

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

文 龙¹, 胡明毅², 罗 冰¹, 张本健¹, 杨宏宇², 周 刚¹, 刘艺妮², 王文芝¹

(1. 中国石油西南油气田公司, 四川 成都 610041; 2. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100)

摘要: 德阳-安岳裂陷槽灯影组台缘带是四川盆地天然气勘探开发的重要领域, 在裂陷槽东侧台缘带发现了安岳和蓬莱等特大型天然气田, 但裂陷槽西侧台缘带沉积特征以及裂陷槽两侧台缘带差异性研究较为薄弱, 制约了该区天然气勘探开发工作进程。综合利用钻井岩心、测井及三维地震资料, 系统分析了德阳-安岳裂陷槽两侧灯影组台缘带发育特征, 编制了关键时期岩相古地理图, 建立了德阳-安岳裂陷槽两侧台缘带沉积相模式。研究表明: ①晚震旦世灯影组沉积期德阳-安岳裂陷槽两侧台缘带主要发育台缘丘、台缘滩、台缘丘滩复合体以及丘(滩)间海亚相沉积, 裂陷槽内部为斜坡-盆地相沉积。②德阳-安岳裂陷槽两侧台缘带发育和演化特征存在明显差异。裂陷槽东侧台缘带受基底断裂控制呈陡坡垂向叠置结构, 横向迁移幅度小。裂陷槽西侧发育多级缓坡型台缘带, 台缘带横向迁移距离大。③岩相古地理图显示灯(灯影组)二段和灯四段沉积期台缘分布范围明显不同。灯二段沉积期台缘带主要沿成都—遂宁—资中一带呈环形分布。灯四段沉积期台缘带分布面积大, 裂陷槽西侧台缘带沿洪雅—井研—自贡一带呈南北向展布, 裂陷槽东侧台缘带沿盐亭—遂宁—磨溪一带呈南北向展布。德阳-安岳裂陷槽为“东陡西缓”和“东侧单级西侧多级”台缘带沉积相模式。

关键词: 岩相古地理; 沉积相模式; 灯影组; 台缘带; 德阳-安岳裂陷槽; 四川盆地

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Structural architecture and sedimentary facies models of the Dengying Formation platform margin belts along the flanks of the Deyang-Anyue rift trough, Sichuan Basin

WEN Long¹, HU Mingyi², LUO Bing¹, ZHANG Benjian¹, YANG Hongyu², ZHOU Gang¹, LIU Yini², WANG Wenzhi¹

(1. Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China)

Abstract: The platform margin belts of the Dengying Formation flanking the Deyang-Anyue rift trough represent a critical frontier for natural gas exploration and development in the Sichuan Basin. While giant gas fields, such as Anyue and Penglai, have been discovered along the eastern margin, the sedimentary characteristics of the western margin and the architectural disparities between the two flanks remain poorly understood, thereby constraining further exploration efforts in the region. By integrating core descriptions, well logs, and 3D seismic data, we systematically characterize the development of the Dengying Formation platform margins on both sides of the trough. Lithofacies paleogeographic maps were reconstructed for key intervals, and refined sedimentary facies models were established for the dual-flank system. As indicated by the research results (1) During the Late Sinian deposition of the Dengying Formation, the platform margins on both flanks primarily consisted of microbial mound, shoal, and mound-shoal complex facies, along with inter-mound/shoal subfacies, whereas the trough interior was dominated by slope-to-basin facies. (2) Distinct heterogeneities exist in the development and evolution of the platform margins. The eastern margin, controlled by basement faults, exhibits a steeply dipping, vertically stacked architecture with minimal lateral migration. In contrast,

收稿日期: 2025-07-23; 修回日期: 2025-09-23。

第一作者简介: 文龙(1977—), 男, 博士、高级工程师, 石油天然气地质勘探与技术管理。E-mail: wenlong@petrochina.com.cn。

通信作者简介: 胡明毅(1965—), 男, 教授、博士研究生导师, 碳酸盐岩储层沉积学和油气田勘探。E-mail: humingyi65@163.com。

基金项目: 国家科技重大专项(2025ZD1400402); 国家自然科学基金项目(42072171); 中国石油西南油气田分公司揭榜挂帅项目(XNSJS2022-180)。

the western margin is characterized by multi-stage, gently sloping geometries with significant lateral migration distances. (3) Lithofacies paleogeographic mapping reveals substantial spatial variations in platform margin distribution between the second (Deng 2) and fourth (Deng 4) members of the Dengying Formation. During the Deng-2 period, the platform margin followed a quasi-circular distribution along the Chengdu-Suining-Zizhong trend. During the Deng-4 period, the platform margins expanded significantly, with the western margin trending NS along the Hongya-Jingyan-Zigong area and the eastern margin extending NS along the Yanting-Suining-Moxi area. Overall, the Deyang-Anyue rift trough is characterized by a “steep-east vs. gentle-west” and “single-stage-east vs. multi-stage-west” sedimentary facies model.

Key words: lithofacies paleogeography, sedimentary facies model, Dengying Formation, platform margin belt, Deyang-Anyue rift trough, Sichuan Basin

引用格式: 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. DOI: 10. 11743/ogg20260209.

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. DOI: 10. 11743/ogg20260209.

四川盆地灯影组油气资源丰富, 勘探开发前景广阔, 目前已发现安岳和蓬莱等大型-特大型天然气田, 勘探实践表明四川盆地灯影组大型天然气藏的分布与德阳-安岳裂陷槽的形成及演化有密切联系。关于德阳-安岳裂陷槽的形成与演化过程, 已有诸多深入研究^[1-9]。目前大多数学者认为晚震旦世灯影组沉积期为裂陷初始形成期, 裂陷内发育槽盆相沉积, 裂陷槽两侧发育台地边缘相丘滩体, 控制了灯影组优质储层的形成与分布; 早寒武世梅树村组沉积期—筇竹寺组沉积期为裂陷发展期, 裂陷槽内充填厚度 50 ~ 100 m 的深水陆棚相泥质岩, 是优质烃源岩沉积期; 沧浪铺组沉积期为裂陷消亡期, 经填平补齐, 结束了克拉通内裂陷的演化历史, 裂陷槽内优质烃源岩与裂陷槽两侧台缘丘滩储层侧向对接构成了良好的油气运聚通道并形成了大型天然气藏。

尽管前人对德阳-安岳裂陷槽成因及形成演化过程进行了较为深入的研究, 但对裂陷槽两侧台缘带结构特征及其差异性缺乏深入研究。目前对裂陷东侧台缘带沉积特征研究较为深入, 对裂陷槽西侧台缘带沉积特征研究则较为薄弱, 对德阳-安岳裂陷槽两侧台缘带结构的差异性研究极为薄弱, 尚未建立德阳-安岳裂陷槽两侧台缘带精细的沉积相模式^[10-15], 因而制约了对该区有利储集相带分布预测和天然气勘探开发进程。本文以碳酸盐岩储层沉积学为理论指导, 基于最新钻井岩心观察, 结合 3D 地震资料精细地震相解释, 对晚震旦世灯影期德阳-安岳裂陷槽东、西两侧台缘带沉积特征和台缘结构的差异演化进行了研究, 建立了该区台缘带两侧沉积相模式, 研究成果可为该区下一步天然气勘探提供指导。

1 区域地质背景

1.1 研究区位置

德阳-安岳裂陷槽位于四川盆地中部, 呈近南北向展布, 北起绵阳, 经安岳延伸至宜宾, 总长度逾 400 km, 宽度为 30 ~ 80 km。其两侧为碳酸盐岩台地沉积, 构成灯影组“两隆夹一凹”的构造格局。本文通过重点解剖德阳-安岳裂陷槽东侧高石梯—磨溪井区与裂陷槽西侧大探 1 井、资探 1 井、资 1 井、资 5 井和金页 1 井等钻井资料, 结合测井和 3D 地震相综合分析, 对德阳-安岳裂陷槽两侧台缘带沉积特征开展了深入研究, 揭示了德阳-安岳裂陷槽台缘带差异演化过程(图 1)。

1.2 地层发育特征

四川盆地灯影组作为晚震旦世重要的碳酸盐岩沉积序列, 其地层厚度与沉积特征受德阳-安岳裂陷槽构造活动控制显著^[16]。灯影组自下而上划分为灯(灯影组)一段—灯四段, 裂陷槽内德阳—安岳一带地层厚度仅为 50 ~ 100 m, 与台缘带厚度 1 100 m 的巨厚沉积形成鲜明对比, 体现裂陷槽对古地貌和沉积发育特征的强烈控制。区域上, 灯一段以泥晶白云岩夹膏盐层为主, 厚度一般小于 100 m, 主要为局限台地环境; 灯二段发育厚层葡萄花边状白云岩、藻叠层白云岩和泥晶白云岩, 厚度范围在 450 ~ 550 m, 台地边缘丘滩沉积发育; 灯三段以泥岩和粉砂岩夹砂岩等碎屑岩沉积为主, 指示区域性海侵事件, 主要为一套陆棚

相沉积;灯四段以藻叠层白云岩和硅质白云岩为主,厚度范围在200~300 m,该时期台地边缘丘滩沉积发育(图1)。

1.3 构造沉积演化

四川盆地德阳-安岳裂陷槽形成于震旦纪桐湾运动Ⅱ幕末期,受Rodinia超大陆裂解引发的扬子板块拉张作用控制^[9-12],呈北宽缓、南窄陡的南北向展布,面积达 $6\times 10^4\text{ km}^2$ 。其构造-沉积演化历经灯影组沉积期拉张裂陷、寒武系早期充填至龙王庙组沉积期消亡,发育灯二段分布较为局限的“U”型槽盆和灯四段大面积分布贯通盆地的南北向槽盆,受桐湾运动多幕次隆升影响,灯影组内部及其与寒武系间均发育平行不整合面。裂陷槽内发育筇竹寺组厚层泥岩烃源岩。裂陷槽周缘台缘带发育灯影组厚层微生物白云岩储层,裂陷槽台缘带白云岩储层与裂陷槽内部烃源岩侧向配置,形成了安岳和蓬莱等天然气富集区。

