

# 四川盆地震旦系灯影组微生物岩多尺度结构特征与沉积新模式

徐哲航<sup>1,2,3</sup>, 李文正<sup>1,2,3</sup>, 乔占峰<sup>1,2,3</sup>, 陈政安<sup>4</sup>, 兰才俊<sup>5</sup>, 杨岱林<sup>5</sup>,  
孙晓伟<sup>1,2,3</sup>, 朱心健<sup>1,2,3</sup>, 王永晓<sup>1,2,3</sup>, 蔡君<sup>1</sup>, 王泽宇<sup>1</sup>

1 中国石油杭州地质研究院; 2 国家能源碳酸盐岩油气重点实验室; 3 中国石油集团碳酸盐岩储层重点实验室;  
4 中国石油勘探开发研究院; 5 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院

**摘要** 四川盆地震旦系灯影组微生物岩蕴含巨大资源潜力,从不同尺度描述微生物岩沉积结构有利于明确其分布规律。以露头、岩心和薄片资料为基础,多尺度刻画了微生物岩中观尺度、微观尺度和宏观尺度的结构特征。结果表明:灯影组大量发育微生物岩,根据中观结构特征可分为叠层石与凝块石两大类。此外,还发育内碎屑、核形石、鲕粒及似球粒等颗粒—泥晶白云岩。灯影组在台地上发育11种岩相,这些岩相构成3种岩相组合,分别对应潮间—潮上、浅潮下以及潟湖3种沉积环境。潮间—潮上环境常见窗格状与帐篷状暴露构造,并且发育多期叠置的微生物层宏观建造;浅潮下环境发育透镜状微生物丘建造,以及砂屑颗粒—泥粒碳酸盐岩;潟湖环境以中—厚层状泥晶白云岩为主,上部发育薄层的微生物岩沉积。由此建立四川盆地灯影组微生物岩沉积模式,可形成优质储层的微生物岩主要发育在潮间—潮上带下部和浅潮下带上部。

**关键词** 微生物岩; 沉积结构; 岩相组合; 沉积模式; 灯影组; 四川盆地

**中图分类号**: TE121.3 **文献标识码**: A

**引用**: 徐哲航,李文正,乔占峰,等. 四川盆地震旦系灯影组微生物岩多尺度结构特征与沉积新模式[J]. 海相油气地质, 2025, 30(2): 133-146.

XU Zhehang, LI Wenzheng, QIAO Zhanfeng, et al. Multi-scale structural characteristics and a new depositional model of microbialites of the Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin, SW China [J]. Marine origin petroleum geology, 2025, 30(2): 133-146.

## 0 前言

微生物岩是非常重要的油气储集岩,在全球油气生产中占有重要地位,例如阿曼的Ara群<sup>[1]</sup>,墨西哥湾Smackover组<sup>[2]</sup>,巴西桑托斯盆地白垩系<sup>[3]</sup>,我国塔里木盆地肖尔布拉克组<sup>[4]</sup>、四川盆地灯影组和雷口坡组<sup>[5]</sup>等层系的微生物岩均有油气发现。四川盆地作为我国重要的大型天然气富集盆地<sup>[6]</sup>,震旦系灯影组是最早进行油气勘探开发的地层之一。近年来,川中灯影组微生物岩勘探获得显著成果,钻遇多口高产井(高石1井、蓬探1井等井),显示了巨大勘探潜力<sup>[7]</sup>,因此开展微生物岩研究意义重大。

自微生物岩及其子类叠层石的岩石学概念被提出以来,学者们在沉积学领域取得了诸多进展<sup>[8]</sup>。Burne和Moore<sup>[9]</sup>提出“微生物岩是指底栖微生物群

落主导形成的碳酸盐岩沉积”的术语定义,该定义在油气生产中也得到广泛应用。微生物岩的生长结构非常复杂,需要进行不同尺度的描述<sup>[10-11]</sup>,众多学者采用巨观、宏观、中观和微观等4个尺度来对微生物岩进行描述<sup>[11-13]</sup>。具体到四川盆地灯影组,基于岩石学特征的藻叠层、藻凝块、藻格架等分类得到广泛应用,丘滩体概念有效地指导了油气生产。然而,目前的岩石学分类存在中观、微观尺度混用,缺乏宏观尺度分类描述,沉积意义不明确等问题。例如,前人依据中观尺度沉积结构划分了叠层石、层纹石<sup>[14]</sup>,一般认为叠层石具有更强的水动力条件,但是层纹石在水体相对较深和较浅的位置均会发育<sup>[15]</sup>,这就需要更明确的标志加以区分。在野外,确实可观察到微生物岩分布于丘状外形沉积建造中,但也有的微生物岩的分布是非丘状的,它们的

收稿日期: 2024-12-27; 改回日期: 2025-03-13

本文受中国石油天然气集团有限公司基础性前瞻性重大科技专项“叠合盆地中下组合油气成藏与保持机制研究”(编号:2023ZZ02)资助

**第一作者**: 徐哲航,博士,工程师,主要从事碳酸盐岩沉积储层与油气地质研究工作。通信地址: 310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号; E-mail: xuzh\_hz@petrochina.com.cn

**通信作者**: 李文正,博士,高级工程师,从事沉积储层与勘探部署研究。通信地址: 310023 浙江省杭州市西湖区西溪路920号; E-mail: liwz\_hz@petrochina.com.cn

沉积环境可能不同。因此,微生物岩不同尺度的结构特征和沉积模式有待于进一步系统梳理和总结。

本文基于四川盆地及其周缘的野外实测资料、钻井资料,总结灯影组不同沉积环境中微生物岩的分布规律,建立微观—宏观尺度微生物岩沉积模式,以期对四川盆地灯影组有效储层的预测提供理论基础,为灯影组天然气进一步勘探提供地质依据。

## 1 区域地质概况

四川盆地是在上扬子克拉通基础上发展起来的叠合型含油气盆地,面积约 $18 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,其在震旦纪—中三叠世以海相沉积为主,晚三叠世—新生代以陆相沉积为主。震旦纪早期,随着伸展作用的逐渐增强,四川盆地内先前存在的基底断裂发生活化,前期裂谷的垒—堑式古地貌被加强且影响到上覆地层的差异沉降<sup>[16]</sup>。强烈的伸展作用使得震旦系内形成多组NE、NW向正断层,其中规模较大的高石梯—磨溪西侧断层长达300 km,断距可达到300~500 m<sup>[17]</sup>。这些断裂活动进一步增加了断层两盘的差异沉降幅度,致使上盘迅速沉降,下盘相对隆升<sup>[16]</sup>,最终在先存裂谷上于震旦纪发育了一个大型裂陷槽。该裂陷槽在陡山沱组沉积期即存在雏形<sup>[17]</sup>,在灯二段沉积期分布于川中至川北的德阳—安岳一带,至灯四段沉积期规模扩大到绵阳—长宁一带。裂陷在早寒武世筇竹寺组沉积期规模达到最大,随后区域性拉张作用转为挤压作用<sup>[18]</sup>,至寒

