

# 四川盆地中部蓬莱地区灯二段沉积微相演化及气藏综合评价

张本健, 钟原, 周刚, 严威, 李莛宇, 和源, 赵立可, 龙虹宇, 吕文正, 乔艳萍

中国石油西南油气田公司勘探开发研究院

**摘要** PT1井区灯二段的重大突破及集中评价成果证实了四川盆地川中古隆起北部斜坡区灯二段发育台缘优质孔洞型储层而且具备优越的岩性气藏条件。为进一步描述蓬莱地区丘滩体岩性气藏特征并评价其勘探潜力,综合利用钻录井、测井、地震等资料,对PT1井区灯二段微相特征及沉积演化过程进行研究分析。结果表明:①灯二段发育典型台缘高能丘滩沉积,岩性以凝块白云岩、泥粉晶白云岩为主,可识别出丘核、丘坪、丘间等微相类型,具有多种相序组合特征;②基于碳同位素、电阻率曲线及井震标定结果可将灯二段分为3个小层,各小层纵、横向上厚度及微相具有不同程度的分异特征;③通过小层时间厚度、内部振幅能量与微相发育的相关性分析,明确了早、中、晚三期沉积微相平面展布特征,并建立了PT1井区灯二段沉积演化模式;④在构造形态及统一气水界面的控制下,PT1井区灯二段主体气藏集中分布在灯二-3小层,内部受沉积微相约束具有一定分异性。对该岩性气藏进行多因素综合评价,划分出三大类有利勘探区。

**关键词** 沉积微相; 沉积演化; 岩性圈闭; 气藏评价; 灯影组; 晚震旦世; 四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

## 0 前言

川中古隆起现今在四川盆地内部表现为一个近东西向展布的鼻状隆起,定型于加里东末期,面积约为 $6.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ <sup>[1]</sup>。在位于古隆起构造高部位的安岳地区发现了震旦系—古生界特大型气田,气藏的展布受构造背景控制,低部位含水<sup>[2-3]</sup>。气田北部为古隆起现今构造的北部斜坡区,总体上具有单斜背景、埋深大的特征<sup>[4]</sup>,最低构造海拔比安岳气田低2 000 m,该区能否发育有效储层、能否形成规模油气聚集是勘探面临的重大挑战。2020年,中石油风险探井PT1井于川中古隆起北部斜坡蓬莱地区灯影组二段(简称灯二段)台缘带取得了重大突破<sup>[5-6]</sup>,测试获日产气 $121.89 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,并且气水界面远低于安岳地区,由此发现川中—川北地区可能存在另一个万亿方气区——蓬莱气区。2021年,针对蓬莱气区PT1井区的集中评价工作陆续见到成效,PT101井、PT102井、PT103井的灯二段取

心见大量孔洞发育,测井解释的气层厚度自40 m至150 m不等,并且气水界面与PT1井一致,证实了单斜背景下岩性气藏客观存在并且具备规模发育的条件。谢继容等<sup>[7]</sup>利用钻井岩电、地震及分析测试等资料,深入分析了川中—川北地区灯二段含油气地质条件,明确了川中—川北地区灯影组二段台地边缘带的勘探潜力。

岩性圈闭的形成往往与丘滩体沉积过程及方式密切相关。为了解析PT1井区岩性圈闭内部结构并深化该岩性气藏特征的认识,开展微相尺度的空间沉积特征研究显得尤为重要。由于目前PT1井区钻井较少且分布集中,空间上研究工作开展难度较大,直接制约了后期评价井位部署工作。本次研究充分利用钻录井、测井、地震等基础资料,从沉积特征及演化规律的角度对PT1井区灯二段岩性圈闭进行剖析,实现对气藏结构特征的精细描述及综合评价,进一步明确其勘探潜力,并为下一步勘探提供理论基础及技术支撑。

收稿日期:2022-01-04; 改回日期:2022-08-16

本文受中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目“西南油气田天然气上产300亿立方米关键技术研究与应用”(编号:2016E-06)资助

**第一作者:** 张本健,博士,高级工程师,主要从事石油与天然气勘探研究及技术管理工作。通信地址:610000 四川省成都市高新区天府大道北段12号;E-mail: zbjian@petrochina.com.cn

**通信作者:** 钟原,博士,高级工程师,主要从事石油与天然气勘探研究。通信地址:610000 四川省成都市高新区天府大道北段12号;E-mail: zhongyuan2018@petrochina.com.cn

## 1 地质背景

四川盆地是一个在上扬子克拉通板块上发展起来的叠合盆地,盆地基底为中元古代末的晋宁运动形成的褶皱基底<sup>[8-9]</sup>。震旦纪,罗迪尼亚大陆裂解<sup>[10]</sup>,全球大陆发生大规模离散拉张。在此背景下,古中国地台逐渐裂解,称为兴凯旋回或兴凯地裂运动旋回<sup>[11-13]</sup>。华南板块、扬子板块同时期发生广泛的地壳幕式上升运动,表现为大规模地壳垂直差异隆升(桐湾运动),桐湾运动 I、II 幕形成了灯二段、灯四段顶部两个区域性不整合面<sup>[14-15]</sup>。在长期风化剥蚀作用下,德阳—安岳裂陷及其周缘最终

形成了“北沉积、南侵蚀”的槽台格局<sup>[16-19]</sup>,北部以保留裂陷槽及裂陷槽边缘沉积型台缘带为主,而南部主要发育侵蚀槽及边缘侵蚀陡坎。金堂—蓬莱地区整体处于灯二段台缘带与侵蚀槽的过渡区,在同沉积断裂的控制下形成多个台缘微生物丘滩岩性-地层、岩性圈闭(图 1a),其中:ZJ2 井区灯二段地层厚度约为 460~960 m,岩性圈闭面积约为 640 km<sup>2</sup>,气水界面为 -6 320 m;PT1 井区灯二段地层厚度约为 570~630 m,岩性圈闭面积约为 430 km<sup>2</sup>,已证实气藏统一气水界面为 -5 540 m。金堂—蓬莱地区灯二段沉积期以发育台缘丘滩亚相为典型特征<sup>[20-24]</sup>,岩性以凝块白云岩与泥晶白云岩不等厚互层为特征(图 1b)。

