石油与天然气地质
第47卷 第5期 OIL & GAS GEOLOGY 2026年10月

文章编号:0253-9985(2026)05-1541-18 doi:10.11743/ogg20260508

四川盆地高磨地区震旦系灯影组四段微生物丘滩叠置样式及沉积演化特征

夏钦禹[1],张 林[1],杨东凡[2],徐 伟[2],罗文军[2],刘军迎[1],郭振华[1],闫海军[1],兰雪梅[2],闫梦楠[2]
(1. 中国石油 勘探开发研究院,北京 100083;2. 中国石油 西南油气田分公司 勘探开发研究院,四川 成都 610051)

摘要:四川盆地震旦系灯(灯影组)四段储层是微生物丘滩(简称丘滩)叠加溶蚀作用和岩溶作用形成的相控岩溶储层,明确丘滩的分布和演化特征对储层精细表征具有重要意义。综合利用岩心、露头、测井和三维地震资料,识别了丘滩沉积微相类型,总结了其叠置样式,分析了不同时期丘滩展布特征,并明确了沉积演化过程和控储作用。研究表明:①受相对水体深度的控制,灯四段发育垂向叠置型、侧向迁移型和孤立型3类丘滩。垂向叠置型为块状加积型丘滩,地震同相轴呈多层平行、中-弱振幅和中-弱连续反射;侧向迁移型为板状侧积或前积型丘滩,地震同相轴呈叠瓦状、中-弱振幅和中-弱连续反射;孤立型丘滩呈席状,地震同相轴呈丘状弱反射。②灯四段沉积早期丘滩分布局限,发育侧向迁移型和孤立型丘滩;晚期丘滩连片分布,发育垂向叠置型、侧向迁移型和孤立型丘滩。③垂向叠置型和侧向迁移型丘滩平均孔隙度分别为5.2%和3.3%,优质储层发育程度高,为有利开发对象;孤立型丘滩平均孔隙度仅2.2%,优质储层欠发育。台缘带灯四^{2}和灯四^{3}小层以垂向叠置型丘滩为主,开发潜力较大;台内以孤立型丘滩为主,开发潜力较差。

关键词:叠置样式;沉积演化;微生物丘滩;灯影组;震旦系;高磨地区;四川盆地
中图分类号:TE121.3 **文献标识码**:A

Stacking patterns and sedimentary evolution characteristics of microbial mound-shoals in the 4th Member of the Sinian Dengying Formation, Gaomo area, Sichuan Basin

XIA Qinyu[1], ZHANG Lin[1], YANG Dongfan[2], XU Wei[2], LUO Wenjun[2], LIU Junying[1], GUO Zhenhua[1], YAN Haijun[1], LAN Xuemei[2], YAN Mengnan[2]

(1. *Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing* 100083, *China*; 2. *Exploration and Development Research Institute, Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan* 610051, *China*)

Abstract: The reservoirs in the 4th member of the Sinian Dengying Formation (Deng 4 Member), Sichuan Basin are facies-controlled karst reservoirs formed by microbial mound-shoal deposits superimposed with dissolution and karstification. Clarifying the distribution and evolution characteristics of these microbial mound-shoals is essential for refined reservoir characterization. This study identified mound-shoal sedimentary microfacies types, characterized their stacking patterns and distribution characteristics across depositional stages, and clarified their sedimentary evolution processes and controls on reservoir development in the Deng 4 Member of the Gaomo area, Sichuan Basin, using integrated core, outcrop, well-log, and 3D seismic data. As indicated by the research results, (1) three types of mound-shoals developed in the Deng 4 Member under the control of relative water depth: vertically stacked, laterally migrating, and isolated types. The vertically stacked mound-shoals are characterized by massive aggradational geometry, displaying multi-layer parallel seismic events with moderate-to-weak amplitude and moderate-to-weak continuity. The laterally migrating type forms tabular laterally accreted or progradational mound-shoals, showing shingled seismic events with moderate-to-weak amplitude and moderate-to-weak continuity. The isolated type occurs as sheet-like mound-shoals, showing mound-shaped weak seismic reflections. (2) Temporally, mound-shoals were initially confined in distribution

收稿日期:2026-02-26;**修回日期**:2026-05-28。
第一作者简介:夏钦禹(1991—),男,高级工程师,油气藏开发地质学。**E-mail**: xiaqy-ordos@petrochina.com.cn。
基金项目:国家科技重大专项(2025ZD1402500);中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2023ZZ16-03)。

during the early depositional stage, dominated by migrating and isolated types. In the late stage, these complexes expanded, encompassing all three stacking patterns. (3) The average porosities of vertically stacked and laterally migrating mound-shoals are 5.2% and 3.3%, respectively. These two types contain well-developed high-quality reservoirs and are favorable exploration targets. In contrast, isolated mound-shoals have an average porosity of only 2.2%, with poorly developed high-quality reservoirs. The Deng 4^2 and Deng 4^3 sublayers in the platform-margin zone are dominated by vertically stacked mound-shoals and have relatively high development potential, whereas the intraplatform area is dominated by isolated mound-shoals, exhibiting poor reservoir performance.

Key words: stacking pattern, sedimentary evolution, microbial mound-shoal, Dengying Formation, Sinian, Gaomo area, Sichuan Basin

引用格式:夏钦禹,张林,杨东凡,等. 四川盆地高磨地区震旦系灯影组四段微生物丘滩叠置样式及沉积演化特征[J]. 石油与天然气地质,2026,47(5):1541-1558. DOI:10.11743/ogg20260508.

XIA Qinyu, ZHANG Lin, YANG Dongfan, et al. Stacking patterns and sedimentary evolution characteristics of microbial mound-shoals in the 4th Member of the Sinian Dengying Formation, Gaomo area, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(5): 1541-1558. DOI: 10.11743/ogg20260508.

微生物岩是微生物通过捕获、包裹、黏结碎屑颗粒或微生物矿化而形成的沉积物,再经成岩作用形成的岩石[1-4]。按结构可分为叠层石、层纹石和凝块石等类型[5],常构成微生物丘或微生物丘滩(微生物丘与周缘颗粒滩组成的复合体,简称丘滩)。微生物岩是重要的油气储层,在墨西哥湾上侏罗统Smackover组[6-8]和俄罗斯东西伯利亚前寒武系及寒武系[9]中均有发现。中国多个盆地的寒武系及前寒武系亦发育丘滩沉积,得到了中国学者的广泛重视[10-13]。

近年来,四川盆地震旦系灯影组微生物碳酸盐岩气藏勘探取得重大突破,累计提交天然气三级地质储量超过万亿立方米[14-18],部分气藏已成功投产,年生产规模超60×10^8 m^3[18-20]。勘探开发实践表明,丘滩是优质储层发育的基础,既易于形成同生期溶蚀孔洞,也有利于后期表生岩溶改造,因此明确其分布具有重要意义。自20世纪80年代以来,前人围绕丘滩的成分[17-18]、形成机制[23-26]、分类[18,23-24]和演化[29-31]开展了大量研究。针对四川盆地震旦系灯影组丘滩,多数研究聚焦岩石类型、纵向序列及储集意义[32-35],识别出凝块石白云岩和叠层石白云岩等岩石类型;部分学者依据不同标准,将丘滩划分为大型、中型和小型丘滩[32-33];亦有学者探讨了丘滩对岩溶储层发育的影响[38-43],认为丘滩是岩溶储层发育的基础,其储层厚度和物性明显优于滩间海。然而,目前对高磨地区震旦系灯影组丘滩叠置样式、不同时期丘滩平面展布及纵向演化规律尚缺乏系统研究,制约了该区相控储层的精细表征,尤其不利于优质储渗体和连通单元的刻画。本文综合利用10口取心井岩心、3处野外露头剖面、108口井电成像测井资料及3 250 km^2三维地震资料,识别丘滩沉积微相类型,总结丘滩叠置样式,分析不同时期丘滩展布特征,明确沉积演化过程,进而厘定有利于储层发育的丘滩类型,为该区丘滩相控储层的精细刻画提供依据。

1 区域地质概况

四川盆地位于扬子板块西北部,属于多期构造-沉积演化叠合盆地。震旦纪末期,盆地构造和沉积分异增强[44],呈隆-坳相间的古地理格局,中部发育德阳-安岳克拉通内裂陷[45-48](图1a),其两侧台地发育碳酸盐岩沉积,即震旦系灯影组。灯影组自下而上可划分灯(灯影组)一段、灯二段、灯三段和灯四段(图1b)[49],其中灯二段和灯四段均可进一步分为上、下亚段。灯一段以泥晶白云岩为主,偶夹纹层石白云岩;灯二下亚段发育纹层石白云岩和凝块石白云岩,具葡萄状和花边状构造,而灯二上亚段则以泥晶白云岩夹少量纹层石白云岩为特征;灯三段为泥岩、砂岩夹薄层白云岩,具混积特征;灯四下亚段以大套泥晶白云岩为主,偶夹纹层石白云岩,灯四上亚段发育纹层石白云岩、叠层石白云岩和凝块石白云岩,夹泥晶白云岩[50]。灯四上亚段上部普遍发育一套厚度为10~20 m的硅质岩或硅质白云岩,在高磨地区具有横向可对比性[51]。据此标志层,灯四上亚段可进一步划分为灯$四^2$和灯$四^3$小层,与下部的灯$四^1$小层共同构成灯四段3个小层。灯$四^1$小层以泥晶白云岩为主,沉积水动力较弱;灯$四^2$和灯$四^3$小层发育大量叠层石白云岩和凝块石白云岩,沉积水动力较强。

前人针对四川盆地灯影组沉积期海平面变化特征开展过详细研究,钻井及野外露头碳、氧同位素分析表明[52],灯一段沉积期海平面缓慢上升;灯二段沉积早

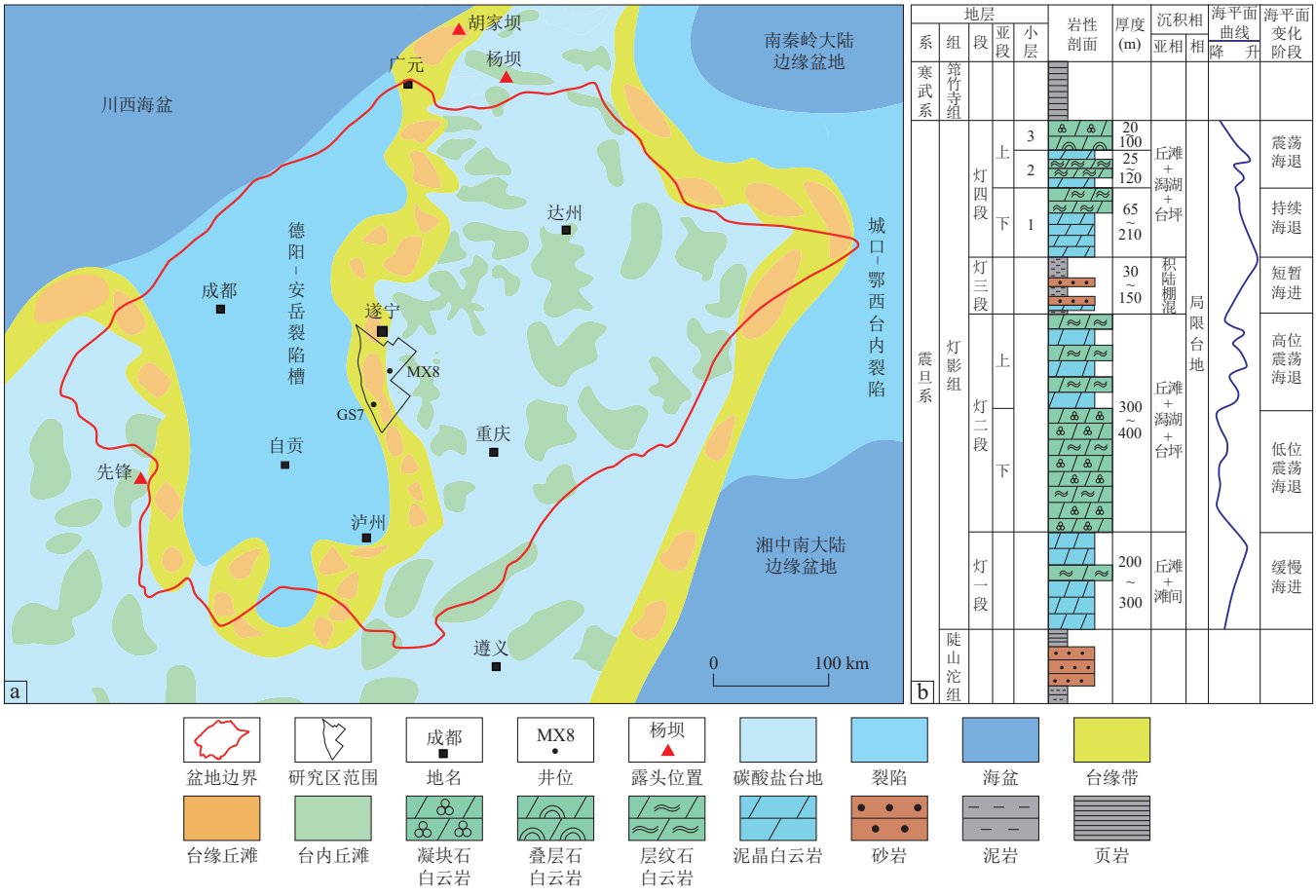


图 1　四川盆地晚震旦世构造及沉积特征

Fig. 1　Tectonic and sedimentary characteristics of the Late Sinian in the Sichuan Basin

a. 灯四段沉积期岩相古地理；b. 灯影组综合柱状图

期为低位振荡海退阶段，海平面变化幅度较小，晚期为高位振荡海退阶段，海平面振荡幅度较大；灯三段沉积期发生短暂海侵后海平面下降；沉积初期（灯四^{1}小层沉积期）持续海退，灯四^{2}和灯四^{3}小层沉积期为振荡海退阶段（图 1b）。因此，灯影组沉积期发育 2 个完整的海进-海退旋回，分别为灯一段-灯二段及灯三段-灯四段。海平面升降控制了灯影组各时期的沉积特征，导致灯一段和灯三段以沉积水动力较弱的泥晶白云岩或泥岩、粉砂岩为主，灯二段和灯四段以沉积水动力较强的叠层石白云岩及凝块石白云岩为主。

