

## 四川盆地蓬莱气区震旦系灯影组四段微生物丘结构类型与沉积演化

王雪婷<sup>1</sup>, 张云峰<sup>1,2,3,4</sup>, 刘倩虞<sup>5</sup>, 梁锋<sup>5</sup>, 连承波<sup>1,2,3,4</sup>, 李娟<sup>5</sup>, 欧家强<sup>5</sup>, 王立恩<sup>5</sup>

1 西南石油大学地球科学与技术学院; 2 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室西南石油大学分室;

3 天然气地质四川省重点实验室; 4 油气藏地质及开发工程国家重点实验室;

5 中国石油西南油气田公司川中北部采气管理处

**摘要** 丘滩复合体是四川盆地震旦系灯影组天然气产出的最重要沉积相类型,而微生物丘是丘滩复合体建造的重要组成部分,关于其类型、规模、垂向演化的研究对灯影组储层预测具有重要作用。基于蓬莱气区灯四段11口钻井的岩心、薄片、测井等资料的综合分析,按空间形态划分了3类微生物丘,明确了其内部结构及演化规律。灯四段岩性以白云岩为主,按结构组分细分为微生物白云岩、颗粒白云岩、角砾白云岩、晶粒白云岩等岩石类型。微生物丘被划分为丘基、丘核、丘盖和丘翼等微相。灯四段发育3类微生物丘:垂向加积型微生物丘,形成于微生物丘营建速率与海平面上升速率接近的环境,呈“丘基→丘核→丘盖”的生长序列,在台地边缘发育的该类微生物丘单井累计厚度一般在64~93 m之间。侧向迁移型微生物丘,形成于微生物丘营建速率大于海平面上升速率的环境,呈“丘基→丘核→丘翼”、“丘核→丘翼”等生长序列,在台地边缘发育的该类微生物丘单井累计厚度一般在25~49 m之间。小型孤立型微生物丘分布于相对低洼的丘滩体之间,规模小,无法进一步识别生长序列。蓬莱气区灯四段微生物丘以垂向加积型和侧向迁移型为主,集中发育在灯四2—3亚段台地边缘,垂向累积厚度大,横向分布连续,是灯影组最有利的相带。

**关键词** 微生物白云岩; 微生物丘; 沉积模式; 灯影组四段; 蓬莱气区; 四川盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

引用: 王雪婷, 张云峰, 刘倩虞, 等. 四川盆地蓬莱气区震旦系灯影组四段微生物丘结构类型与沉积演化[J]. 海相油气地质, 2024, 29(3): 247-256.

WANG Xueting, ZHANG Yunfeng, LIU Qianyu, et al. Types and sedimentary evolution of microbial mounds of the fourth member of Sinian Dengying Formation in the Penglai gas field, Sichuan Basin, Southwest China [J]. Marine origin petroleum geology, 2024, 29(3): 247-256.

### 0 前言

微生物丘是由微生物通过捕捉、粘结矿物,经过化学作用和微生物沉淀作用形成的碳酸盐建造<sup>[1]</sup>,是古老深层碳酸盐岩重要的微相类型,蕴含了丰富的油气资源<sup>[2]</sup>。常见的微生物形态类型包括叠层石、凝块石、树形石和均一石等<sup>[3]</sup>,受沉积环境影响,微生物岩呈现出不同的结构类型<sup>[4-6]</sup>及生长序列<sup>[7-8]</sup>。受微生物岩不同的组构类型影响,微生物丘的成岩演化过程具有明显差异性<sup>[9-10]</sup>,并形成形态、类型多样的储集空间<sup>[11-12]</sup>。前人在微生物岩形成环境<sup>[13-15]</sup>、微生物丘演化及控制因素<sup>[16]</sup>等方面的研究

中取得了诸多成果,并在阿姆河盆地侏罗系牛津阶<sup>[17]</sup>、巴西桑托斯盆地白垩系 Barra Velha (BVE) 组<sup>[18]</sup>、四川盆地震旦系灯影组<sup>[19]</sup>获得重要油气发现。

四川盆地震旦系灯影组广泛发育的微生物丘,既是优势微相,又控制了多期溶蚀改造<sup>[20]</sup>,是储层最有利的发育部位。蓬莱气区灯四段微生物岩形态多样、类型丰富,指示了其生长过程中环境的复杂性;微生物丘结构、垂向演化序列及横向迁移等特征在不同亚段的差异较大;不同类型的微生物岩及微生物丘对储层质量及规模具有重要的控制作用。前人对灯四段微生物岩的研究多聚焦于沉积模式、主控因素及储层性能等方面<sup>[21-22]</sup>,而对微生物丘的结构

收稿日期:2023-11-08; 改回日期:2024-08-28

本文受国家自然科学基金“埋藏期白云石化机制及储集意义”(42272181)和中国石油-西南石油大学创新联合体“深层碳酸盐岩规模储层形成、改造机理及优质储集区带预测”(2020CX010301)联合资助

**第一作者:** 王雪婷,在读硕士研究生,主要从事碳酸盐岩沉积学研究。通信地址:610500 四川省成都市新都区新都大道8号;E-mail: wxt99122@163.com

**通信作者:** 张云峰,副教授,主要从事碳酸盐岩沉积学与储层地质学研究。通信地址:610500 四川省成都市新都区新都大道8号;E-mail: zhyf@swpu.edu.cn

特征和发育模式的研究不够深入,这制约了微生物岩储层的勘探力度。因此,开展微生物丘的结构类型划分与沉积研究,对认识蓬莱气区灯四段微生物丘迁移规律、预测有利储层发育区具有重要意义。

## 1 区域地质背景

受基底断裂影响,四川盆地震旦纪灯影组沉积期为隆拗相间的沉积格局,以浅水碳酸盐台地沉积

为主<sup>[23-24]</sup>。灯影组自下而上分为四段:灯一段以泥粉晶白云岩为主,灯二段、灯四段以微生物白云岩为主,夹泥粉晶白云岩及颗粒白云岩等,灯三段以砂岩和泥岩为主<sup>[25]</sup>。受桐湾运动Ⅱ幕构造抬升的影响,灯四段遭受一定程度的剥蚀。四川盆地灯四段自西向东为台地—斜坡—台地的沉积格局<sup>[26-27]</sup>(图1a),台地具有明显的镶边特征;微生物丘主要沿台地边缘分布,具有多个沉积旋回、成带分布的特征<sup>[28]</sup>。