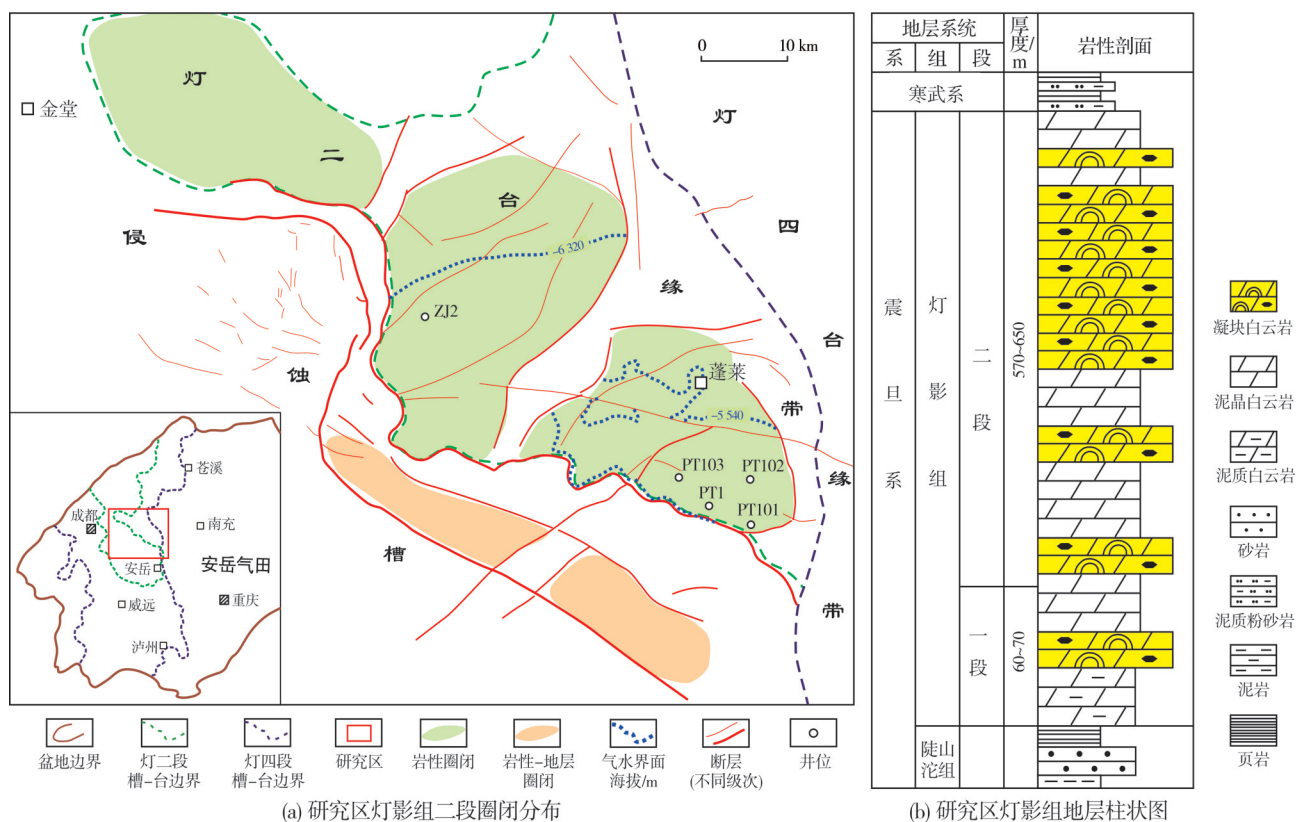


图1 四川盆地金堂—蓬莱地区灯影组二段圈闭分布及地层概况

Fig. 1 Stratigraphic column and trap distribution of the Dengying Member 2 in Jintang-Penglai area, Sichuan Basin

## 2 沉积特征

### 2.1 主要沉积微相类型及相序组合

本次研究基于钻井取心、薄片、成像测井等资料,在PT1井区台缘丘滩岩性圈闭内部识别出丘核、丘坪、丘间等多种沉积微相类型(图2)。

丘核 为微生物丘建造的主体部位,以凝块白

云岩沉积为主要特征(图 2a, 2b),沉积水体能量相对较强,局部可见破碎凝块、漂浮状砾屑等高能沉积构造<sup>[25]</sup>。孔洞较为发育,大小从毫米级至厘米级不等,成像测井上呈现出蜂窝状暗色斑点或斑块大量发育的特征(图 2c)。

丘坪 发育于丘核之上,为微生物丘单个沉积旋回晚期水体变浅、能量降低情况下的沉积产物,





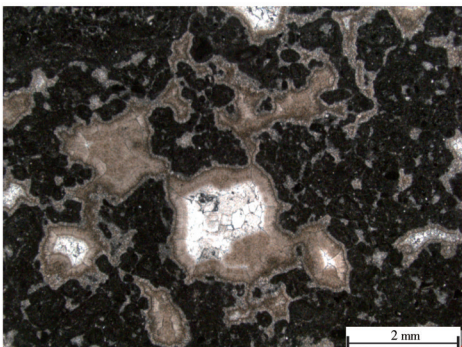
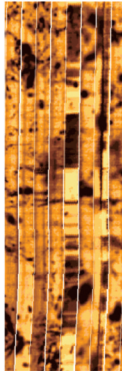
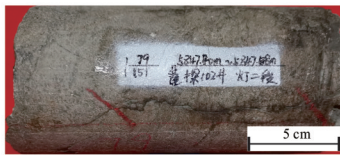

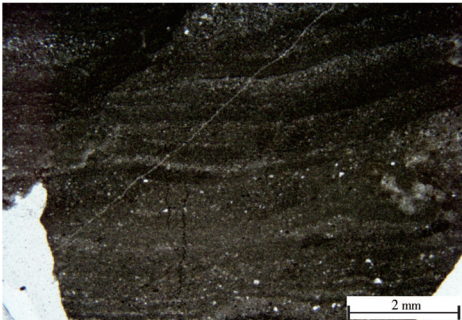
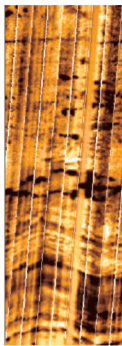
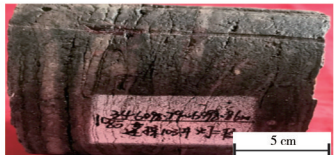
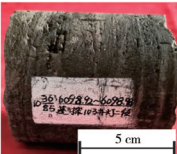
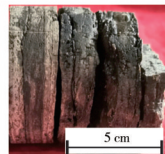
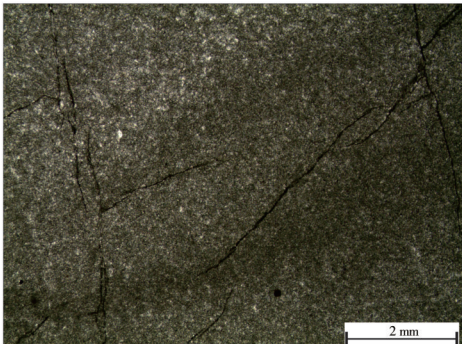
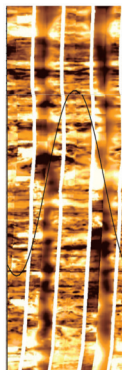
微相	岩心照片	薄片照片	动态成像测井
丘核	 <p>局部发育高能破碎砾屑。5 735.8 m</p>  <p>溶蚀孔洞发育。5 741 m (a) 凝块白云岩。PT101井</p>	 <p>(b) 凝块白云岩。PT101井5 722.6 m。单偏光</p>	 <p>(c) 暗色低阻斑块大量发育。PT101井5 740~5 742 m</p>
丘坪	 <p>块状结构，整体较为致密。5 847.5 m</p>  <p>具一定纹层结构，发育小型顺层溶洞。5 873.5 m (d) 泥晶白云岩。PT102井</p>	 <p>(e) 纹层状泥晶白云岩。PT102井5 737 m。单偏光</p>	 <p>(f) 局部发育高低阻薄互层，见少量低阻斑点。PT102井5 873~5 874.9 m</p>
丘间	 <p>6 098.8 m</p>  <p>6 098.95 m</p>  <p>6 099.22 m (g) 薄层状泥晶白云岩。PT103井</p>	 <p>(h) 泥晶白云岩。PT1井5 744 m。单偏光</p>	 <p>(i) 高低阻薄互层。PT103井6 098.5~6 101 m</p>

