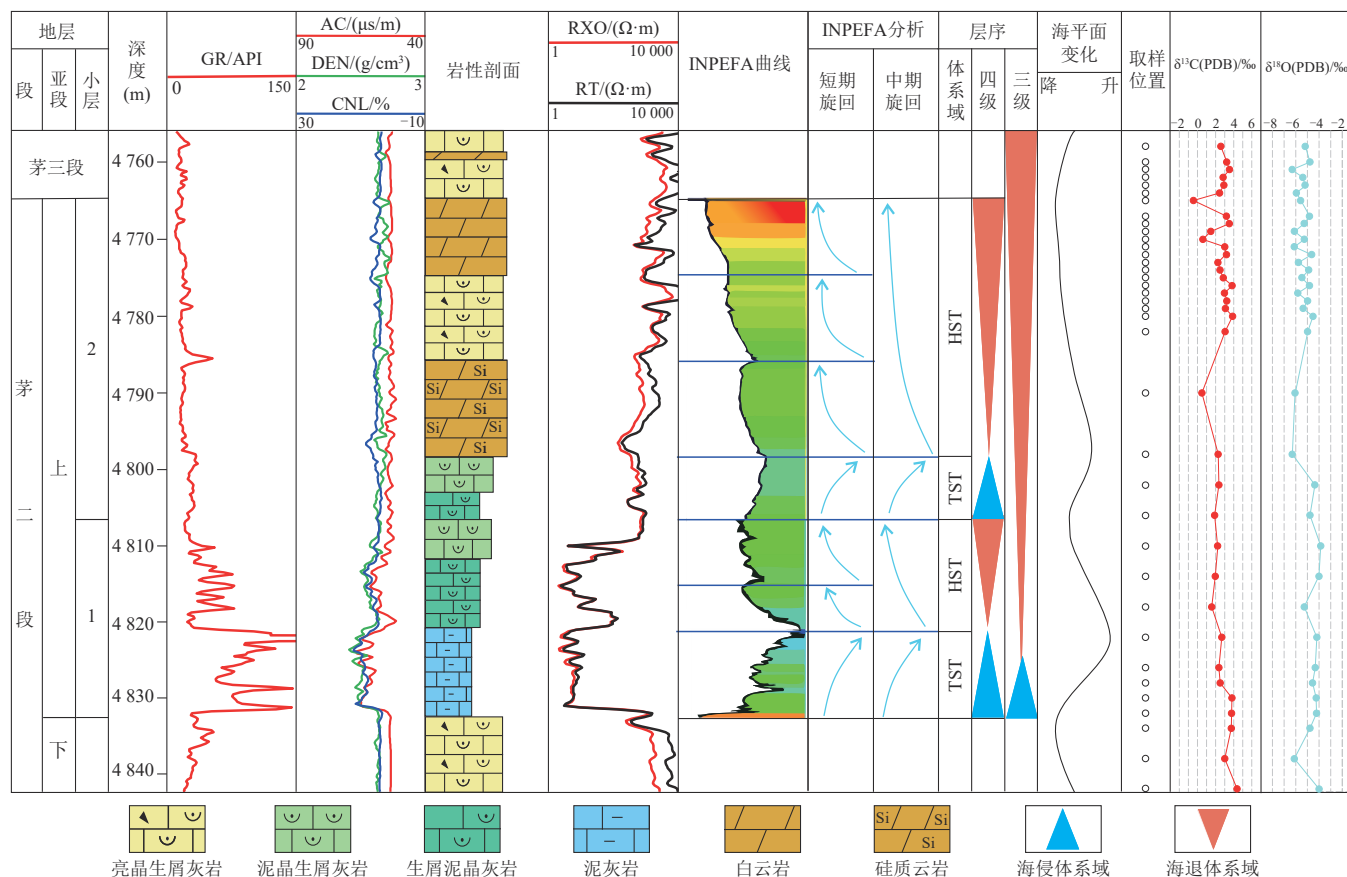


图2 川东地区东方1井中二叠统茅二上亚段层序地层综合柱状图

Fig. 2 Composite stratigraphic column of sequences in the upper sub-member of the Mao 2 Member in well Fangdong-1 in the eastern Sichuan Basin

3 沉积特征与沉积相划分

3.1 岩性特征

不同的岩石类型反映不同的沉积环境。本文通过野外露头、岩心以及镜下薄片观察,对川东地区茅二上亚段岩石类型及特征进行了系统研究,认为目的层岩性主要包括细-中晶白云岩、硅质云岩、亮晶生屑灰岩、泥晶生屑灰岩、生屑泥晶灰岩、泥灰岩、钙质页岩和层状硅质岩(表1;图3)。

3.1.1 颗粒灰岩

该类岩石呈灰色或浅灰色,颗粒类型以生物碎屑为主,颗粒含量大于50%。生屑颗粒主要为有孔虫、棘皮和介壳类,也见少量腕足类、苔藓虫和腹足等。根据颗粒间充填物的差异,可细分为亮晶生屑灰岩和泥晶生屑灰岩,其中,亮晶生屑灰岩颗粒间被亮晶方解石胶结(图3a),代表其形成于水体能量较高的环境,泥晶生屑灰岩颗粒间多为灰泥充填(图3b),代表其形成于较低能的环境。

3.1.2 细-中晶白云岩

该类岩石呈灰白-浅灰色,针状孔发育,镜下可见白云石主要呈自形-半自形,原岩恢复中见大量残余生屑幻影,反映原岩主要为颗粒灰岩,通常代表相对高能的沉积环境(图3c)。

3.1.3 硅质云岩

硅质云岩在研究区内较发育,硅质在宏观上常以结核状的形态与云岩伴生,在微观上常以胶结物的形式产出。此类岩石类型是在白云岩的基础上,叠加了硅化作用,导致白云石晶粒被部分或完全交代,通常代表相对高能的沉积环境(图3d)。

3.1.4 生屑泥晶灰岩

该类岩石呈深灰色,颗粒类型以生物碎屑为主,颗粒含量在25%~50%,生屑颗粒主要为有孔虫、棘皮、介壳和腹足类,颗粒间为灰泥充填,主要形成于较低能的环境(图3e)。

3.1.5 泥灰岩

该类岩石呈深灰色,厚度多为薄-中,生屑可见腕足类、海绵骨针和介形虫等,泥质含量相对较高,形成于低能环境(图3f)。

3.1.6 钙质页岩

该类岩石呈灰黑色,多为薄层状,组分以石英、方解石和黑色有机质为主,其中黑色有机质在镜下极为发育(图3g)。

3.1.7 硅质岩

硅质岩在研究区内较发育,产出形态多样,在研究区南部主要呈条带状和结核状分布于灰岩或云岩层间,在北部主要呈层状与泥页岩、硅质泥岩、泥灰岩互层分布(图3h,i)。

3.2 沉积相划分

基于研究区丰富的露头剖面资料,结合薄片观察、测录井及分析测试等资料,对茅口组沉积相类型和特征展开研究,认为川东地区茅二上亚段主要发育镶边碳酸盐台地体系,沉积相类型主要包括台地边缘、半局限台地和斜坡-海槽相,并可进一步划分为台缘滩、滩间海、滩间潟湖、台内滩、半局限海等亚相,其中台缘滩是区内最主要的亚相类型(表2)。

3.2.1 台地边缘相

台地边缘相位于碳酸盐台地与台缘斜坡相带之

表1 川东地区沉积产物类型及其发育的地区和层位

Table 1 Sedimentary rock types in the study area and the areas and horizons in which they develop

岩石类型	发育地区	发育层位
细-中晶白云岩	工区南部	1小层中、上部,2小层中、上部
硅质云岩	工区南部	1小层中、上部,2小层中、上部
亮晶生屑灰岩	工区南部	1小层中、上部,2小层中、上部
泥晶生屑灰岩	工区南部	各个层位均发育
生屑泥晶灰岩	工区南部	各个层位均发育
泥灰岩	工区南部和北部	1小层中、下部
钙质页岩	工区中部	1小层中、下部
层状硅质岩	工区北部	各个层位均发育

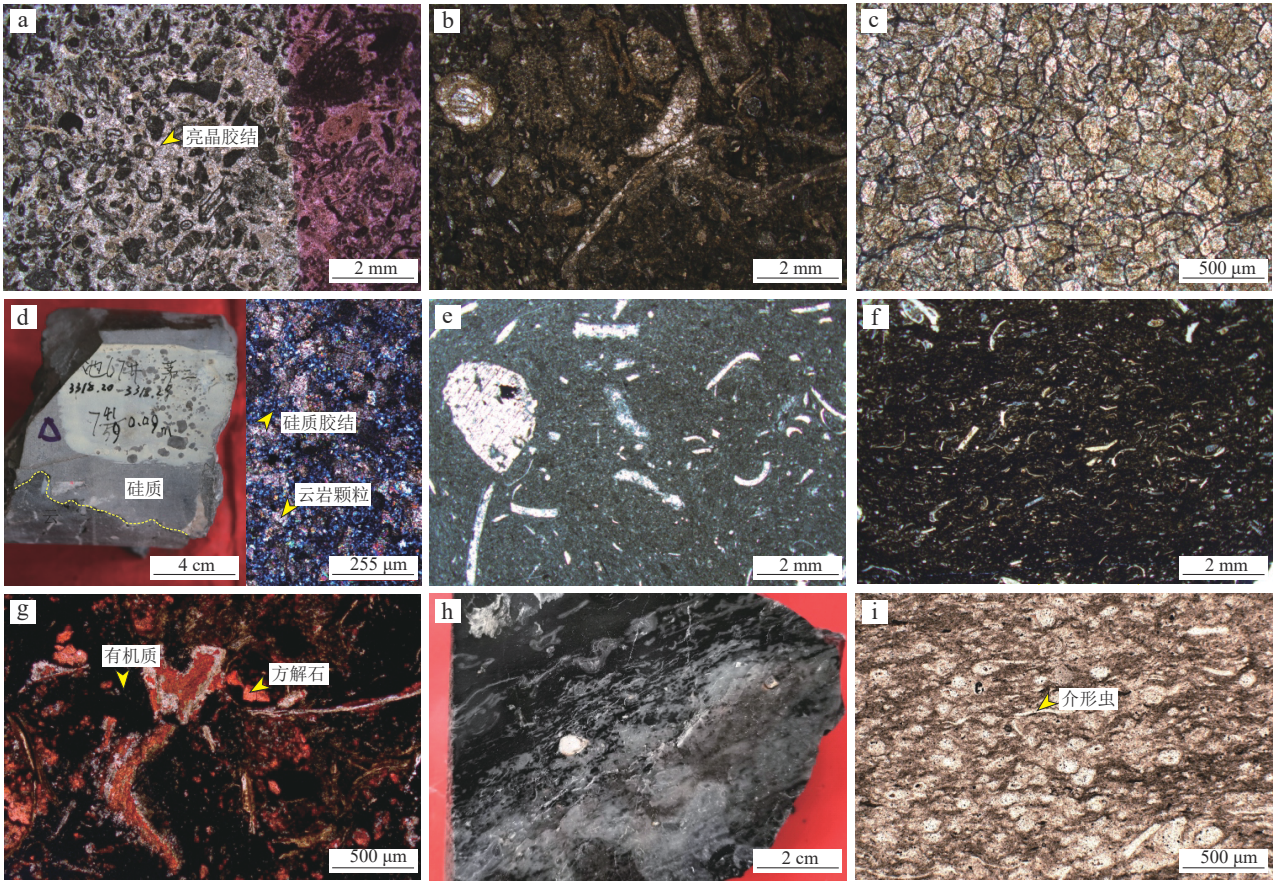


图3 川东地区茅二上亚段岩石学特征显微照片

Fig. 3 Petrological characteristics of the upper sub-member of the Mao 2 Member in the study area