高磨地区灯四段沉积期位于德阳-安岳裂陷槽东侧碳酸盐台地，南部为高石梯区块，北部为磨溪区块。靠近裂陷槽的台地边缘发育大型丘滩，以微生物丘为主，局部发育颗粒滩，呈环绕台地分布，厚度较大。台地内部则发育小型丘滩（图 1a）。

2　丘滩微相类型及划分

灯四段沉积期，研究区发育碳酸盐台地，可划分为台地边缘相和局限台地相[37,39,53]。台地边缘相发育于台地边部，位于台地与斜坡之间的地貌相对高部位；局限台地相发育于台地边缘向台地内部一侧，整体地貌较为平缓。

关于四川盆地灯四段沉积亚相的划分，不同学者存在分歧：部分学者认为微生物丘和颗粒滩分属不同亚相[31,33,48-49]，另一部分学者则将二者统称为丘滩[10,39,41,55]。研究发现，区内灯四段可见微生物丘与颗粒滩复合发育，镜下薄片可观察到较为清晰的丘滩原始沉积结构，包括叠层石白云岩、纹层石白云岩和凝块石白云岩等微生物岩，以及与微生物作用相伴生的微颗粒白云岩。这表明，至少在研究区灯四段部分取心段中，“滩”的形成与“丘”的生长具有伴生关系，系微生物丘被波浪水流改造而成。微生物岩构成“丘”的主要岩石类型，而与微生物岩相关的颗粒岩则是“滩”的主要组成。需要指出的是，并非所有颗粒滩均与微生物丘相伴生或直接相关，部分浅水地区亦可形成典型颗粒滩，但该类颗粒滩在研究区发育程度较低。

为便于研究和总结规律，本文将微生物丘和颗粒

滩统一归并为丘滩，整体上表现为复合体特征。据此，台地边缘相可进一步划分为丘滩和丘滩间洼地2个亚相。台缘丘滩以凝块石白云岩、叠层石白云岩和微颗粒白云岩为主，沉积水深较小；丘滩间洼地属相对低洼的静水低能环境，以深色泥晶白云岩为主。局限台地相发育丘滩和台坪2个亚相。台内丘滩以层纹石白云岩、叠层石白云岩和微颗粒白云岩为主；台坪为局限台地内部相对平坦、水动力较弱的区域，以泥晶白云岩为主。台缘丘滩与台内丘滩本质上均属于局部相对高地貌形成的微生物碳酸盐岩，以微生物作用为主，二者差异主要体现在沉积水动力条件和丘滩发育规模上。

2.1 沉积微相类型

前人将微生物丘和颗粒滩划归为不同亚相时，通常划分出丘基、丘核、丘盖、滩核及滩翼等微相[35,37,54]。如前文所述，研究区部分颗粒滩与微生物丘存在成因上的伴生关系，由微生物丘改造形成，通常发育于微生物丘的翼部，共同构成丘滩。考虑到与微生物丘生长无关的纯颗粒滩发育程度较低，结合前人丘滩的微相划分方案[35,37,54]，本文将丘滩划分为丘基、丘核、丘坪、丘翼和丘盖5种微相类型。丘滩的生长终止存在水体变深和变浅2种成因，分别对应丘盖和丘坪2种沉积微相。

2.1.1 丘基

丘基发育于丘滩最下部，为丘滩发育的基础。丘滩主要发育于碳酸盐台地局部相对高地貌，受地貌和海平面升降控制作用明显。在海平面下降初期，水体深度较大，主要发育层纹石白云岩（图2a），水动力条件较弱。岩心及镜下薄片可见近平行状纹层（图2b，c），储集性能较差，以晶间孔为主，局部可见顺纹层分布的孔洞（图2c），孔洞整体连通性较差。

2.1.2 丘核

丘核发育于丘基之上，是丘滩沉积的主体，占比较大。丘基形成后，随着海平面进一步下降，水体变浅、水动力逐渐增强，水体中富含的营养物质增多，微生物生长繁盛、活跃性强，形成丘核。岩性以凝块石白云岩和叠层石白云岩为主，溶蚀孔洞发育程度高（图2d—i）。

2.1.3 丘坪

丘坪位于丘核之上，以层纹石白云岩为主（图2a—c）。丘坪的形成反映海平面快速下降或丘滩快速生长，水体变浅导致可容空间减小，丘滩顶部暴露水面发生潮坪化。纵向上多期丘滩叠置时，下部丘滩的丘坪常作为上部丘滩的丘基，丘基与丘坪在此情况下较难区分。

2.1.4 丘翼

在微生物生长过程中，由于水体变浅、水动力增强，在浪基面附近沉积的部分早期微生物丘被水体打碎，搬运并沉积在两侧，形成微生物颗粒碳酸盐岩，即丘翼。研究区丘翼以微颗粒白云岩为主（图2j—l）。受沉积环境和发育过程影响，并非所有丘滩均发育丘翼，且部分丘翼规模较小。在沉积旋回序列中，通常先沉积微生物丘，后发育颗粒滩。同期颗粒滩一般位于微生物丘两侧，呈侧向对接；晚期形成的颗粒滩则可能叠置于早期微生物丘之上，呈垂向接触。

2.1.5 丘盖

丘盖位于丘滩顶部，以灰色泥晶白云岩为主（图2m—o）。与丘坪相反，丘盖的存在指示丘滩在生长晚期发生快速海侵，水深突然增加，丘滩沉积速率低于海平面上升速率，水动力减弱，丘滩停止生长。相较于台坪亚相，丘盖沉积厚度较薄，与整个丘滩在形态上具有一定继承性，可归属为丘滩；由于厚度与大套厚层台坪沉积具有一定差异，可用于区分两者。

2.2 沉积微相划分

取心井岩-电分析表明，由叠层石白云岩与凝块石白云岩构成的丘核和微颗粒白云岩构成的丘翼均呈低自然伽马值、中-低电阻率特征；由层纹石白云岩构成的丘基和丘坪呈低自然伽马值、高电阻率特征；由泥晶白云岩构成的丘盖或丘滩间沉积呈高自然伽马值、中-低电阻率特征。因此，层纹石白云岩和泥晶白云岩对应的沉积微相与丘核、丘翼常规测井曲线差异较大，较易区分；而丘核与丘翼的自然伽马、电阻率等测井曲线特征差异较小，仅利用常规测井曲线划分这2类沉积微相的难度较大。

鉴于丘滩不同沉积微相孔洞发育程度差异明显，丘核与丘翼孔洞发育形态亦有所不同，且研究区电成像测井资料丰富，具备成像测井数据的108口井均匀分布于整个研究区，因此在常规测井基础上，补充成像测井开展丘滩沉积微相划分具有可行性。据此，本文利用岩心资料划分取心井的丘滩沉积微相，通过岩心标定常规测井及成像测井，明确不同沉积微相的测井识别标志（图3），进而开展单井沉积微相划分。丘核主要为凝块石白云岩或叠层石白云岩，不同岩性构成的丘核因组构差异，成像测井图像也有所不同：由凝块

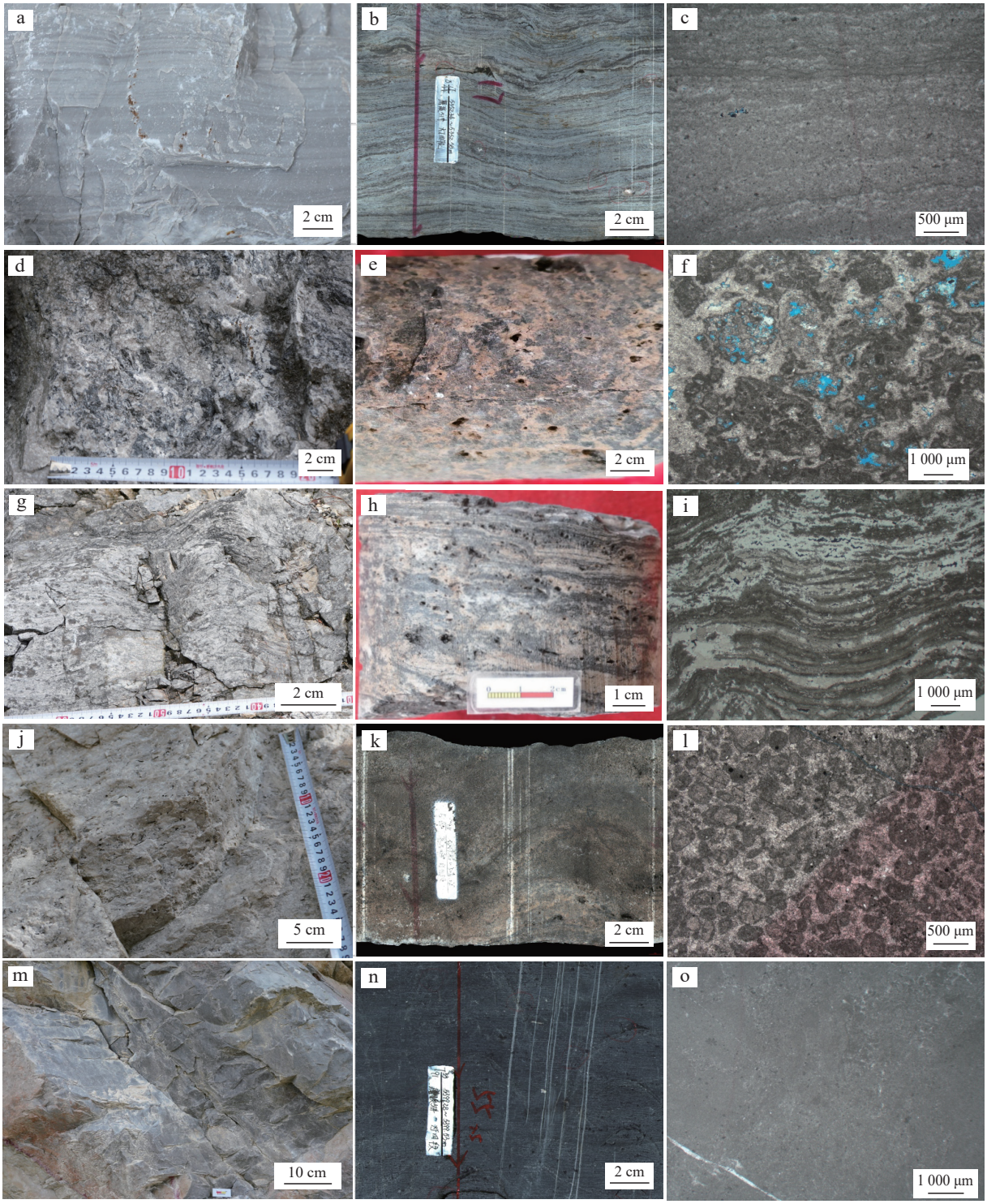


图 2　四川盆地灯四段丘滩沉积微相典型露头、岩心及薄片特征照片

Fig. 2　Photographs showing typical outcrops, cores, and thin-sections of mound-shoal sedimentary microfacies from the Deng 4 Member, Sichuan Basin

a. 丘基、丘坪，层纹石白云岩，先锋剖面，野外照片；b. 丘基、丘坪，层纹石白云岩，MX51 井，岩心照片，埋深 5 352. 34 ~ 5 352. 58 m；c. 丘基、丘坪，层纹石白云岩，MX11 井，铸体薄片镜下照片，单偏光，埋深 5 485. 62 m；d. 丘核，凝块石白云岩，胡家坝剖面，野外照片；e. 丘核，凝块石白云岩，溶蚀孔发育，GS101 井，岩心照片，埋深 5 507. 73 ~ 5 507. 82 m；f. 丘核，凝块石白云岩，溶蚀孔发育，GS18 井，铸体薄片镜下照片，单偏光，埋深 5 133. 72 m；g. 丘核，叠层石白云岩，胡家坝剖面，野外照片；h. 丘核，叠层石白云岩，GK1 井，岩心照片，埋深 5 050. 49 ~ 5 050. 58 m；i. 丘核，叠层石白云岩，GS111 井，铸体薄片镜下照片，单偏光，埋深 5 317. 08 m；j. 丘翼，微颗粒白云岩，胡家坝剖面，野外照片；k. 丘翼，微颗粒白云岩，GS102 井，岩心照片，埋深 5 069. 86 ~ 5 070. 02 m；l. 丘翼，微颗粒白云岩，GS20 井，铸体薄片镜下照片，单偏光，埋深 5 205. 06 m；m. 丘盖，泥晶白云岩，胡家坝剖面，野外照片；n. 丘盖，泥晶白云岩，MX51 井，岩心照片，埋深 5 399. 28 ~ 5 399. 53 m；o. 丘盖，泥晶白云岩，GS18 井，铸体薄片镜下照片，单偏光，埋深 5 140. 99 m