2 灯影组沉积相类型及特征

2.1 台地边缘相

台地边缘相作为碳酸盐台地与深水盆地的关键过渡带,其形成受构造活动、海平面波动及水动力条件的综合控制。台地边缘相带一般位于构造-古地貌高位,水动力总体为中-高能条件。受古地貌和水动力条件控制,研究区台地边缘相带内部发育台缘丘、台缘滩、台缘丘滩复合体及丘(滩)间海亚相沉积等亚相^[17],其中微生物建造与颗粒沉积的交互作用对储层发育具有决定性意义。

2.1.1 台缘丘亚相

台缘丘亚相以微生物丘微相为主体,主要发育于灯二段与灯四段,形成于低能至间歇中-高能交替环境。其典型垂向序列由丘基、丘核与丘坪3个部分构

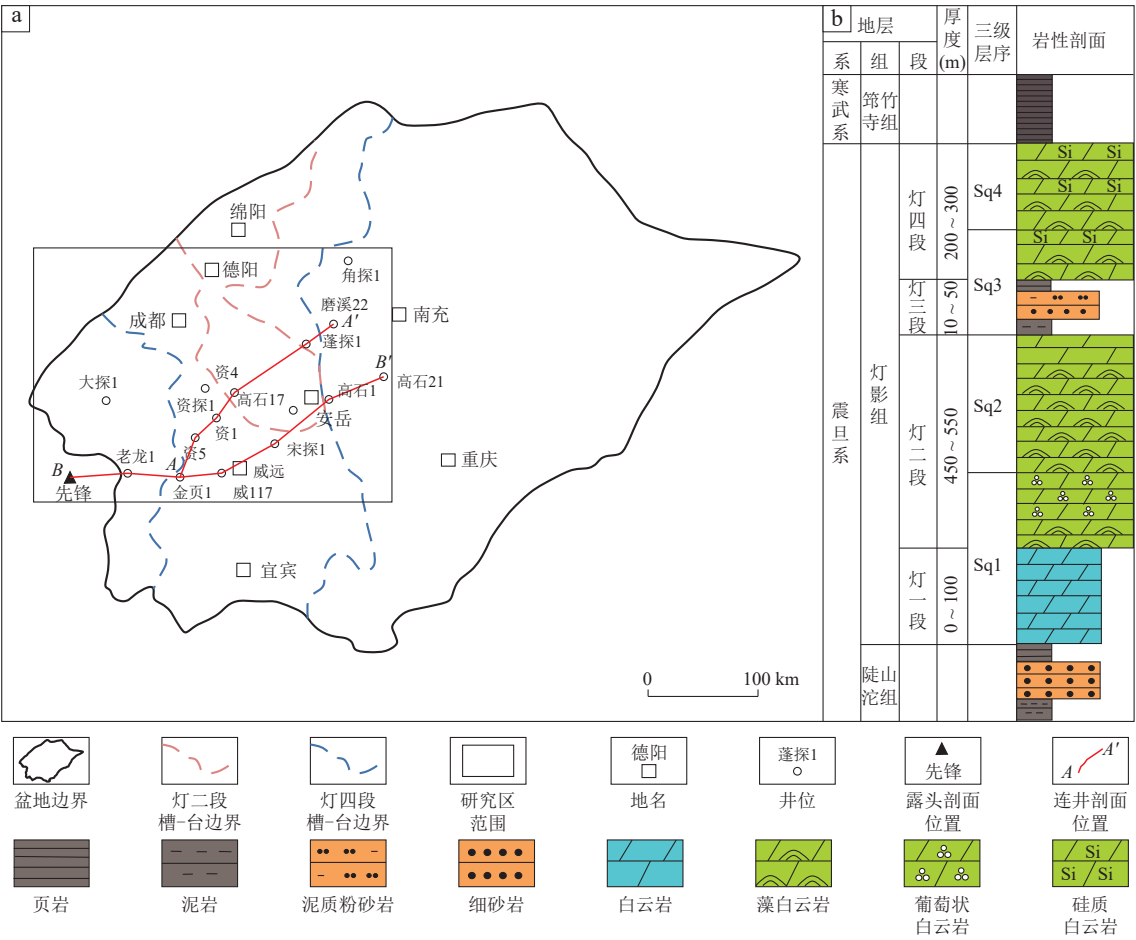


图1 四川盆地灯影期槽-台体系展布(a)及灯影组综合柱状图(b)

Fig. 1 Spatial distribution of the trough-platform system (a) and composite stratigraphic column of the Dengying Formation (b) in the Sichuan Basin

成:丘基由厚层泥晶白云岩或藻纹层泥晶白云岩构成,发育平行层理,反映初始稳定低能沉积环境;丘核以藻纹层白云岩、藻叠层白云岩和藻凝块白云岩沉积为主,微生物席通过黏结-捕获作用形成复杂的格架孔隙系统^[9-15],叠加准同生期溶蚀改造形成蜂窝状孔洞网络,构成储集性能最优单元(图2,图3,图4a—b);丘坪受波浪破碎作用影响,藻格架坍塌形成角砾状结构,孔隙连通性显著降低,标志着建造过程的终止(图3d)。台缘丘亚相具有低自然伽马值且低电阻率的测井响应特征,在地震上表现为丘状外形、内部中-低频率、中振幅以及弱连续反射的特征(图5)。

2.1.2 台缘滩亚相

台缘滩亚相以砂屑滩为主,发育于浪基面以上的

高能环境,水动力中等-强。高能滩体以分选良好的颗粒支撑结构为特征,抗压实性强(图4c,图6)。垂向上,滩核以亮晶胶结颗粒岩为主,向滩翼过渡为含泥质纹层的砂屑白云岩,滩间充填低能泥晶沉积,反映能量递变与相带迁移。台缘滩亚相具有中等自然伽马值、低声波时差和中等电阻率的测井响应特征。

2.1.3 台缘丘滩复合体亚相

丘滩复合体亚相优质储层发育,垂向呈现“丘基—丘核—颗粒滩”变化的结构,受海退—海侵旋回控制。测井曲线上自然伽马值呈“低—高一低”变化的特征,电阻率曲线呈箱型。储集空间以格架溶孔与粒间溶孔组合为主,早期生物格架孔与中期溶蚀孔洞的叠

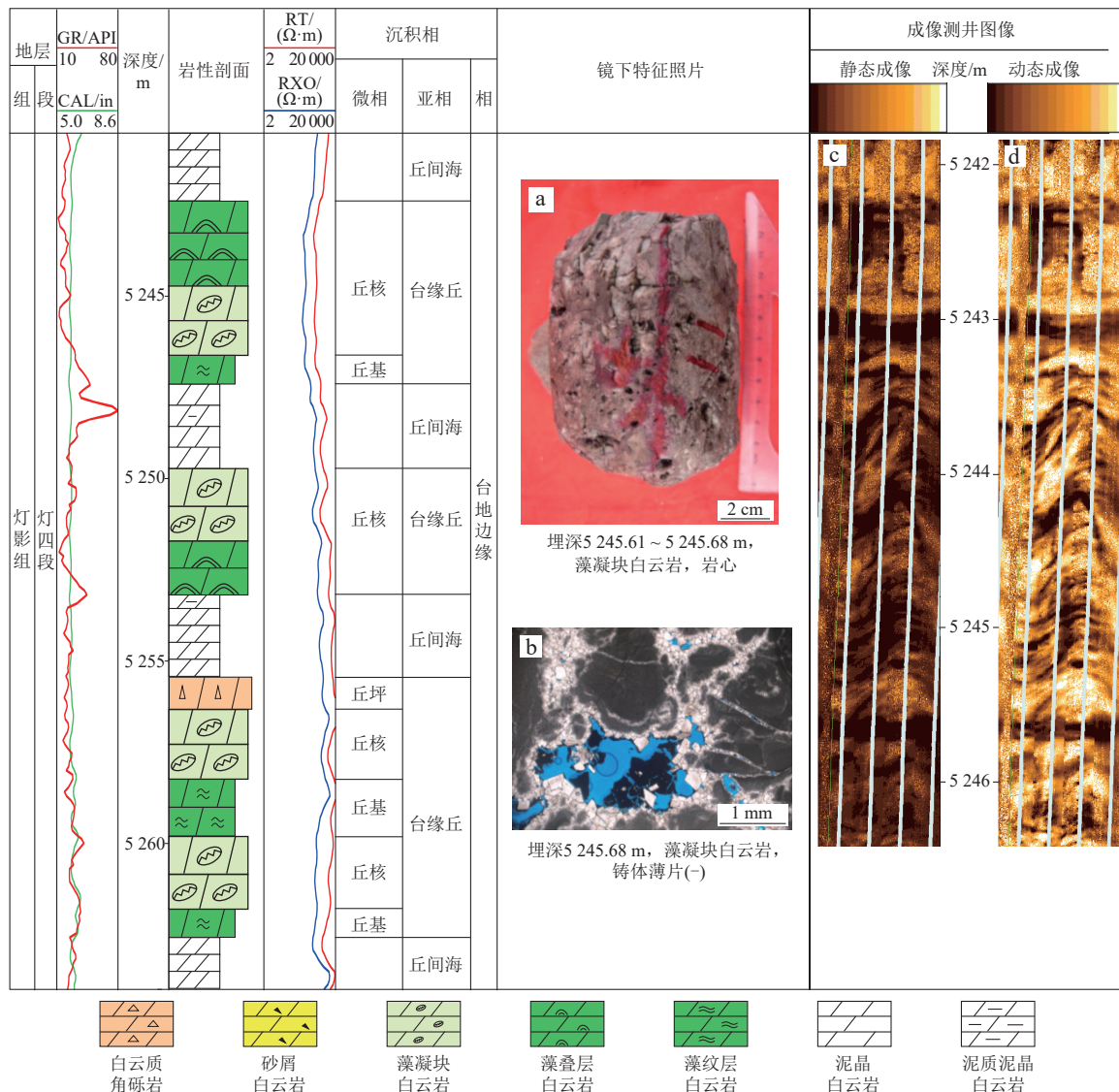


图2 四川盆地汉深1井灯影组台地边缘丘相沉积特征综合柱状图

Fig. 2 Composite stratigraphic section illustrating the sedimentary characteristics of the platform-margin mound facies in the Dengying Formation, well Hanshen-1, Sichuan Basin