a. 亮晶生屑灰岩,生屑颗粒发育,雪玉洞剖面,2小层,茜素红染色的岩心薄片(-);b. 泥晶生屑灰岩,雪玉洞剖面,2小层,岩心薄片(-);c. 细-中晶云岩,池67井,2小层,埋深3 315.80 m,岩心薄片(-);d. 硅质云岩,硅质呈灰蓝色,池67井,2小层,埋深3 318.20 m,左为岩心,右为岩心薄片(+);e. 生屑泥晶灰岩,池67井,2小层,埋深3 324.05 m,岩心薄片(-);f. 泥灰岩,成20井,1小层,埋深3 366.25 m,岩心薄片(-);g. 钙质页岩,天东96井,1小层,埋深4 662.00 m,茜素红染色的岩屑薄片(-);h. 硅质岩,大页1井,1小层,埋深3 390.77 m,岩心; i. 硅质岩,见介壳生屑,大页1井,1小层,埋深3 390.77 m,岩心薄片(-)

表2 川东地区主要沉积相划分方案

Table 2 Division scheme for major sedimentary facies in the study area

沉积体系	相	亚相	微相	主要岩石类型
镶边碳酸盐台地	台地边缘	台缘滩	滩核	亮晶生屑灰岩、白云岩、硅质云岩
			滩翼	泥晶生屑灰岩
		滩间海	—	生屑泥晶灰岩、泥晶生屑灰岩
	半局限台地	滩间潟湖	—	泥灰岩、钙质页岩
		台内滩	—	亮晶生屑灰岩、白云岩、泥晶生屑灰岩
		半局限海	—	泥晶生屑灰岩、生屑泥晶灰岩、泥晶灰岩
	斜坡-海槽	—	—	生屑泥晶灰岩、泥灰岩、层状硅质岩

注:“—”代表未进行划分。

间,呈条带状或链状断续分布,形成“台地镶边”。水体相对较浅,是波浪和潮汐作用强烈改造的高能地带,水动力较强,生物礁和生屑滩发育,泥质含量相对较低,地震反射特征常为杂乱或空白反射。根据岩性特征以及微地貌差异,可进一步划分为台缘滩、滩间海与滩间潟湖亚相。

1) 台缘滩

台缘滩是有利油气储集相带,其沉积特征是本次研究的重点。台缘滩亚相位于碳酸盐台地边缘,通常能量高、滩体规模大。根据微地貌差异可进一步分出滩核微相和滩翼微相。滩核处于微地貌高地,水体能量高,是颗粒最集中堆积的部位,常在低水位期暴露在

海平面之上,其沉积物以厚层、块状的亮晶生屑灰岩为主(图3a),在大气淋滤作用和白云化作用的改造下,可形成具残余生屑结构的云质豹斑灰岩以及晶粒白云岩(图3c)。滩翼是生屑在滩核部位堆积至一定程度后向周围扩散的区域,岩石类型以泥晶生屑灰岩为主(图3b),可见少量薄层状(云质)亮晶生屑灰岩。

2) 滩间海

滩间海亚相一般处于正常浪基面之下,由于礁滩体对水体能量的耗散,海底能量通常较低,沉积物以深灰-灰色泥晶灰岩和生屑泥晶灰岩为主(图3e)。

3) 滩间潟湖

滩间潟湖一般存在于台地边缘的礁滩体围限的低洼水域,水体循环受到限制,环境能量低,以静水沉积为主。主要岩石类型为深灰色钙质页岩、深灰色泥灰岩(图3f,g)。

3.2.2 半局限台地相

研究区由于受到台缘滩和台内局部隆起地形的障壁作用,水体循环受到一定程度限制,海水盐度比正常海水高^[31],主要发育半局限台地。台地内可进一步划分出台内滩和半局限海亚相。

1) 台内滩

台内滩亚相位于碳酸盐台地内部,只有处于浪基面之上的微地貌高地才可能形成较为发育的颗粒滩。沉积物主要以泥晶生屑灰岩、生屑泥晶灰岩为主,有时可见薄层亮晶生屑灰岩与白云岩相伴生。

2) 半局限海

半局限海亚相通常处于正常浪基面之下,水体较深,能量较低。岩石类型多为生屑泥晶灰岩和泥晶灰岩。

3.2.3 斜坡-海槽相

斜坡处于浅水沉积与深水盆地之间,因其地势陡,常发生滑坡和垮塌作用,除正常沉积的深水细粒沉积之外,来自上部浅水环境的半固结、未固结沉积物也常会以重力流的形式搬运至此^[32]。海槽相位于斜坡之外向海一侧的深水区,按沉积物特征又可分为硅质海槽和碳酸盐海槽两类^[33]。研究区北侧沉积物主要为薄层状硅质岩(图3h),为典型的硅质海槽。尽管该相带内储集性能极差,但其中含有的丰富有机质为油气生成提供了良好的物质基础。

3.3 沉积序列

沉积序列是碳酸盐岩沉积微相划分的重要依

据^[34]。研究区茅二上亚段南、北岩性差异大,各种岩石类型在垂向上的有序叠置构成了不同类型的序列组合,本文根据垂向上不同岩石类型的组合特征,识别出4种典型沉积序列。

3.3.1 生屑泥晶灰岩-厚层块状(硅质)云岩-厚层块状亮晶生屑灰岩沉积序列

这种向上变浅的沉积序列主要分布在研究区中部,以池67井为典型代表(图4a)。底部为生屑泥晶灰岩(图3e),厚2 m;下部为硅质云岩(图4e),厚7.1 m;上部为白云岩(图4f),厚9.1 m,顶部为厚层亮晶生屑灰岩夹云岩(图4g),厚8.6 m,可视为台缘滩核单元。推测生屑泥晶灰岩形成于浪基面之下水动力较弱的环境;随后海平面持续下降,水体能量增强,形成多期台缘滩;由于茅口组沉积时期气候变化剧烈,存在多幕式冰期^[35],强烈的气候变化使得海平面波动剧烈,颗粒滩沉积常常由于可容空间不足而叠置迁移,使局部水体受限,促使水体盐度升高,导致多期台缘滩白云化,从而形成了此类向上变浅的沉积序列。该序列记录了台缘环境中颗粒滩的发育与演化过程,测井上GR值极低,呈低幅线形。

3.3.2 生屑泥晶灰岩-泥晶生屑灰岩-薄层亮晶生屑灰岩沉积序列

该序列主要分布在研究区南部,以相19井为典型代表(图4b)。底部为生屑泥晶灰岩(图4h),厚2.5 m;中-上部为泥晶生屑灰岩,厚1.3 m;顶部为亮晶生屑灰岩(图4i),厚1.5 m。生屑泥晶灰岩通常形成于水动力较弱的半局限海环境;随后相对海平面下降,沉积基底进入平均浪基面之上,水动力略微增强,为台内滩的生长奠定基础,并沉积形成泥晶生屑灰岩和薄层的亮晶生屑灰岩。该序列记录了台内环境中颗粒滩的发育与演化过程,测井上GR值较低,呈低幅线形。

3.3.3 厚层泥灰岩-薄层亮晶生屑灰岩沉积序列

该序列主要分布在研究区北部,以复3井为典型代表(图4c)。岩石类型相对简单,整体为灰黑色泥页岩(图4j),厚3.9 m,为典型的斜坡沉积特征,由于高位域沉积末期台缘滩可容空间不足导致侧向迁移,在顶部沉积一套(侧边的台缘滩覆盖在斜坡上而成的)高能的亮晶生屑灰岩(图4k)。该序列记录了斜坡环境的发育过程,测井上GR值较高,曲线形态呈钟形。