图2 四川盆地蓬莱地区灯二段沉积微相典型特征

Fig. 2 Typical characteristics of sedimentary microfacies of the Dengying Member 2 in Penglai area, Sichuan Basin

并且频繁暴露于海平面之上。岩性以泥晶白云岩、纹层状白云岩为主，可见小型顺层溶孔、溶洞(图2d, 2e)，成像测井上以明暗交替的薄互层沉积为特征(图2f)。

**丘间** 发育在微生物丘两侧的翼部，属于浪基面之下低能环境的沉积产物。岩性与丘坪较为相似，以泥晶白云岩、纹层状白云岩为主，但溶蚀特征相对较弱(图2g, 2h)，成像测井上以明暗交替的薄

互层、致密块状沉积为特征(图2i)。

纵向上，通常构成丘核-丘坪、丘间-丘核两种向上变浅相序组合类型(图3)。丘核-丘坪自下至上水动力逐渐减弱，由高能凝块白云岩逐渐变为低能的纹层状白云岩、泥晶白云岩等，成像测井剖面上由下部的蜂窝状、斑块状结构向上逐渐变为层状结构(图3a)。丘间-丘核自下至上水动力逐渐增强，由低能的泥晶白云岩、纹层状白云岩逐

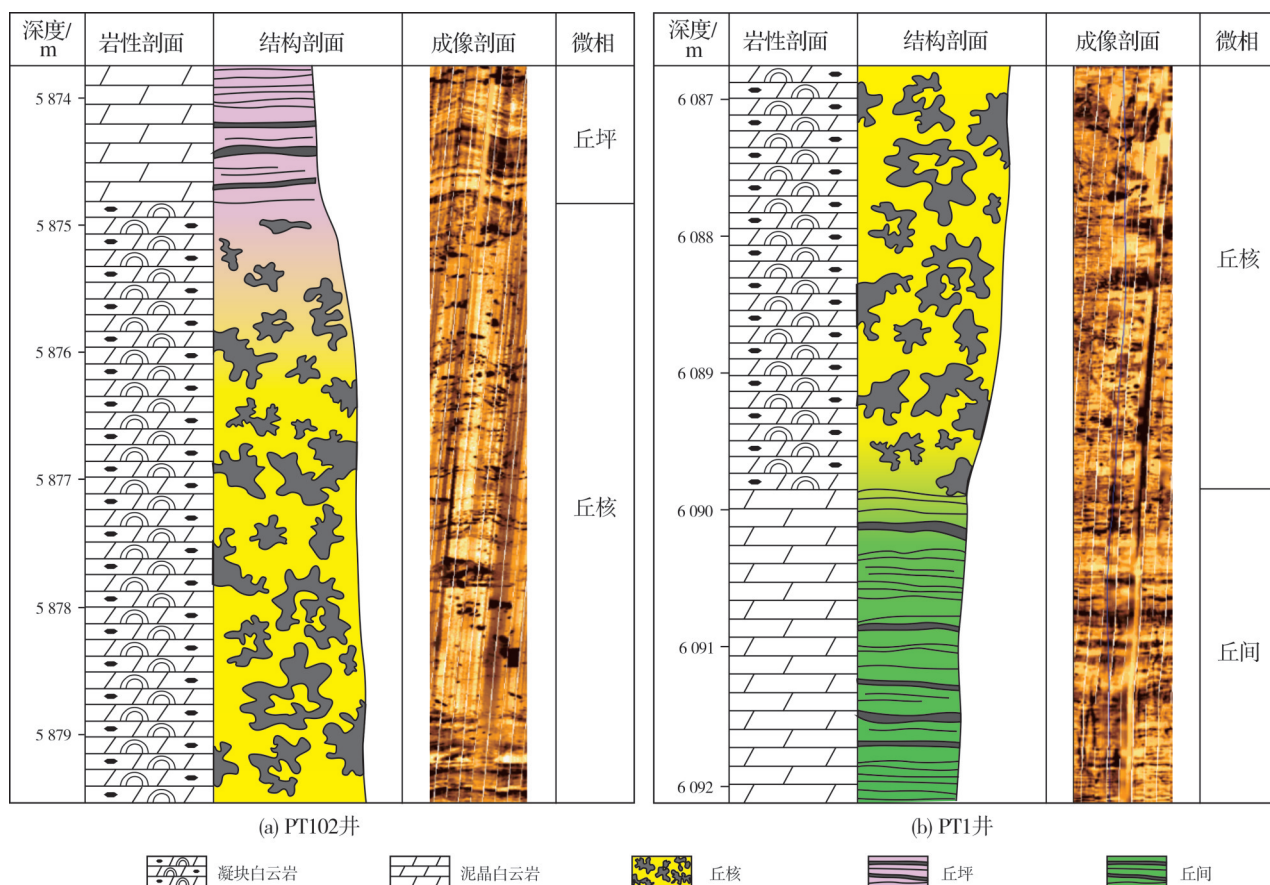


图3 四川盆地蓬萊地区灯二段主要相序组合

Fig. 3 Main depositional assemblage in vertical of the Dengying Member 2 in Penglai area, Sichuan Basin

渐变为高能的凝块白云岩,成像测井剖面上由下部的块状、纹层状结构向上逐渐变为蜂窝状、斑块状结构(图3b)。

## 2.2 等时格架内的沉积微相对比

### 2.2.1 小层划分

根据PT1井区已钻井的岩屑及测井资料分析,常规GR曲线对于灯二段沉积特征的分异响应并不明显,难以用于划分等时地层格架,而基于碳同位素、电阻率曲线可明显将灯二段进行三分,并且在地震资料上易于标定,横向上可连续追踪对比。因此,综合多类资料将灯二段自下至上划分为灯二-1、灯二-2、灯二-3的3个小层(图4)。下面以PT1井为例,对3个小层的特征进行介绍。