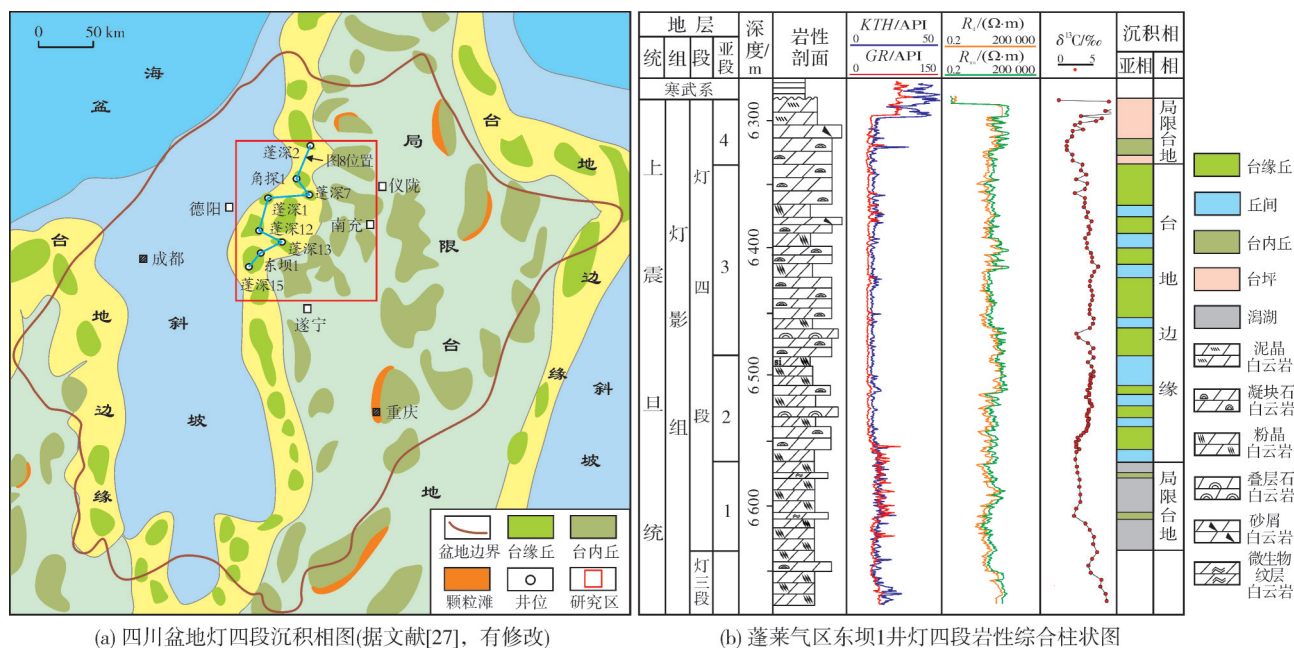


图1 四川盆地灯四段沉积相平面图及地层综合柱状图

Fig. 1 Sedimentary facies map and stratigraphic column of the fourth member of Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin

蓬莱气区位于四川盆地中北部(图1a),面积约为 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,地理位置上西起德阳市,东至阆中市仪陇县,北至绵阳市梓潼县,南靠遂宁市<sup>[29]</sup>。川中古隆起发育于震旦纪,定型于加里东运动,后续继承性发育<sup>[30]</sup>。前人将灯四段划分为上下2个亚段<sup>[31]</sup>。为了详细刻画微生物丘发育模式及规律,本文根据岩性、测井曲线、碳同位素组成等特征,将灯四段由下至上划分为4个亚段:灯四1亚段以粉晶白云岩为主,灯四2亚段以砂屑白云岩、叠层石白云岩和凝块石白云岩为主,灯四3亚段以叠层石白云岩和凝块石白云岩为主,灯四4亚段以砂屑白云岩和泥粉晶白云岩为主(图1b)。灯四段 $\delta^{13}\text{C}$ 值相较于灯三段顶部整体偏负,主要分布在 $2.5\text{‰} \sim 4.5\text{‰}$ 之间,其中灯四1、灯四4亚段负偏较明显(图1b),其变化特征与灯影期海平面的升降<sup>[32]</sup>及微生物的繁

盛有密切关系<sup>[33]</sup>

本文共完成东坝1井、蓬深1井、蓬深2井等11口井的岩性观察、952块薄片鉴定、117件岩屑样品碳同位素测试。薄片鉴定设备为Zeiss AXIO SCOPE A1偏光显微镜;碳同位素测试设备为同位素质谱仪MAT-253。相关分析测试在中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室西南石油大学分室完成。

## 2 岩石学特征

蓬莱气区灯四段岩性以白云岩为主,按结构组分可进一步分为颗粒白云岩、微生物白云岩、丘前角砾白云岩和晶粒白云岩等4类。

颗粒白云岩中颗粒类型以砂屑为主,偶见核形石。砂屑白云岩多呈灰色—深灰色(图2a),砂屑中藻砂屑普遍发育(图2b);粒径一般为 $0.2 \sim 1 \text{ mm}$ ,以