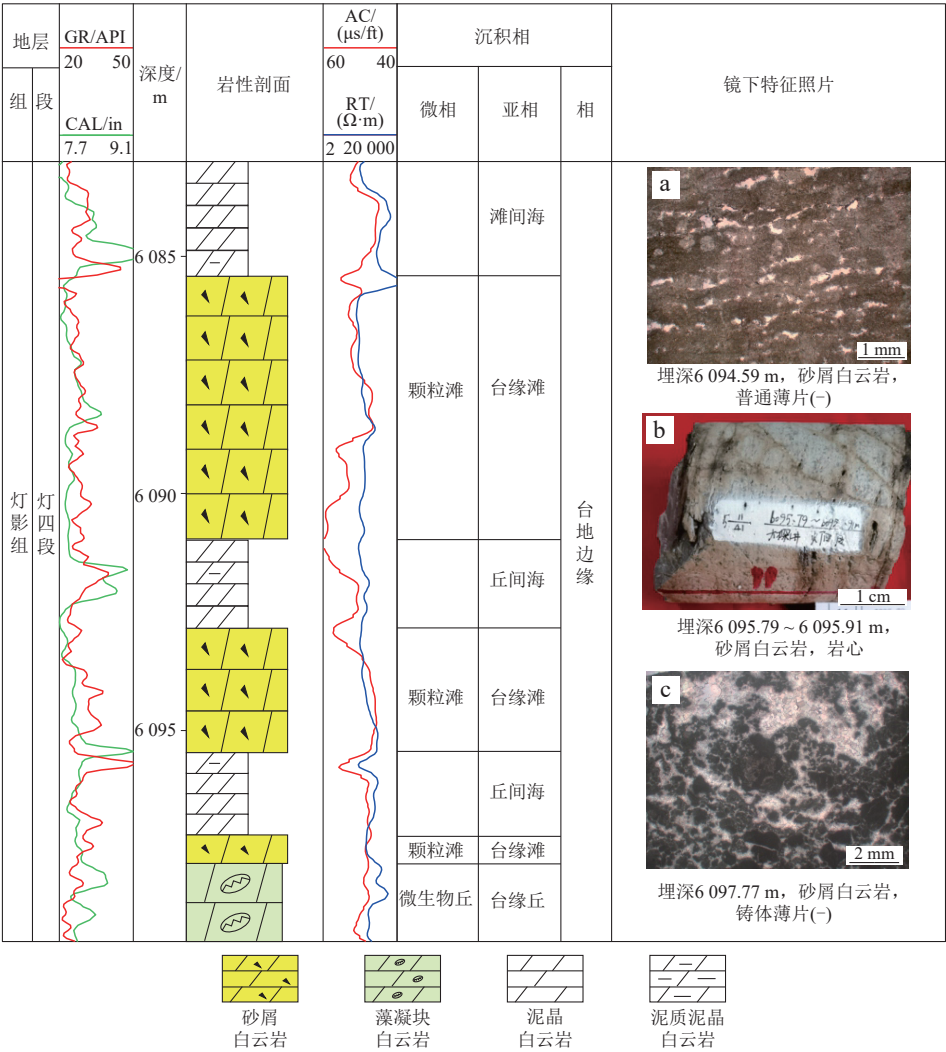


图3 四川盆地大探1井灯影组台地边缘滩相沉积特征综合柱状图

Fig. 3 Composite stratigraphic section illustrating the sedimentary characteristics of the platform-margin shoal facies in the Dengying Formation, well Datan-1, Sichuan Basin

加显著提升储集空间连通性,成为油气富集的重要载体。

2.1.4 丘(滩)间海亚相

丘(滩)间海亚相为丘或滩间低洼滞流环境,以细粒泥晶白云岩和硅质白云岩沉积为主,孔隙不发育,可见水平纹层构造(图3,图4f)。滩间海亚相具有高自然伽马值、高井径、高声波时差和高电阻率的测井响应特征(图7),地震上表现为中-强振幅、中-高频率和连续反射的特征(图5)。

2.2 局限台地相

作为碳酸盐岩台地的主要沉积单元之一,局限台地相主要分布于台地内部,包含台内丘、台内滩、台内丘滩复合体和潮坪等亚相。台内丘、滩规模较小,厚度

约2~6 m,岩性以泥晶白云岩、藻纹层白云岩和砂屑白云岩为主,常具有较高的膏盐含量和高泥质含量等特征。台内丘滩发育藻席纹层白云岩和砂屑白云岩(图7),台内微生物丘和颗粒滩发育规模较台缘带减小,潮坪亚相发育含膏盐的泥晶白云岩沉积。台内丘、滩亚相具有低自然伽马值、低声波时差和低电阻率的测井响应特征,成像测井上显示密集的暗色斑状特征(图7),在地震上表现为丘状外形、内部中振幅、弱连续反射的特征(图5)。

2.3 斜坡-盆地相

裂陷槽内部发育斜坡-盆地相,沉积厚度薄,以含泥质白云岩、含硅质泥晶白云岩和泥岩为主(图4g—i)。地震剖面上表现为低频连续反射(图5),与台缘带的弱连续反射形成鲜明对比。

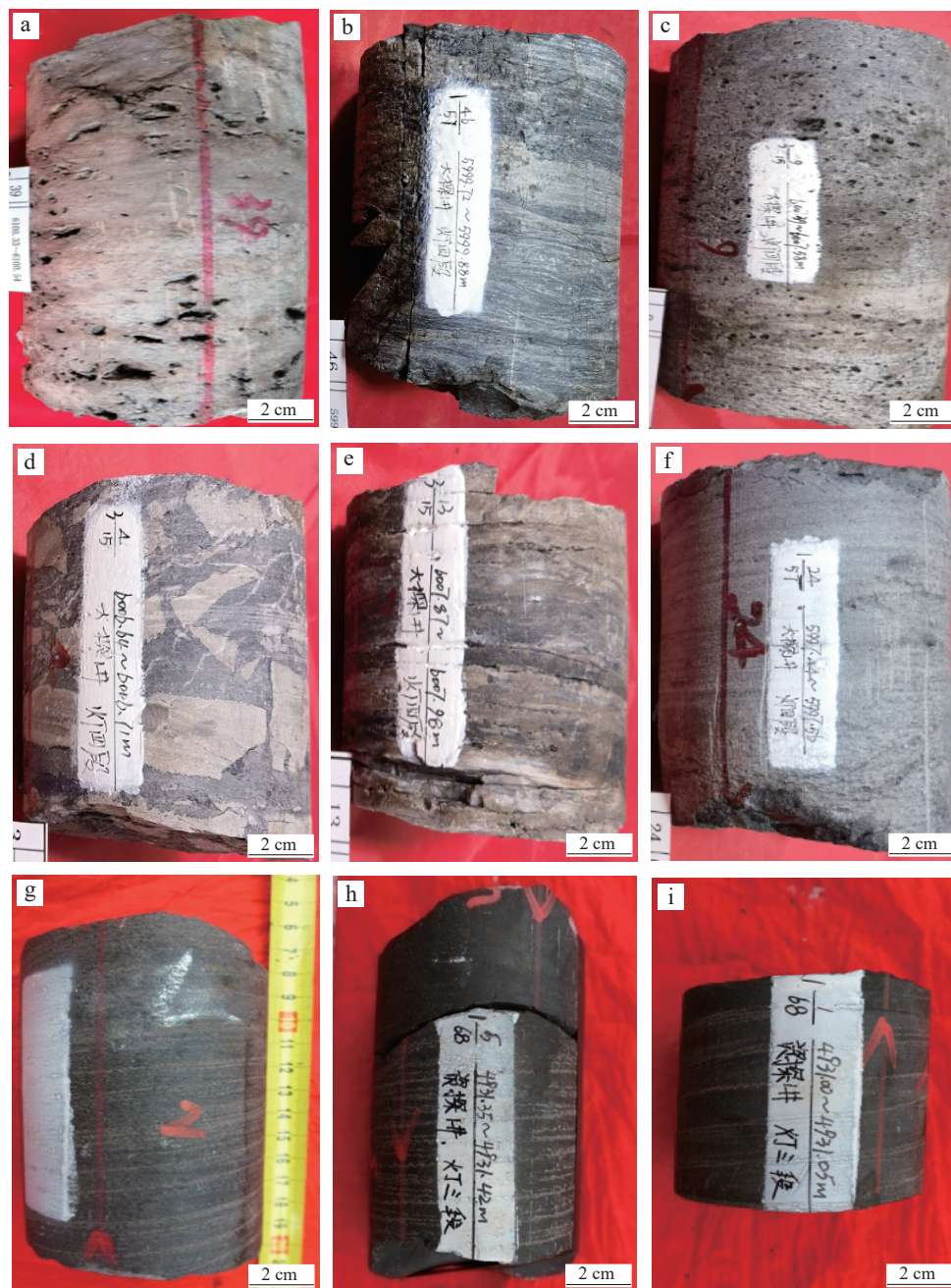


图4 四川盆地灯影组典型岩石类型岩心照片

Fig. 4 Core photographs showing representative lithotypes of the Dengying Formation, Sichuan Basin

- a. 藻凝块白云岩, 顺层溶蚀孔洞发育, 大探1井, 灯四段, 埋深 6 100.33 ~ 6 100.54 m; b. 藻纹层白云岩, 大探1井, 灯四段, 埋深 5 999.72 ~ 5 999.88 m; c. 砂屑白云岩, 针孔发育, 大探1井, 灯四段, 埋深 6 007.39 ~ 6 007.58 m; d. 白云质角砾岩, 角砾以凌角状为主, 大探1井, 灯四段, 埋深 6 006.64 ~ 6 006.71 m; e. 硅质白云岩, 大探1井, 灯四段, 埋深 6 007.87 ~ 6 007.98 m; f. 泥晶白云岩, 见水平纹层, 大探1井, 灯四段, 埋深 5 997.44 ~ 5 997.56 m; g. 泥质泥晶云岩, 资探1井, 埋深 4 931.50 ~ 4 931.60 m; h. 泥质泥晶云岩, 资探1井, 埋深 4 931.35 ~ 4 931.42 m; i. 泥质泥晶云岩, 资探1井, 埋深 4 931.00 ~ 4 931.05 m