武系龙王庙组沉积时基本填平补齐<sup>[19]</sup>。

震旦系灯影组顶部与下寒武统麦地坪组或筇竹寺组呈假整合或不整合接触<sup>[20]</sup>,厚200~1 000 m,为四川盆地良好的碳酸盐岩油气储层。灯影组自下而上可以分为4个岩性段:灯影组一段(简称灯一段)主要为泥粉晶白云岩,夹少量细晶白云岩,局部见纹层状结构;灯二段以叠层石白云岩和凝块石白云岩为主,中下部发育的葡萄状构造是该层的标志,上部还发育混积砂质白云岩和泥质条带;灯三段为以泥质为主的陆源碎屑沉积;灯四段以含有大量硅质条带、硅质团块为特征,主要岩石类型为叠层石白云岩、凝块石白云岩、泥粉晶白云岩和硅质白云岩<sup>[21]</sup>。灯二段和灯四段与上覆地层都是平行不整合接触(图1a),不整合面下发育大量溶孔、溶洞和角砾,反映了大规模暴露溶蚀的特征。

灯影组一段至二段沉积时为缓坡状陆表海台地环境,台地上广泛发育潮坪<sup>[22-23]</sup>,此时四川盆地西北缘松潘—甘孜海向南伸入台地内部,发育裂陷槽<sup>[24]</sup>,该阶段裂陷槽规模较小。前人研究显示裂陷槽边缘与台地边缘发育大量微生物岩储集体(即丘滩体),延伸范围广,几乎连接成片(图1b)。至灯四段沉积时,演化为类似镶边碳酸盐台地的模式,裂陷槽范围增大,同沉积断层活动和差异沉降使得裂陷槽与台地间斜坡的坡度变陡<sup>[25]</sup>,此时台缘范围缩小,台缘微生物岩储集体范围也相对缩小(图1c)。

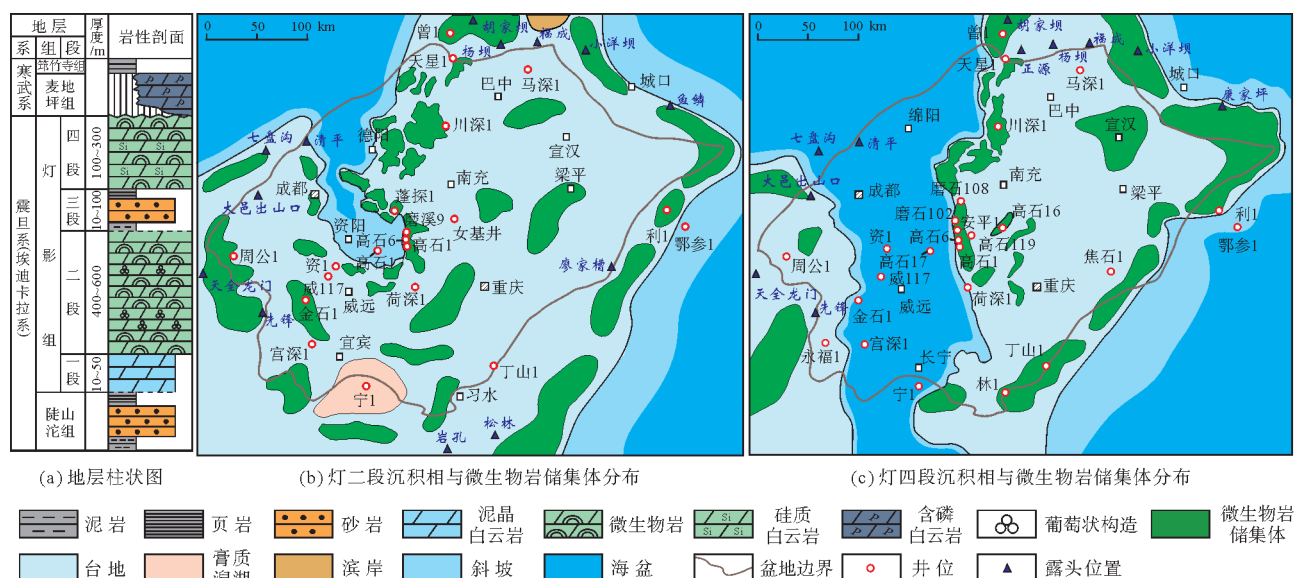


图1 四川盆地震旦系灯影组地层柱状图、沉积相与微生物岩储集体分布(据文献[24],修改)

Fig. 1 Stratigraphic column and distribution of sedimentary facies & microbialite-dominated reservoir of the Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin(cited from reference[24], modified)

## 2 研究资料与方法

本次研究选取四川盆地及周缘胡家坝、杨坝、福成、先峰、松林5条灯影组剖面,以及蓬探1井、高石6井、高石16井、高石119井、磨溪9井、磨溪102井、磨溪108井、焦石1井、安平1井共9口钻井的岩心,剖面 and 井位置见图1。共采集样品227件,其中磨制薄片135张、手标本磨光面53件。

基于以上资料,本次研究从4个构成尺度来对微生物岩进行描述:巨观构造、宏观构造、中观构造和微观构造<sup>[10-11]</sup>。微生物岩的巨观构造用来描述一套地层,范围可达几十至上百米,反映的是岩层的物理性质,其中包含多个微生物岩建造。微生物岩的宏观构造描述的是单个微生物建造的外部形态,如柱状、穹状、分枝状等,范围在几十厘米至数米。灯影组罕有柱状、分枝状微生物建造形态的报道,笔者观察到的形态特征多为丘状或层状,因此本次研究描述的微生物建造应介于巨观—宏观尺度之间,是在野外或者是连续的岩心剖面上的描述。中观构造是描述微生物岩特征、划分微生物岩类型最重要的尺度,它是指微生物岩宏观建造的内部结构;中观构造尺度在毫米至厘米级,即研究人员肉眼可观察的范围之内,因此本次研究应用手标本特别是磨光面进行中观尺度描述。微生物岩的微观构造用以描述其显微结构,是亚毫米级别的;本次研究通过显微镜观察、描述微生物岩中的碳酸盐泥、胶结物等岩石学特征。

## 3 沉积结构特征

### 3.1 中观与微观微生物结构类型

研究者们通常依据中观沉积结构划分微生物岩类型<sup>[26-27]</sup>,在微观尺度可观察到碳酸盐泥粘结形成的微生物岩基本形态特征或颗粒。根据中观尺度微生物岩特征,四川盆地灯影组微生物岩可分为叠层石和凝块石两大类。