**灯二-1小层** 碳同位素曲线自下至上表现为缓慢正偏至缓慢负偏的完整旋回,电阻率曲线形态整体呈锯齿状。岩性以泥晶白云岩为主,夹薄层凝块白云岩,厚度介于140~200 m,成像测井上以高低

阻明暗交替的薄互层沉积为特征。合成记录标定显示该小层底界为一连续波谷反射,顶界为一连续强波峰之下的零相位。

**灯二-2小层** 碳同位素曲线自下至上表现为快速正偏至缓慢负偏的完整旋回,电阻率曲线形态整体呈两段式的低阻齿化箱型-漏斗型。PT1井、PT101井岩性以泥晶白云岩夹薄层凝块白云岩为主,厚度介于180~240 m,成像测井上以高低阻明暗交替的薄互层沉积为特征。合成记录标定显示该小层底界位于连续强波峰之下的零相位,顶界为连续波峰反射。

**灯二-3小层** 碳同位素曲线自下至上表现为缓慢正偏至缓慢负偏的完整旋回,电阻率曲线形态整体呈锯齿状。PT1井、PT101井岩性以凝块白云岩为主,厚度介于210~250 m,成像测井上蜂窝状暗色低阻斑点或斑块大量发育。合成记录标定显示该小层的顶底界均为波峰反射特征。



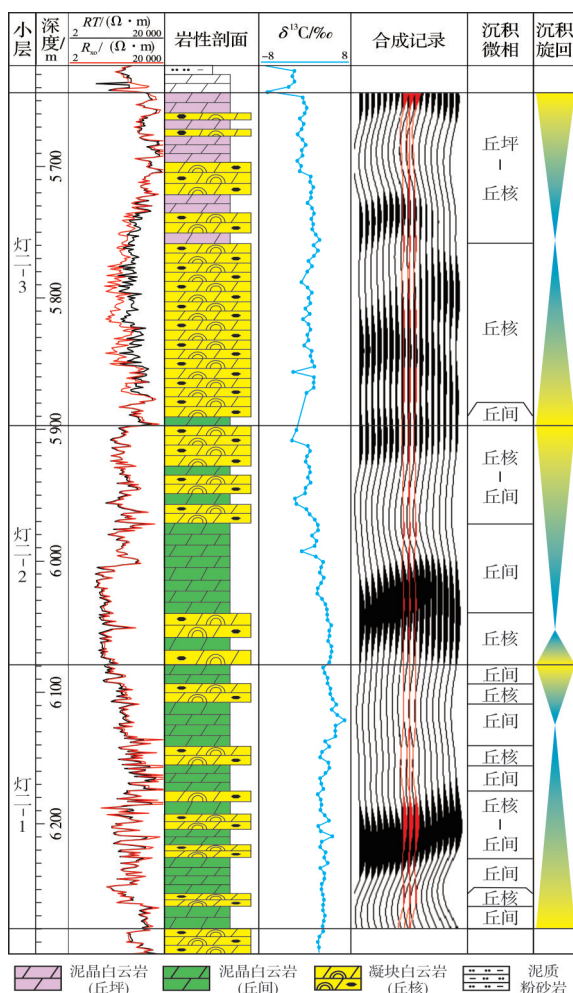


图4 四川盆地蓬莱地区PT1井灯二段小层识别及划分  
Fig. 4 Identification and division of submember in the Dengying Member 2 of Well PT-1 in Penglai area, Sichuan Basin

## 2.2.2 沉积微相对比

结合研究区沉积背景,在微相类型识别、小层划分的基础上,对沉积微相纵横向发育情况进行分析(图5)。灯二-1小层沉积期,沉积水体相对较深,厚度横向分布稳定,整体以丘间夹丘核、丘间-丘核互层沉积为主,未发生沉积分异。灯二-2小层沉积期,横向上厚度具有一定分异:PT1井、PT101井厚度相对较薄,以丘间夹薄层丘核沉积为主;PT102井、PT103井厚度较大,分别以厚层丘核、丘坪沉积为特征。灯二-3小层沉积期,沉积水体逐渐变浅,厚度横向展布与灯二-2小层呈近互补特征,PT1井、PT101井厚度相对较大,中下部以厚层丘核沉积为主,向PT102井、PT103井方向地层逐渐减薄并相变为丘核、丘坪互层沉积;至该小层顶部沉积逐渐均一化,区域上均以丘坪沉积为特征。

## 3 沉积微相分布与时空演化特征

### 3.1 不同沉积微相的地震属性特征

基于单井沉积微相特征、各小层井震标定追踪结果,发现各小层沉积微相发育情况与小层厚度、内部振幅能量强弱具有明显相关性(图6)。沉积微相发育与地震属性分类统计结果具体见表1。

灯二-1小层整体以丘核-丘间薄互层沉积为主,但当局部出现厚层丘核时,层内波峰振幅能量明显减弱(以PT101井为代表)。

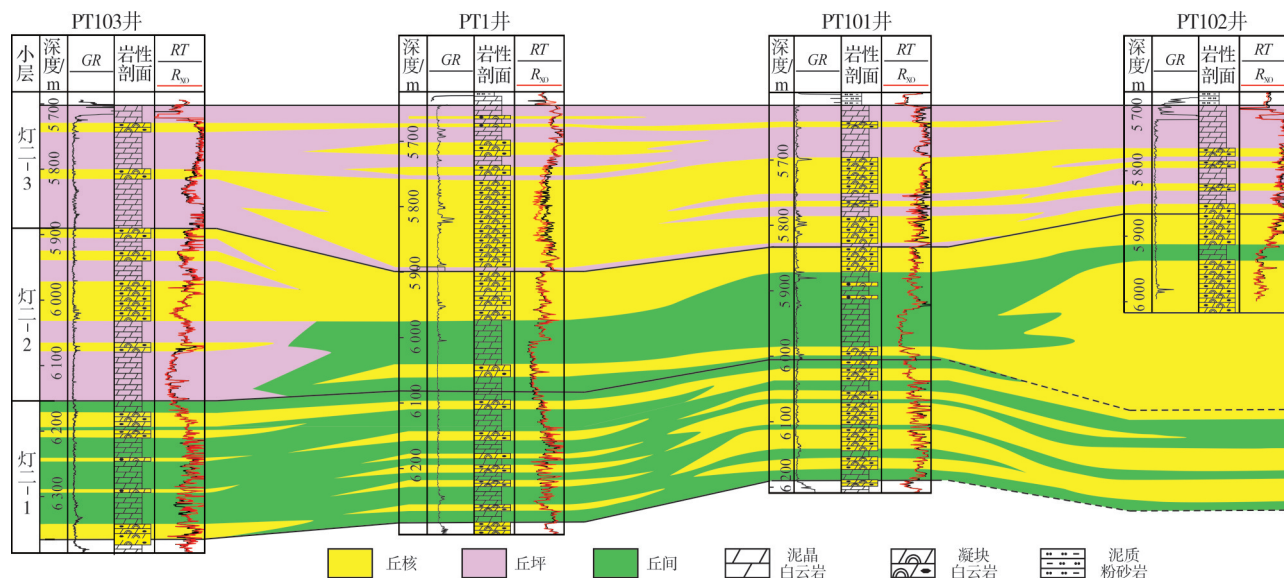


图5 四川盆地蓬莱地区灯二段沉积微相对比剖面  
Fig. 5 Correlation profile of sedimentary microfacies of the Dengying Member 2 in Penglai area, Sichuan Basin