岩性	沉积微相	孔洞发育程度	常规测井曲线特征		成像测井特征	岩心外表面展开图像	成像测井图像	成像测井模式示意图
			自然伽马值/API	深侧向电阻率/(Ω·m)				
凝块石白云岩	丘核	较发育-发育	低 (< 15)	低 (< 10 000)	不规则暗色斑块状	MX51井, 埋深5 397.13 ~ 5 397.38 m		
叠层石白云岩	丘核	较发育-发育	低 (< 15)	低 (< 10 000)	暗色波状	MX108井, 埋深5 296.57 ~ 5 296.77 m		
微颗粒白云岩	丘翼	较发育-发育	低 (< 15)	低 (< 10 000)	规则暗色斑块状	MX105井, 埋深5 312.61 ~ 5 312.75 m		
层纹石白云岩	丘基丘坪	欠发育	低 (< 15)	高 (> 10 000)	亮色块状	MX105井, 埋深5 334.92 ~ 5 335.14 m		
微泥晶白云岩	丘盖	不发育	高 (> 15)	低 (< 10 000)	规则暗色线状	MX105井, 埋深5 363.12 ~ 5 363.4 m		

图3 四川盆地高磨地区灯四段丘滩沉积微相岩-电特征

Fig. 3 Litho-electric characteristics of mound-shoal sedimentary microfacies in the Deng 4 Member, Gaomo area, Sichuan Basin

石白云岩组成的丘核呈不规则暗色斑块状,而由叠层石白云岩组成的丘核呈暗色波状。丘翼主要为微颗粒白云岩,成像测井呈规则暗色斑块状。丘基或丘坪主要为层纹石白云岩,成像测井呈亮色均质块状,二者的区分主要参考其上、下沉积微相的组合关系。丘盖主要为泥晶白云岩,成像测井呈规则暗色线状。

需要说明的是,成像测井本质上反映地层电阻率差异,受孔洞发育程度影响较大,与岩石原始沉积组构缺乏直接关联。例如,丘核和丘翼虽在岩性和原始沉积组构上存在差异,但当丘滩受强烈成岩作用改造时,原始组构已不明显,地层电阻率更多地反映后期孔洞组构特征,导致沉积微相解释结果存在多解性。因此,尽管可以基于不同微相孔洞发育程度和形态的差异开展成像测井微相划分,但此方法仍具有一定的不确定性。

3 丘滩叠置样式及发育模式

3.1 丘滩叠置样式

受丘滩沉积速率、海平面升降、沉积古地貌及水动力条件等因素影响,不同位置发育的丘滩叠置样式存在差异。本文基于研究区灯四段丰富的钻井与三维地震资料,通过岩心标定成像测井及地震资料,识别出垂向叠置型、侧向迁移型和孤立型3类丘滩。结合盆地周缘地表露头开展类比分析,进一步明确了不同叠置样式丘滩的特征。如前所述,灯四^{1}小层与灯四^{2}+灯四^{3}小层(即灯四下亚段与灯四上亚段)岩性差异较大,界面处测井曲线响应特征明显。井-震标定结果表明,灯四段顶面与灯二段顶面对应地震同相轴波峰反射,灯三段顶面对应波谷反射。灯四^{1}小层与灯四^{2}+灯四^{3}小层分界面位于强波峰反射之下,对应波峰-波谷转换面,区域可对比性强。因此,基于上述井-震标定结果可开展各层全区解释追踪,特别是灯四^{1}小层顶面的解释追踪,进而分析丘滩叠置样式。需要指出的是,研究区三维地震资料主频近40 Hz,垂向分辨率为20 ~ 30 m,因此地震剖面同相轴反映的通常为复合丘滩而非单一丘滩,但不同丘滩叠置样式在同相轴形态上仍有较好反映。

3.1.1 垂向叠置型丘滩

垂向叠置型丘滩由多个单一丘滩或复合丘滩垂向

叠加而成，以加积作用为主，主要发育于台缘带，沉积水动力较强。以 MX108 井为例，该井位于研究区西侧台地边缘，取心段深度 5 292 ~ 5 298，5 301 ~ 5 313 和 5 322 ~ 5 338 m 均发育 2 期或多期丘核沉积（图 4a）。每期丘核对应 1 期丘滩沉积旋回，纵向上表现为多个向上变浅的沉积旋回叠加。各沉积旋回下部为层纹石白云岩，向上过渡为凝块石白云岩和叠层石白云岩等，顶部可能因水体变浅发育丘坪沉积，但与上部丘滩的丘基较难区分。单个旋回呈丘基-丘核-丘坪的沉积微相组合特征（图 4a）。地震剖面上，垂向叠置型丘滩表现为同相轴呈多层平行反射、中-弱振幅、中-弱连续性，隆起幅度高、规模大（图 5a）。野外露头中，该类丘滩隆起幅度大、呈块状，多期丘核垂向叠置（图 6）。

3.1.2　侧向迁移型丘滩

侧向迁移型丘滩为多个单一丘滩或复合丘滩侧向叠置而成，发育于台缘带，沉积水动力较强。该类丘滩在原始部位沉积后，受海平面变化等因素影响继续迁移，晚期丘滩的丘翼沉积于早期丘滩的丘核上部，以侧积或前积作用为主。以 GS102 井为例，该井位于研究区西侧台地边缘，取心段深度 5 035 ~ 5 061，5 063 ~ 5 074 和 5 077 ~ 5 087 m 均发育 2 期或多期丘核沉积（图 4b）。每期丘核对应 1 期丘滩沉积旋回。与垂向叠置型丘滩不同，该类丘滩单期沉积旋回内可见微颗粒白云岩，反映早期丘滩沉积后，晚期丘滩侧向迁移，其丘翼与早期丘滩的丘核叠置（图 4b）。该类丘滩纵向上表现为不明显的向上变浅沉积旋回，由下部的层纹石白云岩向上过渡为凝块石白云岩、叠层石白云岩及微颗粒白云岩等，形成丘基-丘核-丘翼的沉积微相组合（图 4b）。地震剖面上，侧向迁移型丘滩同相轴呈叠瓦状反射、中-弱振幅、中-弱连续性，隆起幅度和规模中等（图 5b）。野外露头中，该类丘滩隆起幅度中等、呈板状，多期丘核侧向迁移叠置（图 6）。

3.1.3　孤立型丘滩

孤立型丘滩主要发育于台地内部，水体较深、沉积水动力较弱，营养物质相对匮乏、微生物生长缓慢，极端情况下水体突然加深导致丘滩停止生长。以 MX51 井为例，该井位于研究区东侧台地内部，取心段深度 5 365 ~ 5 369 m，5 374 ~ 5 389 m，5 393 ~ 5 402 m 和 5 409 ~ 5 417 m 发育单期丘核沉积（图 4c）。纵向上表现为单个向上变浅的沉积旋回，由下部的层纹石白云

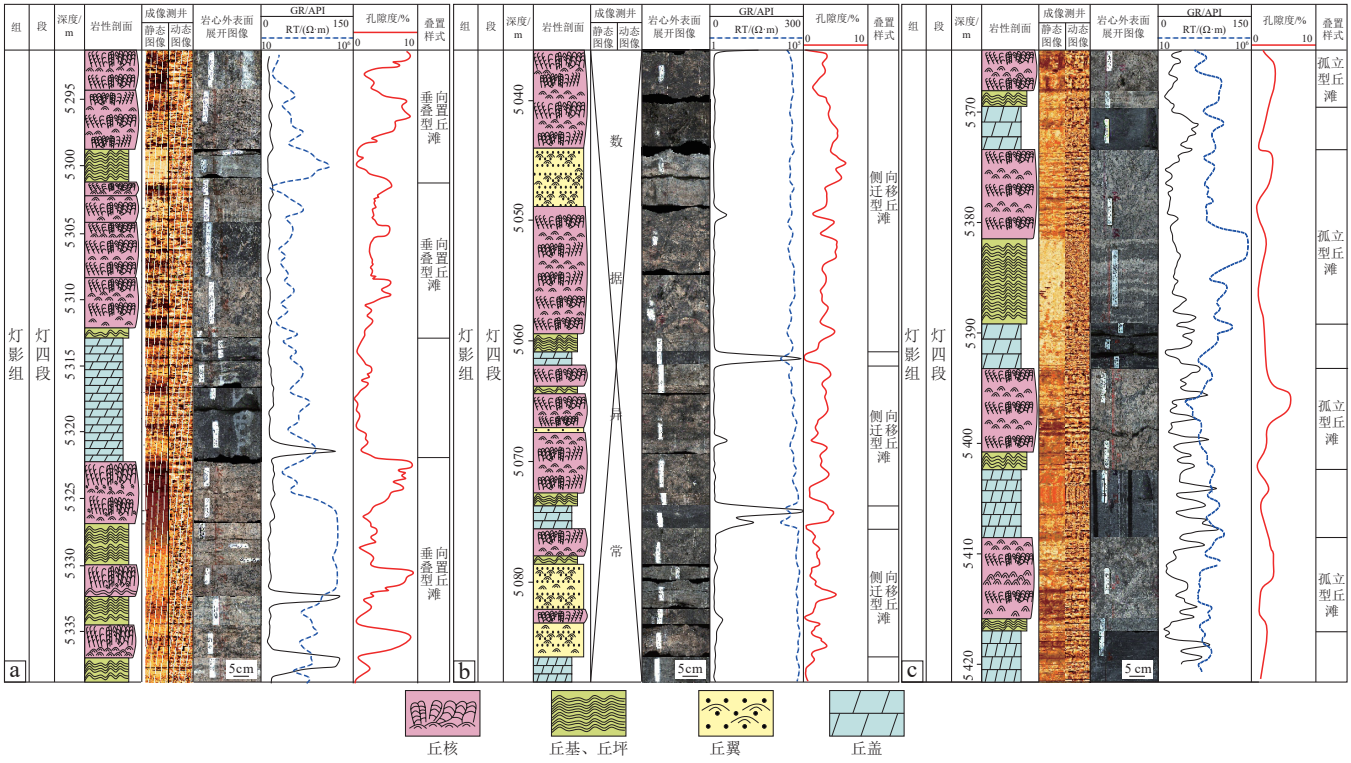


图 4　四川盆地高磨地区灯四段不同叠置样式丘滩岩性组合特征

Fig. 4　Lithological assemblage characteristics of mound-shoals with different stacking patterns in the Deng 4 Member, Gaomo area, Sichuan Basin

a. 垂向叠置型丘滩，MX108 井，台缘；b. 侧向迁移型丘滩，GS102 井，台缘；c. 孤立型丘滩，MX51 井，台内

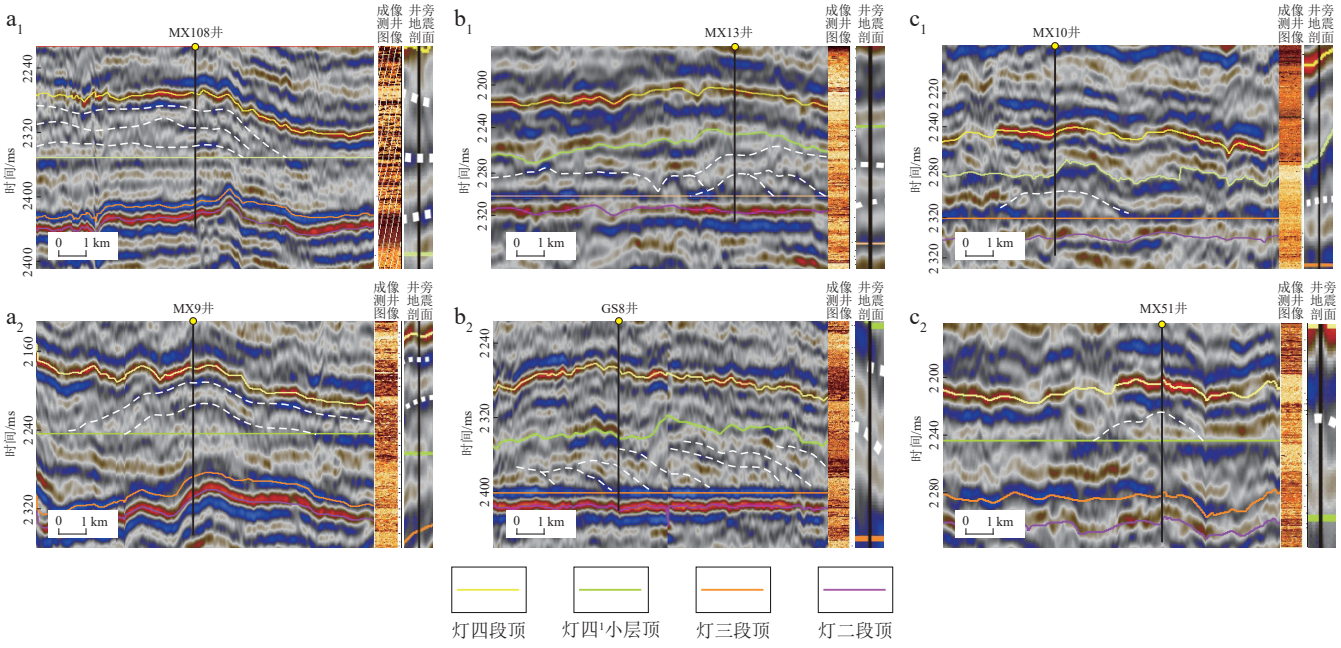


图5 四川盆地高磨地区灯四段不同叠置样式丘滩地震剖面特征

Fig. 5 Seismic profile characteristics of mound-shoals with different stacking patterns in the Deng 4 Member, Gaomo area, Sichuan Basin

a_1, a_2. 垂向叠置型丘滩; b_1, b_2. 侧向迁移型丘滩; c_1, c_2. 孤立型丘滩

(图中白色虚线为丘滩反射地震解释界面。)