3.3.4 泥灰岩/灰质页岩-泥晶生屑灰岩沉积序列

该序列主要分布在研究区中部,以石福1井为典型代

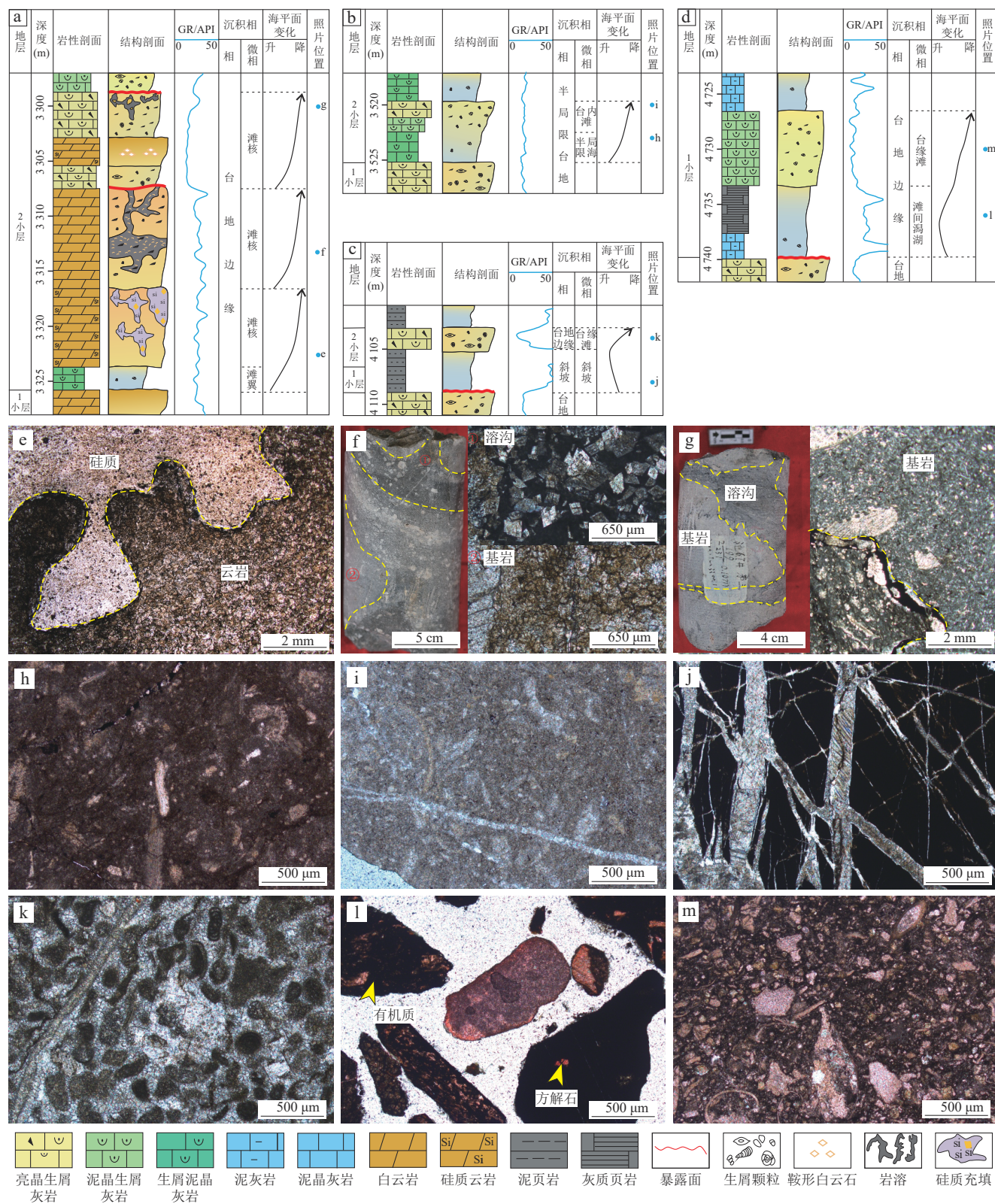


图4 川东地区茅二上亚段典型沉积相序特征照片

Fig. 4 Typical sedimentary facies sequences in the upper sub-member of the Mao 2 Member in the study area

a. 池67井, 台缘滩序列; b. 相19井, 半局限台地序列; c. 复3井, 斜坡-台缘序列; d. 石福1井, 潟湖序列; e. 硅质云岩, 池67井, 2小层, 埋深3 322.61 m, 岩心薄片(-); f. 细晶云岩, 见溶沟, 池67井, 2小层, 埋深3 313.21 m; 左为岩心, 右①和右②为岩心薄片(-); g. 亮晶生屑灰岩, 见溶沟, 池67井, 2小层, 埋深3 300.01 m, 左为岩心, 右为岩心薄片(-); h. 生屑泥晶灰岩, 相19井, 2小层, 埋深3 523 m, 岩屑薄片(-); i. 亮晶生屑灰岩, 相19井, 2小层, 埋深3 520 m, 岩屑薄片(-); j. 泥页岩, 复3井, 1小层, 埋深4 108 m, 岩屑薄片(-); k. 亮晶生屑灰岩, 复3井, 2小层, 埋深4 104 m, 岩屑薄片(-); l. 灰质页岩, 石福1井, 2小层, 埋深4 736 m, 岩屑薄片(-); m. 泥晶生屑灰岩, 石福1井, 2小层, 埋深4 730.00 m, 岩屑薄片(-)

表(图4d)。底部为泥灰岩和灰质页岩(图4l),厚5.2m;上部为厚层泥晶生屑灰岩(图4m),厚5.3m。推测泥灰岩和灰质页岩形成于水动力较弱的潟湖环境,有利于有机质富集与保存;随后海平面相对下降,沉积基底进入平均浪基面之上,水动力增强,为台缘滩的生长奠定基础。该序列记录了潟湖环境向台缘滩演化的过程,测井上GR值持续变低,指示海退,GR曲线形态呈钟形。

4 沉积微相展布规律

4.1 横向展布

选取多口钻井对茅二上亚段2个小层进行精细的沉积微相对比(图5),结果表明:整体上发育两带

台缘滩,沉积高能的(白云质)亮晶生屑灰岩,台缘滩沉积速率快、厚度大。1小层沉积初期,在研究区中部普遍存在一套海侵产物,岩性以泥灰岩和灰质页岩为主,为潟湖沉积;随着海平面下降,台缘滩体开始沉积。2小层海平面持续下降,潟湖亚相大面积消退,台缘滩体沉积范围更广。研究区西部的台内滩分布较为零散,规模普遍较小,白云化程度也低。研究区北部1小层沉积时期斜坡-海槽相发育,2小层沉积时随着台缘滩迁移,部分斜坡区出现台缘滩沉积。

为了更细致地研究两带台缘滩体的展布规律,选取两条贯穿滩体的剖面进行精细刻画。在板2井—三星1井一带,台缘滩核发育,滩体整体呈自西北向东南迁移的特征,发育多套厚层白云岩储层(图6a);成23井—洋渡003-H2井一带,台缘滩核也十分发育,岩性

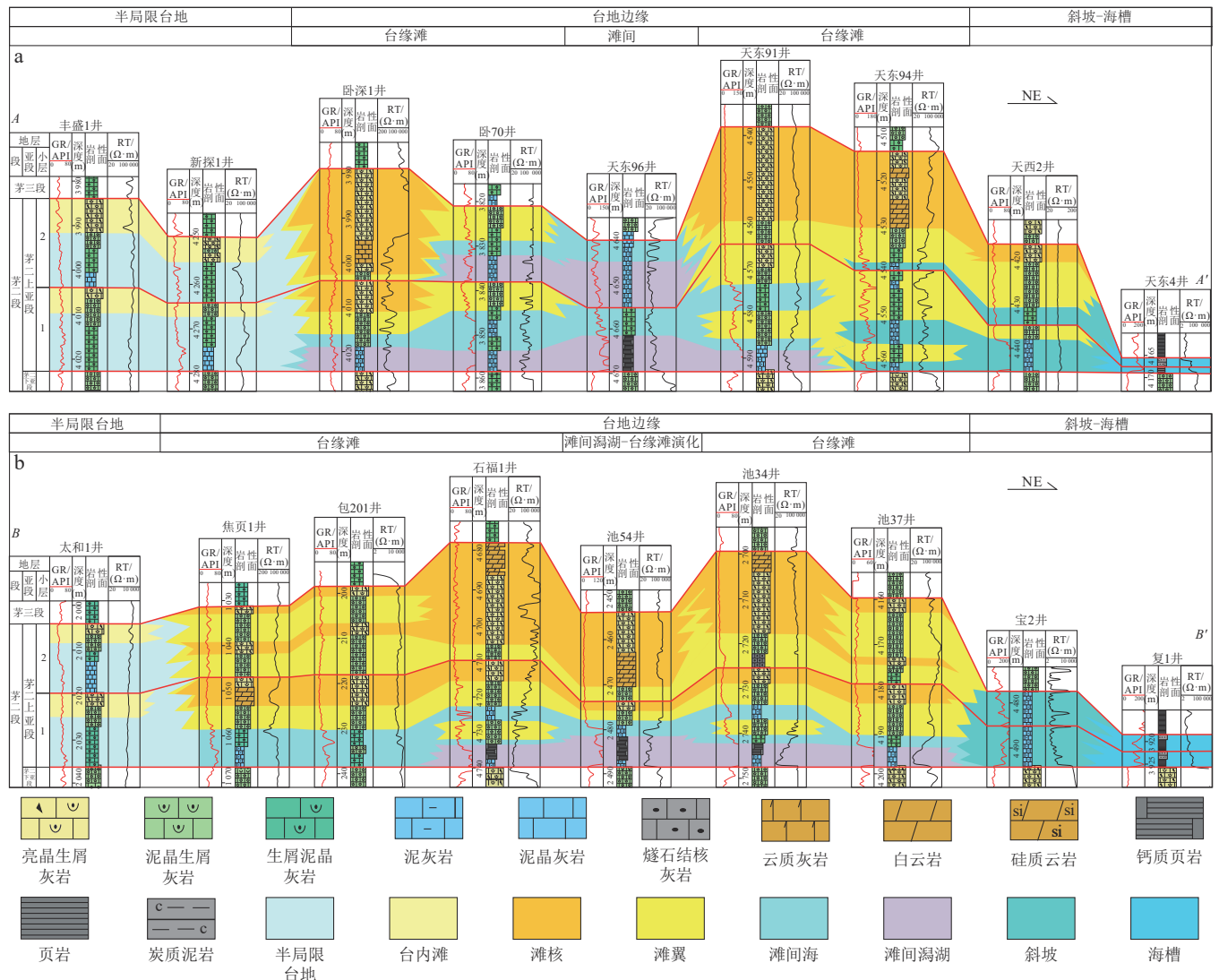


图5 川东地区沉积相连井对比剖面(剖面位置见图1b)

Fig. 5 Cross-well correlation of sedimentary facies in the study area (see Fig. 1b for the section locations)

a. A—A'连井剖面;b. B—B'连井剖面

以亮晶生屑灰岩为主(图6b)。

川东地区最新的地震资料显示,研究区茅口组底部一茅二段底地震响应表现为亚平行的波峰反射(图7a,b),且厚度未见明显分异,指示茅口组沉积早期川东地区沉积环境相对均一,为稳定的台地沉积^[36]。茅二段底界面之上地震响应特征开始呈现明显差异,池67、池34、卧93和梁7井等区域,茅二段厚度最大,以丘状、低频、杂乱的弱反射结构为主(图7),且该区域钻井岩性以厚层(白云质)亮晶生屑灰岩为主(图5b,图6a),反映了台缘滩相地震响应特征,证实川东地区发育平行展布的两带台缘滩(图5)。在剖面北部,茅二段厚度快速减薄,同相轴表现为低-中频、连续、强反射特征,且池7、云安5和复1等井以泥灰岩或硅质页岩低能沉积物为主,反映研究区北部演变为深

水斜坡-海槽相。由此可见,川东地区茅口组台缘带地震响应特征与钻井对比所呈现的相带分异特征基本吻合,二者共同揭示出邻水-丰都台缘带的北部也存在台缘带的响应特征。

4.2 平面展布

4.2.1 茅二上亚段1小层

茅二上亚段1小层沉积时期,邻水-丰都和大竹-忠县一线发育滩核微相,滩体具有北西-南东向展布特征,岩性以厚层块状(白云质)亮晶生屑灰岩和(硅质)白云岩为主(图4a)。在碳酸盐台地边缘和台内地区,微地貌高地的颗粒滩沉积速率始终较相邻的低能相带沉积速率快^[37-39],因此,邻水-丰都和大竹-