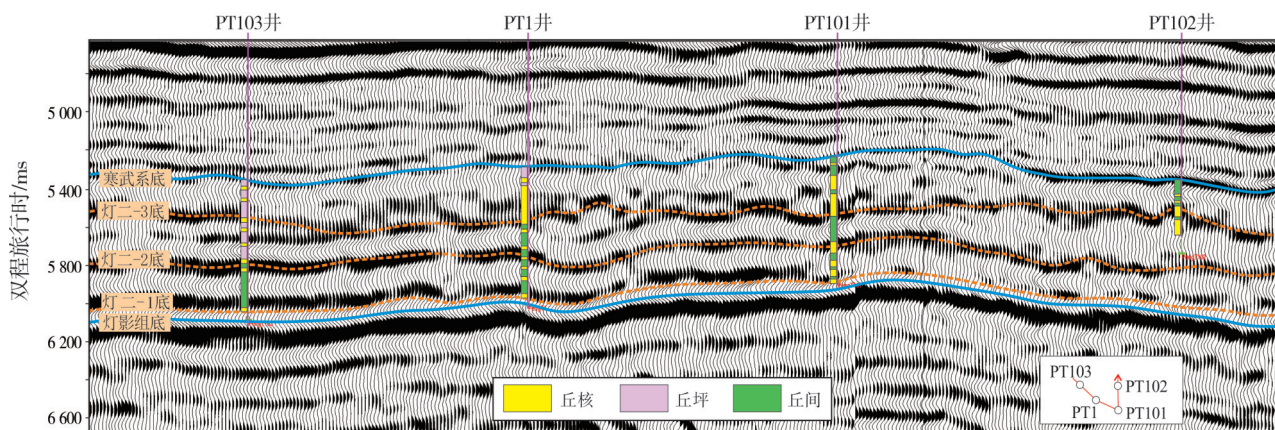


图6 四川盆地蓬莱地区灯二段连井沉积微相井震标定剖面

Fig. 6 Well-seismic calibration profile of sedimentary microfacies of the Dengying Member 2 in Penglai area, Sichuan Basin

表1 四川盆地 PT1 井区灯二段不同沉积微相地震属性特征统计

Table 1 Statistics of seismic attribute characteristics of sedimentary microfacies of the Dengying Member 2 in PT1 Well Block, Sichuan Basin

时期	小层	丘核	丘坪	丘间
晚期	灯二-3	时间厚度 >60 ms	时间厚度 <60 ms	
中期	灯二-2	时间厚度>67 ms, 振幅断续或弱 (能量<10)	时间厚度>67 ms, 振幅连续较强 (能量>10)	时间厚度 <67 ms
早期	灯二-1	振幅断续或弱		振幅连续较强

灯二-2小层内部以丘间或丘间-丘核薄互层沉积为主时,地层厚度相对较小(以PT1井、PT101井为代表);内部为丘坪-丘核互层沉积时,地层厚度相对较大并且层内出现连续波峰反射(以PT103井为代表);内部以厚层块状丘核沉积为特征时,地层厚度也相对较大,但层内波峰反射较弱或无波峰反射(以PT102井为代表)。

灯二-3小层内部整体以块状丘核发育为主时,地层厚度相对较大(以PT1井、PT101井为代表);内部为丘核-丘坪薄互层沉积时,地层厚度相对较小(以PT102井为代表)。

### 3.2 沉积微相平面展布及演化

通过编制相关小层时间厚度和层内波峰振幅能量图,对各小层沉积微相平面展布进行约束刻画,明确了研究区各时期微相展布特征及其演化规律(图7)。

灯二-1小层沉积期,研究区沉积地貌均一旦水体相对较深,以丘间沉积为主,丘核主要呈斑块状分布

在PT1井圈闭的中部、东北部及东南部地区(图7a)。

灯二-2小层沉积期,研究区平面沉积分异开始出现并逐渐加剧,沉积地貌呈现出南低北高的特征。水体相对较深的丘间主要发育在圈闭的南部及东部地区,其余地区以丘核、丘坪交互沉积为主(图7b)。

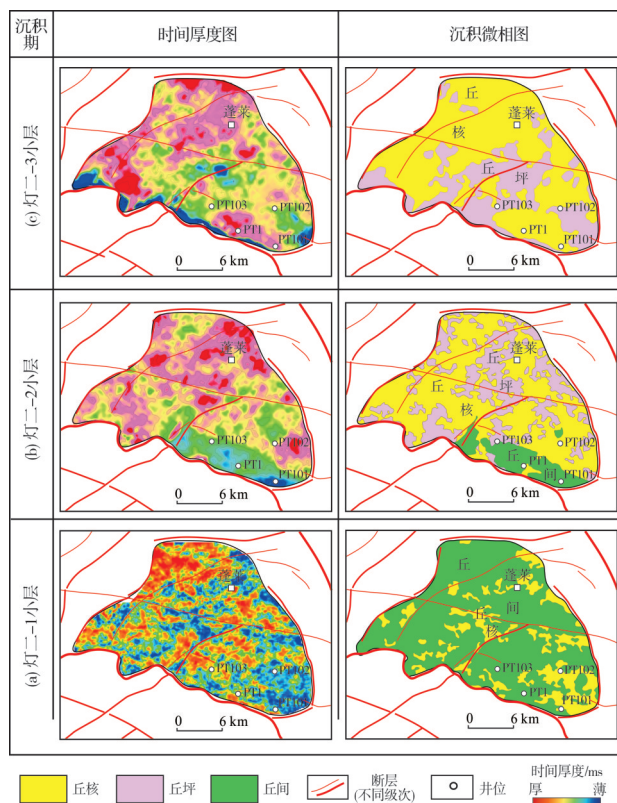


图7 四川盆地蓬莱地区灯二段岩性圈闭范围内各小层沉积微相平面展布

Fig. 7 Sedimentary microfacies of each submember in the lithologic trap zone of the Dengying Member 2 in Penglai area, Sichuan Basin



灯二-3小层沉积期,相对海平面逐渐下降,沉积水体变浅,平面上主要以丘核、丘坪沉积为主,丘核主要分布在圈闭西部、北部、东南部地区,丘坪主要分布在中部及南部地区(图7c)。