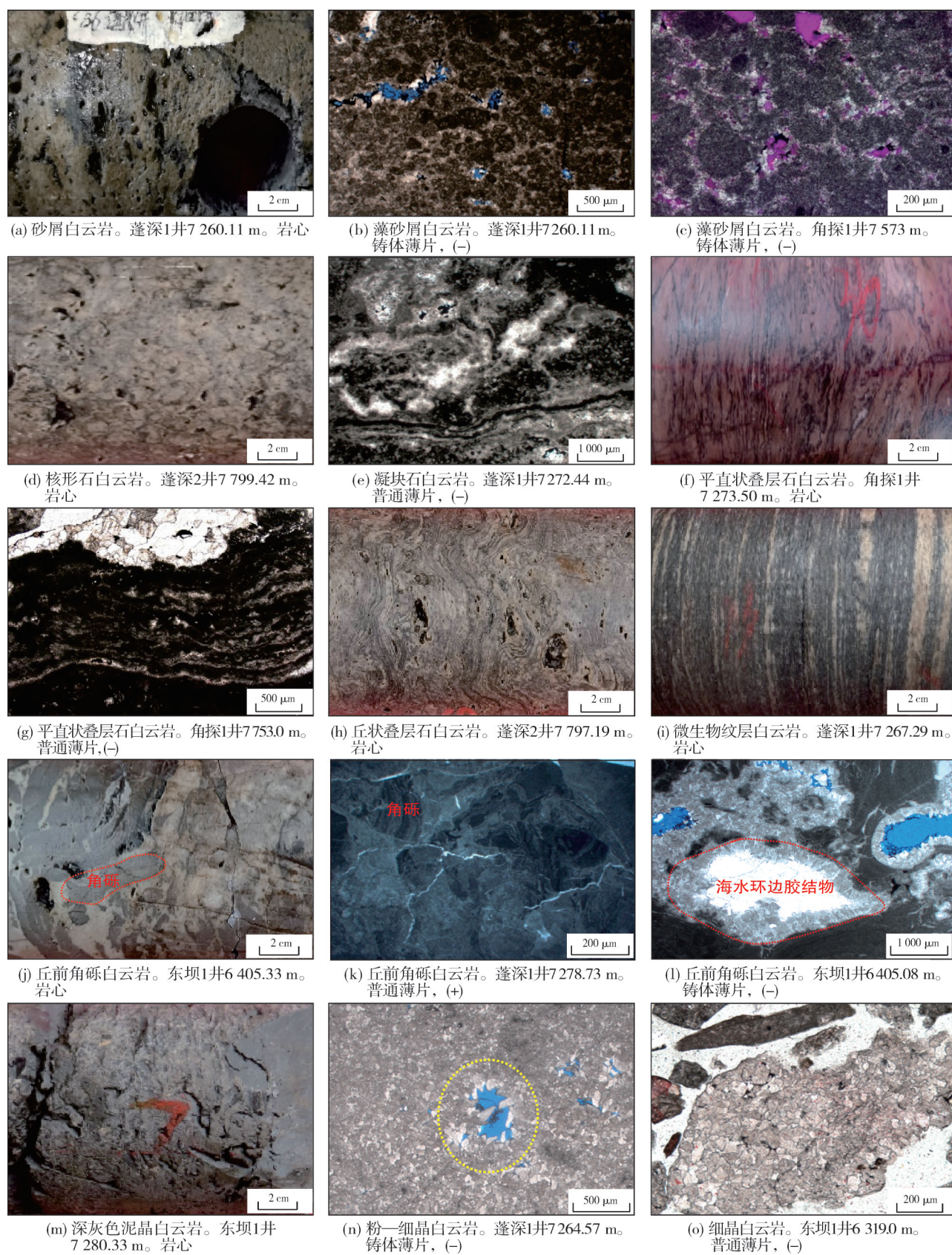


图2 蓬莱气区灯四段岩石类型

Fig. 2 Rock types of the fourth member of Sinian Dengying Formation in the Penglai gas field



中一粗砂级为主,磨圆度较高,分选较好;粒间多充填泥晶白云石,少量充填亮晶白云石(图2c)。核形石白云岩多呈灰白色—浅灰色(图2d),核形石呈椭球状、纺锤状、不规则状等形态;核心多为内碎屑,包壳由微亮晶贫藻亮层和泥晶富藻暗层组成,包壳多均匀分布,核形石粒间以充填云泥为主。

根据微生物形态及其组合,微生物白云岩可分为凝块石白云岩、叠层石白云岩和微生物纹层白云岩。凝块石白云岩多呈浅灰色—灰色,由暗色细菌群落在生长过程中粘连、融合及捕获泥晶、细碎屑物质组成,呈凝絮状集合体;凝块石相互连接形成抗浪组构,发育大量孔隙(图2e),是研究区重要的储集岩类之一。叠层石白云岩呈明暗交替的叠层状构造,按照其结构形态可细分为平直状叠层石白云岩和丘状叠层石白云岩。前者多呈浅灰色,纵向上明暗纹层互相叠置,纹层横向平缓连续,偶见断续纹层(图2f,2g);后者研究区较发育,多呈灰色—灰白色,纵向上明暗纹层呈明显的起伏弯曲状,高度不一,纹层横向连续性弱(图2h),常发育格架孔洞。微生物纹层白云岩通常呈深灰色,纹层平直、连续,厚度大小不一(图2i),系微生物生长过程中捕获碳酸盐矿物和其他更低级的微生物菌类及碎屑形成;可见少量有机质组构呈不太明显的凝絮状或纹层状分布,部分发育格架溶孔,被石英充填。平直状叠层石白云岩和微生物纹层白云岩都具有层状结构,在识别过程中可以根据宏观形态来判别<sup>[34]</sup>。

丘前角砾白云岩多呈灰色—深灰色(图2j),角砾成分为微生物白云岩,不具有定向性;部分角砾边缘具细菌生长纹层(图2k),砾间普遍发育白云石纤状等厚环边胶结物(图2l)。这些特征指示了角砾来源于微生物丘主体,受重力及风浪作用垮塌而形成。此外,在岩心上可识别出构造角砾白云岩、岩溶角砾白云岩等类型,它们形成于成岩期。

晶粒白云岩包括泥晶白云岩和粉—细晶白云岩2类。前者多呈深灰色(图2m),薄层状为主,呈泥晶结构,岩石组构以泥晶白云石为主,重结晶作用较弱,未见微生物痕迹。后者多呈灰色—浅灰色,白云石晶体多呈他形—半自形(图2n),且随着晶粒增大自形程度变好的趋势(图2o);晶体多呈线接触,部分凹凸接触;部分粉—细晶白云岩中可见微生物痕迹、残余颗粒结构,指示其原始组构可能为微生物或颗粒。

### 3 微生物丘微相划分

在蓬莱气区灯四段浅水碳酸盐台地环境中,微生物丘多发育在台地边缘或台内的水下地貌高地<sup>[7]</sup>,是丘滩体建造的重要组成部分。基于岩心、薄片、FMI成像测井等资料,将研究区微生物丘划分为丘基、丘核、丘盖、丘翼4种微相类型(图3)。

**丘基** 位于单个微生物丘的底部,是海平面下降初期形成的具有一定抗水流冲刷能力的基底,常具有低幅度的正地形。其岩-电特征有:岩石包括微生物纹层白云岩和颗粒白云岩等类型;FMI成像测井呈亮块状;常规测井具有低—中电阻、低伽马特征。在多期旋回的微生物丘中,丘基可以作为上一期旋回的顶部。

**丘核** 位于丘体的中部<sup>[28]</sup>,厚度较大。其岩-电特征有:岩石类型以凝块石白云岩、叠层石白云岩为主,发育少量硅质白云岩;FMI成像测井呈杂乱斑状;常规测井具有低—中电阻、低伽马特征。

**丘盖** 因海平面发生潮坪化导致微生物活动减弱而形成<sup>[7]</sup>。其岩-电特征有:岩石类型以粉晶白云岩和微生物纹层白云岩为主,发育少量颗粒白云岩;FMI成像测井呈亮块状;常规测井具有低—中电阻、中—高伽马特征。在多期微生物丘旋回中,丘盖会成为下一期旋回的底部。

**丘翼** 因沉积水体变浅导致微生物丘在波浪作用下发生破碎,碎屑颗粒被搬运到丘体两侧堆积而形成<sup>[5]</sup>。其岩-电特征有:岩石包括颗粒白云岩、角砾白云岩等类型,颗粒白云岩中常有藻类的痕迹;FMI成像测井呈暗斑块状;常规测井具有中电阻、低—中伽马特征。

### 4 微生物丘类型

受海平面变化、海底地貌等因素影响,微生物生长过程中排列方式会有所不同<sup>[7]</sup>。蓬莱气区灯四段发育3类微生物丘:垂向加积型(图4a)、侧向迁移型(图4b)、小型孤立型(在丘滩体之间相对低洼、静水低能地带常见,图4c)。在微生物丘成长过程中,主要呈现垂向加积型和侧向迁移型2种类型(图4a,4b):前者因生长速度与海平面上升速度接近,丘翼不常单独发育,形成“丘基→丘核→丘盖”微相组合;后者因生长速度快于海平面上升速度,在微生物丘两侧发育丘翼,形成“丘基→丘核→丘翼”及“丘核→丘翼”的微相组合。