3 裂陷槽两侧台缘带沉积特征

3.1 裂陷槽东侧陡坡叠置台缘带沉积特征

德阳-安岳裂陷槽东侧台缘带受基底断裂幕式活

动与裂陷槽差异沉降的强烈控制, 斜坡坡度陡, 垂向厚度大。其中, 断裂上盘主要发育斜坡沉积, 断裂下盘主要发育台缘带。

连井剖面 and 井-震结合的大剖面显示德阳-安岳裂陷槽东侧台缘带存在多期丘滩体叠置特征。灯二期, 以微生物丘垂向叠置为主, 丘核部位发育藻格架

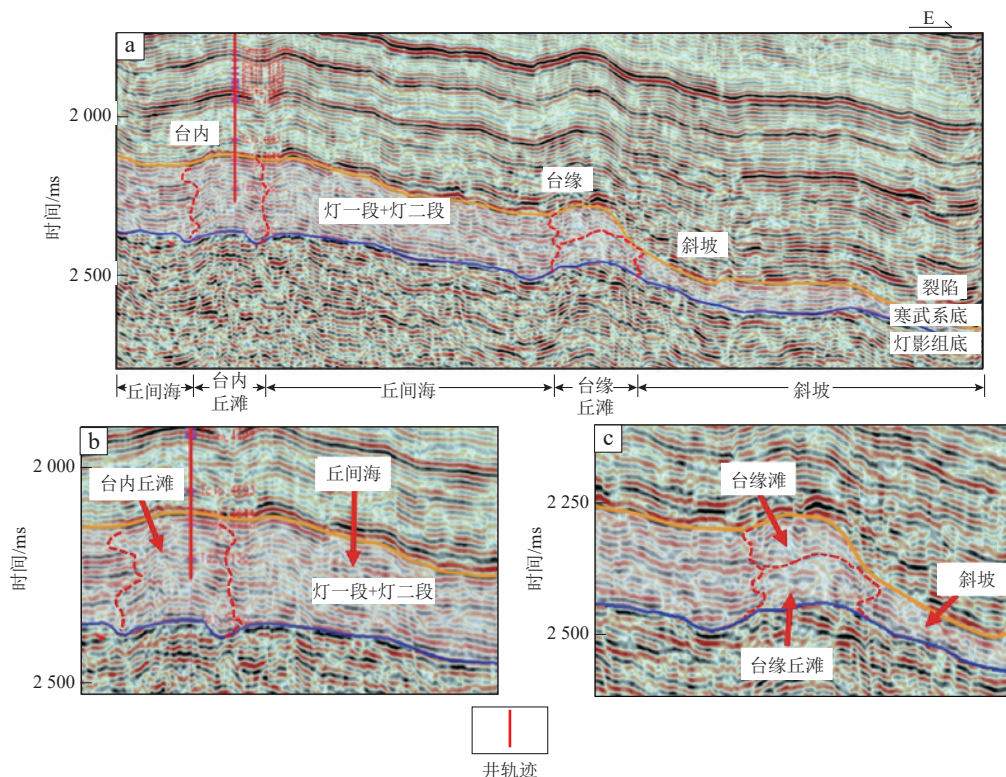


图5 四川盆地灯影组不同沉积微相地震剖面特征

Fig. 5 Seismic response characteristics of various sedimentary microfacies in the Dengying Formation, Sichuan Basin

a. 台内丘滩-台缘丘滩-斜坡; b. 台内丘滩-丘间海; c. 台缘丘滩-斜坡

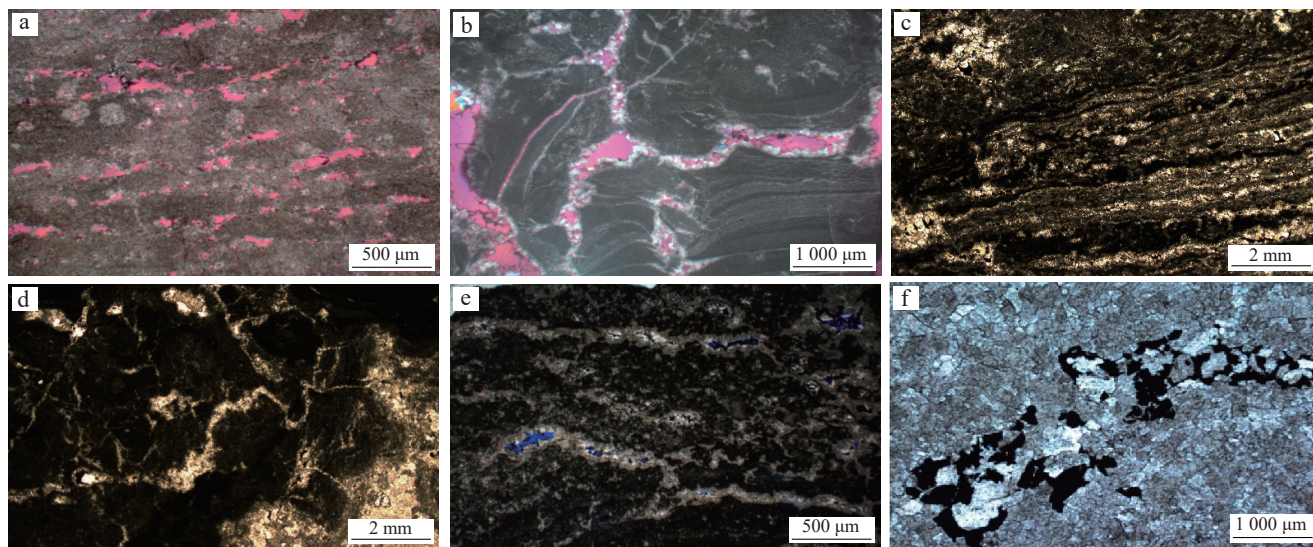


图6 四川盆地灯影组不同类型岩石特征显微照片(铸体薄片)

Fig. 6 Photomicrographs showing the characteristics of representative lithotypes from the Dengying Formation, Sichuan Basin (cast thin sections)

a. 砂屑白云岩,粒间溶孔发育,大探1井,灯四段,埋深6 094.0 m; b. 藻凝块白云岩,粒间孔被胶结物和沥青充填,大探1井,灯四段,埋深6 098.0 m; c. 藻纹层白云岩,蓬深9井,灯四段,埋深7 061.0 m; d. 藻凝块白云岩,胶结作用强烈,蓬深8井,灯四段,埋深7 053.0 m; e. 藻纹层白云岩,东坝1井,见藻格架孔,灯二段,埋深6 409.5 m; f. 粉晶白云岩,见压溶缝合线和沥青充填,宋探1井,灯二段,埋深4 169.0 m