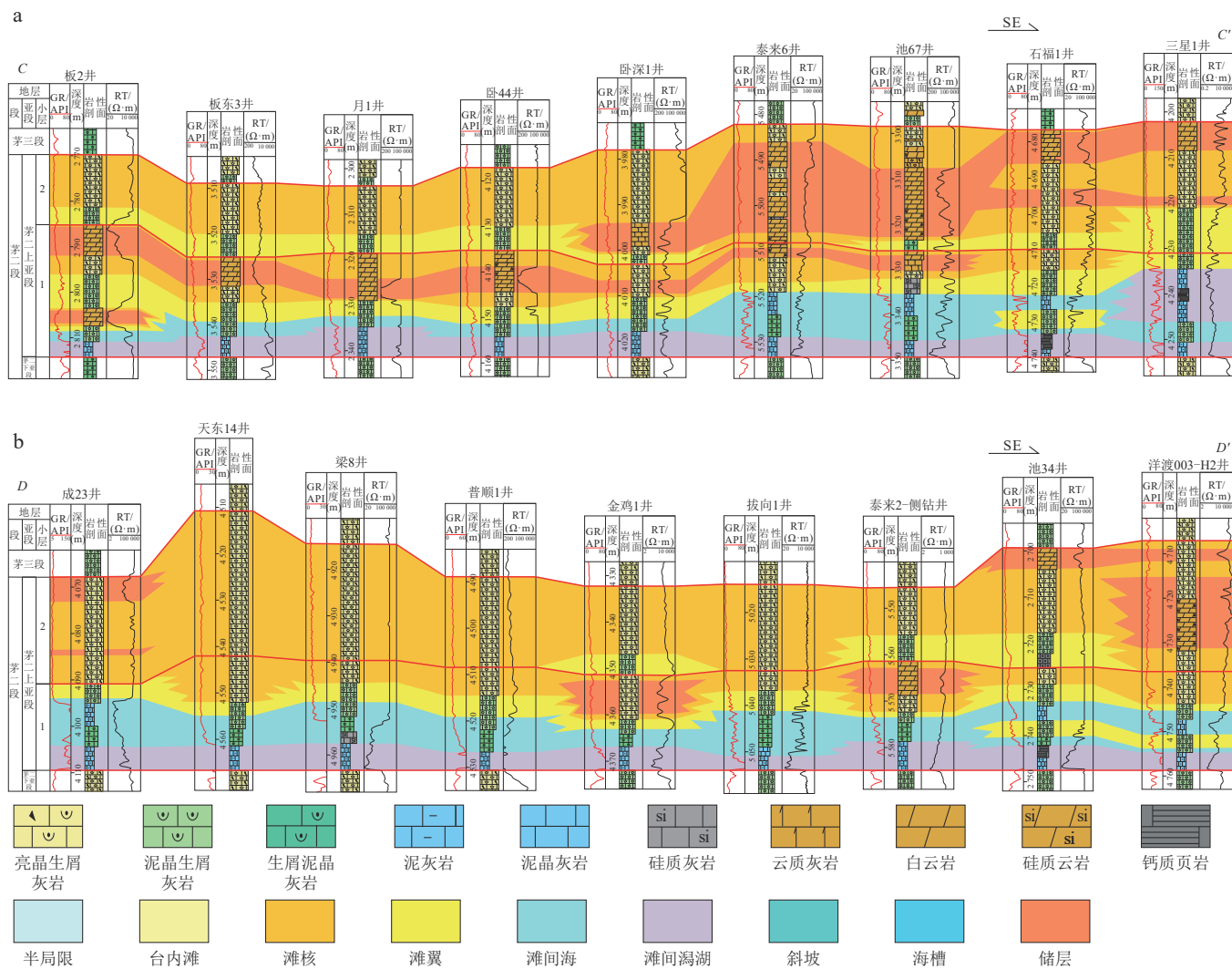


图6 川东地区台缘滩体展布钻井对比剖面(剖面位置见图1b)

Fig. 6 Cross-well correlation of platform-margin shoals in the study area (see Fig. 1b for the section locations)

a. C—C'连井剖面;b. D—D'连井剖面

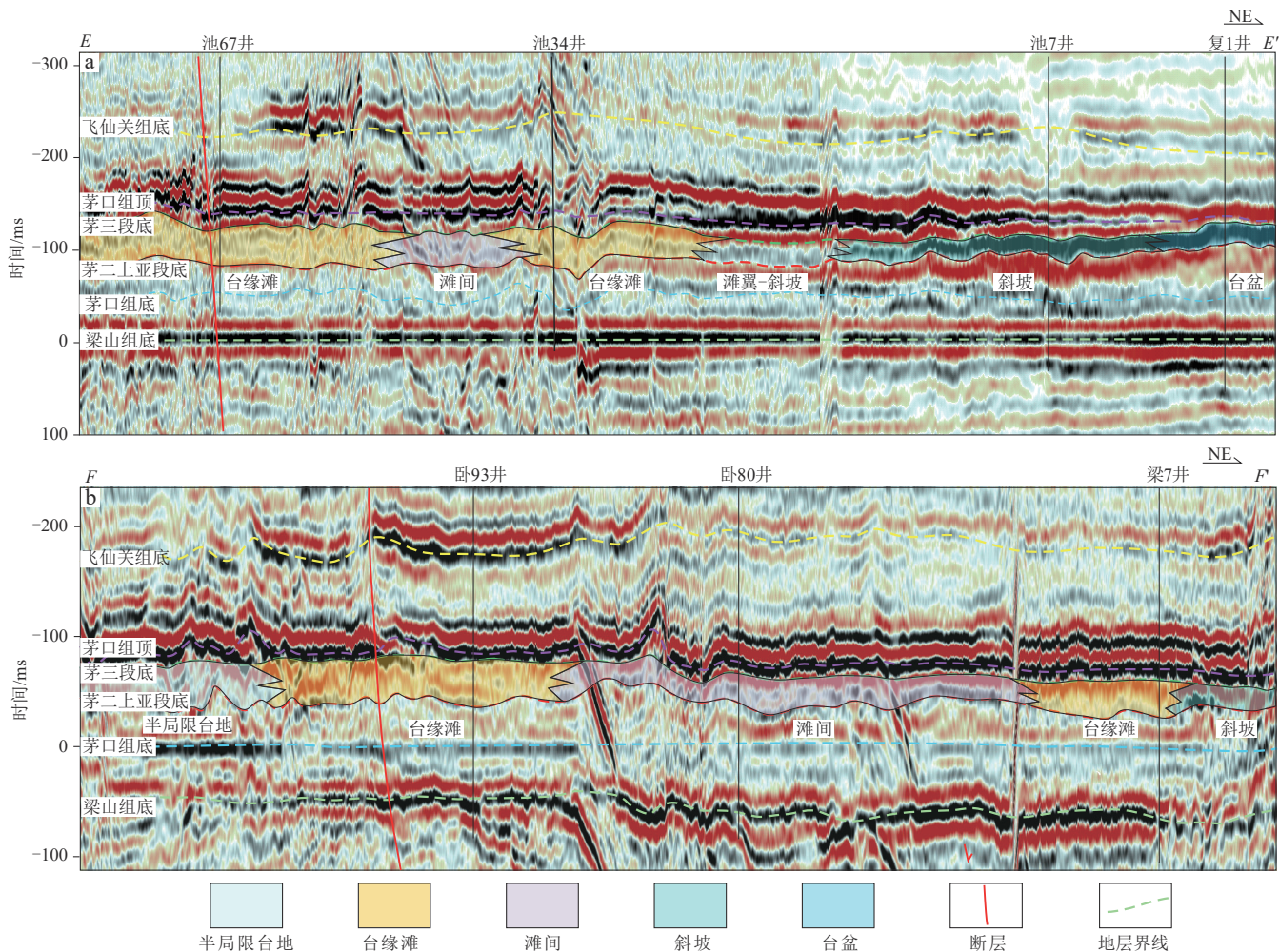


图7 川东地区台缘带地震响应特征剖面(剖面位置见图1b)

Fig. 7 Seismic response characteristics of platform-margin zones in the study area (see Fig. 1b for section locations)

a. E—E'地震剖面;b. F—F'地震剖面

忠县一线地层厚度最大,可达30 m以上。滩翼围绕滩核生长,分布较广,岩性以泥晶生屑灰岩为主,亦可见少量颗粒岩与白云岩薄互层(图4a)。两带台缘滩体之间地层厚度较大,但整体低于台缘滩,且岩性以生屑泥晶灰岩、泥灰岩和灰质页岩为主,代表其微古地貌较高,沉积速率较快,指示了潟湖环境(图4d)。研究区南部地层厚度较稳定,整体颗粒滩欠发育,岩性主要为泥晶生屑灰岩、生屑泥晶灰岩和泥晶灰岩,为半局限海沉积(图4b)。台缘滩向北地层厚度变化快,岩性主要为泥灰岩和硅质岩,发育斜坡—海槽相(图4c,图8)。

4.2.2 茅二上亚段2小层

茅二上亚段2小层沉积时期,沉积微相展布明显继承了1小层沉积时期的格局,台缘滩体仍具有北西—南东展布特征,但由于1小层滩体沉积,使区域内大规模处于微古地貌高地,并伴随着海平面持续下

降,导致可容空间不足,滩体发生侧向迁移。因此,2小层较1小层滩体规模更大,台缘滩核在邻水—丰都和大竹—石柱一带连片分布,滩间潟湖规模缩小,分布在成20井—卧80井一带。研究区南部仍为半局限海沉积,滩体较1小层更发育,研究区北部发育斜坡—海槽相(图9)。

4.3 沉积相演化模式

茅口组沉积早期构造背景稳定,茅一段—茅二下亚段遭受持续海侵,发育一套浅水碳酸盐台地沉积^[40]。茅二上亚段沉积时期在地幔柱的持续影响下,加之勉略洋被动大陆边缘伸展构造共同控制,研究区发生明显的构造沉积分异,北部发生沉降并沉积孤峰段深水硅质岩^[41-42]。与此同时,随着15#和16#基底断层活化并持续活动,邻水—丰都一带地层隆升,形成古地貌高地^[43]。