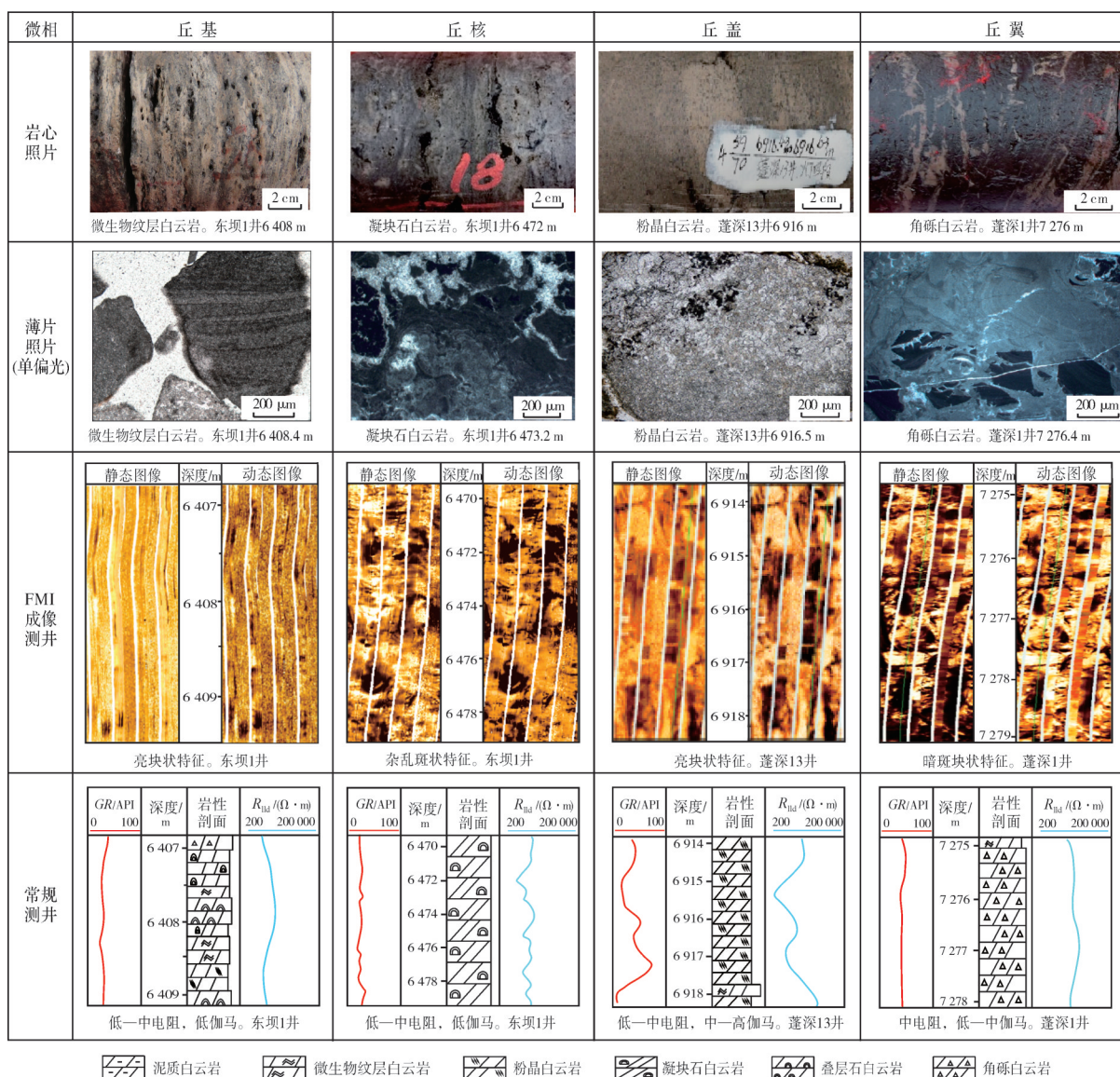


图3 蓬莱气区灯四段微生物丘微相识别图版

Fig. 3 Microfacies identification plate of microbial mound of the fourth member of Sinian Dengying Formation in the Penglai gas field

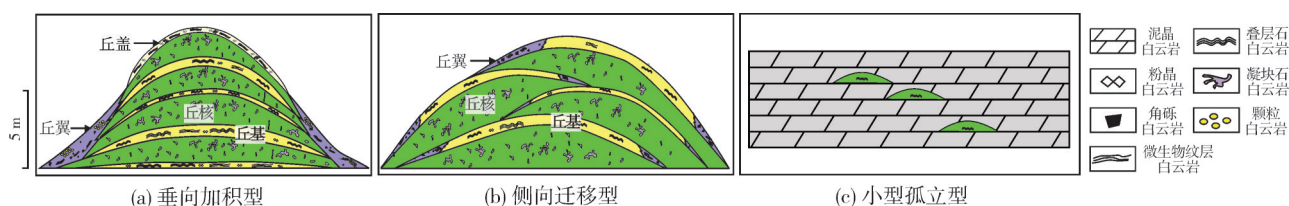


图4 蓬莱气区灯四段微生物丘类型

Fig. 4 Microbial mound types of the fourth member of Sinian Dengying Formation in the Penglai gas field

#### 4.1 垂向加积型微生物丘

完整的垂向加积型微生物丘垂向上具“丘基→丘核→丘盖”旋回(图5),自然伽马曲线呈箱型,岩性由下至上依次为叠层石白云岩→微生物纹层

白云岩→凝块石白云岩→粉晶白云岩。在营养丰富、水动力条件适宜的环境下,蓝藻开始发育并粘结白云石形成叠层石白云和微生物纹层白云岩,构成丘基。随着海平面变浅,水体能量增强,进入微生物繁盛阶段,微生物丘的发育与海平面

上升速度相近,在丘基上以垂向加积的形式构成了微生物丘的主体部分(丘核),岩性以凝块石白云岩为主。丘盖发育的粉晶白云岩,指示了快速海侵条件下沉积水体加深造成丘体停止生长,至此单个微生物丘旋回结束。研究区蓬深1井、蓬深13井、东坝1井、蓬深7井等多口取心井均见该类微生物丘发育,主要发育于灯四2、灯四3亚段,单个微生物丘厚度一般为7~24 m。