孔,受同生岩溶改造形成蜂窝状孔洞网络,丘体间与颗粒滩沉积形成“丘滩复合体”结构;灯四期,裂隙槽北部台缘向东迁移,但迁移幅度较小,这种受限迁移模式与

基底断裂的幕式活动密切相关(图8),而裂隙槽南部受构造活动影响较弱,台缘带丘体继承性叠置发育,台缘丘滩沉积的垂向累积厚度和规模均较大(图9)。地

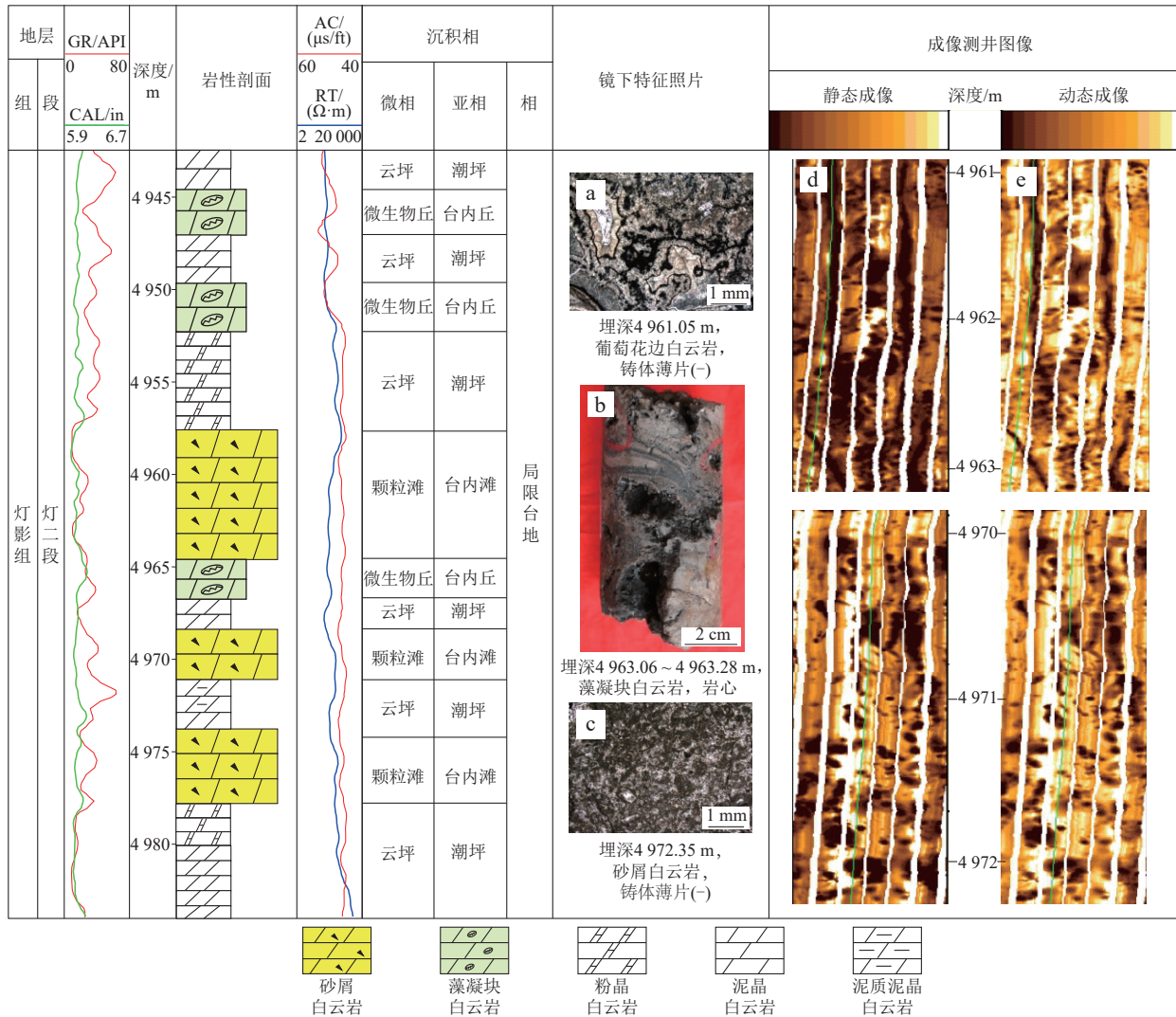


图7 四川盆地资探1井灯影组台内丘滩相沉积特征综合柱状图

Fig. 7 Composite stratigraphic section illustrating the sedimentary characteristics of intra-platform mound-shoal facies in the Dengying Formation, well Zitan-1, Sichuan Basin

震剖面显示台缘丘滩体发育特征,地震剖面上台缘丘滩体形呈丘状,内部呈丘状中振幅弱连续反射(图9),反映微生物建造与高能滩体的交替沉积。

3.2 裂陷槽西侧多级缓坡台缘带沉积特征

德阳-安岳裂陷槽西侧台缘带受克拉通刚性基底差异沉降与古地貌控制,古地貌平缓且基底断裂差异沉降较小,以阶梯状退积型台缘结构为典型特征,呈现多级缓坡式沉积响应。地震剖面上也可见西侧台缘带表现为阶梯状退积反射结构,发育多级台缘^[18-19]。

灯二期,缓坡受基底断裂差异沉降控制,形成宽缓的斜坡带和较窄的台缘带。受区域拉张作用影响,裂陷槽北段受拉张作用影响强烈,裂陷槽西侧资1井—资4井—资阳1井台缘斜坡坡度较缓,导致台缘带较窄

(图8)。资阳地区丘滩体呈北西向展布,薄互层连片带状。裂陷槽南段受拉张作用影响减弱,台缘斜坡坡度较北段陡,宋探1井区台缘丘滩侧向迁移幅度小,丘滩体厚度较大(图9)。

灯四期,缓坡受桐湾运动幕式抬升影响,坡折带向台地地方向迁移,地震反射呈现中频断续特征,指示高频海平面波动与沉积能量分异。此类缓坡台缘带的形成机制与裂陷西侧基底稳定性和拉张速率较低有关,导致沉积体以侧向退积为主,而非陡坡型前积。裂陷西侧断裂规模较小,坡度较缓,沉积物从台内到台缘最后向深盆区缓慢渐变,最终形成缓坡退积型台缘丘滩沉积(图9)。

3.3 裂陷槽东、西两侧台缘带沉积特征差异性

德阳-安岳裂陷槽东、西两侧台缘带发育特征呈

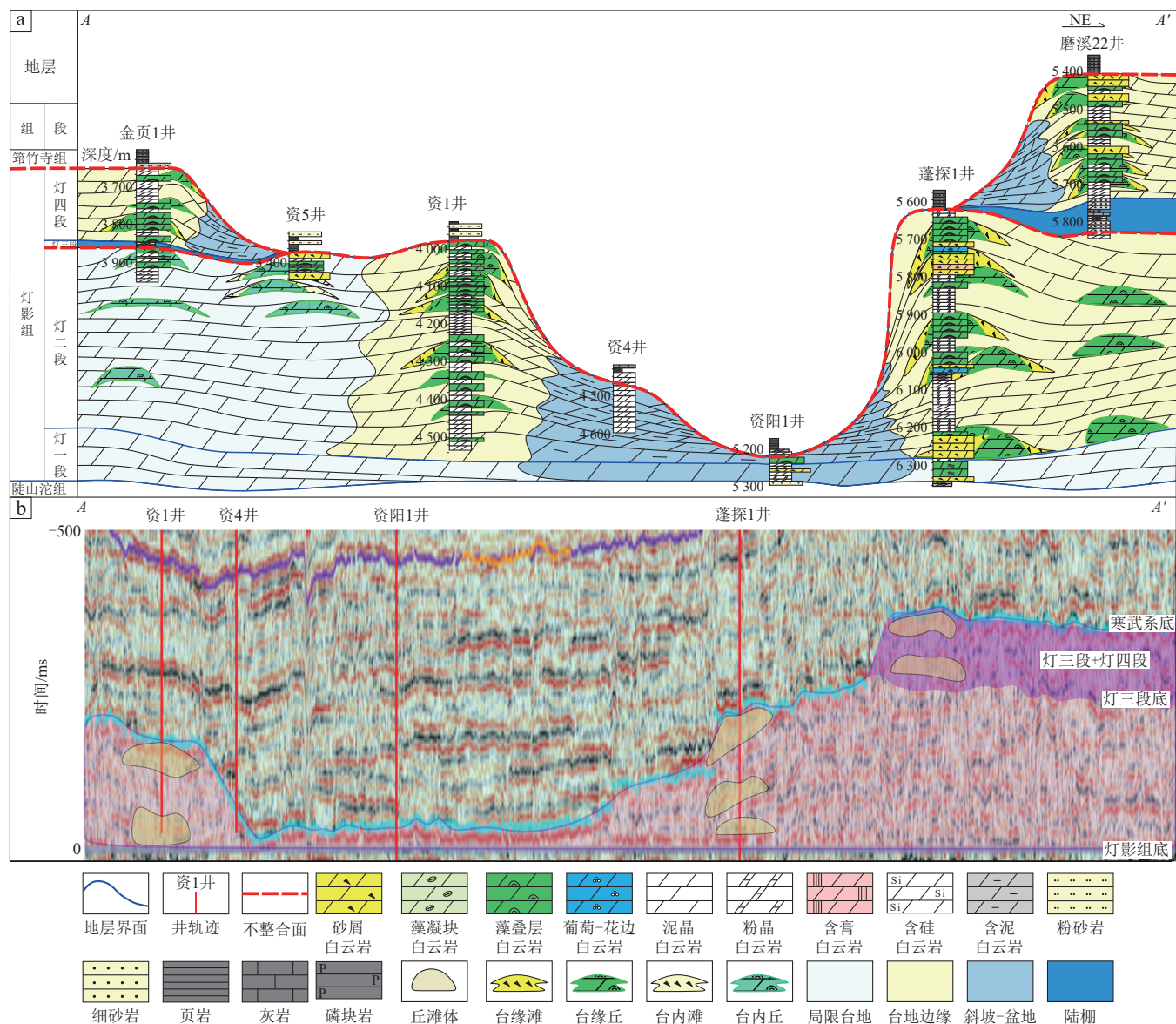


图8 四川盆地德阳-安岳裂陷槽金页1井—资1井—资阳1井—蓬探1井—磨溪22井连井大剖面沉积相侧向展布

Fig. 8 Lateral facies distribution along the multi-well cross section (i. e., wells Jinye-1, Zi-1, Ziyang-1, Pengtan-1, and Moxi-22) across the Deyang-Anyue rift trough

a. 金页1井—资阳1井—磨溪22井灯影组连井大剖面沉积相侧向展布图; b. 过资1井—资阳1井—蓬探1井井—震结合大剖面灯影组沉积相解释图 (剖面位置见图1a。)

现显著差异^[9-11], 西侧台缘带受克拉通刚性基底控制, 形成坡度平缓且横向迁移幅度大的多级缓坡沉积体系, 其构造背景以基底差异沉降为主, 古地貌分异与海平面波动主导沉积过程, 发育宽缓的丘滩储集体, 早期大气淡水溶蚀作用对孔隙系统改造显著; 东侧台缘带则受基底断裂强烈活动影响, 表现为陡坡带窄而厚的叠置结构, 走滑断裂与拉张断裂复合作用形成高角度断控陡坡, 高能沉积环境促进微生物丘建隆, 储层以丘滩复合体为主。平面上, 裂陷槽北段受沉积作用主导形成退积型台缘, 中-南段受岩溶侵蚀控制发育加积型与侵蚀型台缘, 这种分段性进一步强化了台缘带类

型的空间异质性。总之, 东、西两侧沉积差异本质上是构造活动强度、基底差异与成岩改造协同作用的结果, 西侧以稳定基底背景下的缓坡退积为特征, 东侧则体现为断裂控制下的陡坡叠置模式。