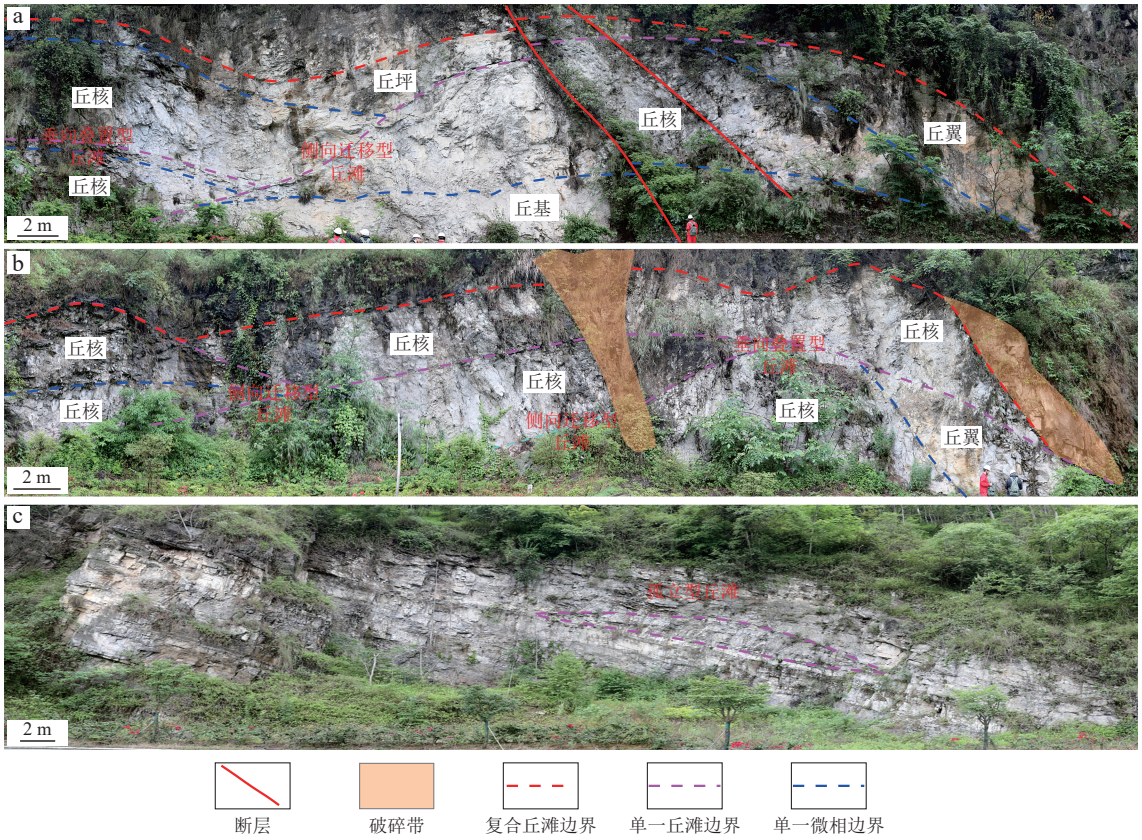


图6 四川盆地峨边先锋剖面灯影组不同叠置样式丘滩露头特征野外照片

Fig. 6 Field photographs showing outcrop characteristics of mound-shoals with different stacking patterns in the Dengying Formation at the Xianfeng section, Ebian, Sichuan Basin

a. 垂向叠置型与侧向迁移型丘滩; b. 垂向叠置型与侧向迁移型丘滩; c. 孤立型丘滩

岩向上过渡为叠层石白云岩，少见凝块石白云岩，呈丘基-丘核-丘盖的沉积微相组合特征（图 4c）。该类丘滩地震同相轴呈丘状弱反射，隆起幅度低、规模小（图 5c）。野外露头中，该类丘滩隆起幅度低、呈席状，为低能环境中沉积的单一丘滩（图 6）。

3.2　不同叠置样式丘滩发育模式

丘滩叠置样式本质上受控于相对水深变化，即丘滩沉积速率与可容纳空间变化速率之间的相对关系。可容纳空间主要受沉积古地貌和海平面升降影响，与层序旋回变化阶段密切相关。当沉积层序位于高位体系域早期时，海平面缓慢上升或下降，可容纳空间变化速率与丘滩沉积速率大致相当，相对水深基本不变，以加积作用为主，发育垂向叠置型丘滩（图 7a）。当沉积层序位于高位体系域晚期或低位体系域早期时，可容纳空间增大速率小于丘滩沉积速率，相对水深减小，以侧积或前积作用为主，形成侧向迁移型丘滩。其中，侧积指丘滩平行台缘带方向迁移至可容纳空间较大的部位（图 7b），而前积指丘滩垂直台缘带方向向台内迁移，沉积至可容纳空间更大的区域（图 7c）。侧向迁移型丘滩与前人在该区灯四段发现的前积体在本质上具有一致性[56]，两者具有相同的沉积背景。在前积体发育过程中，部分地区表现为顺台缘带方向的侧积特征，部分地区则表现为垂直台缘带方向的前积特征。当沉积层序位于低位体系域晚期时，可容纳空间增大速率大于丘滩沉积速率，相对水深增大，丘滩生长缓慢，仅在浪基面附近发育孤立型丘滩（图 7d）。

4　丘滩沉积演化特征

4.1　沉积古地貌恢复

前人研究表明，沉积古地貌对丘滩发育具有控制作用[52-53]。在较强的水动力条件下，碳酸盐的产率较大，丘滩沉积速率较快，有利于丘滩发育。水动力条件与沉积地貌坡度密切相关，坡度平缓则波浪消能、水动

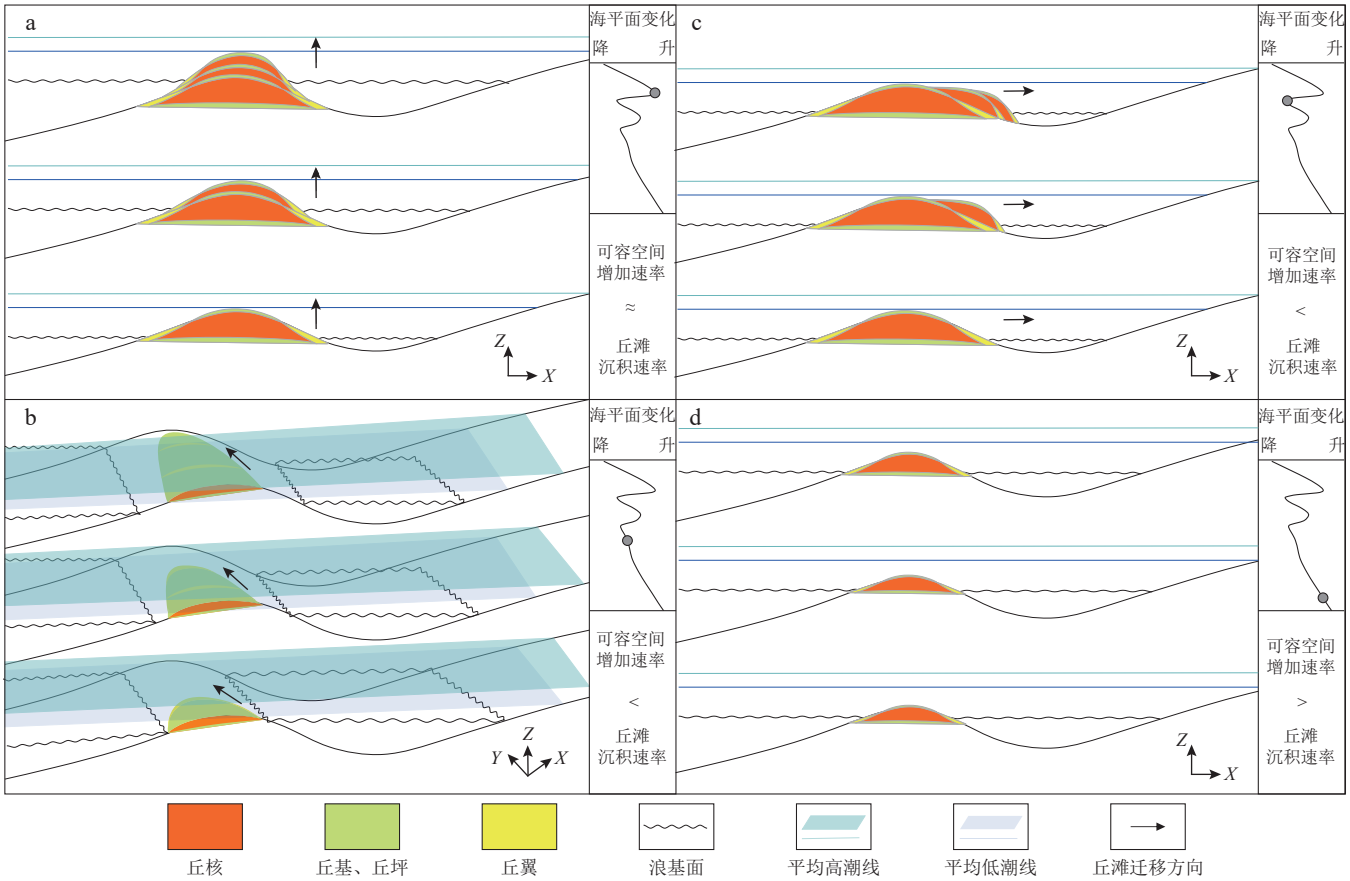


图 7　四川盆地高磨地区灯四段不同叠置样式丘滩发育模式示意图

Fig. 7　Development models of mound-shoals with different stacking patterns in the Deng 4 Member, Gaomo area, Sichuan Basin

a. 垂向叠置型丘滩；b. 侧向迁移型丘滩（侧积）；c. 侧向迁移型丘滩（前积）；d. 孤立型丘滩

（*X*，*Y*，*Z* 分别代表三维空间的不同方向。）

力弱，坡度较陡则水动力强。海平面升降与古地貌的配置关系决定了可容纳空间的大小。因此，古地貌及其控制下的水动力条件，与海平面变化共同决定了丘滩沉积速率与可容纳空间的相对关系（即相对水深），进而控制丘滩的发育、类型及演化过程。通过恢复沉积古地貌并结合海平面变化分析，可评价不同地区丘滩类型及演化控制因素。由此可见，沉积古地貌恢复对丘滩分布表征具有重要意义。

古地貌的形成主要有2种机制：①构造活动期区域应力作用形成的区域古地貌；②稳定构造背景下差异沉积作用形成的局部古地貌。如前所述，灯四段沉积期研究区发育稳定的碳酸盐台地，其沉积古地貌主要为灯三段海侵作用填平补齐后的产物。本文在对研究区灯四^{1}小层顶、底面开展时间域地震层位解释追踪的基础上，利用井数据约束得到2个层面的深度域构造面，通过计算2个层面的深度差，获得灯四^{1}小层的平面沉积厚度。已有研究表明，对于以丘滩为主的碳酸盐岩等时地质体，其横向厚度差异可近似反映沉积古地貌的相对高低，即等时地质体厚度越大，古地貌相对地势越高[54-55]。基于此，本文以灯四段底面为沉积古地貌相对高程基准面，认为灯四^{1}小层厚值区反映沉积古地貌相对较高，薄值区则反映古地貌相对较低。需要说明的是，受资料条件限制，在不考虑沉降速率、沉积速率等因素的情况下，单纯利用地层厚度无法得到可靠的沉积古地貌绝对高程，厚度差异仅能在一定程度上反映古地貌的相对高低。