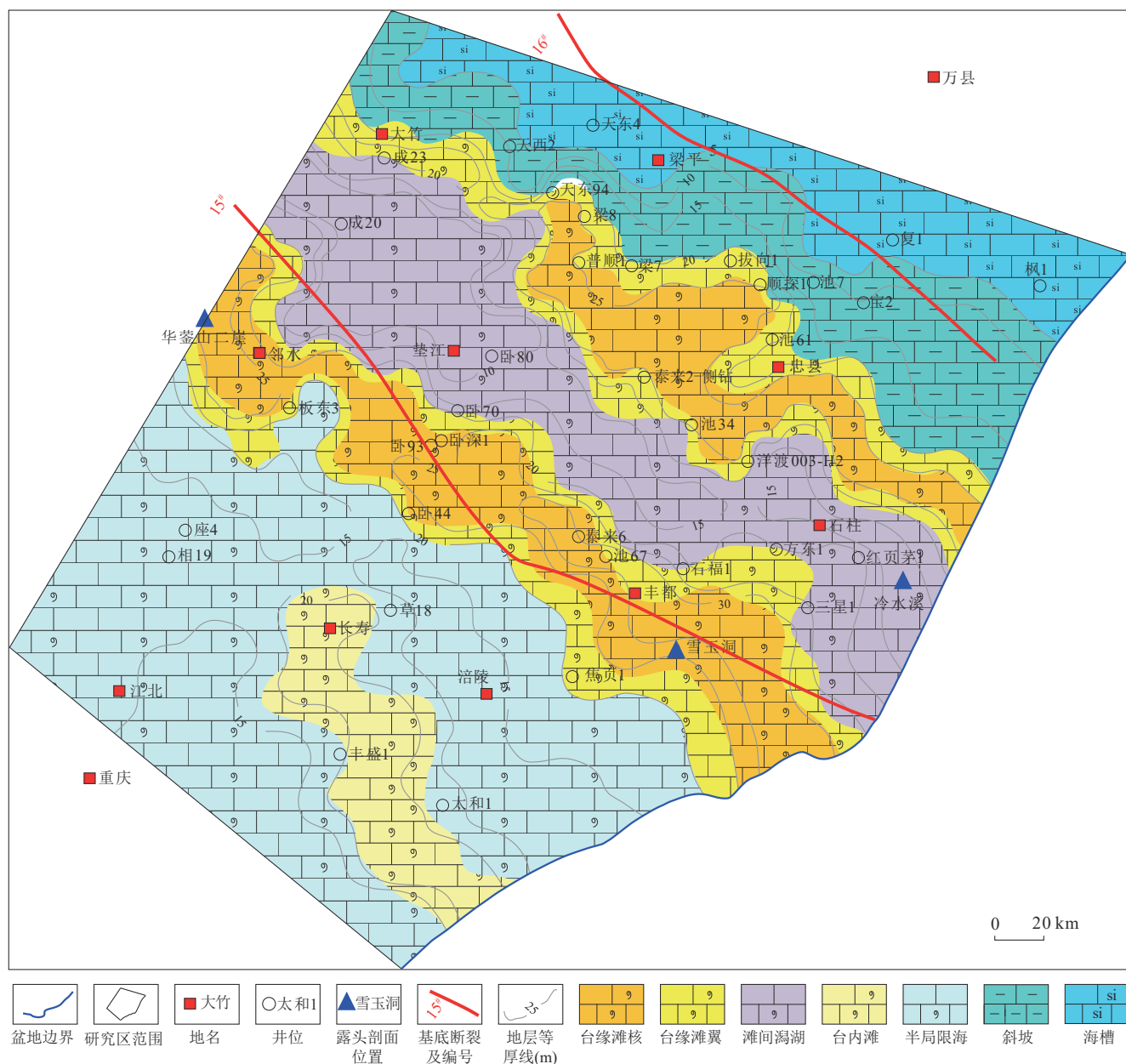


图8 川东地区茅二上亚段1小层沉积相平面分布

Fig. 8 Planar distribution of sedimentary facies in sub-layer 1 of the upper sub-member of the Mao 2 Member in the study area

1小层海侵阶段,海平面快速上升,在邻水—丰都和大竹—忠县地区均沉积了一套低能的泥灰岩和钙质页岩(图3f、g);海侵末期,邻水—丰都地区由于地貌较高,沉积少量低能滩;1小层海退阶段,水体逐渐变浅,邻水—丰都地区和大竹—丰都地区均逐渐发育台缘滩,沿裂陷槽边缘呈条带状展布^[43],沉积物主要为厚层块状(浅)灰色白云岩及亮晶生屑灰岩(图4a)。古地貌最高的邻水—丰都台缘滩,出露海平面,接受准同生期岩溶改造,改善储渗条件^[43-44]。在两带台缘滩之间低洼处,水体能量低,加之台缘滩体对水体能量的耗散,水体进一步受限,发育滩间潟湖,沉积物以生屑泥晶灰岩和泥灰岩为主(图4d)。台地边缘相以西,受基

底断裂影响减弱,为半局限台地相,古地貌较高区域沉积少量台内滩,其岩性主要为亮晶生屑灰岩,台内滩体之间地势相对低处发育半局限海亚相,沉积物以生屑泥晶灰岩为主(图4b)。

2小层海侵阶段,受海泛影响,1小层海退期发育的滩体被淹没,在继承1小层海退礁滩带高地貌背景下,形成了零星的生屑滩;2小层海退阶段,随着海平面逐渐下降,高地貌处可容空间不足,另一方面由于坡折带可容空间足,导致台缘滩体向北发生侧向叠置迁移,原本孤立的邻水—丰都和大竹—忠县两带台缘滩体,逐渐连片分布(图8,图9,图10)。在高频海退过程中,邻水—丰都和大竹—忠县两带台缘滩

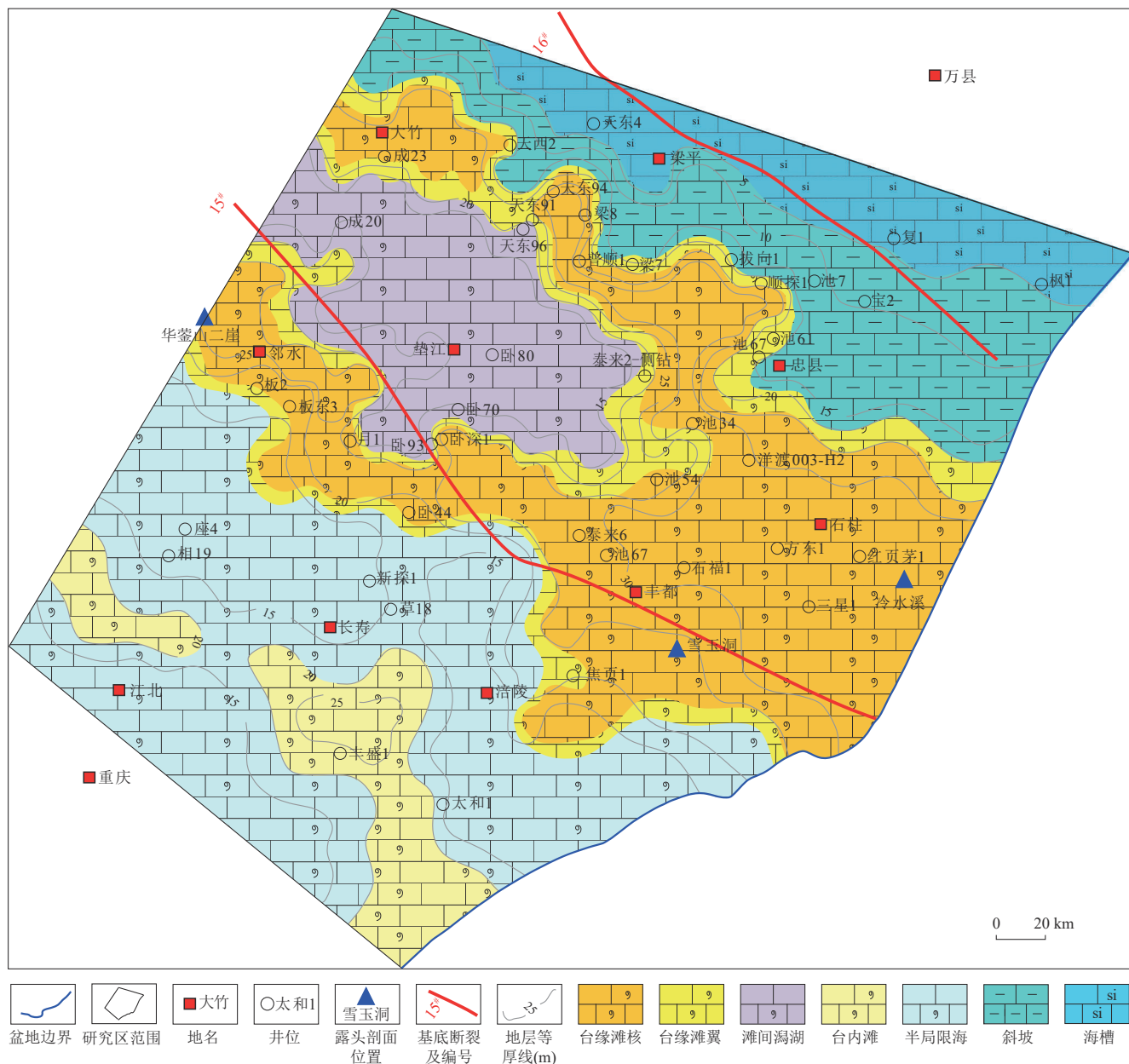


图9 川东地区茅二上亚段2小层沉积相平面分布

Fig. 9 Planar distribution of sedimentary facies in sub-layer 2 of the upper sub-member of the Mao 2 Member in the study area

体暴露并遭受准同生期淡水岩溶改造^[44],且由于滩体向坡折带发生侧向叠置迁移,导致局部水体受限,促使准同生白云石化作用的发生,进一步改善滩体储渗条件^[45]。

综上所述,邻水—丰都和大竹—忠县两带台缘滩在15#和16#断裂以及差异沉积导致的地貌差异的共同控制下,在1小层沉积时期分异显著,被带状滩间潟湖分隔。2小层台缘滩与1小层台缘滩在纵向上叠置分布,且由于可容空间有限,台缘滩横向迁移,平面分布面积扩大,两带台缘滩体在东北部连片发育。邻水—丰都台缘滩古地貌较太竹—忠县更高,更易暴露,接受准同生期大气淡水溶蚀。总体上,邻水—丰都台缘带