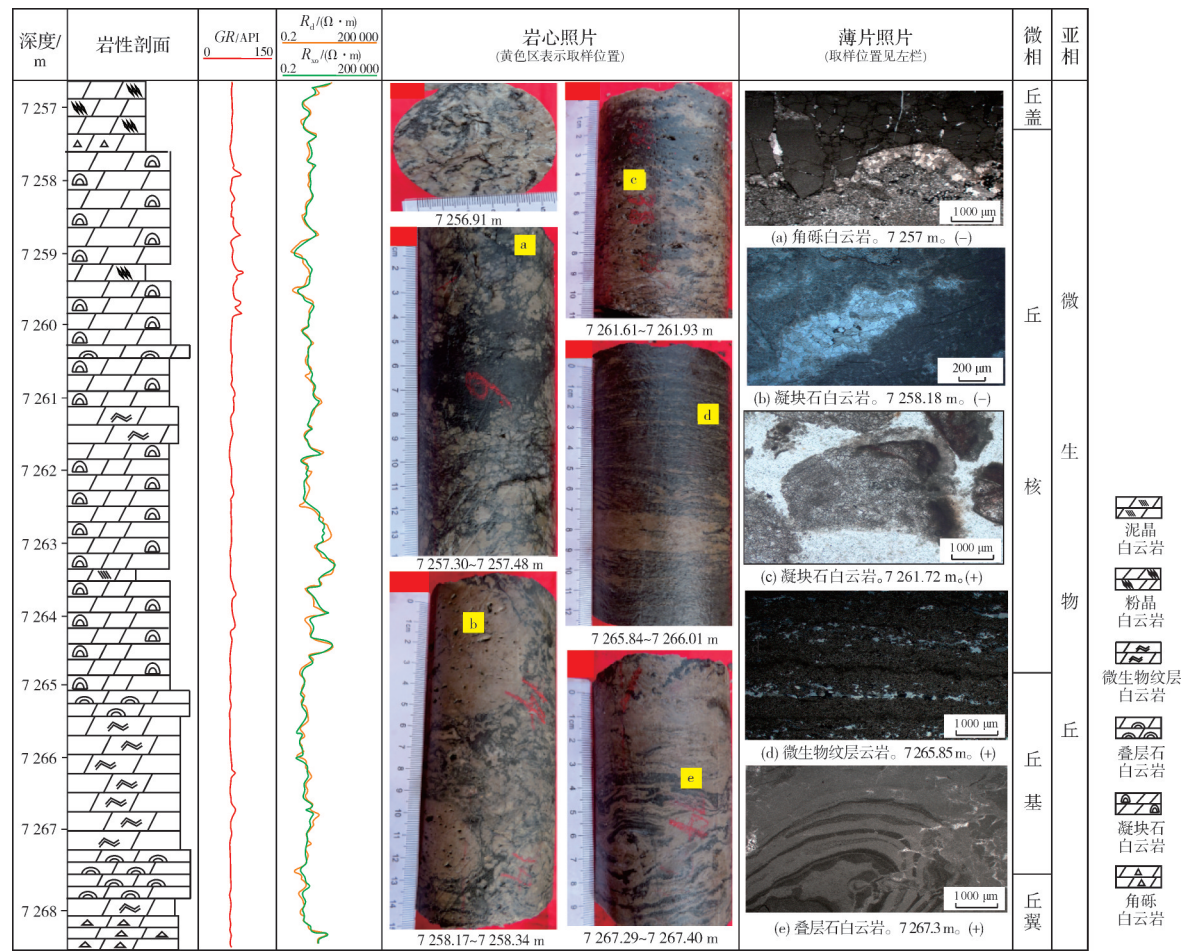


图5 蓬莱气区灯四段垂向加积型微生物丘单井垂向演化序列(蓬深1井)  
Fig. 5 Vertical sedimentary sequence of vertical accretion type microbial mounds of the fourth member of Sinian Dengying Formation in the Penglai gas field (Well Pengshen 1)

### 4.2 侧向迁移型微生物丘

受微生物丘生长速度大于海平面上升速度的影响,微生物丘主体向高地貌迁移,形成侧向迁移型微生物丘<sup>[5]</sup>。完整的侧向迁移型微生物丘在垂向上表现为“丘基→丘核→丘翼”的微相组合;但受迁移速度影响,丘翼横向规模较大,丘基常不发育,丘翼多为下一期的“丘基”。单井剖面上,自然伽马为齿化中—低幅,呈多个漏斗型叠置,岩性由下至上依次为叠层石白云岩→微生物纹层白云岩→凝块石白云岩→叠层石白云岩→凝块石白云岩→角砾白云岩(图6a),反映了一个侧向迁移型微生物丘的沉积旋回由丘基开始、

到丘翼结束;多个旋回表现为丘基→丘核→丘翼→丘核→丘翼的微相组合。研究区东坝1井、角探1井等多口取心井见该类型微生物丘发育,主要发育于灯四2、灯四3亚段。单个微生物丘厚度一般为4.5~20 m。

### 4.3 小型孤立型微生物丘

小型孤立型微生物丘发育在丘滩体之间相对低洼、静水低能地带,厚度较薄,单个厚度一般小于1 m,垂向上无法进一步识别不同微相;岩性以微生物纹层白云岩为主(图6b)。研究区蓬深8井、蓬深13井、蓬深15井等井见该类型微生物丘发育,主要发育于灯四1、灯四2亚段。



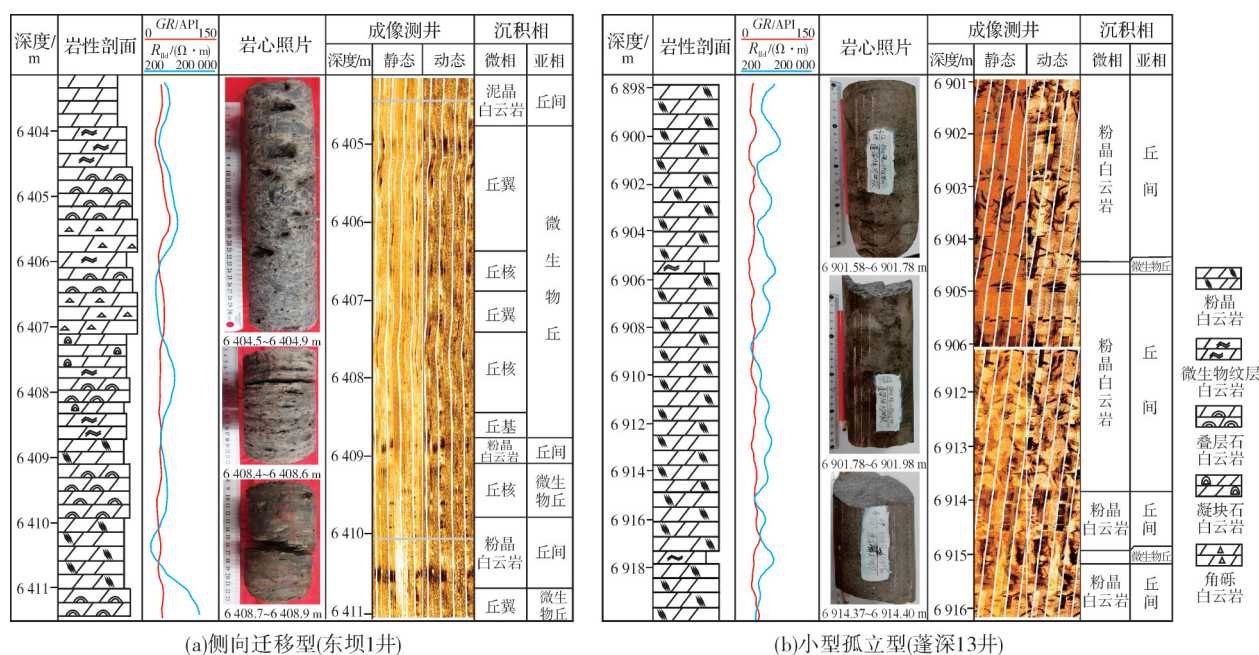


Fig. 6 Vertical sedimentary sequences of lateral migration type and small isolated type microbial mounds of the fourth member of Sinian Dengying Formation in the Penglai gas field