沉积古地貌恢复结果表明，高磨地区灯四段沉积前不同区块的地貌差异较大。南部高石梯区块的地貌整体高于北部磨溪区块，最大相对高程差达50 m，中部被条带状沟槽所分隔（图8）。高石梯区块整体地貌呈连片状隆起，西北部地势较高，向东、南方向逐渐降低，平均相对高程差约为36 m。磨溪区块整体地貌较低，局部发育孤立状高地貌隆起，北部地势相对较高且连续性更好，平均相对高程差约为21 m。

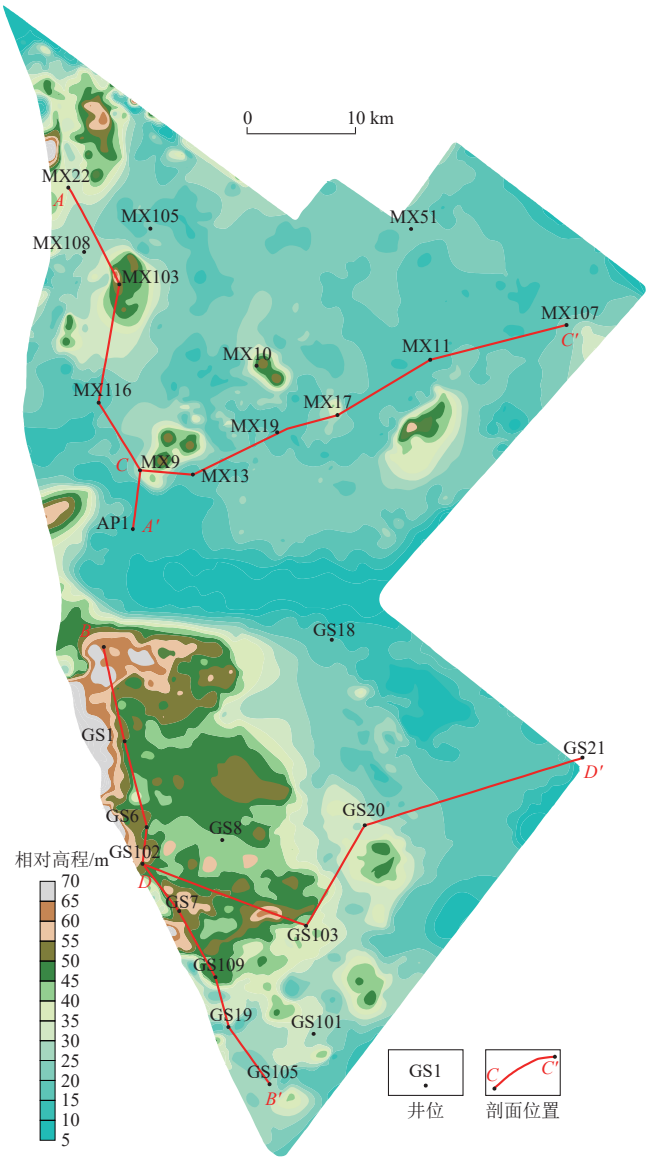


图8 四川盆地高磨地区灯四段沉积古地貌

Fig. 8 Sedimentary paleogeomorphology of the Deng 4 Member, Gaomo area, Sichuan Basin

4.2 平面厚度表征

本文基于108口井常规测井及成像测井资料，开展了单井丘滩的识别与划分，并结合沉积古地貌插值得到灯四段各小层丘滩平面厚度分布。灯四^{1}小层丘滩厚度与沉积古地貌对应良好，呈局部高值特征，主要分布在高石梯区块北部，反映沉积古地貌差异大，受地貌影响，丘滩分布较局限（图9a）。灯四^{2}小层中，研究区西侧台缘带丘滩厚度均一化特征明显，区块间厚度差异较小（图9b），表明台缘带丘滩普遍发育，沉积古地貌差异减小；东侧台内丘滩的厚值区呈孤立土豆状分布。灯四^{3}小层丘滩厚度分布与灯四^{2}小层趋势基本一致（图9c），台缘带高石梯与磨溪区块的厚度差异较小，而台内丘滩厚度连续性较灯四^{2}小层有所改善。

4.3 地震相分析

在沉积古地貌和丘滩平面厚度分布刻画的基础上，采用波形聚类方法开展丘滩地震相分析，以更准确地预测丘滩分布[61-63]。地震波形是岩性和物性等因素的综合反映，既取决于丘滩的原始结构，也受后期成岩作用改造的影响。前人研究表明，丘滩作为研究区储层形成的物质和结构基础，虽经历成岩作用，但储层发

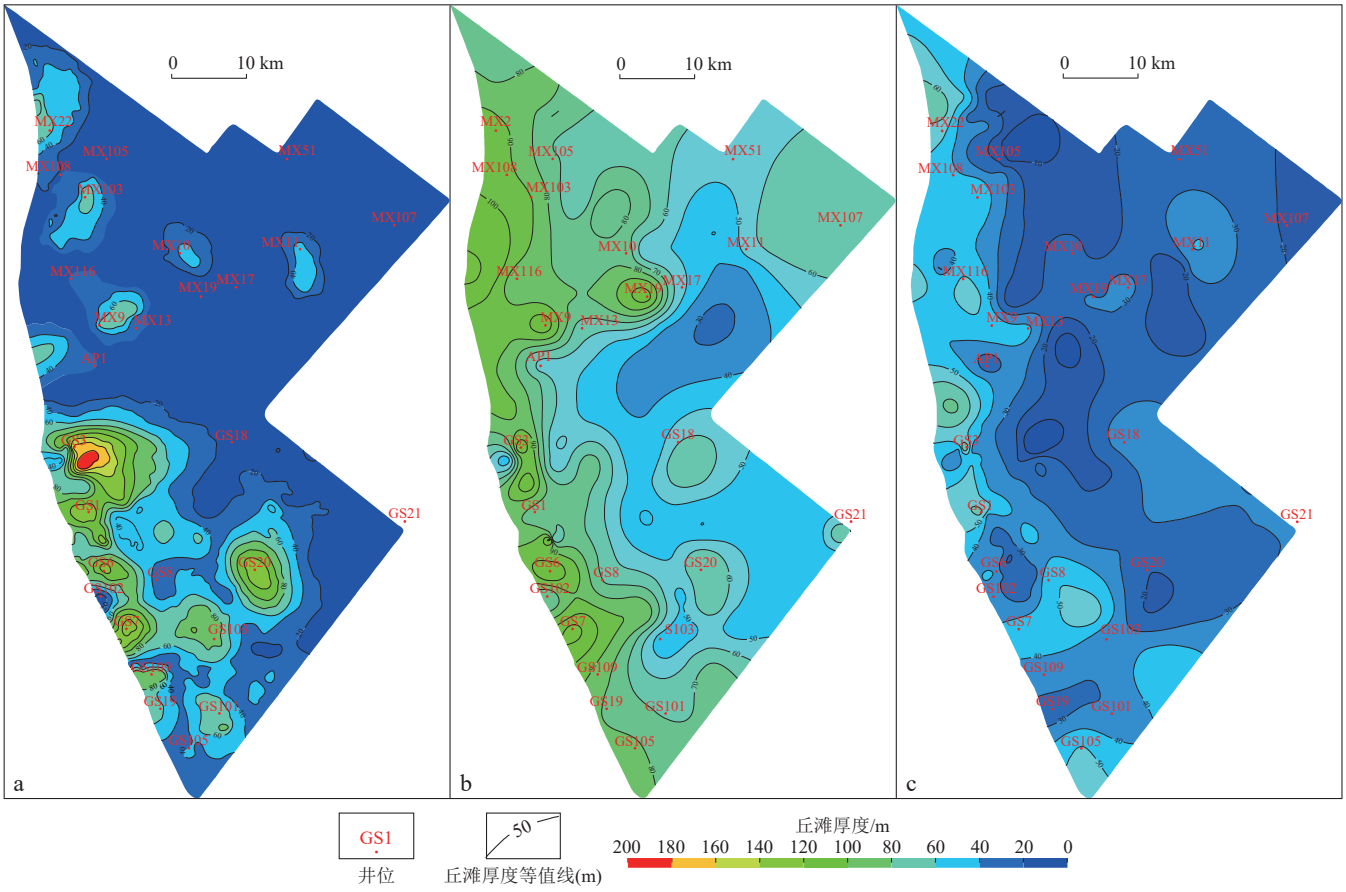


图9　四川盆地高磨地区灯四段各小层丘滩厚度平面分布等值线图

Fig. 9　Contour maps of mound-shoal thickness across individual sublayers of the Deng 4 Member, Gaomo area, Sichuan Basin

a. 灯四^{1}小层；b. 灯四^{2}小层；c. 灯四^{3}小层

育仍受控于丘滩及其沉积微相，储层的地震响应可在一定程度上反映丘滩及沉积微相类型。因此，对波形进行合理有效地分类，可明确地震相变化规律，进而指导丘滩分布预测。

地震相分析的总体思路是依据研究区沉积复杂程度，设置不同波形分类数进行多次尝试，优选平面效果与地质认识最为接近的波形聚类结果。此外，可分析单井解释同类型沉积相波形聚类结果的分布特征，利用井数据验证结果的相对合理性。需要指出的是，波形聚类通常按层位进行分析，井点处某层位的波形结果是唯一的，与沉积微相划分结果不具有严格对应性，但能够反映整体沉积响应特征，类似优势相的概念。此外，由前文分析可知，基于波形聚类的丘滩地震相预测结果仍具有一定不确定性，需结合单井解释结果、丘滩平面厚度以及沉积古地貌等多方面因素综合分析，以降低地震预测的不确定性。

本文对第5—第8类波形分类数进行了试验。当波形数为6时，聚类结果的平面特征与地质认识最为接近，特别是灯四^{1}小层波形聚类结果与沉积古地貌分布特征对应较好。此外，统计不同小层优势相为丘滩的典型井的波形聚类结果发现：当波形数为6时，单井聚类结果相对集中于第1类和第2类；而波形数为5，7和8时，丘滩相井的波形类型分布分散，涵盖第1类—第8类，集中度较低，表明波形数6的分类结果更为合理。因此，优选波形数6对3个小层的丘滩沉积开展波形聚类分析。

波形聚类结果表明，研究区灯四段各小层发育6类波形，其中红色和黄色2类波形可较好地反映丘滩分布，其余4类波形主要代表台坪沉积。波形聚类结果与沉积古地貌具有对应关系，在灯四^{1}小层的磨溪区块、高石梯区块台内及2个区块间低洼地带表现得尤为明显：红色和黄色2类波形对应沉积古地貌相对高部位，其余4类波形对应相对低部位（图8，图10a）。统计显示，灯四^{1}小层红色和黄色2类波形的井均位于沉积古地貌相对高程大于25 m的区域，而其余4类波形则主要分布于相对高程小于25 m的区域，如台缘带GS1井（相对高程50 m）为红色波形，台内GS18井（相对高程16 m）为蓝绿色波形。波形聚类结果与丘滩平