的储集性能优于大竹—忠县台缘滩带。

5 勘探潜力

有利沉积相带是控制规模性碳酸盐岩储层发育与分布的关键要素^[46]。全球碳酸盐岩油气勘探实践证明,台缘滩体是碳酸盐岩中最优质的储层发育区,其分布与有利储集相带的展布密切相关^[47]。在茅口组低海平面高频振荡时期,台缘滩体常常由于可容空间不足而侧向迁移,导致局部水体受限,促使水体盐度升高,为早期白云石化提供流体来源;加之台缘滩体往往发育在地貌较高部位,在准同生期暴露接受岩溶改造,

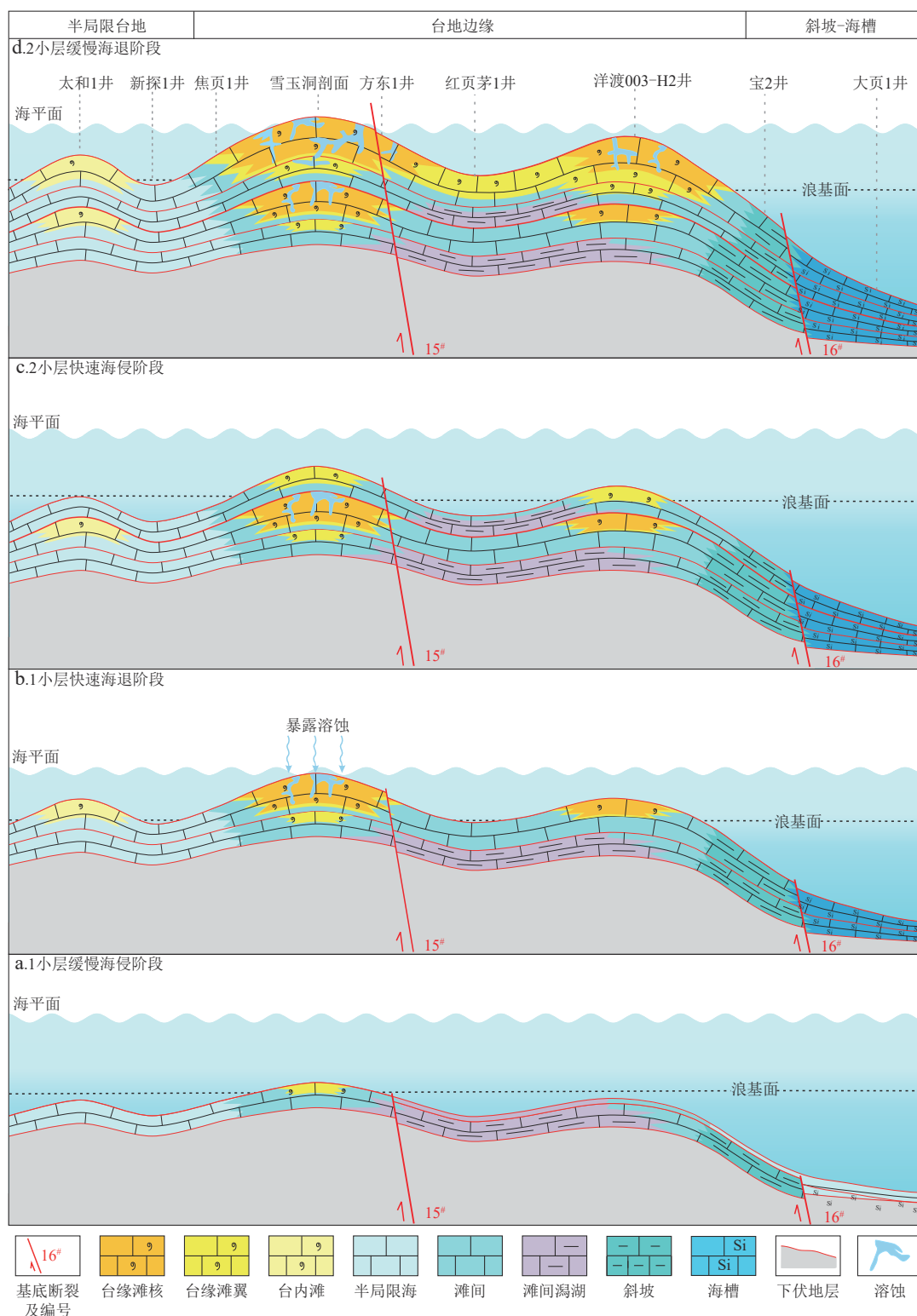


图10 川东地区茅二上亚段沉积演化模式示意图

Fig. 10 Evolutionary sedimentary model for the deposition of the upper sub-member of the Mao 2 Member in the study area

发育一系列溶蚀孔洞,改善滩体储渗条件^[48-50]。

本次研究揭示,川东地区发育邻水—丰都和大竹—忠县两带台缘滩相,以池67、泰来6、顺探1和梁7等井为代表的优质孔洞型白云岩储层均发育在两带台缘滩相中。例如,泰来6井,最大孔隙度达14.00%,平

均孔隙度高达6.48%^[23, 51],且油气测试效果好;池67井、泰来6井和卧67井测试分别获 2.21×10^4 、 11.08×10^4 和 64.28×10^4 m³/d工业油气产量,佐证茅口组优质储层发育与台缘滩密切相关。

在台缘带分布刻画基础上,编制了白云岩储层(云

质灰岩和硅质云岩)厚度平面图,指明了川东地区有利储集区带。板东地区、卧龙河地区、泰来地区和洋渡003-H2井区等台缘滩体规模大,白云岩储层厚度大于15 m,为Ⅰ类有利区。Ⅱ类有利区白云岩储层厚度在5~15 m,主要为滩核发育区;Ⅲ类有利区白云岩储层厚度小于5 m,为滩翼发育区(图11)。总体上,邻水—丰都台缘滩带白云化程度优于大竹—忠县台缘滩带,白云岩储层更发育,是Ⅰ类有利区最发育的区带。而大竹—忠县台缘滩白云岩储层相对较薄,多为Ⅱ类有利区,可以作为接替领域。

研究区北部斜坡—海槽相为开江—梁平海槽早期

雏形,沉积物以硅质泥页岩为主,富含硅质放射虫和介壳生物(图3h),为前人研究认为的孤峰段,海槽内发育的富有机质泥灰岩和泥页岩是潜在的烃源岩和非常规油气勘探区^[23, 52]。此外,近年钻探结果表明川东地区茅二上亚段富有机质滩间潟湖具有良好的生烃潜力,可以作为烃源岩或非常规储层。例如,红叶茅1井1小层底部总有机碳含量可达6.95%,放喷测试获得日产 $6.45 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的工业气流^[53]。茅二上亚段富有机质潟湖和斜坡—海槽均可作为台缘滩储层供烃^[54],构成良好的源—储配置,这对评价茅口组资源潜力具有重要意义。

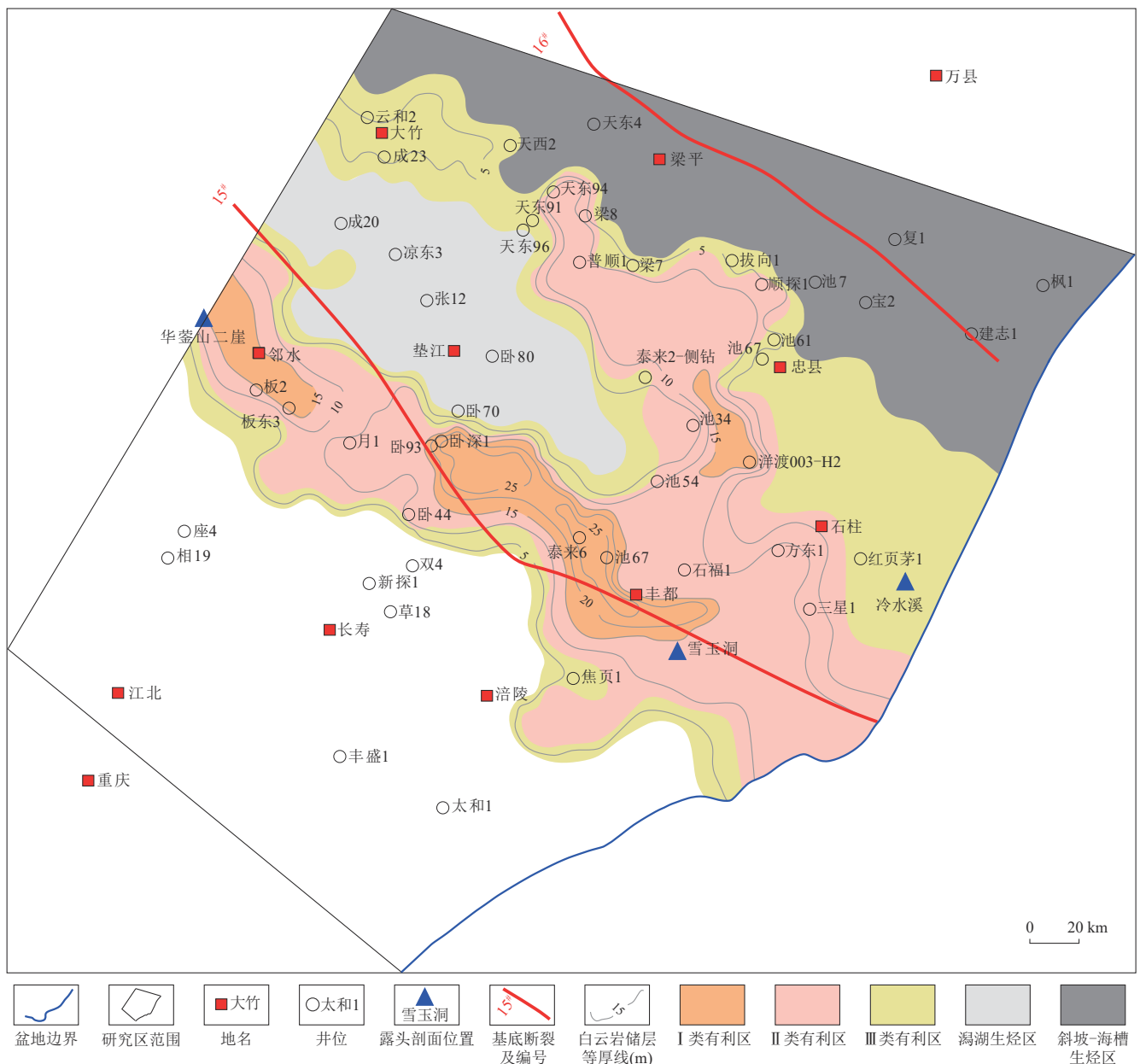


图11 川东地区油气勘探有利区预测

Fig. 11 Mapping of the predicted hydrocarbon play fairways in the study area

6 结论

1) 茅二上亚段在岩性和电性识别上具有两期旋回,据此在茅二上亚段内部划分出1小层和2小层。在旋回顶部,碳、氧同位素具有负偏的特征,表明顶部受到大气淡水的影响。

2) 川东地区茅二上亚段南、北岩性差异较大,可识别出8种岩石类型。各岩石类型纵向上相互叠置,构成4种典型序列。主要发育镶边碳酸盐台地体系,包括台缘滩、滩间潟湖、台内滩、半局限海等多种亚相。