4 灯影组岩相古地理和沉积相模式

4.1 灯二段岩相古地理

灯二段沉积期, 德阳-安岳裂陷槽初具雏形, 该时期裂陷槽分布范围小、收口于德阳-安岳一带。古地

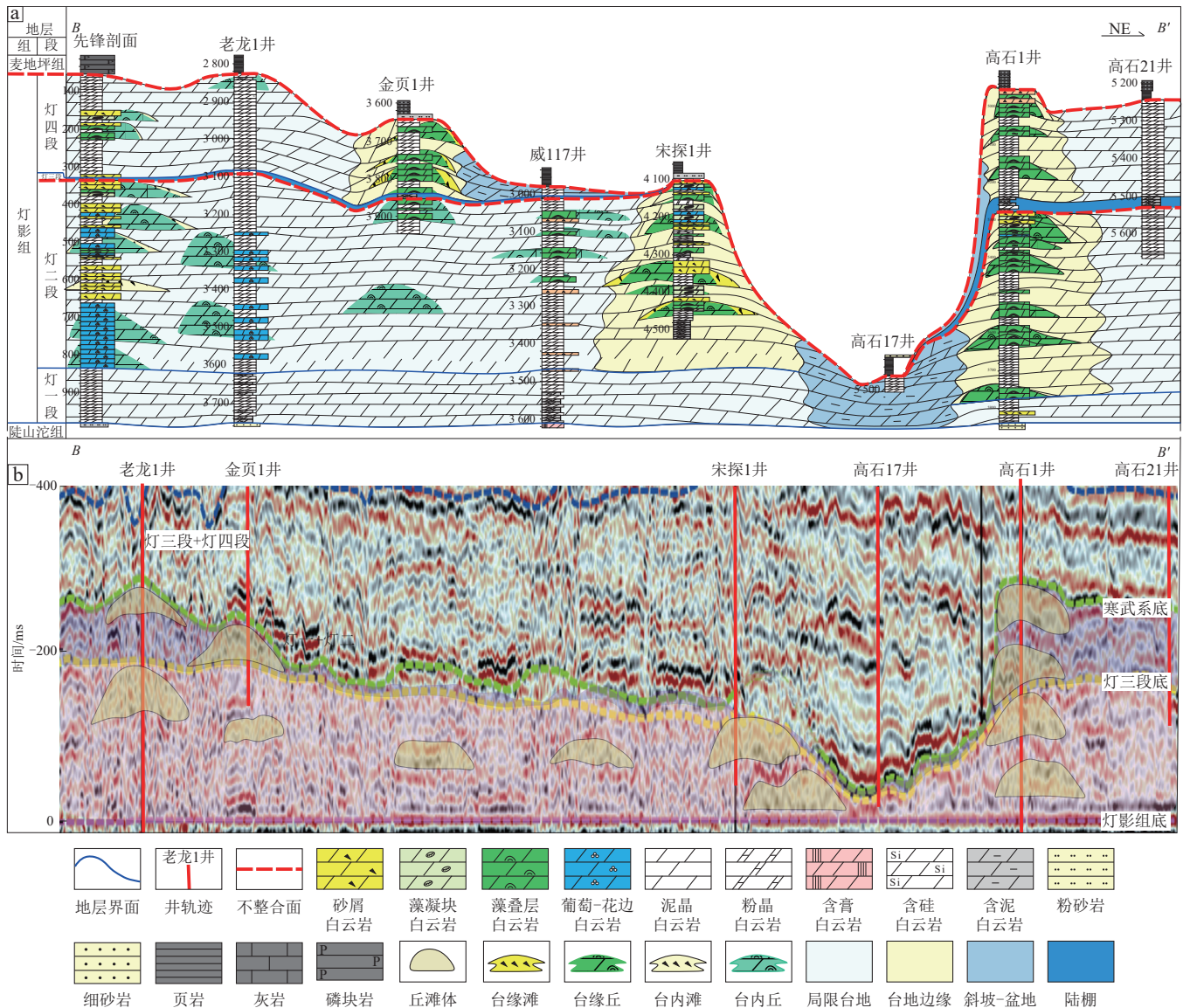


图9 四川盆地德阳-安岳裂陷槽先锋剖面—金页1井—宋探1井—高石17井—高石1井—震结合大剖面沉积相侧向展布

Fig. 9 Lateral facies distribution along the integrated well-seismic section (i. e., wells Xianfeng, Jinye-1, Songtan-1, Gaoshi-17, and Gaoshi-1) across the Deyang-Anyue rift trough (see Fig. 1a for the section location)

a. 先锋剖面—老龙1井—高石17井—高石21井灯影组连井大剖面沉积相侧向展布图; b. 过老龙1井—高石17井—高石21井—震结合大剖面灯影组沉积相解释图
(剖面位置见图1a。)

理格局受德阳-安岳裂陷槽初始拉张作用控制,呈现“西缓东陡”的差异地貌特征。古地貌恢复显示,裂陷槽周缘差异沉降导致古隆起与洼地相间分布,控制丘滩体沿台缘带状分布^[20-25](图10)。裂陷槽东侧受同沉积断裂活动影响,形成陡坡型台缘带,分布于盐亭—遂宁—安岳一带,坡度陡峭,以微生物丘和颗粒滩垂向叠置为特征,丘滩复合体垂向叠置特征明显;裂陷槽西侧发育缓坡型台缘带,分布于成都—资中一带,微生物丘和颗粒滩沿缓坡分散分布,垂向序列中可见砂屑白云岩与藻叠层白云岩交互沉积。台地内部以局限台地相为

主,主要岩性为泥晶白云岩,潮坪亚相广泛分布,泥晶白云岩中普遍含膏盐矿物,反映低能间歇性暴露环境。

灯二期裂陷活动具有南、北分段性。裂陷槽北段(广元—绵阳一带)以沉积充填为主,微生物丘滩体沿裂陷边缘分布;裂陷槽南段(资阳—高石梯地区)则受桐湾运动早期岩溶改造影响,形成侵蚀型台缘带,台地边缘相带沿古地貌高部位分布。

4.2 灯四段岩相古地理

灯四段沉积期,裂陷槽进入强烈扩张阶段,其裂陷

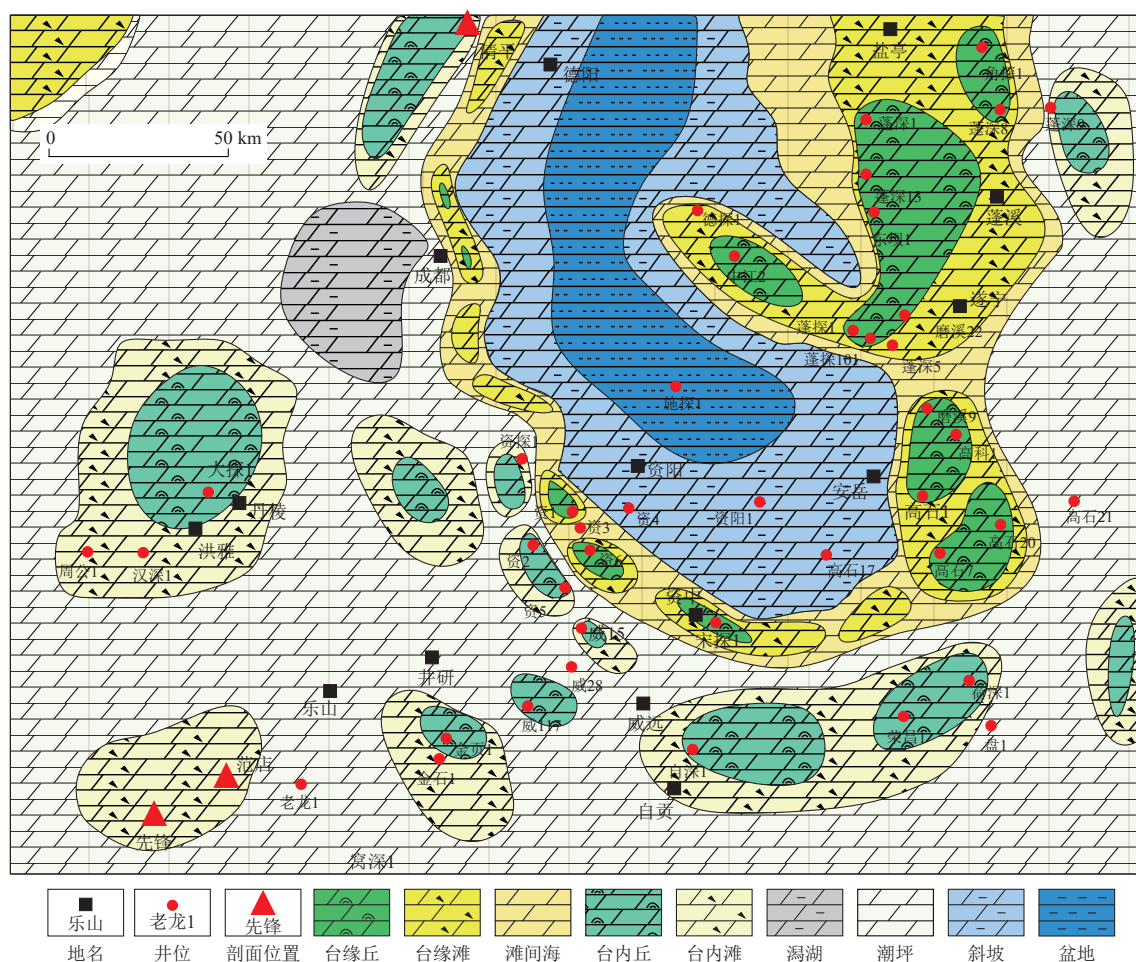


图10 四川盆地德阳-安岳裂陷槽灯二段岩相古地理及台缘带平面展布

Fig. 10 Lithofacies paleogeography and spatial distribution of the platform margin belt during the deposition of the Deng2 member, Deyang-Anyue rift trough, Sichuan Basin

边界向南延伸至泸州地区。裂陷扩张导致裂陷槽两侧台缘带发生迁移,西侧台缘带向台地内部迁移幅度大,沿洪雅—井研一带呈大面积展布,西侧台缘带宽度较灯二期台缘带明显加大,台地边缘相带微生物丘与颗粒滩交互发育,以藻叠层白云岩和藻凝块白云岩为主,台缘带面积明显增大,体现为微生物建隆作用增强与高能滩体侧向加积,形成二级台缘带;东侧台缘带向台地方向迁移幅度受基底断裂幕式活动强度约束,南、北分异,中-南部向台地方向迁移非常有限,北部向台地方向迁移,在盐亭—遂宁—安岳一带形成二级台缘带。

此时期裂陷槽南、北分段性进一步强化,北段(绵阳—成都地区)台缘带厚度为350~450 m,受同沉积断裂活动主导,形成多期退积型台缘带;中-南段(资阳—泸州地区)台缘带厚度增至450~500 m,受桐湾运动Ⅱ幕岩溶改造作用强烈,古地貌高部位发育台缘带溶蚀孔洞系统,古地貌高部位见暴露溶蚀角砾岩,表明有暴露溶蚀作用。此时局限台地相向东退缩至南充—达州