#### 3.1.1 叠层—纹层微生物岩

叠层石是由微生物纹层作为基本单元构成的中观微生物结构类型<sup>[10]</sup>。这些纹层明暗相间:暗色纹层厚度介于0.1~1 mm,微观上由微晶白云石(晶体大小为10~50  $\mu\text{m}$ )和捕获的内碎屑和似球粒组成;浅色纹层厚度介于1~10 mm,微观上由细晶白云

石(晶体大小为50~250  $\mu\text{m}$ )和白云石胶结物构成。在灯二段和灯四段都可以观察到大量叠层石和微生物纹层,根据起伏程度分类,灯影组可观察到的微生物纹层有层状(图2a)、波状(图2b)、微波状(图2c)、穹状和平直状<sup>[22, 26, 28]</sup>。

潮上带—潮间带的叠层石中可以观察到帐篷构造(图2d)和窗格构造。帐篷构造高度介于10 cm至2 m,宽度介于10 cm至4 m,在横向上不连续,顶部有裂口充填等厚的纤状白云石胶结物。窗格构造也称为鸟眼构造,窗格大小往往为毫米级,其中充填等厚纤状和丛状白云石胶结物。潮下带的叠层石的纹层间充填碳酸盐泥,窗格构造和帐篷构造不发育(图2e)。

#### 3.1.2 凝块石微生物岩

凝块石是由微生物凝块作为基本单元组成的中观微生物结构类型。凝块是非层状、不规则、毫米—厘米级的中观结构单元(图2f—2i),微观上是由碳酸盐泥或粘结捕获的颗粒构成,可描述为凝块粘结颗粒<sup>[13]</sup>。微观尺度上,凝块石中的白云石晶体大小呈现两极分化,暗色凝块内部的晶体大小为10~100  $\mu\text{m}$ ,充填孔隙的白云石胶结物晶体大小为100~250  $\mu\text{m}$ 。凝块石在灯二段和灯四段都有分布。与叠层石相似,在潮间—潮上环境的凝块石中可以见到窗格构造(图2g),而潮下凝块石的凝块中会粘结较多颗粒,凝块间充填碳酸盐泥(图2i)。

## 3.2 颗粒与灰泥支撑结构类型

四川盆地灯影组碳酸盐台地上除了发育微生物岩以外,还存在许多其他沉积结构的碳酸盐岩石类型,可以应用邓哈姆分类来描述成颗粒白云岩、泥粒白云岩、粒泥白云岩和泥晶白云岩。其中的颗粒类型包括以砂屑为主的内碎屑、核形石、似球粒和鲕粒。

砂屑是灯影组最常见的颗粒类型,分选中等到好,磨圆中等到好,近圆到圆,并且经常被捕获沉积在微生物岩中观沉积结构中,砂屑间大部分充填云泥,少见白云石胶结物(图3a, 3b),所以砂屑泥粒白云岩比砂屑颗粒白云岩更常见。内碎屑泥粒—颗粒白云岩沉积在浅潮下环境中,分选较差的内碎屑颗粒沉积可能是受到风暴的影响<sup>[29]</sup>。核形石是具有不规则圈层的包覆粒<sup>[28]</sup>,其内部为其他颗粒如内碎屑、似球粒甚至凝块,外部缠绕不规则圈层,因此



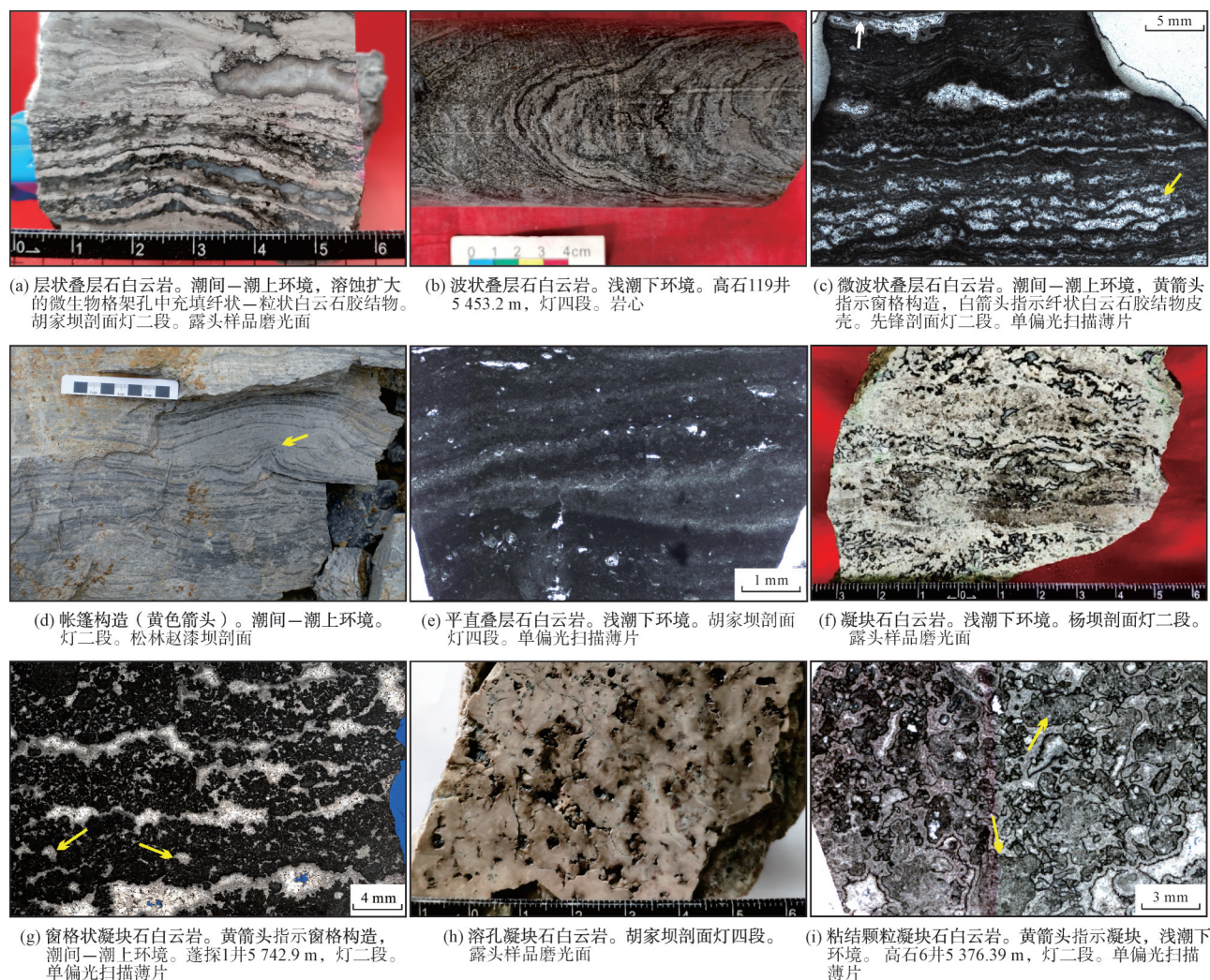


图2 四川盆地灯影组微生物岩石学特征

Fig. 2 Petrological characteristics of microbialites of the Dengying Formation in Sichuan Basin