总体来看,PT1井区灯二段自下而上呈现出沉积水体逐渐变浅的特征,同时受沉积微地貌分异的影响,不同时期发育不同的优势微相类型,并且在纵横向上各微相具有一定的继承性和迁移性。以过PT101井、PT102井的剖面为例,建立了PT1井区灯二段台缘微生物丘沉积演化模式(图8)。

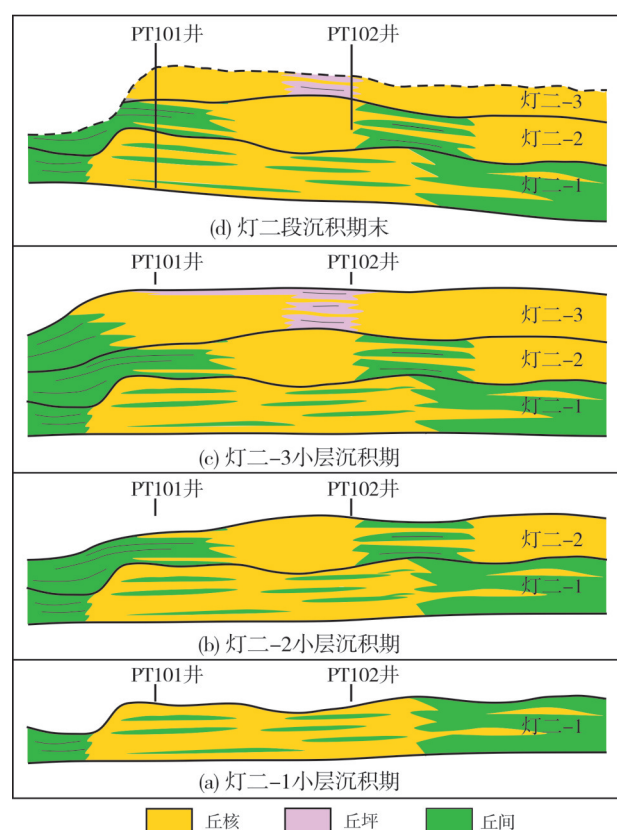


图8 四川盆地蓬莱地区灯二段沉积微相演化

Fig. 8 Sedimentary microfacies evolution of the Dengying Member 2 in Penglai area, Sichuan Basin

## 4 气藏综合评价

从PT1井区灯二段台缘微生物丘内部沉积微相平面展布特征(图7)及演化过程(图8)不难看出,单个岩性圈闭内部在空间上并非完全均质,存在不同程度的沉积分异。同时,微相与储层发育情况分析(图9)表明:丘核中储层的厚度占比最大,是优质储层形成发育的最优微相,因此储层的空间分布很大程度上受控于丘核微相的展布。

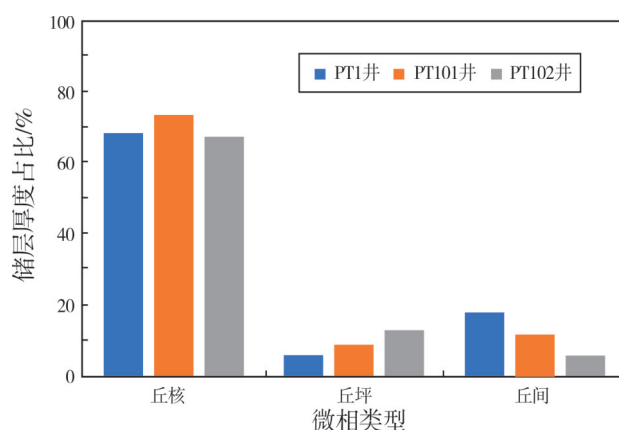


图9 四川盆地PT1井区灯二段不同沉积微相储层发育程度直方图

Fig. 9 Histogram of reservoir development degree of different sedimentary microfacies of the Dengying Member 2 in Well Block PT1, Sichuan Basin

PT1井区灯二段顶界构造具有南高北低的特征(图6)。从过已钻井并向北延伸的气藏剖面(图10)可以看出:气藏主要分布在灯二-3小层内部,PT1井、PT101井位于构造最高部位,气藏厚度最大,向构造低部位方向气藏厚度逐渐减小;灯二-2小层大部分位于-5 540 m气水界面之下,以水层发育为特征;灯二-1小层较为致密,储层不发育,仅在PT101井发育局部薄气层,与上部主体气藏相互独立。

整体上PT1井区灯二段上部气藏结构受构造、气水界面和灯二-3小层沉积微相共同控制。将灯二-3小层沉积微相叠加灯影组顶界构造及气水界面海拔线,对PT1井区灯二段岩性气藏进行综合评价,共划分出三大类有利勘探区(图11)。

I类区面积约为146 km<sup>2</sup>,整体避水高度大于100 m,可进一步细分为I<sub>1</sub>、I<sub>2</sub>两类。I<sub>1</sub>类区为灯二-3小层丘核微相发育区,推测储层厚度及气柱高度大;I<sub>2</sub>类区为灯二-3小层以丘坪微相发育为主的区域,储层厚度、气柱高度较大。

II类区面积约为77 km<sup>2</sup>,避水高度为40~100 m,同样可细分为II<sub>1</sub>、II<sub>2</sub>两类。II<sub>1</sub>类区灯二-3小层丘核微相发育,推测储层厚度大、气柱高度中等;II<sub>2</sub>类区灯二-3小层丘坪微相发育,推测储层厚度较小、气柱高度中等。

III类区面积约为75 km<sup>2</sup>,避水高度小于40 m,无论发育何种微相类型,气柱高度总体较小,勘探风险相对较大。

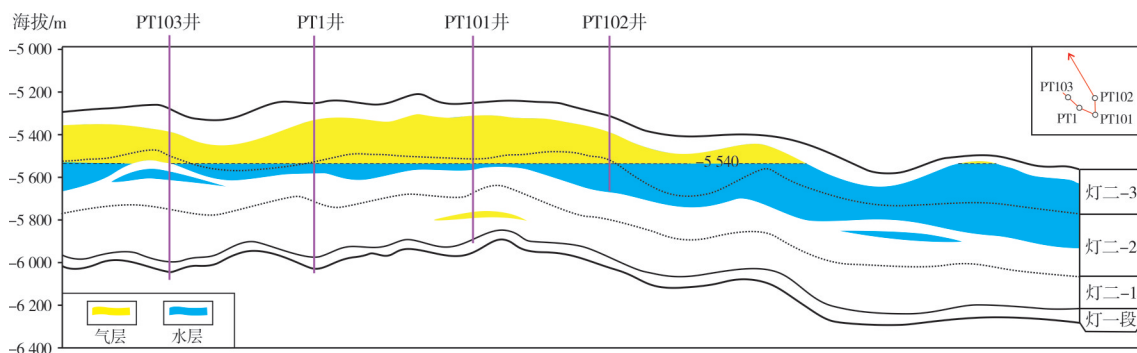


图10 四川盆地蓬莱地区灯二段南北向气藏结构模式图

Fig. 10 Structural model of gas reservoir section in north-south direction of the Dengying Member 2 in Penglai area, Sichuan Basin