3) 1小层台缘带位于邻水—丰都一线与大竹—忠县一线地区,以北西—南东向展布为主;2小层大竹—忠县一线滩体展布特征得到加强,据此明确了下一步沿邻水—丰都一线与大竹—忠县一线的高能滩体勘探领域。滩间潟湖和斜坡—海槽是区内优质烃源岩发育区。

参 考 文 献

- [1] 杨雨, 文龙, 周刚, 等. 四川盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2045–2069.
YANG Yu, WEN Long, ZHOU Gang, et al. New fields, new types and resource potentials of hydrocarbon exploration in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2045–2069.
- [2] 高兆龙, 李跃杰, 张玺华, 等. 蜀南地区中二叠统茅口组油气成藏演化与气藏分布规律[J/OL]. 天然气地球科学: 1–21 [2024–12–01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1177.TE.20240816.1317.002.html>.
GAO Zhaolong, LI Yuejie, ZHANG Xihua, et al. Evolution of oil and gas formation and distribution of gas reservoirs in the Middle Permian Maokou Formation of Shunan area[J/OL]. Natural Gas Geoscience: 1–21 [2024–12–01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1177.TE.20240816.1317.002.html>.
- [3] 杨雨, 谢继容, 文龙, 等. 四川盆地东北部飞仙关组台缘早期鲕滩带的发现及宣探1井天然气勘探突破意义[J]. 天然气工业, 2023, 43(9): 1–13.
YANG Yu, XIE Jirong, WEN Long, et al. Discovery of early platform-margin oolitic shoal zone of Feixianguan Formation in the northeastern Sichuan Basin and natural gas exploration breakthrough in Well Xuantan 1[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(9): 1–13.
- [4] 杨雨, 钟原, 李林娟. 开江—梁平海槽周缘二叠系—三叠系礁滩组合分布与成因[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2021, 48(6): 683–690.
YANG Yu, ZHONG Yuan, LI Linjuan. Distribution and genesis of Permian-Triassic reef-shoal combination around Kaijiang–Liangping trough in Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2021, 48(6): 683–690.
- [5] 徐诗雨, 夏茂龙, 祝怡, 等. 开江—梁平海槽演化阶段与构造沉积特征[J]. 断块油气田, 2023, 30(6): 963–974.
XU Shiyu, XIA Maolong, ZHU Yi, et al. Evolution stage and tectonic sedimentary characteristics of the Kaijiang–Liangping Trough[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2023, 30(6): 963–974.
- [6] 汪华, 沈浩, 黄东, 等. 四川盆地中二叠统热水白云岩成因及其分布[J]. 天然气工业, 2014, 34(9): 25–32.
WANG Hua, SHEN Hao, HUANG Dong, et al. Origin and distribution of hydrothermal dolomites of the Middle Permian in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(9): 25–32.
- [7] 杨光, 汪华, 沈浩, 等. 四川盆地中二叠统储层特征与勘探方向[J]. 天然气工业, 2015, 35(7): 10–16.
YANG Guang, WANG Hua, SHEN Hao, et al. Characteristics and exploration prospects of Middle Permian reservoirs in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(7): 10–16.
- [8] 杨雨, 谢继容, 赵路子, 等. 四川盆地茅口组滩相孔隙型白云岩储层天然气勘探的突破及启示——以川中北部地区JT1井天然气立体勘探为例[J]. 天然气工业, 2021, 41(2): 1–9.
YANG Yu, XIE Jirong, ZHAO Luzi, et al. Breakthrough of natural gas exploration in the beach facies porous dolomite reservoir of Middle Permian Maokou Formation in the Sichuan Basin and its enlightenment: A case study of the tridimensional exploration of Well JT1 in the central-northern Sichuan[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(2): 1–9.
- [9] 徐婷, 袁海峰, 陈聪, 等. 川中磨溪—龙女寺构造中二叠统茅口组白云岩成因分析[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(1): 13–29.
XU Ting, YUAN Haifeng, CHEN Cong, et al. Genesis of dolomite reservoirs in the Middle Permian Maokou Formation of the Moxi–Longnvsi structure, central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(1): 13–29.
- [10] 杨雨, 文龙, 陈聪, 等. 四川盆地西部二叠系多期台缘带油气勘探潜力[J]. 地学前缘, 2023, 30(1): 1–10.
YANG Yu, WEN Long, CHEN Cong, et al. Oil and gas exploration potential of the Permian multi-stage platform-margin zone, western Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(1): 1–10.
- [11] 张赫驿, 杨帅, 张玺华, 等. 川东地区中二叠统茅口组沉积微相与环境演变——以重庆市武隆区羊角剖面为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 457–470.
ZHANG Heyi, YANG Shuai, ZHANG Xihua, et al. Sedimentary microfacies and environmental evolution of the Middle Permian Maokou Formation in the eastern Sichuan Basin: A case study of the Yangjiao section in Wulong District, Chongqing, China[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 457–470.

- [12] 杨威, 李德江, 魏国齐, 等. 四川盆地东部上石炭统黄龙组规模储层形成主控因素与发育模式[J]. 天然气工业, 2024, 44(2): 40–51.
YANG Wei, LI Dejiang, WEI Guoqi, et al. Formation controlling factors and development patterns of large-scale reservoirs in Carboniferous Huanglong Formation of eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(2): 40–51.
- [13] 魏国齐, 杨威, 刘满仓, 等. 四川盆地大气田分布、主控因素与勘探方向[J]. 天然气工业, 2019, 39(6): 1–12.
WEI Guoqi, YANG Wei, LIU Mancang, et al. Distribution rules, main controlling factors and exploration directions of giant gas fields in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(6): 1–12.
- [14] 陈宗清. 四川盆地中二叠统茅口组天然气勘探[J]. 中国石油勘探, 2007, 12(5): 1–11.
CHEN Zongqing. Exploration for natural gas in middle Permian Maokou Formation of Sichuan Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2007, 12(5): 1–11.
- [15] 胡东风, 王良军, 黄仁春, 等. 四川盆地东部地区中二叠统茅口组白云岩储层特征及其主控因素[J]. 天然气工业, 2019, 39(6): 13–21.
HU Dongfeng, WANG Liangjun, HUANG Renchun, et al. Characteristics and main controlling factors of the Middle Permian Maokou dolomite reservoirs in the eastern Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(6): 13–21.
- [16] 李让彬, 段金宝, 潘磊, 等. 川东地区中二叠统茅口组白云岩储层成因机理及主控因素[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(9): 1347–1357.
LI Rangbin, DUAN Jinbao, PAN Lei, et al. Genetic mechanism and main controlling factors of the Middle Permian Maokou Formation dolomite reservoirs in the eastern Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(9): 1347–1357.
- [17] 何昌兴悦, 陈康, 李承泽, 等. 四川盆地东部卧龙河地区茅口组白云岩储层地震响应特征[J]. 天然气勘探与开发, 2023, 46(4): 107–115.
HE Changxingyue, CHEN Kang, LI Chengze, et al. Seismic-response characteristics on dolomite reservoirs of Maokou Formation, Wolonghe area, eastern Sichuan Basin [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2023, 46(4): 107–115.
- [18] HAQ B U, SCHUTTER S R. A chronology of Paleozoic sea-level changes[J]. Science, 2008, 322(5898): 64–68.
- [19] 李凤杰, 陈荣林. 四川盆地东北地区中-下二叠统层序地层特征研究[J]. 石油实验地质, 2008, 30(5): 472–477.
LI Fengjie, CHEN Ronglin. Study on the Middle-Lower Permian sequence stratigraphy in northeastern area, the Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2008, 30(5): 472–477.
- [20] 苏旺, 江青春, 陈志勇, 等. 四川盆地中二叠统茅口组层序地层特征及其对源储的控制作用[J]. 天然气工业, 2015, 35(7): 34–43.
SU Wang, JIANG Qingchun, CHEN Zhiyong, et al. Sequence stratigraphic features of Middle Permian Maokou Formation in the Sichuan Basin and their controls on source rocks and reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(7): 34–43.
- [21] 杨帅, 陈安清, 张玺华, 等. 四川盆地二叠纪栖霞-茅口期古地理格局转换及勘探启示[J]. 沉积学报, 2021, 39(6): 1466–1477.
YANG Shuai, CHEN Anqing, ZHANG Xihua, et al. Paleogeographic transition of the Permian Chihhsia-Maokou period in the Sichuan Basin and indications for oil-gas exploration [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2021, 39(6): 1466–1477.
- [22] 杨跃明, 杨雨, 文龙, 等. 四川盆地中二叠统天然气勘探新进展与前景展望[J]. 天然气工业, 2020, 40(7): 10–22.
YANG Yueming, YANG Yu, WEN Long, et al. New exploration progress and prospect of Middle Permian natural gas in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(7): 10–22.
- [23] 曹华, 山述娇, 田辰, 等. 川东-川北地区二叠系茅口组沉积演化及其油气地质意义[J]. 石油实验地质, 2024, 46(3): 460–471.
CAO Hua, SHAN Shujiao, TIAN Chen, et al. Sedimentary evolution and petroleum geological significance of Permian Maokou Formation in eastern and northern Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2024, 46(3): 460–471.
- [24] 刘昇, 范存辉, 张本健, 等. 四川盆地东部中二叠统茅口组孤峰段展布特征及其油气地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 993–1008.
LIU Sheng, FAN Cunhui, ZHANG Benjian, et al. Distribution characteristics of Gufeng Member of the Middle Permian Maokou Formation, eastern Sichuan Basin and its petrogeological significance[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(4): 993–1008.
- [25] 陈卫东, 陈义才, 徐发波, 等. 四川盆地东部中二叠统茅口组地层划分、对比与岩溶古地貌恢复[J]. 天然气工业, 2021, 41(6): 27–36.
CHEN Weidong, CHEN Yicai, XU Fabo, et al. Stratigraphic division and correlation and karst palaeogeomorphology restoration of the Middle Permian Maokou Formation in the eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(6): 27–36.
- [26] NIO S D, BROUWER J H, SMITH D, et al. Spectral trend attribute analysis: applications in the stratigraphic analysis of wireline logs[J]. First Break, 2005, 23(4): 71–75.
- [27] 邓志强, 胡明毅, 左洛滔, 等. 四川盆地龙岗东地区长兴组高频层序及其对礁滩体的控制[J]. 大庆石油地质与开发, 2023, 42(1): 11–22.
DENG Zhiqiang, HU Mingyi, ZUO Mingtao, et al. High-frequency sequence and its control on reef beach bodies of Changxing Formation in Eastern Longgang area, Sichuan Basin [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2023, 42(1): 11–22.
- [28] 董庆民, 胡忠贵, 蔡家兰, 等. 层序地层与同位素地球化学响