## 5 微生物丘空间分布特征

蓬莱气区灯四段3种类型的微生物丘均有发育,但在不同层位、不同相带中微生物丘的类型、厚度具有差异性(图7)。垂向加积型微生物丘主要发育于灯四2亚段、灯四3亚段的台地边缘,单井累计厚度一般为64~93 m;局限台地内厚度较小,单井累计厚度一般为5~20 m。侧向迁移型微生物丘主要发育于灯四2亚段、灯四3亚段的台地边缘,单井累计厚度一般为25~49 m;局限台地内厚度较小,单井累计厚度一般为12~35 m。小型孤立型微生物丘发育于灯四1亚段、灯四2亚段,台地边缘单井累计厚度一般为6~8 m;局限台地内厚度较小,单井累计厚度一般为3~7 m。由此可知,灯四2亚段、灯四3亚段的台地边缘是垂向加积型微生物丘和侧向迁移型微生物丘发育

的主体,累计厚度大,这与灯四2亚段、灯四3亚段沉积时期海平面低位震荡、水体能量较高密切相关。

在蓬莱气区近南北向的沉积微相对比剖面上,灯四段台缘带的微生物丘在横向分布上具有一定规律性(图8):灯四1时期主要为潟湖沉积,局部发育薄层微生物丘,以小型孤立型微生物丘为主;灯四2时期,在蓬深1井以东地区发育垂向加积型微生物丘,以西地区发育侧向迁移型微生物丘,少量发育小型孤立型微生物丘;灯四3时期是微生物丘主要发育时期,纵向发育多套微生物丘,横向上大面积发育;灯四4时期以台坪沉积为主,微生物丘发育规模减小,并逐渐消亡。蓬莱气区灯四段不同类型微生物丘垂向叠加(图8),可形成厚度大、连续性好的复合体,是利相带分布区。

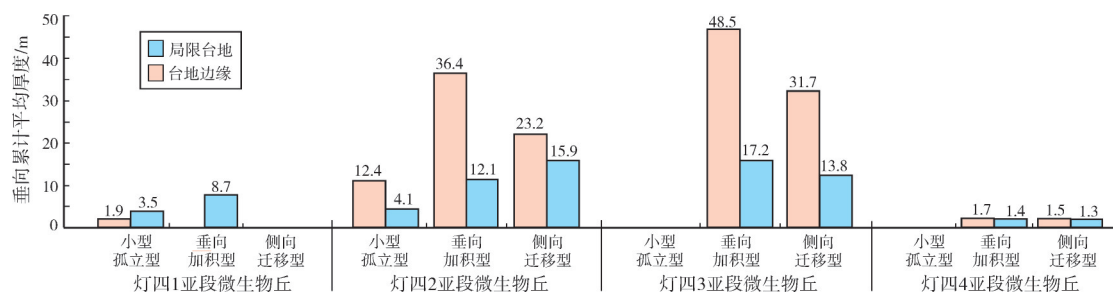


Fig. 7 Total thickness histogram of microbial mounds of the fourth member of Sinian Dengying Formation in the Penglai gas field

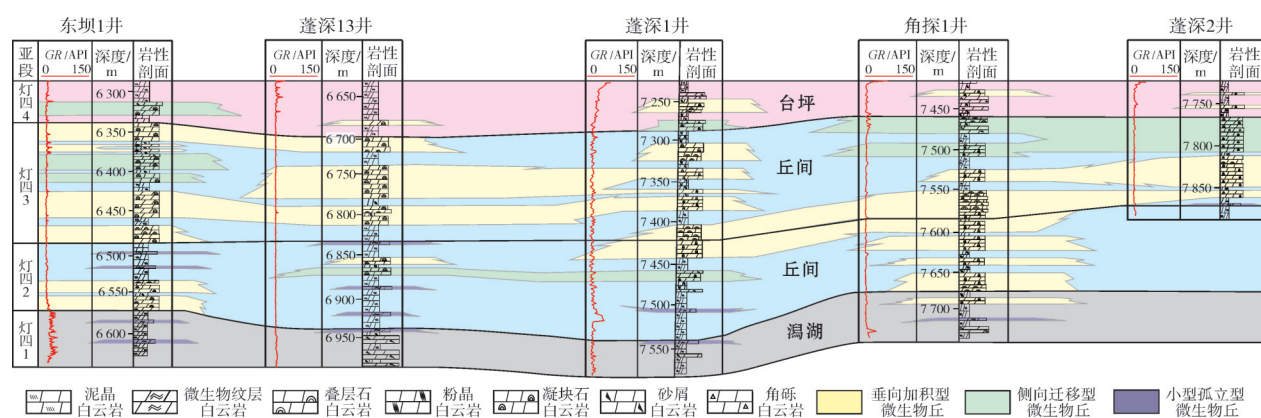


图8 蓬莱气区灯四段连井沉积相对比剖面(位置见图1a)

Fig. 8 Inter-well sedimentary facies comparison profile of the fourth member of Sinian Dengying Formation in the Penglai gas field (location is shown in Fig. 1a)

## 6 结论

(1) 蓬莱气区灯四段岩性以白云岩为主,按结构组分细分为微生物白云岩、颗粒白云岩、角砾白云岩、晶粒白云岩等岩石类型。微生物丘被划分为丘基、丘核、丘盖和丘翼等微相。

(2) 蓬莱气区灯影组四段发育3种微生物丘类型:垂向加积型微生物丘,形成于微生物丘营建速率与海平面上升速率接近的环境,呈“丘基→丘核→丘盖”的生长序列;侧向迁移型微生物丘,形成于微生物丘营建速率大于海平面上升速率的环境,呈“丘基→丘核→丘翼”、“丘核→丘翼”等生长序列;小型孤立型微生物丘,分布于丘滩体之间低洼和低能地带,规模小(单个厚度一般小于1 m)。

(3) 蓬莱气区灯四2亚段、灯四3亚段的台地边缘是垂向加积型微生物丘与侧向迁移型微生物丘发育的主要区域,垂向累积厚度大,横向分布连续性好,是灯影组最有利的相带。

### 参考文献

- [1] 刘静江, 张宝民, 周慧. 灰泥丘系统分类及石油地质特征[M]. 北京: 石油工业出版社, 2016.  
LIU Jingjiang, ZHANG Baomin, ZHOU Hui. Mud mound systems classification and petroleum geological features[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016.
- [2] 罗平, 王石, 李朋威, 等. 微生物碳酸盐岩油气储层研究现状与展望[J]. 沉积学报, 2013, 31(5): 807-823.  
LUO Ping, WANG Shi, LI Pengwei, et al. Review and prospectives of microbial carbonate reservoirs[J]. Acta sedimentologica sinica, 2013, 31(5): 807-823.
- [3] RIDING R. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms[J]. Sedimentology, 2000, 47(S1): 179-214.
- [4] 张君龙, 胡明毅, 汪爱云, 等. 塔里木盆地古城台缘带寒武系丘滩体沉积构型特征及储层分布规律[J]. 石油与天然气

地质, 2021, 42(3): 557-569.