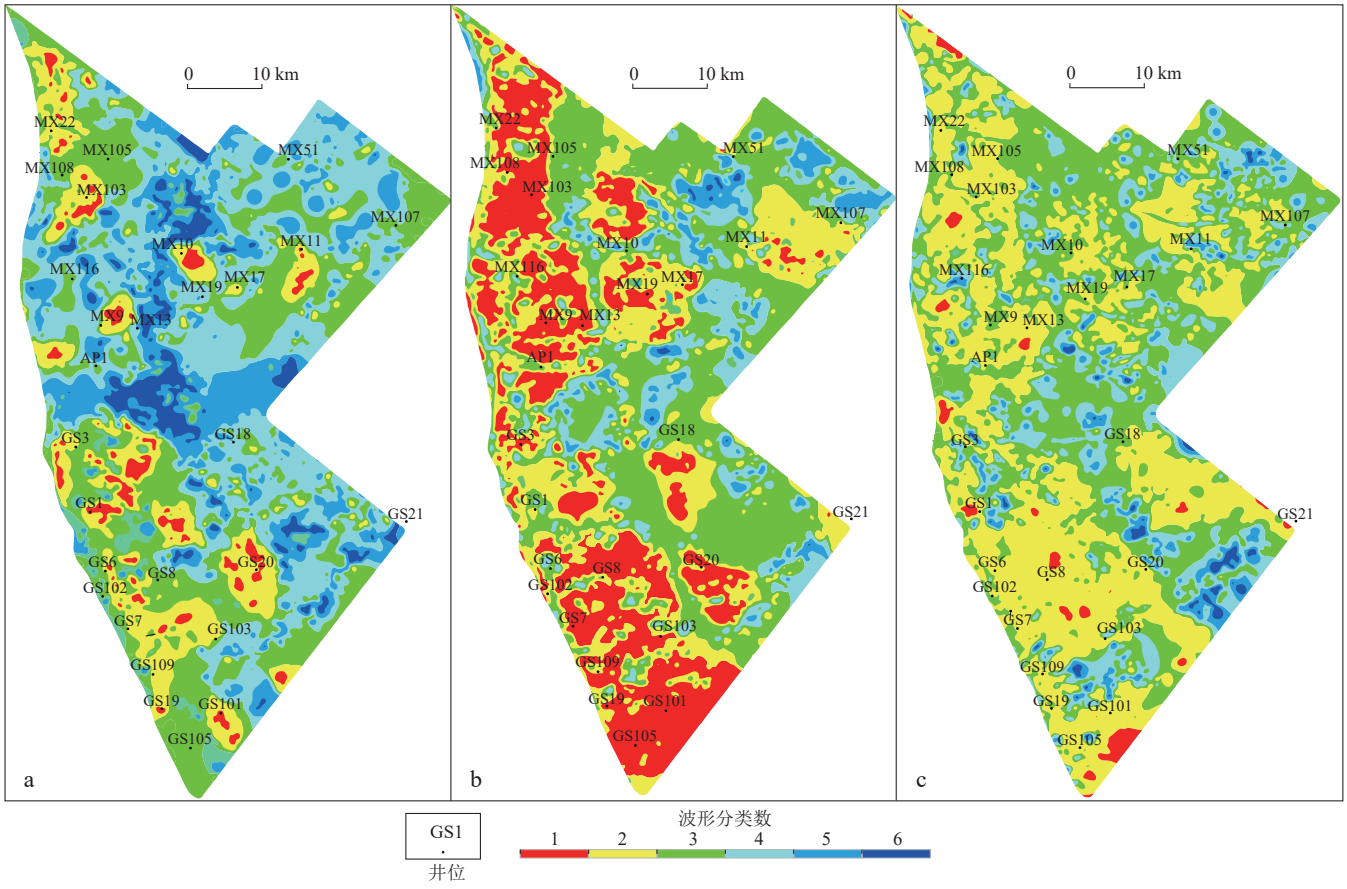


图10 四川盆地高磨地区灯四段各小层地震波形平面分布

Fig. 10 Plan-view distribution of seismic waveforms across individual sublayers of the Deng 4 Member, Gaomo area, Sichuan Basin

a. 灯四^{1}小层;b. 灯四^{2}小层;c. 灯四^{3}小层

面厚度分布亦具有明显对应关系:红色和黄色2类波形对应丘滩厚值区,其余4类波形对应丘滩欠发育区(图9,图10)。各小层波形与丘滩厚度对应关系存在差异:灯四^{1}小层红色和黄色波形基本位于丘滩厚度大于40 m的区域,其余波形中88%的井位于丘滩厚度小于40 m的区域;灯四^{2}小层红色和黄色波形对应丘滩厚度大于60 m的区域,其余波形对应丘滩厚度小于60 m的区域;灯四^{3}小层红色和黄色波形大致对应丘滩厚度大于30 m的区域,其他波形对应丘滩厚度小于30 m的区域。单井特征方面,台缘带GS1井各小层均以丘滩沉积为主,占比超90%,丘滩沉积厚度大,3个小层的丘滩厚度分别为132,77和61 m,各小层均为红色和黄色波形。台内GS18井各小层丘滩零散发育,占比为50%~60%,丘滩累计厚度较小,3个小层的丘滩厚度分别为18,51和35 m,各小层均为绿色和蓝绿色波形。

4.4 沉积演化特征

基于沉积古地貌、平面厚度及地震相平面分析,开展不同小层丘滩平面分布刻画。结合连井丘滩对比和地震相剖面分析,明确不同地区、不同时期的丘滩分布和叠置样式演化特征。灯四段与灯三段、灯四^{1}小层与灯四^{2}小层在岩性、电性和地球化学特征上均存在明显差异[46],反映这2个界面具有良好的等时性。井-震标定后,地震剖面上灯四段与灯三段的分界面对应强波峰反射,灯四^{1}与灯四^{2}小层的分界面位于灯四段中部强波峰之下、波峰与波谷之间。这2个界面同相轴特征明显,可追踪性强。鉴于丘滩为自下而上沉积的碳酸盐岩建隆,与碎屑岩河流相沉积明显不同,故采取地震层位"底拉平"的思路开展丘滩剖面叠置样式及演化特征分析。

灯四^{1}小层丘滩沉积受古地貌影响显著,不同区块丘滩的分布与叠置样式差异明显。台缘带高石梯区块北部及磨溪区块北部发育侧向迁移型丘滩(图11a),主要分布在GS3井—GS7井以及MX22井—MX116井附近,丘滩侧向延伸较远(图12b,d)。2个区块台缘带南部(GS105井和MX9井)发育孤立型丘滩,厚度较小(图11a;图12b,d)。台内灯四^{1}小层发育孤立型丘滩(图12f,h),如GS21井,丘滩隆起幅度较小,侧向延伸有限,部分丘滩因厚度较小在地震剖面上响应不明显

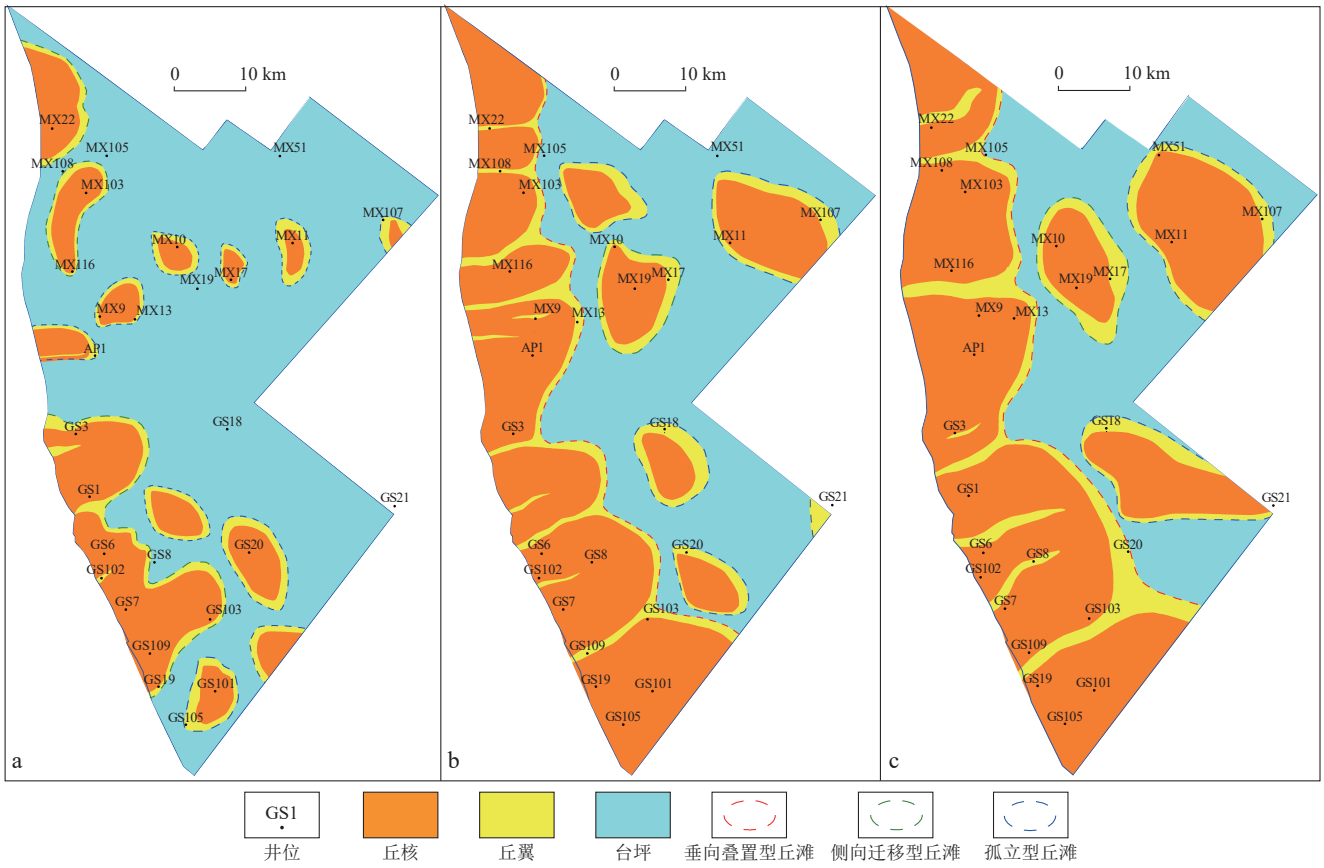


图 11　四川盆地高磨地区灯四段各小层丘滩平面分布

Fig. 11　Plan-view distribution of mound-shoals across individual sublayers of the Deng 4 Member, Gaomo area, Sichuan Basin

a. 灯四^{1}小层；b. 灯四^{2}小层；c. 灯四^{3}小层

（如 MX107 井）。

灯四^{2}小层沉积期，高石梯区块北部和磨溪区块北部丘滩向南迁移，西侧台缘带丘滩逐渐连片（图 11b），整体以垂向叠置型丘滩为主；东侧台内丘滩规模增大，部分具侧向迁移特征，但整体分布仍相对孤立。灯四^{3}小层沉积期，丘滩沉积范围进一步扩大、连续性增强，台缘带垂向叠置型丘滩在灯四^{2}小层基础上持续发育，台内部分丘滩呈连片状分布（图 11c），发育侧向迁移型和孤立型丘滩。灯四^{2}和灯四^{3}小层丘滩沉积范围扩大，不同区块丘滩叠置样式差异性减弱：台缘带高石梯区块和磨溪区块主要发育垂向叠置型丘滩，同相轴隆起特征明显、幅度较大、连续性较好（图 12a，c，e，g）；台内以孤立型丘滩为主（图 12e，g），局部发育侧向迁移型丘滩，丘滩规模明显小于台缘带。总体而言，研究区灯四段丘滩由早期相对孤立分布演化为晚期连片分布，丘滩沉积范围由西侧台缘带向东侧台内扩大。

灯四段 3 个小层丘滩分布及叠置样式的演化差异主要受海平面变化和丘滩沉积速率共同控制。灯四^{1}小层沉积期为持续海退背景（图 1c），台缘带高地貌丘滩沉积速率大但可容纳空间小，导致相对水深减小，以平行台缘带的侧向迁移型丘滩为主；低地貌及台内丘滩沉积速率小、可容纳空间充足，相对水深较大，发育孤立型丘滩。灯四^{2}和灯四^{3}小层沉积期为震荡海退背景（图 1c），台缘带可容纳空间变化速率与丘滩沉积速率大致相当，相对水深基本不变，主要发育垂向叠置型丘滩；台内丘滩沉积速率较小、可容纳空间充足，相对水深较大，发育孤立型丘滩。

5　丘滩控储作用

研究区灯四段储层经历准同生期溶蚀、表生期岩溶及埋藏期岩溶作用，丘滩作为储层发育的物质基础，较台坪和潟湖更有利于溶蚀改造。本文选取四川盆地宁强胡家坝、南江杨坝和峨边先锋剖面及高磨地区 GS102、GS7、MX108 和 MX51 井灯四段样品 90 块，开展不同叠置样式的丘滩储集性能差异研究。