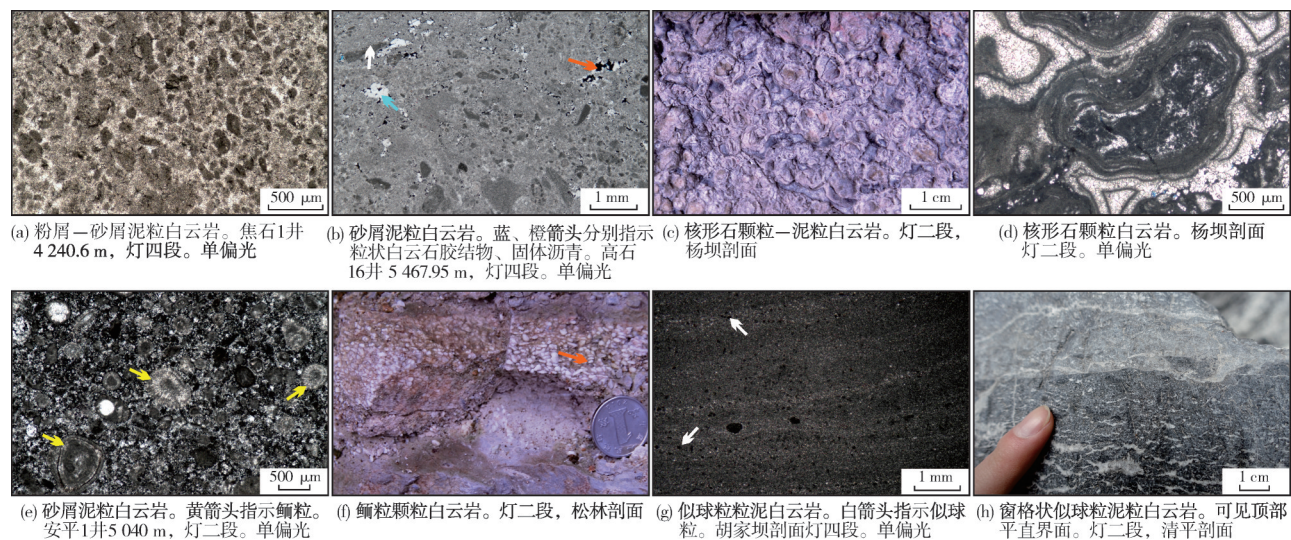


图3 四川盆地灯影组碳酸盐岩中颗粒结构的岩石学特征

Fig. 3 Petrological characteristics of carbonate grains of Dengying Formation in Sichuan Basin



往往粒径较大(常大于2 mm),可肉眼识别(图3c)。灯影组核形石分选介于中等到好,圆度是近圆到圆,核形石颗粒/泥粒/粒泥白云岩所占地层厚度较小,符合潮下带迁移变动的环境特征(图3d)<sup>[30-32]</sup>。鲕粒是具有规则圈层的包覆粒<sup>[28,33-34]</sup>。灯影组鲕粒分选较好,圆度为较圆,鲕粒颗粒碳酸盐岩沉积于浅潮下环境中(图3e,3f)。似球粒是由微晶白云石构成的、无内部结构的非骨骼颗粒。灯影组大部分似球粒大小在0.1 mm左右,圆度为圆—亚圆,球状—椭球状外形。似球粒粒泥白云岩颜色通常为灰色至深灰色,缺乏暴露构造,发育于潟湖(深潮下)环境(图3g)<sup>[23]</sup>。而窗格状的似球粒泥粒碳酸盐岩(图3h)常与含暴露构造的叠层石、凝块石伴生,沉积于潮间—潮上旋回,基质中发育的自生石英反映了盐度较高的局限环境。

泥晶白云岩中绝大部分为晶粒小于10 μm的白云石,颗粒和微生物结构占比小于10%。潮上带的泥晶白云岩中可见窗格构造、干裂缝等暴露标志。土黄色泥晶泥质白云岩也形成于潮上带。而无暴露标志的中—厚层状泥晶白云岩发育于局限台地潟湖(深潮下)环境。

### 3.3 微生物岩宏观建造特征

微生物岩不仅在中观尺度上呈现出独有的沉

积结构特征,在宏观(巨观)尺度上也存在微生物丘、微生物层等建造形态<sup>[10,35]</sup>,并且在不同沉积环境中具有不同的宏观建造特点<sup>[36-37]</sup>。

在四川盆地南部先锋野外露头剖面,可观察到一处灯影组宏观微生物岩建造。剖面底部出露地表的岩相为中层潮下泥粒白云岩(厚约0.5 m),其上发育薄层窗格状凝块石白云岩,定为潮间沉积。再向上分布薄层窗格状平直微生物纹层白云岩与窗格状似球粒泥粒白云岩互层,可见窗格构造和干裂缝等暴露标志,因此定为潮上带。这是第1个潮间—潮上微生物岩旋回,旋回底部较平整,顶部具有10~20 cm的起伏,属于微生物层。向上发育第2个潮间—潮上旋回,下部凝块石中可见窗格孔,顶部为窗格状似球粒泥粒白云岩。该旋回建隆高度约为80 cm,是微起伏的微生物层。第3个旋回由窗格状凝块石和叠层石组成,具有约60 cm的起伏高度,也属于微生物层。因此,先锋剖面潮缘旋回中形成了多期叠置的微生物层,横向上延伸9~20 m<sup>[38]</sup>。

胡家坝野外露头剖面在距灯四段底部198~211 m处,可观察到连续的微生物岩沉积,推测存在微生物建造。图4中可见到3个半潮间—潮上旋回,常见窗格状构造,并且可观察到帐篷状构造和席状缝。根据窗格状似球粒粒泥白云岩和窗格状泥晶白云岩可