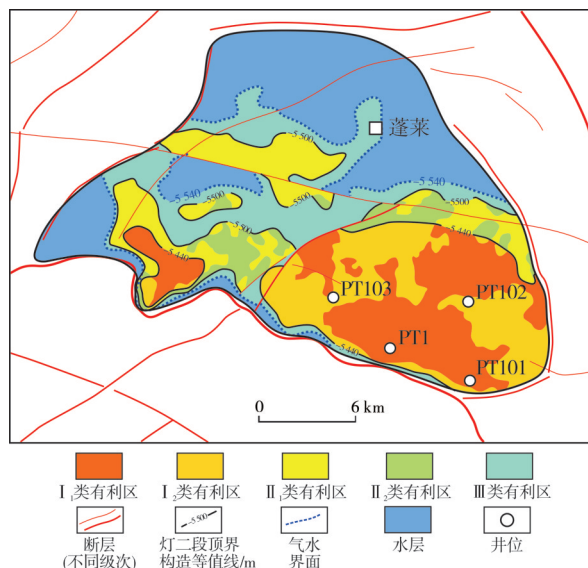


图11 四川盆地蓬莱地区灯二段岩性气藏综合评价图

Fig. 11 Comprehensive evaluation map of lithologic gas reservoir of the Dengying Member 2 in Penglai area, Sichuan Basin

## 5 结论

(1)四川盆地蓬莱地区PT1井区灯二段发育典型台缘高能丘滩沉积,岩性以凝块白云岩、泥粉晶白云岩为主,可识别出丘核、丘坪、丘间3类微相类型,自下至上主要形成丘核-丘坪、丘间-丘核两种相序组合。

(2)灯二段内部可识别划分出3个小层,自下至上分别为灯二-1、灯二-2、灯二-3,横向上各小层厚度及微相具有不同程度的分异特征,反映出PT1井区灯二段岩性圈闭内部的储集空间差异及非均质性。

(3)明确了PT1井区灯二段早、中、晚三期沉积微相平面展布特征,并建立了相应的沉积演化模式。

(4)PT1井区灯二段主体气藏结构受灯二段顶界构造、气水界面和灯二-3小层沉积微相共同控制。

对气藏进行多因素综合评价,划分出三大类有利勘探区,其中I、II类区累计面积为223 km<sup>2</sup>,具有较大的避水高度及气柱高度,是下一步集中勘探的最优甜点区。

(5)本文的评价方法与结果,可为川中古隆起斜坡区灯影组岩性气藏的后续勘探提供重要支撑和借鉴。

## 参考文献

- [1] 宋文海. 乐山—龙女寺古隆起大中型气田成藏条件研究[J]. 天然气工业, 1996, 16(增刊1): 13-26.  
SONG Wenhai. Research on reservoir-formed conditions of large-medium gas fields of Leshan-Longnusi palaeohigh [J]. Natural gas industry, 1996, 16(S1): 13-26.
- [2] 徐春春, 沈平, 杨跃明, 等. 四川盆地川中古隆起震旦系一下古生界天然气勘探新认识及勘探潜力[J]. 天然气工业, 2020, 40(7): 1-9.  
XU Chunchun, SHEN Ping, YANG Yueming, et al. New understandings and potential of Sinian - Lower Paleozoic natural gas exploration in the central Sichuan paleo-uplift of the Sichuan Basin [J]. Natural gas industry, 2020, 40(7): 1-9.
- [3] 杨雨, 罗冰, 张本健, 等. 四川盆地寒武统筇竹寺组烃源岩有机质差异富集机制与天然气勘探领域[J]. 石油实验地质, 2021, 43(4): 611-619.  
YANG Yu, LUO Bing, ZHANG Benjian, et al. Differential mechanisms of organic matter accumulation of source rocks in the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation and implications for gas exploration fields in Sichuan Basin [J]. Petroleum geology & experiment, 2021, 43(4): 611-619.
- [4] 魏国齐, 杨威, 杜金虎, 等. 四川盆地高石梯—磨溪古隆起构造特征及对特大型气田形成的控制作用[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(3): 257-265.  
WEI Guoqi, YANG Wei, DU Jinhu, et al. Tectonic features of Gaoshiti-Moxi paleo-uplift and its controls on the formation of a giant gas field, Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum exploration and development, 2015, 42(3): 257-265.