- 应特征及礁滩发育模式——以川东城口—鄂西海槽边缘带长兴组为例[J]. 石油实验地质, 2019, 41(2): 243–250.
- DONG Qingmin, HU Zhonggui, CAI Jialan, et al. Sequence stratigraphy and isotope geochemical response and development pattern of reef and shoal: A case study of Changxing Formation in the marginal zone of Eastern Sichuan Chengkou–Western Hubei Oceanic Trough[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2019, 41(2): 243–250.
- [29] 张秀莲. 碳酸盐岩中氧、碳稳定同位素与古盐度、古水温的关系[J]. 沉积学报, 1985, 3(4): 17–30.
- ZHANG Xiulian. Relationship between carbon and oxygen stable isotope in carbonate rocks and paleosalinity and paleotemperature of seawater [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1985, 3(4): 17–30.
- [30] TAO Ye, GAO Da, HE Youbin, et al. Carbon and oxygen isotopes of the Lianglitage Formation in the Tazhong area, Tarim Basin: Implications for sea-level changes and palaeomarine conditions[J]. Geological Journal, 2023, 58(3): 967–980.
- [31] 董翼昕. 四川盆地中二叠统白云岩成因机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- DONG Yixin. Genetic mechanism of the Middle Permian dolomite in the Sichuan Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [32] 罗兰. 川西北地区栖霞组—茅口组沉积相研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- LUO Lan. Sedimentary facies study of Qixia Formation–Maokou Formation in northwest Sichuan [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [33] 张建勇, 周进高, 郝毅, 等. 四川盆地环开江——梁平海槽长兴组——飞仙关组沉积模式[J]. 海相油气地质, 2011, 16(3): 45–54.
- ZHANG Jianyong, ZHOU Jingao, HAO Yi, et al. A sedimentary model of Changxing and Feixianguan reservoirs around Kaijiang–Liangping trough in Sichuan Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2011, 16(3): 45–54.
- [34] 纪友亮, 马达德, 薛建勤, 等. 柴达木盆地西部新生界陆相湖盆碳酸盐岩沉积环境与沉积模式[J]. 古地理学报, 2017, 19(5): 757–772.
- JI Youliang, MA Dade, XUE Jianqin, et al. Sedimentary environments and sedimentary model of carbonate rocks in the Cenozoic lacustrine basin, western Qaidam Basin [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2017, 19(5): 757–772.
- [35] GARBELLI C, SHEN S Z, IMMENHAUSER A, et al. Timing of Early and Middle Permian deglaciation of the southern hemisphere: Brachiopod-based $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ calibration [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2019, 516: 122–135.
- [36] 胡罗嘉, 黄世伟, 谭万仓, 等. 四川盆地东部二叠系茅口组层序地层特征及地质意义[J]. 海相油气地质, 2021, 26(4): 357–366.
- HU LuoJia, HUANG Shiwei, TAN Wancang, et al. Sequence stratigraphic characteristics and geological significance of Permian Maokou Formation in eastern Sichuan Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2021, 26(4): 357–366.
- [37] 肖笛, 谭秀成, 山述娇, 等. 四川盆地南部中二叠统茅口组二段沉积微相研究[J]. 沉积学报, 2015, 33(6): 1182–1191.
- XIAO Di, TAN Xiucheng, SHAN Shujiao, et al. Sedimentary microfacies of the second member in Maokou Formation, Middle Permian, south Sichuan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(6): 1182–1191.
- [38] 罗兰, 王兴志, 李勇, 等. 川西北地区中二叠统沉积相特征及其对储层的影响[J]. 特种油气藏, 2017, 24(4): 60–66.
- LUO Lan, WANG Xingzhi, LI Yong, et al. Sedimentary facies in Middle Permian series in northwest Sichuan and its effect on reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(4): 60–66.
- [39] 谭秀成, 刘晓光, 陈景山, 等. 磨溪气田嘉二段陆表海碳酸盐岩台地内滩体发育规律[J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 995–1001.
- TAN Xiucheng, LIU Xiaoguang, CHEN Jingshan, et al. Shoal development within the epicontinental carbonate platform, Jia 2 member, Lower Triassic, Moxi Gas Field, central Sichuan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(5): 995–1001.
- [40] 胡明毅, 胡忠贵, 魏国齐, 等. 四川盆地茅口组层序岩相古地理特征及储集层预测[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 45–55.
- HU Mingyi, HU Zhonggui, WEI Guoqi, et al. Sequence lithofacies paleogeography and reservoir prediction of the Maokou Formation in Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 45–55.
- [41] 孙自明, 卞昌蓉, 刘光祥. 峨眉山幔柱主要研究进展及四川盆地二叠纪成盆动力学机制[J]. 现代地质, 2023, 37(5): 1089–1099.
- SUN Ziming, BIAN Changrong, LIU Guangxiang. Advances on the understanding in the Emeishan mantle plume and dynamic mechanism of the Permian Sichuan Basin formation [J]. Geoscience, 2023, 37(5): 1089–1099.
- [42] 杨巍, 张廷山, 刘治成, 等. 地幔柱构造的沉积及环境响应——以峨眉地幔柱为例[J]. 岩石学报, 2014, 30(3): 835–850.
- YANG Wei, ZHANG Tingshan, LIU Zhicheng, et al. Sedimentary and environmental responses to mantle plume: A case study of Emeishan mantle plume [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(3): 835–850.
- [43] 李大军, 陈洪德, 侯明才, 等. 四川盆地中二叠世栖霞期—茅口期岩相古地理特征及其地球动力学机制探讨[J]. 地质科学, 2019, 54(4): 1114–1134.
- LI Dajun, CHEN Hongde, HOU Mingcai, et al. Lithofacies and paleogeographic characteristics of Middle Permian Qixia and

- Maokou periods in Sichuan Basin and the geodynamic mechanisms [J]. Chinese Journal of Geology, 2019, 54(4): 1114-1134.
- [44] 李明隆, 谭秀成, 罗冰, 等. 四川盆地西北部中二叠统栖霞组相控早期高频暴露岩溶特征及启示[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 66-82.
- LI Minglong, TAN Xiucheng, LUO Bing, et al. Characteristics of facies-controlled and early high-frequency exposed karstification in the Qixia Formation of Middle Permian in the northwest of Sichuan Basin and its significance [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 66-82.
- [45] 杨文杰, 谭秀成, 李明隆, 等. 四川盆地威远—高石梯地区中二叠统栖霞组台内薄层白云岩发育特征与成因[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(4): 75-90.
- YANG Wenjie, TAN Xiucheng, LI Minglong, et al. Development characteristics and genesis of thin layered dolomite of the Middle Permian Qixia Formation in the platform in Weiyuan-Gaoshiti area, Sichuan Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(4): 75-90.
- [46] 赵文智, 沈安江, 胡素云, 等. 中国碳酸盐岩储集层大型化发育的地质条件与分布特征[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 1-12.
- ZHAO Wenzhi, SHEN Anjiang, HU Suyun, et al. Geological conditions and distributional features of large-scale carbonate reservoirs onshore China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 1-12.
- [47] 何治亮, 张军涛, 丁茜, 等. 深层-超深层优质碳酸盐岩储层形成控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 633-644, 763.
- HE Zhiliang, ZHANG Juntao, DING Qian, et al. Factors controlling the formation of high-quality deep to ultra-deep carbonate reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(4): 633-644, 763.
- [48] 肖笛, 黄天海, 张本健, 等. 四川盆地南部向斜区二叠系岩溶孔隙型石灰岩储层成因与天然气勘探新领域[J]. 天然气工业, 2024, 44(2): 52-67.
- XIAO Di, HUANG Tianhai, ZHANG Benjian, et al. Permian karst porous limestone reservoir in the syncline area of southern Sichuan Basin: Origin and new field of natural gas exploration [J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(2): 52-67.
- [49] 印长海, 师江波, 谭秀成, 等. 四川盆地中部合川—潼南地区茅口下亚段白云岩储层特征及成储机制[J]. 海相油气地质, 2024, 29(2): 136-146.
- YIN Changhai, SHI Jiangbo, TAN Xiucheng, et al. Characteristics and formation mechanism of dolomite reservoirs in the lower submember of Maokou Member 2 in Hechuan-Tongnan area, central Sichuan Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2024, 29(2): 136-146.
- [50] 彭军, 刘芳兰, 张连进, 等. 川中龙女寺地区中二叠统茅口组储层特征及其主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(5): 1337-1354.
- PENG Jun, LIU Fanglan, ZHANG Lianjin, et al. Characteristics and main controlling factors of reservoirs in the Middle Permian Maokou Formation, Longnvsi area, central Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1337-1354.
- [51] 张宇, 曹清古, 罗开平, 等. 四川盆地二叠系茅口组油气藏勘探发现与启示[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 610-620.
- ZHANG Yu, CAO Qinggu, LUO Kaiping, et al. Reservoir exploration of the Permian Maokou Formation in the Sichuan Basin and enlightenment obtained [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 610-620.
- [52] 易海永, 张本健, 谷明峰, 等. 四川盆地东部地区二叠系茅口组孤立浅滩的发现及天然气勘探潜力[J]. 天然气工业, 2024, 44(6): 1-11.
- YI Haiyong, ZHANG Benjian, GU Mingfeng, et al. Discovery of isolated shoals in the Permian Maokou Formation of eastern Sichuan Basin and their natural gas exploration potential [J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(6): 1-11.
- [53] 包汉勇, 赵帅, 王必金, 等. 川东红星地区二叠系茅口组页岩气勘探突破及富集主控因素[J]. 中国石油勘探, 2024, 29(1): 65-75.
- BAO Hanyong, ZHAO Shuai, WANG Bijin, et al. Exploration breakthrough and main controlling factors for shale gas enrichment in the Permian Maokou Formation in Hongxing area in eastern Sichuan Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2024, 29(1): 65-75.
- [54] LI Yanjun, XU Fabo, ZENG Liyuan, et al. Gas source in Lower Permian Maokou Formation and gas accumulation in the syncline area of eastern Sichuan Basin [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 206: 109044.

(编辑 张玉银)