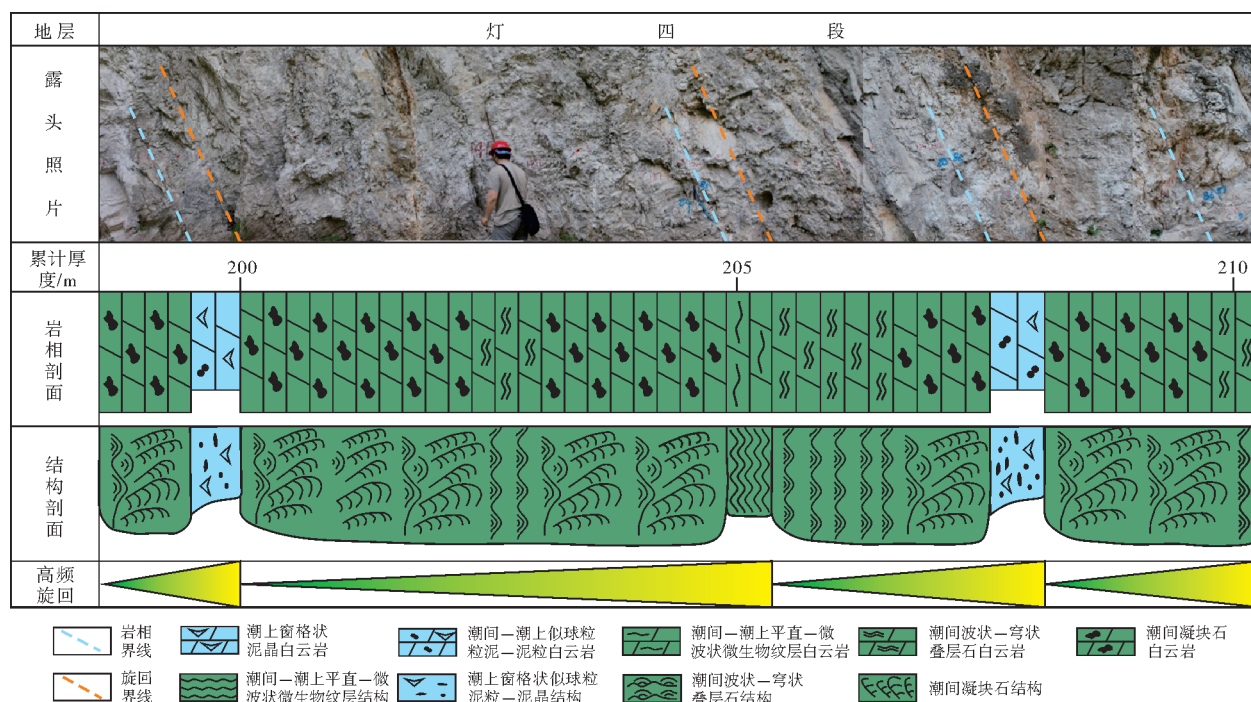


图4 四川盆地胡家坝剖面灯四段多期潮间—潮上旋回生物层建造

Fig. 4 Microbial biostromes in multi-stage intertidal-supratidal cycles in the Member 4 of Dengying Formation at the Hujiaba section, Sichuan Basin



识别出潮上带,而潮间—潮上微生物岩中包括了凝块石与波浪状微生物纹层白云岩。在胡家坝剖面发育大量单旋回厚度小于5 m的潮间—潮上旋回,顶部常见暴露标志,反映高频海平面频繁升降。由于剖面地层产状倾角较大,因此难以评价微生物岩建造侧向延伸范围,但是旋回顶部为正常暴露面而未见更大起伏,根据大量发育的微生物岩,推测为多期叠置的微生物层<sup>[39]</sup>。

在遵义市松林镇西南约1.5 km的赵漆坝采石场灯影组剖面,可观察到一丘状宏观微生物建造(图5)。剖面底部为中层微波状微生物纹层白云岩,可见帐篷状构造,因此是潮间—潮上带微生物岩。其上发育一薄层土黄色泥晶泥质白云岩,厚

15~20 cm,为潮上沉积(图5中的A)。该旋回之上可见一透镜状建隆,高4.2 m、长16.6 m。底部为厚层泥粒白云岩(图5中的B),除见似球粒和砂屑外还可观察到凝块,属于潮下带沉积。向上发育薄层穹状—波浪状叠层石白云岩(图5中的C),向西南方向纹层由起伏较大的穹状变为起伏较小的波浪状。建造顶部为薄层潮上窗格状粒泥—泥晶白云岩。根据此建隆透镜状的外形以及内部发育的微生物岩,判断其为微生物丘。在丘体东北部,下一旋回中的潮下泥粒白云岩和平直—微波状微生物纹层超覆在丘体之上,在顶部尖灭(图5中的D)。随后沉积潮下波浪状叠层石。该微生物丘建造具有潮坪环境迁移沉积的特点<sup>[28]</sup>。

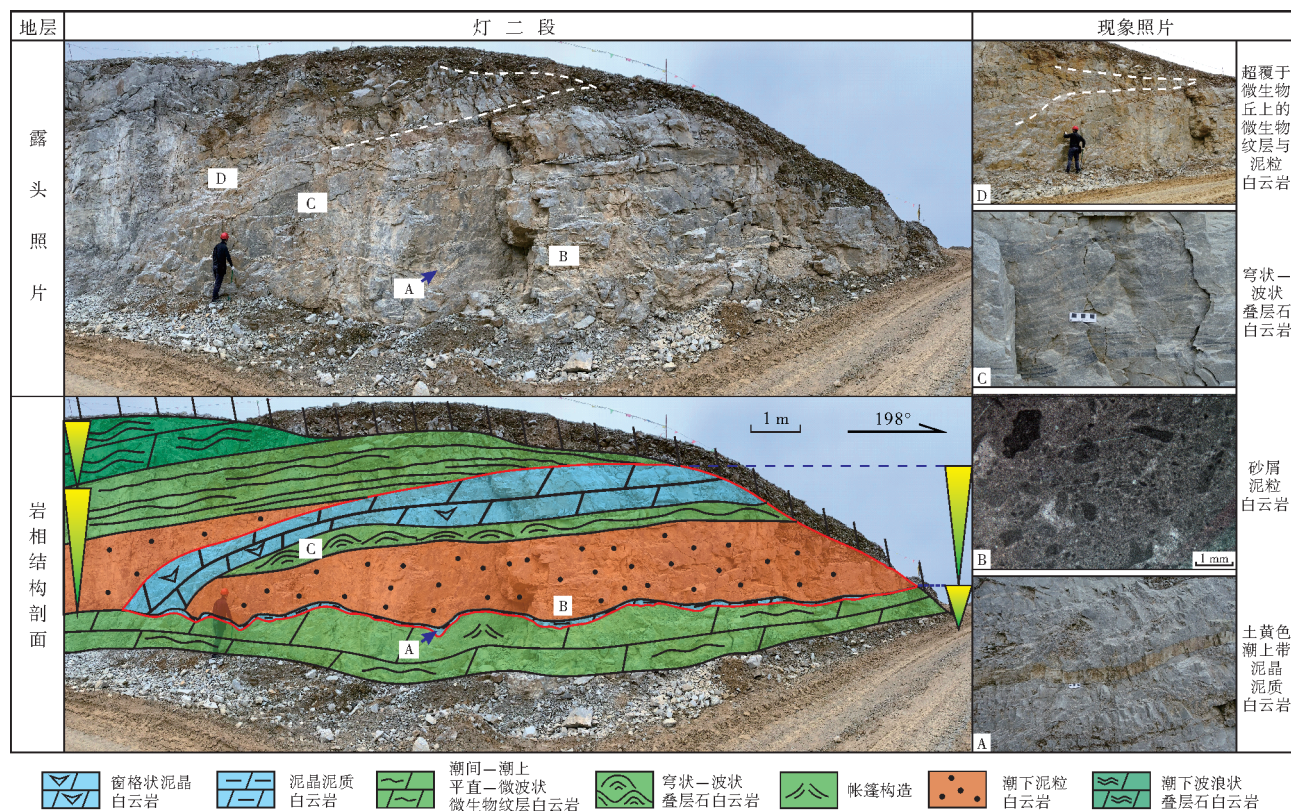


图5 四川盆地松林赵漆坝剖面灯二段浅潮下迁移宏观微生物丘

Fig. 5 Shallow-subtidal migrated macrobial bioherm in the Member 2 of Dengying Formation at the Zhaoqiba section in Songlin Town, Sichuan Basin