ZHANG Junlong, HU Mingyi, WANG Aiyun, et al. Sedimentary configuration and reservoir distribution in the Cambrian mound-shoal complexes at platform margins of Gucheng Area, Tarim Basin[J]. Oil & gas geology, 2021, 42(3): 557-569.

- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 罗垚, 谭秀成, 赵东方, 等. 埃迪卡拉系微生物碳酸盐岩沉积特征及其地质意义: 以川中磨溪8井区灯影组四段为例[J]. 古地理学报, 2022, 24(2): 278-291.  
LUO Yao, TAN Xiucheng, ZHAO Dongfang, et al. Sedimentary characteristics of the Ediacaran microbial carbonates and their geological implications: a case study of the Member 4 of Dengying Formation from Wellblock MX8 in central Sichuan Basin[J]. Journal of palaeogeography, 2022, 24(2): 278-291.
- [9] 马永生, 何治亮, 赵培荣, 等. 深层-超深层碳酸盐岩储层形成机理新进展[J]. 石油学报, 2019, 40(12): 1415-1425.  
MA Yongsheng, HE Zhiliang, ZHAO Peirong, et al. A new progress on formation mechanism of deep and ultra-deep carbonate reservoir[J]. Acta petrolei sinica, 2019, 40(12): 1415-1425.
- [10] 罗冰, 杨跃明, 罗文军, 等. 川中古隆起灯影组储层发育控制因素及展布[J]. 石油学报, 2015, 36(4): 416-426.  
LUO Bing, YANG Yueming, LUO Wenjun, et al. Controlling



- factors and distribution of reservoir development in Dengying Formation of paleo-uplift in central Sichuan Basin[J]. *Acta petrolei sinica*, 2015, 36(4): 416-426.
- [11] 黄擎宇, 胡素云, 潘文庆, 等. 台内微生物丘沉积特征及其对储层发育的控制: 以塔里木盆地柯坪—巴楚地区下寒武统肖尔布拉克组为例[J]. *天然气工业*, 2016, 36(6): 21-29. HUANG Qingyu, HU Suyun, PAN Wenqing, et al. Sedimentary characteristics of intra-platform microbial mounds and their controlling effects on the development of reservoirs: a case study of the Lower Cambrian Xiaorbulake Fm in the Keping-Bachu area, Tarim Basin[J]. *Natural gas industry*, 2016, 36(6): 21-29.
- [12] 徐哲航, 兰才俊, 马肖琳, 等. 四川盆地震旦系灯影组丘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.
- [13] 胡安平, 沈安江, 郑剑锋, 等. 微生物碳酸盐岩分类、沉积环境与沉积模式[J]. *海相油气地质*, 2021, 26(1): 1-15. HU Anping, SHEN Anjiang, ZHENG Jianfeng, et al. The classification, facies and sedimentary models of microbialites[J]. *Marine origin petroleum geology*, 2021, 26(1): 1-15.
- [14] 高建平, 朱士兴. 晋东北地区寒武系微生物岩及其与沉积环境的关系[J]. *微体古生物学报*, 1998, 15(2): 166-177. GAO Jianping, ZHU Shixing. Cambrian microbialites from the northeastern Shanxi Province and their relation to sedimentary environments [J]. *Acta micropalaeontologica sinica*, 1998, 15(2): 166-177.
- [15] WHALEN M T, DAY J, EBERLI G P, et al. Microbial carbonates as indicators of environmental change and biotic crises in carbonate systems: examples from the Late Devonian, Alberta Basin, Canada[J]. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 2002, 181(1/3): 127-151.
- [16] 乔占峰, 沈安江, 倪新锋, 等. 塔里木盆地寒武统肖尔布拉克组丘体体系类型及其勘探意义[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(2): 392-402. QIAO Zhanfeng, SHEN Anjiang, NI Xinfeng, et al. Types of mound-shoal complex of the Lower Cambrian Xiaorbulake Formation in Tarim Basin, Northwest China and its implications for exploration[J]. *Oil & gas geology*, 2019, 40(2): 392-402.
- [17] 马文辛, 欧阳诚, 廖波勇, 等. 阿姆河盆地东部牛津阶微生物灰岩储层特征及成因[J]. *岩性油气藏*, 2021, 33(5): 59-69. MA Wenxin, OU YANG Cheng, LIAO Boyong, et al. Characteristics and genesis of Oxfordian microbial limestone reservoirs in eastern Amu Darya Basin [J]. *Lithologic reservoirs*, 2021, 33(5): 59-69.
- [18] MUNIZ M C, BOSENCE D. Carbonate platforms in non-marine rift system in the Early Cretaceous (pre-salt) of the Campos Basin, Brazil [R]. Long Beach: AAPG Annual Convention and Exhibition, 2012.
- [19] 刘树根, 宋金民, 罗平, 等. 四川盆地深层微生物碳酸盐岩储层特征及其油气勘探前景[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2016, 43(2): 129-152. LIU Shugen, SONG Jinmin, LUO Ping, et al. Characteristics of microbial carbonate reservoir and its hydrocarbon exploring outlook in the Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (science & technology edition)*, 2016, 43(2): 129-152.
- [20] 唐玄. 川西南地区震旦系灯影组微生物碳酸盐岩储层特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2018. TANG Xuan. Characteristics of microbialite reservoir of Sinian Dengying Formation in the southwestern Sichuan Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [21] 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.
- [22] 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): 231-245. 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): 231-245.
- [23] 丁一, 刘树根, 文龙, 等. 中上扬子地区震旦纪灯影组沉积期碳酸盐岩台地古地理格局及有利储集相带分布规律[J]. *沉积学报*, 2014(1): 1-21. DING Yi, LIU Shugen, WEN Long, et al. Paleogeographic pattern of the carbonate platform in the middle-upper Yangtze area during the deposition of the Ediacaran Dengying Formation and distribution pattern of the reservoir facies [J]. *Acta sedimentologica sinica*, 2014(1): 1-21.
- [24] 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 等. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(3): 278-293. ZOU Caineng, DU Jinhu, XU Chunchun, et al. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum exploration and development*, 2014, 41(3): 278-293.
- [25] 姚根顺, 郝毅, 周进高, 等. 四川盆地震旦系灯影组储层储集空间的形成与演化[J]. *天然气工业*, 2014, 34(3): 31-37. YAO Genshun, HAO Yi, ZHOU Jingao, et al. Formation and evolution of reservoir spaces in the Sinian Dengying Fm of the Sichuan Basin [J]. *Natural gas industry*, 2014, 34(3): 31-37.
- [26] 李华松, 代林呈, 朱祥, 等. 四川盆地震旦系灯影组沉积储层特征与勘探前景[J]. *地球科学*, 2023, 48(8): 2915-2932. LI Bisong, DAI Lincheng, ZHU Xiang, et al. Sedimentary and characteristics of the Denying Formation and its exploration prospect in Sichuan Basin [J]. *Earth science*, 2023, 48(8): 2915-2932.
- [27] 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.
- [28] 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. Sedimen-