在丘滩沉积过程中，海平面周期性升降导致丘滩

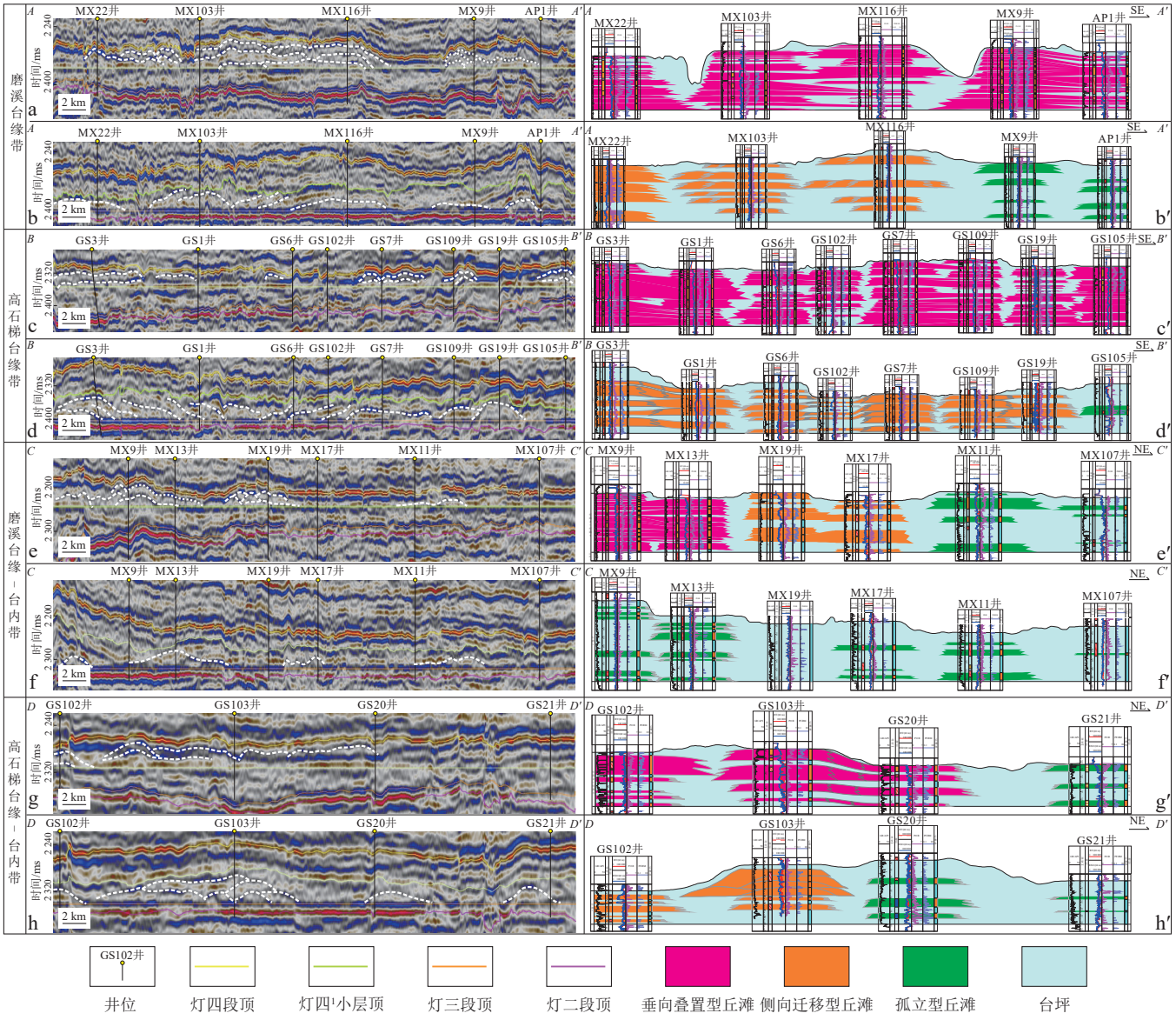


图12 四川盆地高磨地区灯四段丘滩叠置样式地震剖面(a—h)及连井剖面(a′—h′)(剖面位置见图8)

Fig. 12 Seismic profiles (a—h) and cross-well correlation profiles (a′—h′) showing stacking architectures of mound-shoal complexes in the Deng 4 Member, Gaomo area, Sichuan Basin (see Fig. 8 for the profile locations)

a,a′. 灯四^{2}+灯四^{3}小层;b,b′. 灯四^{1}小层;c,c′. 灯四^{2}+灯四^{3}小层;d,d′. 灯四^{1}小层;e,e′. 灯四^{2}+灯四^{3}小层;f,f′. 灯四^{1}小层;g,g′. 灯四^{2}+灯四^{3}小层;h,h′. 灯四^{1}小层

(图中白色虚线为丘滩反射地震解释界面。)

频繁暴露,易发生准同生期溶蚀,形成溶蚀孔隙。不同类型丘滩的孔隙度分析表明,垂向叠置型丘滩溶蚀程度较高,孔隙度为1.9%~9.3%,平均值为5.2%;侧向迁移型丘滩溶蚀程度中等,孔隙度为1.8%~7.8%,平均值为3.3%;孤立型丘滩溶蚀程度较弱,孔隙度为1.5%~5.5%,平均值为2.2%。

不同叠置样式的丘滩孔隙度与准同生期溶蚀程度差异主要取决于其暴露于大气淡水之下的难易程度。垂向叠置型丘滩沉积速率与可容空间变化速率相近,且位于古地貌高部位,海平面频繁升降时更易暴露接受多期高频大气淡水溶蚀,物性最佳;侧向迁移型丘滩沉积速率大于可容空间增大速率,虽相对水深减小,但存在向可容空间较大的低地貌区迁移过程,总体暴露程度不高,溶蚀作用较弱,物性中等;孤立型丘滩生长速率小、沉积水体深,难以接受大气淡水溶蚀,仅海平面大幅下降时可短暂暴露,溶蚀程度最低,物性最差。因此,垂向叠置型和侧向迁移型丘滩整体物性优于孤立型丘滩,储层主要发育于前2类丘滩。

综上所述,丘滩是高磨地区灯四段储层发育的基础。台缘带各小层垂向叠置型和侧向迁移型丘滩普遍

发育,特别是灯四^{2}和灯四^{3}小层以垂向叠置型丘滩为主,有利于溶蚀改造和储层发育,是最有利的开发区域;台内以孤立型丘滩为主,储层累计厚度小、物性差,开发潜力较低。

6　结论

1) 可容空间变化速率与丘滩沉积速率大致相当时,相对水深不变,以加积作用为主,形成垂向叠置型丘滩,地震同相轴呈多层平行、中-弱振幅、中-弱连续反射;可容空间增大速率小于丘滩沉积速率时,相对水深减小,以侧积或前积作用为主,形成侧向迁移型丘滩,地震同相轴呈叠瓦状、中-弱振幅、中-弱连续反射;可容空间增大速率大于丘滩沉积速率时,相对水深增加,发育孤立型丘滩,地震同相轴呈丘状弱反射。

2) 灯四段丘滩由早期相对孤立演化为晚期连片分布,沉积范围由台缘带向台内扩大。灯四^{1}小层持续海退,台缘带丘滩沉积速率大、可容空间小,相对水深减小,以平行台缘带侧向迁移型丘滩为主;低地貌和台内丘滩沉积速率小,可容空间充足,相对水深较大,发育孤立型丘滩。灯四^{2}和灯四^{3}小层沉积期震荡海退,台缘带可容空间变化速率与丘滩沉积速率大致相当,相对水深不变,以垂向叠置型丘滩为主;台内丘滩沉积速率较小、可容空间充足,相对水深较大,发育孤立型丘滩。

3) 垂向叠置型和侧向迁移型丘滩储层发育程度及物性优于孤立型丘滩,前两者平均孔隙度分别为5.2%和3.3%,为有利的开发对象。台缘带灯四^{2}和灯四^{3}小层以垂向叠置型丘滩为主,灯四^{1}小层发育侧向迁移型丘滩,均有利于溶蚀改造和储层发育,开发潜力较大;台内以孤立型丘滩为主,溶蚀作用弱、储层厚度小、孔隙度偏低,开发潜力较小。

参　考　文　献

[1] BURNE R V, MOORE L S. Microbialites: organosedimentary deposits of benthic microbial communities[J]. PALAIOS, 1987, 2(3): 241-254.

[2] RIDING R. Classification of microbial carbonates[M]//Riding R. Calcareous Algae and Stromatolites. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1991: 21-51.

[3] RIDING R. Microbialites, stromatolites, and thrombolites[M]// Reitner J, Thiel V. Encyclopedia of Geobiology. Dordrecht: Springer, 2011: 635-654.

[4] 周进高, 徐哲航, 黄世伟, 等. 碳酸盐岩沉积储层研究前沿与未来发展方向[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 929-953.
ZHOU Jingao, XU Zhehang, HUANG Shiwei, et al. Frontiers and trends in the research on carbonate sedimentology and reservoir geology[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 929-953.

[5] 吴亚生. 生物岩的分类[J]. 古地理学报, 2023, 25(3): 511-523.
WU Yasheng. Classification of biolith (biogenic rocks)[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2023, 25(3): 511-523.

[6] MANCINI E A, BENSON D J, HART B S, et al. Appleton field case study (Eastern Gulf Coastal Plain): Field development model for Upper Jurassic microbial reef reservoirs associated with paleotopographic basement structures[J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(11): 1699-1717.

[7] MANCINI E A, LLINÁS J C, PARCELL W C, et al. Upper Jurassic thrombolite reservoir play, northeastern Gulf of Mexico[J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(11): 1573-1602.

[8] MANCINI E A, PARCELL W C, AHR W M, et al. Upper Jurassic updip stratigraphic trap and associated smackover microbial and nearshore carbonate facies, eastern gulf coastal plain[J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(4): 417-442.

[9] TULL S J. The diversity of hydrocarbon habitat in Russia[J]. Petroleum Geoscience, 1997, 3(4): 315-325.

[10] 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.

[11] 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.
ZHANG Zili, 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.

[12] 杨磊磊, 魏国, 于志超, 等. 四川盆地灯影组多类型流体多期次改造作用下孔隙度演化的定量研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2024, 48(3): 15-26.
YANG Leilei, WEI Guo, YU Zhichao, et al. Quantitative study on porosity evolution under multi-stage reformation of multi-type fluids in Dengying Formation, Sichuan Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2024, 48(3): 15-26.

[13] 谭谦, 袁海锋, 王涛, 等. 深层白云岩储层溶蚀作用成因及其对储层的影响——以川中蓬莱地区震旦系灯影组二段为例[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(3): 809-826.
TAN Qian, YUAN Haifeng, WANG Tao, et al. Genesis and impact of dissolution in deep dolomite reservoirs: A case of the 2nd member of the Sinian Dengying Formation, Penglai area, central Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(3): 809-826.

[14] 杨跃明, 王文之, 文龙, 等. 四川盆地大型古隆起斜坡区微生物碳酸盐岩储层沉积演化特征与天然气规模成藏模式[J]. 天

然气工业，2021，41(3)：38-47.
YANG Yueming，WANG Wenzhi，WEN Long，et al. Sedimentary evolution characteristics and large-scale natural gas accumulation pattern of microbial carbonate in the slope area of major paleouplift，the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry，2021，41(3)：38-47.

[15] 夏钦禹，闫海军，徐伟，等. 川中地区磨溪区块震旦系顶面古岩溶微地貌及其发育特征[J]. 石油学报，2021，42(10)：1299-1309，1336.
XIA Qinyu，YAN Haijun，XU Wei，et al. Paleokarst microtopography of the Sinian top and its development characteristics in Moxi area，central Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica，2021，42(10)：1299-1309，1336.

[16] XIA Qinyu，YAN Haijun，XU Wei，et al. Paleo-karst zone and its control on reservoirs in the fourth member of the Sinian Dengying Formation in the Moxi area，central Sichuan Basin[J]. Carbonates and Evaporites，2022，37(3)：48.

[17] 夏钦禹，马新华，郭振华，等. 川中高石梯区块灯影组四段古岩溶带及内部储层分布特征[J]. 石油学报，2023，44(8)：1299-1312，1332.
XIA Qinyu，MA Xinhua，GUO Zhenhua，et al. Distribution characteristics of paleokarst zones and internal reservoirs in the fourth member of Dengying Formation in Gaoshiti Block，central Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica，2023，44(8)：1299-1312，1332.

[18] 田兴旺，彭瀚霖，王云龙，等. 川中安岳气田震旦系灯影组四段台缘—台内区储层差异及控制因素[J]. 天然气地球科学，2020，31(9)：1225-1238.
TIAN Xingwang，PENG Hanlin，WANG Yunlong，et al. Analysis of reservoir difference and controlling factors between the platform margin and the inner area of the fourth member of Sinian Dengying Formation in Anyue Gas Field，central Sichuan[J]. Natural Gas Geoscience，2020，31(9)：1225-1238.

[19] ZHOU Zikun，WANG Xingzhi，YANG Xiyan，et al. Multi-factor evaluation of deep karst dolomite reservoir based on paleogeomorphological reconstruction，a case study from the 4th member of the Dengying formation in the central Sichuan Basin，China[J]. Frontiers in Earth Science，2022，10：930269.

[20] DONG Shuyi，FU Meiyan，SONG Rongcai，et al. Diagenesis and reservoir quality of Neoproterozoic dolomitized microbialites following multi-stage diagenetic fluid activity：A case study of the Sinian Dengying Formation，China[J]. Frontiers in Earth Science，2023，11：1181863.

[21] BOSENCE D W J，BRIDGES P H. A review of the origin and evolution of carbonate mud-mounds[M]//MONTY C L V，BOSENCE D W J，BRIDGES P H，et al. Carbonate Mud-Mounds：Their Origin and Evolution. Oxford：Blackwell Science，1995：1-9.

[22] RIDING R. Structure and composition of organic reefs and carbonate mud mounds：Concepts and categories[J]. Earth-Science Reviews，2002，58(1/2)：163-231.

[23] BATHURST R G C. Genesis of stromatactis cavities between submarine crusts in Palaeozoic carbonate mud buildups[J]. Journal of the Geological Society，1982，139(2)：165-181.

[24] PRATT B R. Stromatolitic framework of carbonate Mud-Mounds[J]. Journal of Sedimentary Research，1982，52(4)：1203-1227.

[25] REITNER J，WILMSEN M，NEUWEILER F. Cenomanian/Turonian sponge microbialite deep-water hardground community (liencres，northern Spain)[J]. Facies，1995，32(1)：203-212.

[26] SCHLAGER W. Benthic carbonate factories of the Phanerozoic[J]. International Journal of Earth Sciences，2003，92(4)：445-464.