## 4 沉积环境与沉积模式

### 4.1 岩相组合与沉积环境

在四川盆地灯影组碳酸盐台地上可识别出3种与微生物岩相关的岩相组合,分别是潮间—潮上组合(LA1)、浅潮下组合(LA2)和潟湖组合(LA3)(表1)。

上述岩相组合分别对应3种灯影组台地上的沉积环境,由此可识别3种向上变浅的沉积旋回,分别是潮间—潮上旋回、浅潮下旋回和潟湖旋回,其叠置规律揭示台地演化的周期性海平面波动<sup>[22,40]</sup>。

#### 4.1.1 潮间—潮上岩相组合

潮间—潮上岩相组合在灯二段和灯四段均广



表1 四川盆地灯影组碳酸盐地潮坪环境岩相组合与微生物岩沉积特征

Table 1 Lithofacies associations and microbialite depositional characteristics of carbonate platform tidal flat of Dengying Formation in Sichuan Basin

岩相组合	英文缩写序号	岩 相	沉积环境	识别标志	宏观(巨观) 微生物建造
潮间—潮上 组合(LA1)	LF1	窗格状泥晶白云岩	潮上	常见窗格状 和帐篷状构造	微生物层
	LF2	窗格状似球粒粒泥—泥粒白云岩	潮间—潮上		
	LF3	窗格/帐篷状平直—微波状 微生物纹层白云岩	潮间—潮上		
	LF4	窗格/帐篷状波状—穹状 叠层石白云岩	潮间		
	LF5	窗格状凝块石白云岩	潮间		
浅潮下 组合(LA2)	LF6	内碎屑泥粒—颗粒白云岩	浅潮下	发育潮道,微生物岩中 颗粒较丰富	微生物丘
	LF7	波状—穹状叠层石白云岩	浅潮下		
	LF8	凝块石白云岩	浅潮下		
潟湖组合 (LA3)	LF9	水平纹层状白云岩	潟湖	中—厚层状泥晶 白云岩为主	难以形成 微生物建造
	LF10	似球粒粒泥—泥晶白云岩	潟湖		
	LF11	泥晶硅质白云岩	潟湖		

泛分布,以泥晶为主要结构组分,含有少量颗粒。这类岩相组合包括窗格状泥晶白云岩(LF1)、窗格状似球粒粒泥—泥粒白云岩(LF2)、窗格/帐篷状平直—微波状微生物纹层白云岩(LF3)、窗格/帐篷状波状—穹状叠层石白云岩(LF4)以及窗格状凝块石白云岩(LF5)。LF1以灰色—浅灰色薄层—中层状为主,发育丰富的窗格状、鸟眼状构造,局部可见干裂缝,反映经历了陆上暴露的低能潮上环境<sup>[41]</sup>。LF2同样以灰色—浅灰色薄层—中层状为主,常见似球粒和窗格状构造,指示低能沉积和同沉积暴露。LF3为浅灰色—灰色薄层状,由大量泥晶组分组成,窗格状构造比较常见,沉积于潮间—潮上环境。LF4多为浅灰色—灰色中层—厚层状,纹层弯曲起伏,呈分枝状,为潮间带高能沉积。LF5多为浅灰色—灰色厚层—块状,具有明显的生长格架和丰富的格架孔,指示其沉积于微生物繁盛的潮间环境,水体能量较强。潮间—潮上旋回通常由下部厚层潮间凝块石白云岩和叠层石白云岩与上部的薄层潮上泥晶白云岩和/或窗格状似球粒粒泥—粒泥白云岩组成,底部偶见浅潮下颗粒白云岩。

以蓬探1井为例(图6a),该井位于川中古隆起北部斜坡区新发现的蓬莱气区中,可见大量灯二段微生物岩。蓬探1井岩心5 749.51~5 767.34 m段可观察到4期潮间—潮上旋回,发育窗格状(图6a中的②)及帐篷状构造(图6a中的⑤),微生物岩主要为窗格状凝块石,首个旋回底部见波浪状叠层石(图6a)。在胡家坝剖面的灯二段与灯四段、杨坝剖面的灯二段、先锋剖面(剖面位置见图1c)的灯二段

可以观察到多期叠置的潮间—潮上旋回,累计厚度均在100 m以上(图7)。

潮间—潮上沉积环境中多发育扁平状的中—薄层微生物层,这可能是因为潮间—潮上环境水体浅、可容空间较小,不足以提供微生物岩形成较大建隆的生长空间。但是潮间—潮上环境具有沉积速率快、海平面升降频繁的特征,配合沉积时合适的地层沉降速率,如裂陷槽断层上盘下降和断块掀斜的影响<sup>[42]</sup>,可以形成累计厚度大的多旋回叠置的微生物岩沉积。

#### 4.1.2 浅潮下岩相组合

浅潮下岩相组合中颗粒较为丰富而同沉积暴露标志较少,岩石类型包括内碎屑泥粒—颗粒白云岩(LF6)、波状—穹状叠层石白云岩(LF7)以及凝块石白云岩(LF8)。浅潮下岩相组合中的微生物岩在灯二段和灯四段均广泛分布,泥粒—颗粒白云岩在灯二段和灯四段均有出现但总体厚度不大。该岩相组合的典型特征是含有大量砂级(0.2~0.5 mm)颗粒。LF6多为浅灰色—灰色透镜状薄层或中—厚层状,含内碎屑、核形石等颗粒,为高能浅潮下颗粒滩沉积,且可能发育于潮汐水道中。LF7多为灰色中层—厚层状,纹层间多充填碳酸盐泥,指示中等水体能量的浅潮下环境。LF8主要为灰色中厚层状,粘结的颗粒指示了较强的水体能量<sup>[39,43]</sup>,沉积于潮道附近的浅潮下带或水体相对较深的潮下环境<sup>[43]</sup>。浅潮下旋回由下部潮下叠层石和凝块石与上部浅