- [5] 赵路子, 汪泽成, 杨雨, 等. 四川盆地蓬探1井灯影组灯二段油气勘探重大发现及意义[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 1-12.  
ZHAO Luzi, WANG Zecheng, YANG Yu, et al. Important discovery in Well Pengtan 1 in the second member of the Dengying Formation in the Sichuan Basin and its significance[J]. China petroleum exploration, 2020, 25(3): 1-12.
- [6] 文龙, 王文之, 李林娟, 等. 川西南部灯影组展布特征新认识及油气地质勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3): 56-65.  
WEN Long, WANG Wenzhi, LI Linjuan, et al. New understandings of the distribution characteristics of the Sinian Dengying Formation in the southwestern Sichuan Basin and its significance for oil and gas geological exploration[J]. China petroleum exploration, 2020, 25(3): 56-65.
- [7] 谢继容, 张自力, 钟原, 等. 四川盆地中部—北部地区灯影组二段天然气勘探新认识及潜力分析[J]. 海相油气地质, 2022, 27(3): 225-235.  
XIE Jirong, ZHAGN Zili, ZHONG Yuan, et al. New understanding and potential analysis of natural gas exploration of the Dengying Member 2 in central-northern area of Sichuan Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2022, 27(3): 225-235.
- [8] 四川油气区石油地质志编写组. 中国石油地质志 卷十: 四川油气区[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989.  
Compilation Group of Petroleum Geology Records of Sichuan Oil and Gas Region. China petroleum geology Vol. 10: Sichuan oil and gas region[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989.
- [9] XIAO Di, CAO Jian, LUO Bing, et al. Neoproterozoic postglacial paleoenvironment and hydrocarbon potential: a review and new insights from the Doushantuo Formation Sichuan Basin, China[J]. Earth-science reviews, 2021, 212: 103453.
- [10] 陆松年, 李怀坤, 陈志宏, 等. 新元古时期中国古大陆与罗迪尼亚超大陆的关系[J]. 地学前缘, 2004, 11(2): 515-523.  
LU Songnian, LI Huaikun, CHEN Zhihong, et al. Relationship between Neoproterozoic cratons of China and the Rodinia[J]. Earth science frontiers, 2004, 11(2): 515-523.
- [11] 刘树根, 孙玮, 罗志立, 等. 兴凯地裂运动与四川盆地下组合油气勘探[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, 40(5): 511-520.  
LIU Shugen, SUN Wei, LUO Zhili, et al. Xingkai taphrogenesis and petroleum exploration from Upper Sinian to Cambrian Strata in Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (science & technology edition), 2013, 40(5): 511-520.
- [12] 罗志立. 略论地裂运动与中国油气分布[J]. 中国地质科学院院报, 1984(3): 93-101.  
LUO Zhili. A discussion of taphrogenesis and hydrocarbon distribution in China[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1984(3): 93-101.
- [13] 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.
- [14] 邢凤存, 侯明才, 林良彪, 等. 四川盆地晚震旦世—早寒武世构造运动记录及动力学成因讨论[J]. 地学前缘, 2015, 22(1): 115-125.  
XING Fengcun, HOU Mingcai, LIN Liangbiao, et al. The records and its dynamic genesis discussion of tectonic movement during the Late Sinian and the Early Cambrian of Sichuan Basin[J]. Earth science frontiers, 2015, 22(1): 115-125.
- [15] 张扬, 田少亭, 吴一凡, 等. 桐湾运动形成古风化壳对华南上震旦统储层的控制作用: 以南山坪古油藏灯影组储层为例[J]. 石油地质与工程, 2012, 26(6): 29-31, 63, 145.  
ZHANG Yang, TIAN Shaoting, WU Yifan, et al. Controlling of palaeo-weathering crust formed in Tongwan movement towards upper Sinian reservoirs of south China[J]. Petroleum geology and engineering, 2012, 26(6): 29-31, 63, 145.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 李英强, 何登发, 文竹. 四川盆地及邻区晚震旦世古地理与构造—沉积环境演化[J]. 古地理学报, 2013, 15(2): 231-246.  
LI Yingqiang, HE Dengfa, WEN Zhu. Palaeogeography and tectonic-depositional environment evolution of the Late Sinian in Sichuan Basin and adjacent areas[J]. Journal of palaeogeography, 2013, 15(2): 231-246.
- [20] 洪海涛, 杨雨, 刘鑫, 等. 四川盆地海相碳酸盐岩储层特征及控制因素[J]. 石油学报, 2012, 33(增刊2): 64-73.  
HONG Haitao, YANG Yu, LIU Xin, et al. The characteristics and development law of marine carbonate reservoirs in Sichuan Basin, China[J]. Acta petrolei sinica, 2012, 33(S2): 64-73.
- [21] 李天生. 四川盆地寒武系沉积成岩特征与油气储集性[J]. 矿物岩石, 1992, 12(3): 66-73.  
LI Tiansheng. The characteristics of sedimentary rock and reservoir of oil and gas of Cambrian System in Sichuan Basin[J]. Mineralogy and petrology, 1992, 12(3): 66-73.

- eralogy and petrology, 1992, 12(3): 66–73.
- [22] 黄文明. 四川盆地震旦系储层特征及其形成机制研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
- HUANG Wenming. Study on the characteristics and formation mechanism of Sinian reservoirs in Sichuan Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008.
- [23] 王文之, 文龙, 姚军, 等. 四川盆地震旦系灯影组层序划分及多期台缘带的发现[J]. 天然气勘探与开发, 2019, 42(4): 46–54.
- WANG Wenzhi, WEN Long, YAO Jun, et al. Sequence classification and discovery of multi-stage platform margin belts of Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin[J]. Natural gas exploration and development, 2019, 42(4): 46–54.
- [24] 何顺, 秦启荣, 王家树, 等. 川中地区震旦系灯影组四段裂缝特征及发育机理[J]. 特种油气藏, 2020, 27(4): 60–66.
- HE Shun, QIN Qirong, WANG Jiashu, et al. Fracture properties and development mechanisms of Sinian Dengying-4 member in central Sichuan[J]. Special oil & gas reservoirs, 2020, 27(4): 60–66.
- [25] 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 & oil-field development in Daqing, 2018, 37(2): 15–25.

编辑: 董庸

## Sedimentary microfacies evolution and comprehensive evaluation of gas reservoir of the Dengying Member 2 in Penglai area, central Sichuan Basin

ZHANG Benjian, ZHONG Yuan, ZHOU Gang, YAN Wei, LI Kunyu, HE Yuan, ZHAO Like, LONG Hongyu, Lü Wenzheng, QIAO Yanping

**Abstract:** The great breakthrough and centralized evaluation results of the second member of Dengying Formation (Dengying Member 2) in PT1 Well Block confirmed the development of high-quality marginal platform porous-vuggy reservoir and the favorable conditions of lithologic gas reservoir in the northern slope zone of central Sichuan paleouplift. In order to further describe the characteristics of the mound-shoal lithologic gas reservoir in Penglai area and evaluate its exploration potential, this paper analyzes the microfacies characteristics and sedimentary evolution process of the Dengying Member 2 in PT1 Well Block by making comprehensive use of drilling, logging and seismic data. The results show that: (1) High-energy mound-shoal deposit of typical marginal platform is developed in the Dengying Member 2, the lithology is dominated by clotted dolomite and micrite-very finely crystal dolomite, and mound core, mound flat and inter-mound microfacies can be identified, presenting the characteristics of multiple facies sequence combination. (2) Based on carbon isotope, resistivity curve and well-seismic calibration results, the Dengying Member 2 can be divided into three submember, the thickness and microfacies of which presents the differential characteristics of different degrees in vertical and lateral. (3) Based on the correlation between the microfacies and time thickness and internal amplitude energy of submember, the distribution characteristics of sedimentary microfacies in three stages (early, middle and late) are clarified and the sedimentary evolution model of the Dengying Member 2 in PT1 Well Block is established. (4) Under the control of structural morphology and uniform gas-water interface, the main gas reservoir of the Dengying Member 2 in PT1 Well Block is mainly distributed in submember 3 of Dengying Member 2 and is differential to some extent due to the constraint of sedimentary facies internally. Accordingly, this lithologic gas reservoir is evaluated comprehensively based on multiple factors and it is divided three types of exploration area, in which class I and II areas have large water avoidance and gas column height, and are the best dessert areas for the next concentrated exploration. This proposed evaluation method can further provide important support and reference for the subsequent exploration of lithologic gas reservoirs of Dengying Formation in the slope zone of central Sichuan paleouplift.

**Key words:** sedimentary microfacies; sedimentary evolution; lithologic trap; gas reservoir evaluation; Dengying Formation; Late Sinian; Sichuan Basin

**ZHANG Benjian**, First author: PhD, Senior Engineer, mainly engaged in oil and gas exploration and research and technical management. Add: No. 12, North Section, Tianfu Road, Gaoxin District, Chengdu, Sichuan 610000, China. ORCID: 0000-0001-6206-1448

**ZHONG Yuan**, Corresponding author: PhD, Senior Engineer, mainly engaged in oil and gas exploration and research. Add: No. 12, North Section, Tianfu Road, Gaoxin District, Chengdu, Sichuan 610000, China. ORCID: 0000-0001-5223-7470