[27] PAS D，SILVA A C D，DHITAL M R，et al. Sedimentology of a Mid-Late Ordovician carbonate mud-mound complex from the Kathmandu nappe in central Nepal[J]. Journal of Asian Earth Sciences，2011，42(3)：452-467.

[28] TOSOLINI A M P，WALLACE M W，GALLAGHER S J. Shallow water mud-mounds of the Early Devonian Buchan Group，East Gippsland，Australia[J]. Sedimentary Geology，2012，281：208-221.

[29] PRATT B R. The origin，biota and evolution of deep-water mud-mounds[M]//MONTY C L V，BOSENCE D W J，BRIDGES P H，et al. Carbonate Mud-Mounds：Their Origin and Evolution. Oxford：Blackwell Science，1995：49-123.

[30] BRIDGES P H，P. GUTTERIDGE P，PICKARD N A H. The environmental setting of early carboniferous mud-mounds[M]//MONTY C L V，BOSENCE D W J，BRIDGES P H，et al. Carbonate Mud-Mounds：Their Origin and Evolution. Oxford：Blackwell Science，1995：171-190.

[31] KRAUSE F F，SCOTESE C R，NIETO C，et al. Paleozoic stromatactis and zebra carbonate mud-mounds：Global abundance and paleogeographic distribution[J]. Geology，2004，32(3)：181-184.

[32] 李安鹏，高达，胡明毅，等. 川中地区灯影组四段微生物岩沉积模式及主控因素[J]. 沉积学报，2023，41(4)：1080-1096.
LI Anpeng，GAO Da，HU Mingyi，et al. Deposition model and main factors controlling depositional processes for microbialites in the fourth member，Dengying Formation，central Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica，2023，41(4)：1080-1096.

[33] 李凌，谭秀成，曾伟，等. 四川盆地震旦系灯影组灰泥丘发育特征及储集意义[J]. 石油勘探与开发，2013，40(6)：666-673.
LI Ling，TAN Xiucheng，ZENG Wei，et al. Development and reservoir significance of mud mounds in Sinian Dengying Formation，Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development，2013，40(6)：666-673.

[34] 徐哲航，兰才俊，杨伟强，等. 四川盆地震旦系灯影组微生物丘沉积演化特征[J]. 大庆石油地质与开发，2018，37(2)：15-25.
XU Zhehang，LAN Caijun，YANG Weiqiang，et al. Sedimentary and evolutionary characteristics of sinian Dengying-Formation microbial mound in Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing，2018，37(2)：15-25.

[35] 王文之，杨跃明，文龙，等. 微生物碳酸盐岩沉积特征研究——以四川盆地高磨地区灯影组为例[J]. 中国地质，2016，

43(1): 306-318.
WANG Wenzhi, YANG Yueming, WEN Long, et al. A study of sedimentary characteristics of microbial carbonate: A case study of the Sinian Dengying Formation in Gaomo area, Sichuan Basin [J]. Geology in China, 2016, 43(1): 306-318.

[36] 郭恒玮, 伏美燕, 宋荣彩, 等. 川中高石梯地区灯四段藻丘类型与沉积模式[J]. 沉积学报, 2022, 40(1): 217-228.
GUO Hengwei, FU Meiyan, SONG Rongcai, et al. Algal type and sedimentary model of the 4th member, Dengying Formation in the Gaoshiti area of Chuanzhong [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2022, 40(1): 217-228.

[37] 徐欣, 胡明毅, 高达. 磨溪-高石梯地区灯影组四段微生物岩沉积特征及主控因素[J]. 中国海上油气, 2018, 30(2): 25-34.
XU Xin, HU Mingyi, GAO Da. Sedimentary characteristics and main control factors for microbialite of the fourth Member of Dengying Formation in Moxi-Gaoshiti area, central Sichuan Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(2): 25-34.

[38] 陈尘, 曾伟, 金民东, 等. 川北地区灯影组灰泥丘沉积特征及储集性[J]. 天然气技术与经济, 2014, 8(3): 23-28.
CHEN Chen, ZENG Wei, JIN Mindong, et al. Sedimentary features and reservoir property of mud mound in Dengying Formation, northern Sichuan Basin [J]. Natural Gas Technology and Economy, 2014, 8(3): 23-28.

[39] 兰才俊, 徐哲航, 马肖琳, 等. 四川盆地震旦系灯影组丘滩体发育分布及对储层的控制[J]. 石油学报, 2019, 40(9): 1069-1084.
LAN Caijun, XU Zhehang, MA Xiaolin, et al. Development and distribution of mound-shoal complex in the Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin and its control on reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(9): 1069-1084.

[40] 王兴志, 穆曙光, 方少仙, 等. 四川资阳地区灯影组滩相沉积及储集性研究[J]. 沉积学报, 1999, 17(4): 578-583.
WANG Xingzhi, MU Shuguang, FANG Shaoxian, et al. The bank facies deposits and the reservoir characteristics in Dengying Formation, Ziyang Sichuan [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(4): 578-583.

[41] 徐哲航, 兰才俊, 郝芳, 等. 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[J]. 古地理学报, 2020, 22(2): 235-250.
XU Zhehang, LAN Caijun, HAO Fang, et al. Difference of mound-bank complex reservoir under different palaeogeographic environment of the Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2020, 22(2): 235-250.

[42] 徐哲航, 兰才俊, 马肖琳, 等. 四川盆地震旦系灯影组丘滩体储层沉积模式与物性特征[J]. 地球科学, 2020, 45(4): 1281-1294.
XU Zhehang, LAN Caijun, MA Xiaolin, et al. Sedimentary models and physical properties of mound-shoal complex reservoirs in Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin[J]. Earth Science, 2020, 45(4): 1281-1294.

[43] 朱讯, 徐伟, 李菡韵, 等. 四川盆地高石梯—磨溪区块灯四段沉积相变对岩溶储层发育影响[J]. 天然气勘探与开发, 2018, 41(3): 51-57.
ZHU Xun, XU Wei, LI Hanyun, et al. Effects of sedimentary facies change on development of karst reservoirs in Dengying 4 member, Gaoshiti-Moxi Block, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2018, 41(3): 51-57.

[44] 罗冰, 周刚, 马奎, 等. 四川盆地德阳—安岳裂陷西侧震旦系灯四段储层特征及成藏主控因素[J]. 岩性油气藏, 2025, 37(5): 49-58.
LUO Bing, ZHOU Gang, MA Kui, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors for hydrocarbon accumulation of the fourth member of Sinian Dengying Formation in the west side of Deyang-Anyue Rift, Sichuan Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2025, 37(5): 49-58.

[45] 汪泽成, 姜华, 陈志勇, 等. 中上扬子地区晚震旦世构造古地理及油气地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 884-897.
WANG Zecheng, JIANG Hua, CHEN Zhiyong, et al. Tectonic paleogeography of Late Sinian and its significances for petroleum exploration in the middle-upper Yangtze region, South China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 884-897.

[46] 赵文智, 王小芳, 王鑫, 等. 四川盆地震旦系灯影组地层厘定与岩相古地理特征[J]. 古地理学报, 2022, 24(5): 852-870.
ZHAO Wenzhi, WANG Xiaofang, WANG Xin, et al. Stratigraphic sequence re-determination and lithofacies palaeogeographical characteristics of the Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2022, 24(5): 852-870.

[47] SONG Jinmin, JIN Xin, LUO Zhong, et al. Depositional model of the Member Deng-2 marginal microbial mound-bank complex of the Dengying Formation in the southwestern Sichuan Basin, SW China: Implications for the Ediacaran microbial mound construction and hydrocarbon exploration [J]. Petroleum Science, 2024, 21(2): 806-822.

[48] 文龙, 胡明毅, 罗冰, 等. 四川盆地德阳-安岳裂陷槽两侧灯影组台缘带结构特征和沉积相模式[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(2): 490-504.
WEN Long, HU Mingyi, LUO Bing, et al. Structural architecture and sedimentary facies models of the Dengying Formation platform margin belts along the flanks of the Deyang-Anyue rift trough, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(2): 490-504.

[49] 杨雨, 汪泽成, 文龙, 等. 扬子克拉通西北缘震旦系油气成藏条件及勘探潜力[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(2): 238-248.
YANG Yu, WANG Zecheng, WEN Long, et al. Sinian hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential at the northwest margin of the Yangtze region, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(2): 238-248.

[50] 陈明思, 张本健, 李智武, 等. 四川盆地及周缘震旦系灯影组岩性—碳同位素地层划分及意义[J]. 古地理学报, 2023, 25(6): 1347-1363.
CHEN Mingsi, ZHANG Benjian, LI Zhiwu, et al. Lithol and carbon isotopic stratigraphic division and its sighificance of the Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin and surrounding area

[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2023, 25(6): 1347-1363.

[51] 罗文军, 徐伟, 朱正平, 等. 四川盆地高石梯地区震旦系灯影组四段硅质岩成因及地质意义[J]. 天然气勘探与开发, 2019, 42(3): 1-9.
LUO Wenjun, XU Wei, ZHU Zhengping, et al. Origin of siliceous rocks in Sinian Dengying 4 Member, Gaoshiti area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2019, 42(3): 1-9.

[52] 罗贝维, 魏国齐, 杨威, 等. 四川盆地晚震旦世古海洋环境恢复及地质意义[J]. 中国地质, 2013, 40(4): 1099-1111.
LUO Beiwei, WEI Guoqi, YANG Wei, et al. Reconstruction of the late Sinian paleo-ocean environment in Sichuan Basin and its geological significance[J]. Geology in China, 2013, 40(4): 1099-1111.

[53] 谭磊, 刘宏, 陈康, 等. 川中高磨地区震旦系灯影组三、四段层序沉积与储集层分布[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(5): 871-883.
TAN Lei, LIU Hong, CHEN Kang, et al. Sequence sedimentary evolution and reservoir distribution in the third and fourth members of Sinian Dengying Formation, Gaomo area, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(5): 871-883.

[54] 文龙, 王文之, 张健, 等. 川中高石梯-磨溪地区震旦系灯影组碳酸盐岩岩石类型及分布规律[J]. 岩石学报, 2017, 33(4): 1285-1294.
WEN Long, WANG Wenzhi, ZHANG Jian, et al. Classification of Sinian Dengying Formation and sedimentary evolution mechanism of Gaoshiti-Moxi area in central Sichuan Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(4): 1285-1294.

[55] 杨威, 魏国齐, 谢武仁, 等. 四川盆地绵竹—长宁克拉通内裂陷东侧震旦系灯影组四段台缘丘滩体成藏特征与勘探前景[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1174-1184.
YANG Wei, WEI Guoqi, XIE Wuren, et al. Hydrocarbon accumulation and exploration prospect of mound-shoal complexes on the platform margin of the fourth member of Sinian Dengying Formation in the east of Mianzhu-Changning intracratonic rift, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1174-1184.

[56] 谷明峰, 朱茂, 梁锋, 等. 四川盆地磨溪地区灯四段前积体产状定量解释及其应用[J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(4): 853-868.
GU Mingfeng, ZHU Mao, LIANG Feng, et al. Quantitative interpretation and application of progradational reflection in the fourth member of Dengying Formation in the Moxi area, Sichuan Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(4): 853-868.

[57] 张君龙, 胡明毅, 冯子辉, 等. 塔里木盆地古城地区寒武系台缘丘滩体类型及与古地貌的关系[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 94-105.
ZHANG Junlong, HU Mingyi, FENG Zihui, et al. Types of the Cambrian platform margin mound-shoal complexes and their relationship with paleogeomorphology in Gucheng area, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 94-105.

[58] 张春林, 李剑, 陈鑫, 等. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系盐下古地貌恢复及其对滩体的控制作用[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(9): 1263-1271.
ZHANG Chunlin, LI Jian, CHEN Xin, et al. Palaeogeomorphological restoration of Ordovician subsalt and its controlling effect on beach bodies, eastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(9): 1263-1271.

[59] 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.

[60] 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.

[61] 徐海, 都小芳, 高君, 等. 基于波形聚类的沉积微相定量解释技术研究——以中东地区X油田为例[J]. 石油物探, 2018, 57(5): 744-755.
XU Hai, DU Xiaofang, GAO Jun, et al. Quantitative interpretation of sedimentary microfacies based on waveform clustering: A case study of X Oilfield, Middle East[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(5): 744-755.

[62] 谭磊, 刘宏, 唐昱哲, 等. 四川盆地龙女寺构造龙王庙组储层特征及地震响应[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(12): 1802-1813.
TAN Lei, LIU Hong, TANG Yuzhe, et al. Reservoir characteristics and seismic response of Longwangmiao Formation of Longnvsi structure in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(12): 1802-1813.

[63] 李哲宇, 刘宏, 谭磊, 等. 川中古隆起北斜坡地区龙王庙组颗粒滩分布规律及油气地质意义[J]. 天然气地球科学, 2025, 36(7): 1241-1257.
LI Zheyu, LIU Hong, TAN Lei, et al. Distribution patterns and petroleum geological implications of grain shoals in the Longwangmiao Formation in the northern slope area of Central Sichuan paleo-uplift[J]. Natural Gas Geoscience, 2025, 36(7): 1241-1257.

(编辑 张玉银)