地区,西侧退缩至乐山—雅安地区以西,潮坪亚相中膏盐含量进一步升高,形成区域性封盖层(图11)。

4.3 研究区沉积相模式

依据上述古地理格局和沉积相展布,建立了灯影组沉积相模式(图12)。该模式包含3类沉积相,即台地边缘相、局限台地相和斜坡-盆地相。台地边缘相主要发育微生物丘和颗粒滩,岩性以藻凝块白云岩、藻叠层白云岩和砂屑白云岩为主;局限台地相主要发育云坪,岩性以泥晶白云岩为主;斜坡-盆地相以较深水泥质沉积为主。裂陷槽内发育斜坡-盆地相,沿裂陷槽边缘台缘带呈带状分布,台地内部发育局限台地相。

德阳-安岳裂陷槽的构造演化具有显著的时-空分异特征,控制了灯影组台缘带的沉积格局。在拉张阶段(灯一段-灯二段沉积期),受新元古代Rodinia超大陆裂解影响,基底断裂活化形成地堑式裂陷。在裂

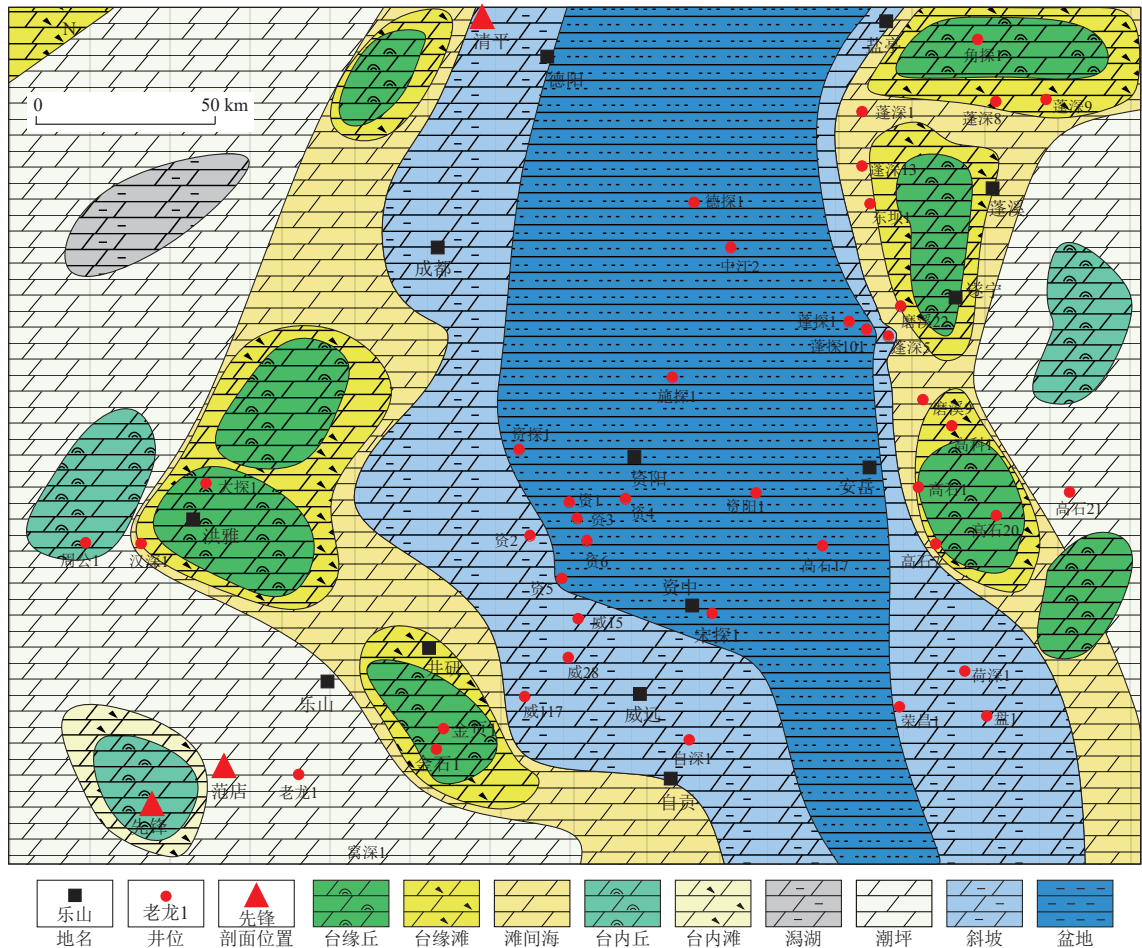


图 11 四川盆地德阳-安岳裂陷槽灯四段岩相古地理及台缘带平面展布

Fig. 11 Lithofacies paleogeography and spatial distribution of the platform margin belt during the deposition of the Deng 4 member, Deyang-Anyue rift trough, Sichuan Basin

陷槽不同区段展现出差异响应,北段(绵阳—成都地区)受古特提斯洋壳俯冲拖拽及基底薄弱带影响,基底断裂活动形成多级断阶结构,控制东、西侧发育宽缓台缘带;而中段和南段(资阳—宜宾地区)基底刚性较强,东侧台缘带受同沉积断裂控制形成陡坡结构,垂向叠置厚层丘滩体,而西侧发育缓坡结构。侵蚀阶段(灯三段—灯四段沉积期),桐湾运动Ⅱ幕导致裂陷槽南段发生大规模差异抬升,导致灯三段普遍缺失、灯四段遭受强烈岩溶改造,形成侵蚀型台缘地貌(图9),此时北段仍持续沉降,东侧高石梯—磨溪一带台缘带继承性发育陡坡地貌,垂向加积为主,横向迁移幅度受限,西侧迁移幅度大,形成阶梯状台缘,台缘带由资阳—威远地区向乐山—雅安地区迁移。

总之,西侧基底刚性较弱,促使西侧发育多级缓坡台缘结构,其中灯二段台缘带沿资3井—宋探1井呈较窄的条带分布;灯四段台缘带明显向西迁移,沿大探1井—汉深1井—洪雅一带呈大面积条带分布。而东侧基底刚性较强,形成陡坡叠置台缘,沿角探1井—

磨溪22井—高石1井一带分布。构造与沉积作用耦合最终形成“东陡西缓”的差异性台缘带结构,裂陷槽东侧发育陡坡垂向叠置型台缘带,台缘带垂向厚度大,横向分布范围较小;裂陷槽西侧发育缓坡多级台缘带,台缘带垂向厚度相对小,但横向展布范围大。

5 结论

1) 晚震旦世灯影组沉积时期德阳-安岳裂陷槽两侧台缘带主要发育台缘丘、台缘滩、台缘丘滩复合体以及丘(滩)间海亚相沉积,裂陷槽内部发育斜坡-盆地相沉积。

2) 德阳-安岳裂陷槽两侧台缘带发育和演化特征存在明显差异,裂陷槽东侧台缘带受基底断裂控制呈陡坡叠置结构,横向迁移幅度小;裂陷槽西侧发育多级缓坡型台缘带,灯二段和灯四段台缘带侧向迁移特征显著。

3) 岩相古地理编图表明,灯二段沉积期台缘带主

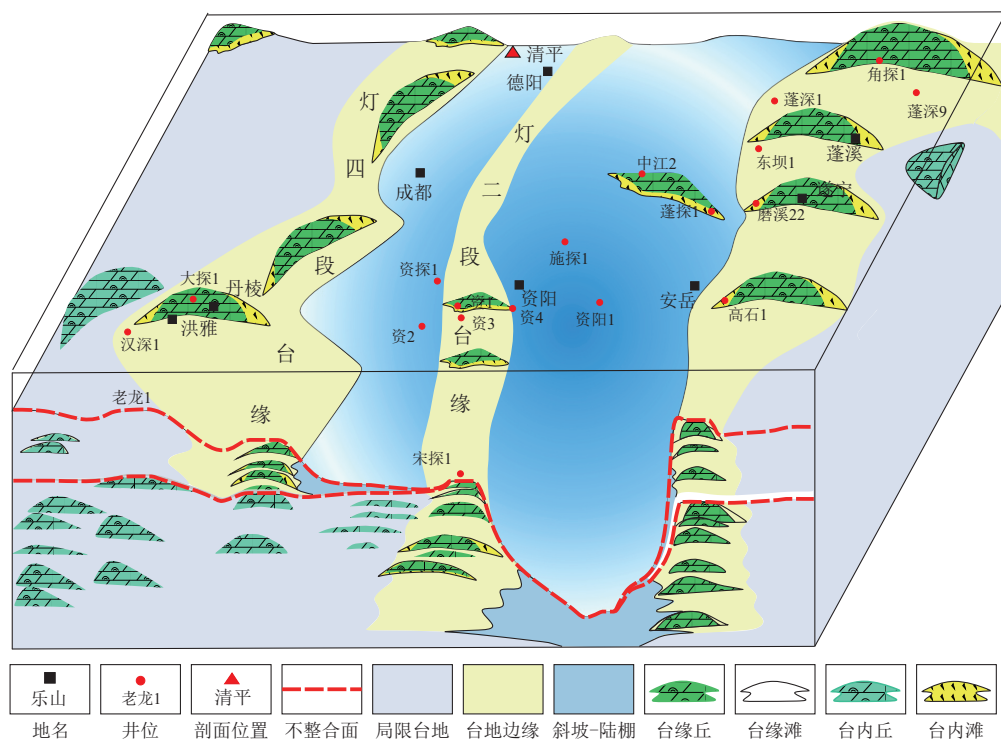


图12 四川盆地德阳-安岳裂陷槽灯影组台缘带沉积相模式示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the sedimentary facies model for the Dengying Formation platform margin belts along the Deyang-Anyue rift trough, Sichuan Basin

要沿成都—遂宁—资中一带呈环形分布;灯四段沉积期台缘带台缘带分布面积大,裂陷槽西侧台缘带沿洪雅—井研—自贡一带呈南北向展布,裂陷槽东侧台缘带沿盐亭—遂宁—磨溪一带呈南北向展布。据此建立德阳-安岳裂陷槽灯影组“东陡西缓”和“东侧单级西侧多级”台缘带沉积相模式。