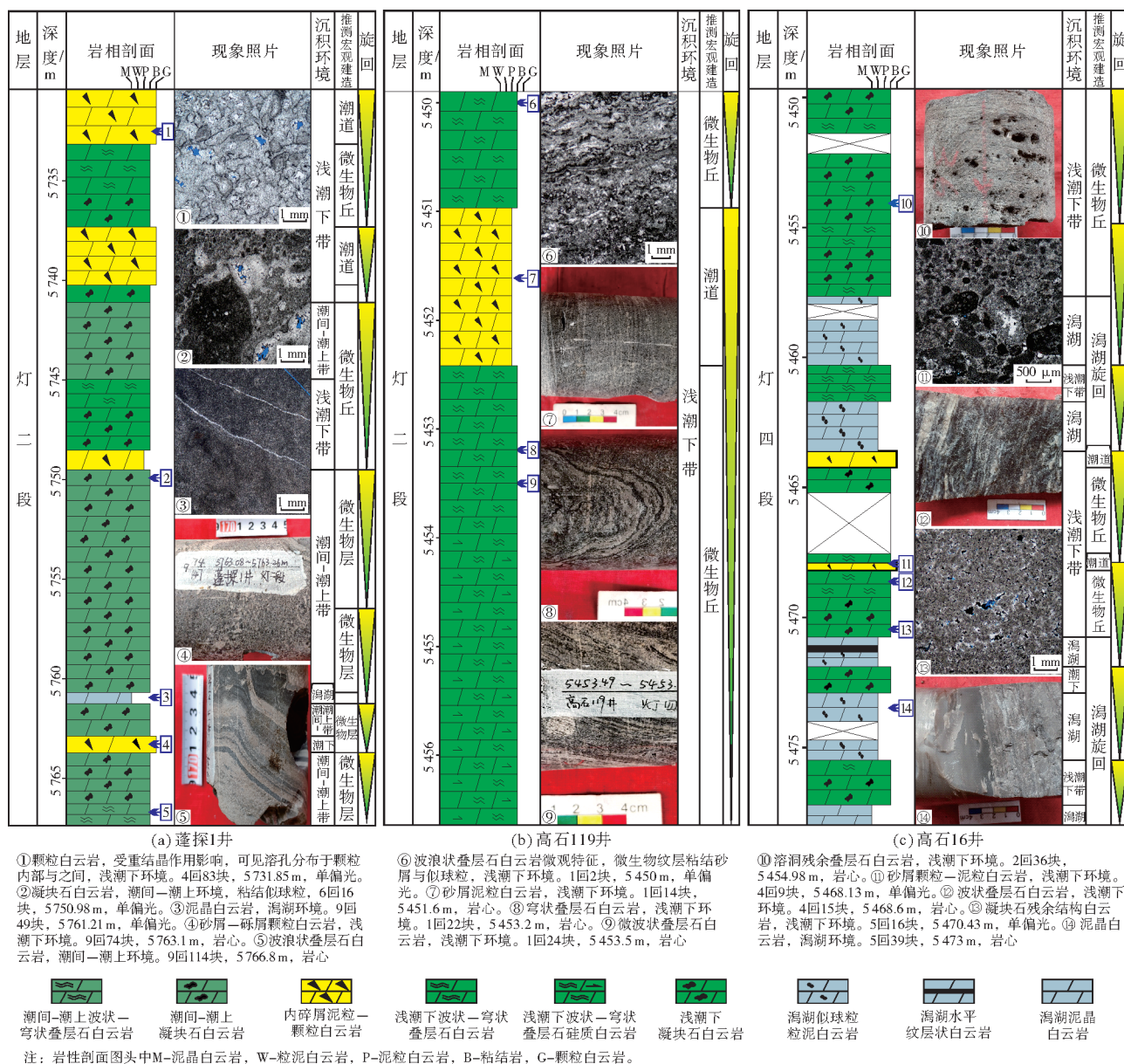


图6 四川盆地灯影组岩心岩相组合特征

Fig. 6 Characteristics of the well core lithofacies association of Dengying Formation in Sichuan Basin

潮下颗粒-泥粒白云岩组成,可能由于潮道与颗粒滩不发育而直接向上进入潮间-潮上旋回。

以高石119井为例(图6b),该井岩心中可观察到大量叠层石。其中,5450.96~5452.47m井段发育砂屑泥粒白云岩的潮道沉积(图6b中的⑦),且叠层石中也粘结有砂屑和似球粒颗粒。此外,在5453.2~5453.5m井段很薄的30cm内观察到微生物纹层由微波状向上起伏为穹状(图6b中的⑧,⑨),反映水体能量增强。蓬探1井5730.40~5749.51m井段包含3期浅潮下旋回,发育砂屑-砾屑颗粒-泥粒白云岩构成的潮道沉积,微生物岩中粘结有较多砂

屑颗粒,以凝块石为主,其次为波浪状叠层石(图6a中的①)。在胡家坝剖面的灯二段与灯四段、杨坝剖面灯二段与灯四段、先锋剖面的灯二段、松林剖面灯二段(图7)可以观察到单层较厚的浅潮下沉积,与潮间-潮上沉积交替出现,累计厚度在100~200m之间,总体厚度较潮间-潮上旋回更厚。

浅潮下环境更容易发育具透镜外形之中一厚层至块状微生物丘,这可能是因为浅潮下环境相比潮间-潮上环境水体更深,同时提供了足够的水体能量,保证了沉积速率,于是在潮下带会发育中间高两边低的丘状外形微生物建造。此外,在潮下带