- tary and evolutionary characteristics of Sinian Dengying Formation microbial mound in Sichuan Basin[J]. *Petroleum geology & oilfield development in Daqing*, 2018, 37(2): 15–25.
- [29] 杨雨, 文龙, 宋泽章, 等. 川中古隆起北部蓬莱气区多层系天然气勘探突破与潜力[J]. *石油学报*, 2022, 43(10): 1351–1368, 1394.
- YANG Yu, WEN Long, SONG Zezhang, et al. Breakthrough and potential of natural gas exploration in multi-layer system of Penglai gas area in the north of central Sichuan paleo-uplift[J]. *Acta petrolei sinica*, 2022, 43(10): 1351–1368, 1394.
- [30] 钟勇, 李亚林, 张晓斌, 等. 川中古隆起构造演化特征及其与早寒武世绵阳—长宁拉张槽的关系[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2014, 41(6): 703–712.
- ZHONG Yong, LI Yalin, ZHANG Xiaobin, et al. Evolution characteristics of central Sichuan palaeouplift and its relationship with Early Cambrian Mianyang–Changning intracratonic sag[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(science & technology edition)*, 2014, 41(6): 703–712.
- [31] 邓胜徽, 樊茹, 李鑫, 等. 四川盆地及周缘地区震旦(埃迪卡拉)系划分与对比[J]. *地层学杂志*, 2015, 39(3): 239–254.
- DENG Shenghui, FAN Ru, LI Xin, et al. Subdivision and correlation of the Sinian (Ediacaran) System in the Sichuan Basin and its adjacent area[J]. *Journal of stratigraphy*, 2015, 39(3): 239–254.
- [32] 陈明, 万方, 蒲心纯. 深水浊积岩层序地层学研究中碳氧同位素的应用: 以湖南大庸田坪剖面为例[J]. *沉积与特提斯地质*, 2002, 22(4): 55–60.
- CHEN Ming, WAN Fang, PU Xinchun. The application of carbon and oxygen isotopes to the sequence stratigraphy of deep-water turbidites: an example from the Tianping section in Dayong, Hunan[J]. *Sedimentary geology and Tethyan geology*, 2002, 22(4): 55–60.
- [33] 陈孝红, 李华芹, 陈立德, 等. 三峡地区震旦系碳酸盐岩碳氧同位素特征[J]. *地质论评*, 2003, 49(1): 66–73.
- CHEN Xiaohong, LI Huaqin, CHEN Lide, et al. Carbon and oxygen isotope features of the Sinian carbonate strata in the Three Gorges region[J]. *Geological review*, 2003, 49(1): 66–73.
- [34] 吴亚生. 生物岩的分类[J]. *古地理论*, 2023, 25(3): 511–523.
- WU Yasheng. Classification of biolith (biogenic rocks) [J]. *Journal of palaeogeography*, 2023, 25(3): 511–523.

编辑:董庸

## Types and sedimentary evolution of microbial mounds of the fourth member of Sinian Dengying Formation in the Penglai gas field, Sichuan Basin, Southwest China

WANG Xueting<sup>1</sup>, ZHANG Yunfeng<sup>1,2,3,4</sup>, LIU Qianyu<sup>5</sup>, LIANG Feng<sup>5</sup>, LIAN Chengbo<sup>1,2,3,4</sup>, LI Juan<sup>5</sup>, OU Jiaqiang<sup>5</sup>, WANG Lien<sup>5</sup>

1. School of Earth Science and Technology, Southwest Petroleum University; 2. Southwest Petroleum University Division of Key Laboratory of Carbonate Reservoir, CNPC; 3. Sichuan Provincial Key Laboratory of Natural Gas Geology;

4. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Development Engineering;

5. Gas Production Management Office of Central and Northern Sichuan, PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company

**Abstract:** The mound-shoal complex is the most important sedimentary facies for natural gas in the Dengying Formation of the Sichuan Basin, and microbial mound is an important component of the mound-shoal complex. Based on a comprehensive analysis of the cores, thin sections, and logging of 11 wells in the fourth member of the Penglai gas field, three types of microbial mounds are classified according to spatial morphology, and the internal structure and evolution rule are clarified respectively. The rock types of microbial mounds are divided into microbial dolomite, residual granular dolomite, breccia dolomite and crystalline dolomite. The microfacies such as mound base, mound core, mound cover, and mound flank are identified. Three types of microbial mound developed as follows: Vertical accretion microbial mound was formed in an environment where the construction rate of microbial mounds was close to the rate of sea level rise, with a growth sequence of "mound base → mound core → mound cover". The cumulative thickness of this type developed at the platform margin is generally 64–93 m. Lateral migration of the microbial mound was formed in environments where the construction rate of microbial mounds was greater than the rate of sea level rise, with a growth sequences of "mound base → mound core → mound flank" and "mound core → mound flank". The cumulative thickness of this type developed at the platform margin is generally 25–49 m. Small isolated microbial mound was distributed between mounds, with a thickness of generally decimeters and a small scale. The microbial mounds of vertical accretion and lateral migration concentrated at the platform margin in the second to third sub-members of the fourth member, with large total thickness and continuous horizontal distribution, which are the most favorable facies for the Dengying Formation in the Penglai gas field.

**Key words:** microbial dolomite; microbial mound; sedimentary model; fourth member of Sinian Dengying Formation; Penglai gas field; Sichuan Basin

**WANG Xueting**, First author: Master candidate at School of Geoscience and Technology of Southwest Petroleum University, mainly engaged in carbonate sedimentology. Add: No. 8 Xindu Ave., Xindu District, Chengdu, Sichuan 610500, China. E-mail: wx99122@163.com

**ZHANG Yunfeng**, Corresponding author: Associate Professor, mainly engaged in carbonate sedimentology and reservoir geology. Add: No. 8 Xindu Ave., Xindu District, Chengdu, Sichuan 610500, China. E-mail: zhyf@swpu.edu.cn