参 考 文 献

- [1] 魏国齐, 杨威, 杜金虎, 等. 四川盆地震旦纪—早寒武世克拉通内裂陷地质特征[J]. 天然气工业, 2015, 35(1): 24-35.
WEI Guoqi, YANG Wei, DU Jinhu, et al. Geological characteristics of the Sinian-Early Cambrian intracratonic rift, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(1): 24-35.
- [2] 邱玉超, 罗冰, 夏茂龙, 等. 四川盆地长宁地区震旦系—寒武系裂陷槽的发现及其地质意义[J]. 天然气勘探与开发, 2019, 42(2): 22-28.
QIU Yuchao, LUO Bing, XIA Maolong, et al. Discovery and geological significance of Sinian-Cambrian rift trough, Changning area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2019, 42(2): 22-28.
- [3] 李双建, 高平, 黄博宇, 等. 四川盆地绵阳—长宁凹槽构造演化的沉积约束[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 889-898.
LI Shuangjian, GAO Ping, HUANG Boyu, et al. Sedimentary constraints on the tectonic evolution of Mianyang-Changning trough in the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 889-898.
- [4] 杨雨, 黄先平, 张健, 等. 四川盆地寒武系沉积前震旦系顶界岩溶地貌特征及其地质意义[J]. 天然气工业, 2014, 34(3): 38-43.
YANG Yu, HUANG Xianping, ZHANG Jian, et al. Features and geologic significances of the top Sinian karst landform before the Cambrian deposition in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(3): 38-43.
- [5] 周慧, 李伟, 张宝民, 等. 四川盆地震旦纪末期—寒武纪早期台盆的形成与演化[J]. 石油学报, 2015, 36(3): 310-323.
ZHOU Hui, LI Wei, ZHANG Baomin, et al. Formation and evolution of Upper Sinian to Lower Cambrian intraplatformal basin in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(3): 310-323.
- [6] 李忠权, 刘记, 李应, 等. 四川盆地震旦系威远—安岳拉张侵蚀槽特征及形成演化[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 26-33.
LI Zhongquan, LIU Ji, LI Ying, et al. Formation and evolution of Weiyuan-Anyue extension-erosion groove in Sinian system, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 26-33.
- [7] 谢武仁, 杨威, 汪泽成, 等. 台缘带特征、形成主控因素及其对油气成藏的控制: 以四川盆地灯影组为例[J]. 地质科学, 2021, 56(3): 867-883.

- XIE Wuren, YANG Wei, WANG Zecheng, et al. Characteristics and main controlling factors on the development of a platform margin belt and its effect on hydrocarbon accumulation: A case study of Dengying Formation in Sichuan Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2021, 56(3): 867-883.
- [8] 文龙, 罗冰, 钟原, 等. 四川盆地灯影期沉积特征及槽-台体系成因模式[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2021, 48(5): 513-524, 590.
- WEN Long, LUO Bing, ZHONG Yuan, et al. Sedimentary characteristics and genetic model of trough-platform system during the Dengying period in Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2021, 48(5): 513-524, 590.
- [9] 周刚, 罗冰, 张新, 等. 四川盆地德阳-安岳凹槽形成机理及灯影组沉积新格局[J]. 天然气工业, 2024, 44(8): 13-28.
- ZHOU Gang, LUO Bing, ZHANG Xin, et al. Formation mechanism of Deyang-Anyue trough and new sedimentation pattern of Dengying Formation in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(8): 13-28.
- [10] 谢武仁, 姜华, 马石玉, 等. 四川盆地德阳-安岳裂陷晚震旦世一早寒武世沉积演化特征与有利勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(8): 1240-1250.
- XIE Wuren, JIANG Hua, MA Shiyu, et al. Sedimentary evolution characteristics and favorable exploration directions of Deyang-Anyue Rift within the Sichuan Basin in Late Sinian-Early Cambrian [J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(8): 1240-1250.
- [11] 刘树根, 王一刚, 孙玮, 等. 拉张槽对四川盆地海相油气分布的控制作用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2016, 43(1): 1-23.
- LIU Shugen, WANG Yigang, SUN Wei, et al. Control of intracratonic sags on the hydrocarbon accumulations in the marine strata across the Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2016, 43(1): 1-23.
- [12] 马奎, 文龙, 张本健, 等. 四川盆地德阳-安岳侵蚀裂陷槽分段性演化分析和油气勘探意义[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(2): 274-284.
- MA Kui, WEN Long, ZHANG Benjian, et al. Segmented evolution of Deyang-Anyue erosion rift trough in Sichuan Basin and its significance for oil and gas exploration, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(2): 274-284.
- [13] 曾富英, 杨威, 魏国齐, 等. 四川盆地德阳-安岳裂陷震旦系灯影组台缘结构特征与勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(2): 273-284, 308.
- ZENG Fuying, YANG Wei, WEI Guoqi, et al. Structural features and exploration targets of platform margins in Sinian Dengying Formation in Deyang-Anyue Rift, Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(2): 273-284, 308.
- [14] 文龙, 谢继容, 张本健, 等. 四川盆地德阳-安岳裂陷西侧大探1井震旦系灯影组天然气勘探重大突破及意义[J]. 天然气工业, 2023, 43(11): 7-18.
- WEN Long, XIE Jirong, ZHANG Benjian, et al. Well Datan 1 in west side of Deyang-Anyue rift, Sichuan Basin: Great breakthrough in natural gas exploration in Sinian Dengying Formation and its significance [J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(11): 7-18.
- [15] 张玺华, 彭瀚霖, 文龙, 等. 四川盆地西北部灯影组深水沉积的发现及油气地质意义[J]. 天然气勘探与开发, 2020, 43(4): 10-21.
- ZHANG Xihua, PENG Hanlin, WEN Long, et al. Discovery of deep-water deposits in Northwest Sichuan Basin during Dengyingian period: Implications for petroleum geology [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2020, 43(4): 10-21.
- [16] 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.
- [17] 刘艺妮, 胡明毅, 张三. 塔里木盆地古城-肖塘地区寒武系—奥陶系碳酸盐台地类型、差异演化过程及油气地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(5): 884-895.
- LIU Yini, HU Mingyi, ZHANG San. Types, structural evolution difference and petroleum geological significance of Cambrian-Ordovician carbonate platforms in Gucheng-Xiaotang area, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(5): 884-895.
- [18] 杨威, 魏国齐, 谢武仁, 等. 克拉通内裂陷边缘台缘丘滩地规模储层发育主控因素与成因模式——以四川盆地德阳-安岳克拉通内裂陷东侧灯影组四段为例[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(10): 1541-1553.
- YANG Wei, WEI Guoqi, XIE Wuren, et al. Main controlling factors and genetic mechanism for the development of high-quality reservoirs in the mound-shoal complexes on the platform margin mound-beach body at platform margin of the inner cratonic rift: Case study of the fourth member of Dengying Formation in the east side of the Deyang-Anyue cratonic rifts, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(10): 1541-1553.
- [19] 曾富英, 杨威, 孙爱, 等. 四川盆地川中地区震旦系灯影组台地边缘相带地震识别及其分段特征[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(6): 1079-1086.
- ZENG Fuying, YANG Wei, SUN Ai, et al. Seismic recognition and zonation of the platform margin facies of the Sinian Dengying

- Formation in central Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(6): 1079–1086.
- [20] 李柱正, 石晶慧萃, 王家辉, 等. 川中德阳—安岳古裂陷槽震旦系灯影组残丘型储层特征及其油气勘探意义[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(8): 1263–1275.
- LI Zhuzheng, SHI Jing huicui, WANG Jiahui, et al. Characteristics of residual hill-type reservoir of Sinian Dengying Formation in Deyang-Anyue ancient rift trough, central Sichuan and its significance for oil and gas exploration [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(8): 1263–1275.
- [21] 宋金民, 刘树根, 李智武, 等. 四川盆地上震旦统灯影组微生物碳酸盐岩储层特征与主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(4): 741–752.
- SONG Jinmin, LIU Shugen, LI Zhiwu, et al. Characteristics and controlling factors of microbial carbonate reservoirs in the Upper Sinian Dengying Formation in the Sichuan Basin, China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(4): 741–752.
- [22] 宋何骁, 郑马嘉, 刘勇, 等. 四川盆地“槽-隆”控制下的寒武系筇竹寺组页岩储层特征及其差异性成因[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(2): 420–439.
- HE Xiao, ZHENG Maja, LIU Yong, et al. Characteristics and differential origin of Qiongzhusi Formation shale reservoirs under the “aulacogen–uplift” tectonic setting, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(2): 420–439.
- [23] 聂海宽, 苏海琨, 张珂, 等. 古老地层页岩气富集特征与勘探方向——来自中-上扬子地区寒武系的启示[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(6): 1840–1859.
- NIE Haikuan, SU Haikun, ZHANG Ke, et al. Enrichment characteristics and exploration targets of shale gas in ancient strata: Insights from the Cambrian shales in the Middle–Upper Yangtze region [J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46(6): 1840–1859.
- [24] 杨毅, 朱祥, 张雷, 等. 四川盆地北部灯影组四段台内地区油气来源及成藏过程[J]. *石油实验地质*, 2025, 47(2): 384–394.
- YANG Yi, ZHU Xiang, ZHANG Lei, et al. Hydrocarbon sources and accumulation processes in intra–platform of the fourth member of Dengying Formation in northern Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2025, 47(2): 384–394.
- [25] 杨程宇, 于博, 张剑锋, 等. 四川盆地川中隆起安岳气田震旦系灯影组储层差异性成岩演化[J]. *石油实验地质*, 2025, 47(4): 754–766.
- YANG Chengyu, YU Bo, ZHANG Jianfeng, et al. Differential diagenetic evolution of Sinian Dengying Formation reservoirs in Anyue gas field, Central Sichuan Uplift, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2025, 47(4): 754–766.

(编辑 董奕含)