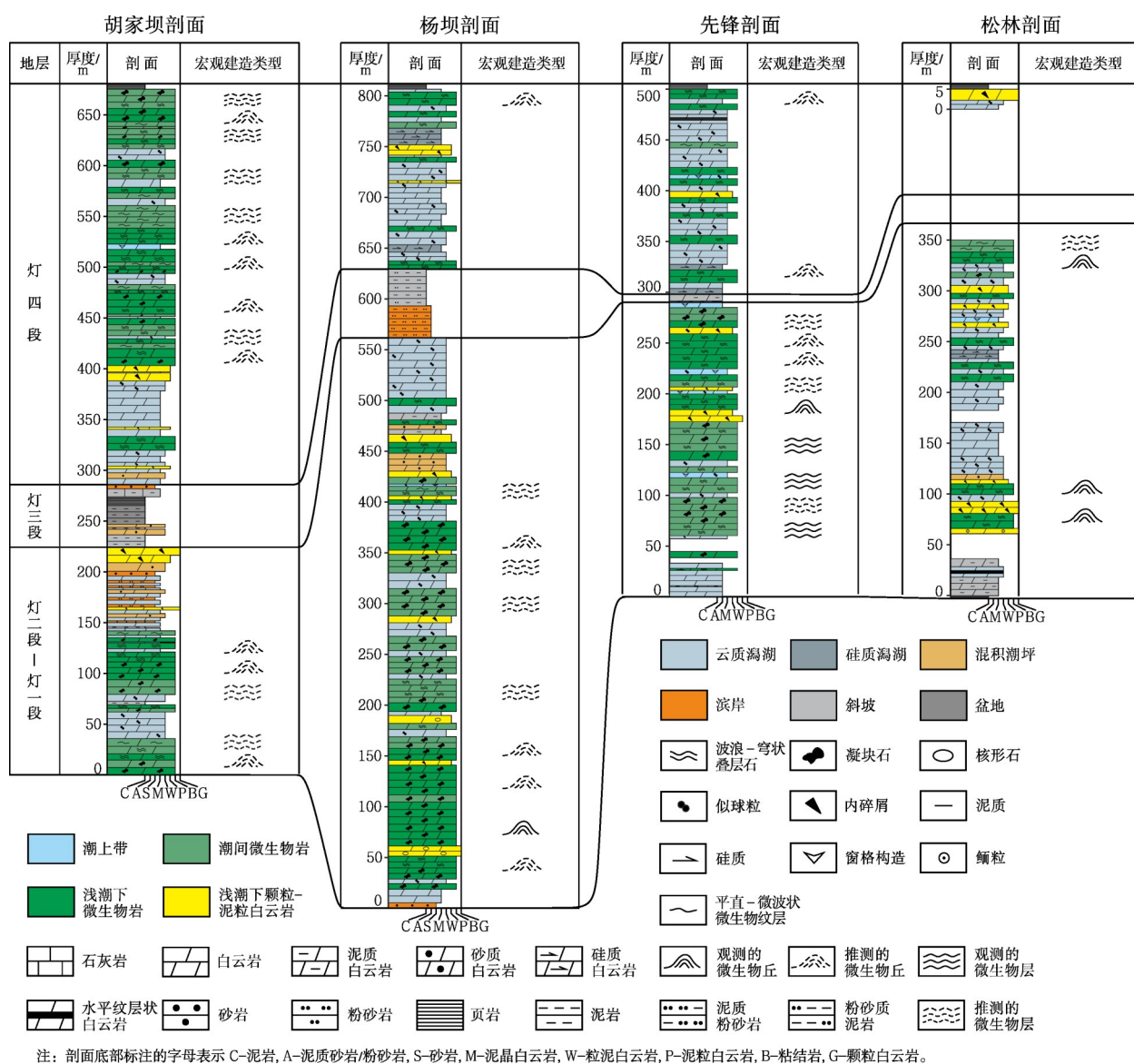


图7 四川盆地震旦系灯影组露头岩相组合特征

Fig. 7 Characteristics of outcrop lithofacies association of Dengying Formation in Sichuan Basin

的海平面升降不如潮缘环境频繁，丘体沉积结束后，沉积相带可能发生迁移，导致目前观察到的地层中的潮下环境微生物丘并非加积型连续叠置，而是丘体位置仿佛经历了迁移一般，这符合潮坪环境迁移沉积的特点<sup>[28]</sup>。灯影组丘体外的地层中也常见潮坪环境微生物岩沉积，未构成明显建造，处于正常的沉积层中(图5)。

#### 4.1.3 潟湖(深潮下)岩相组合

潟湖岩相组合由水平纹层状白云岩(LF9)、似球粒粒泥—泥晶白云岩(LF10)和泥晶硅质白云岩(LF11)组成。LF9多为浅灰色与灰色互层，薄层—

中层状显示深水富似球粒与浅水富泥晶互层，沉积于半局限深潮下带，受潮汐流影响。LF10多为灰色—深灰色中厚层状，指示了低能沉积环境，表明其沉积于局限深潮下环境，如潟湖<sup>[44-45]</sup>。LF11颜色从浅灰色至深灰色均有，由薄层—厚层状泥晶白云石和石英组成，呈韵律层，沉积于平静深水环境，硅质含量高。潟湖旋回底部为深潮下泥晶和泥晶硅质白云岩，中部变为浅潮下颗粒岩和潮下一潮间带微生物岩，顶部为潮上带沉积。部分旋回中上部可能缺失，仅保留下部沉积。

以高石16井5 449.66~5 478.02 m井段(共28.36 m)的岩心为例(图6c)，岩心中旋回大多是由下部的潟湖泥

晶白云岩和上部微生物岩组成。底部2期旋回由潟湖泥晶白云岩和似球粒粒泥白云岩向上演化为粘结颗粒凝块石。第3期旋回底部为水平纹层状泥晶白云岩,中部为凝块石和波状微生物纹层,顶部为磨圆较好的砂屑颗粒白云岩。第4期旋回因取心间隔不完整,推测为微生物丘向上变浅旋回,之后发育一期由潟湖泥晶白云岩到波浪状叠层石演化的旋回。最顶部旋回始于泥晶白云岩,上部微生物岩受成岩改造,但部分孔洞呈层状、格架状,部分可观察到残余纹层与粘结颗粒结构,判断为由泥粉晶白云质潟湖沉积向上演化为浅潮下微生物岩沉积旋回(图6c)。

在福成灯四段剖面可观察到潟湖旋回中的微生物岩沉积(图8)。旋回底部可见中一薄层水平纹层状白云岩,纹层并非微生物成因,反映低水动力环境。向上为17.2 m厚的中一厚层泥粉晶白云岩和似球粒粒泥白云岩,偶见似球粒。随后发育中一薄层潮下带波浪状微生物纹层白云岩、凝块石和泥粒白云岩,未见暴露标志。顶部可见下一旋回的中一厚层泥晶白云岩。潟湖旋回微生物岩中未见明显建造形态构型,也难以追踪横向展布,可认为

是潮坪环境中沉积的薄层微生物岩。因此,在潟湖旋回中,以泥晶白云岩沉积为主,微生物岩沉积较少或者缺失。出现在顶部的薄层潮下一潮间带微生物岩沉积中很难观察到建造形态,所以认为其未形成微生物建造。

## 4.2 微生物岩沉积模式

根据四川盆地灯影组常见的窗格构造与帐篷构造、沉积的叠层石和凝块石、岩相组合特征以及前寒武纪地质背景,揭示了灯影组沉积时台地上发育微生物繁盛的潮坪环境,包括了潮间—潮上坪、局限的浅潮下带和潟湖(图9)。

在台地上最深处发育局限的潮下潟湖,以沉积厚层的泥晶白云岩、泥晶硅质白云岩和似球粒粒泥白云岩为主。进一步向岸,水体变浅和局限,依次沉积了浅潮下带凝块石和波状—穹状叠层石,并且可以形成透镜状的微生物丘建造。潮间带同样沉积凝块石和平直—穹状叠层石,受潮汐涨落活动的影响,先成沉积物如微生物纹层受到暴露影响,形成帐篷构造或窗格构造,具有这些暴露构造的微生物岩可认为形成于潮间—潮上环境。由于可容空间限制,潮间—潮上带发育微生物层建造并且多期

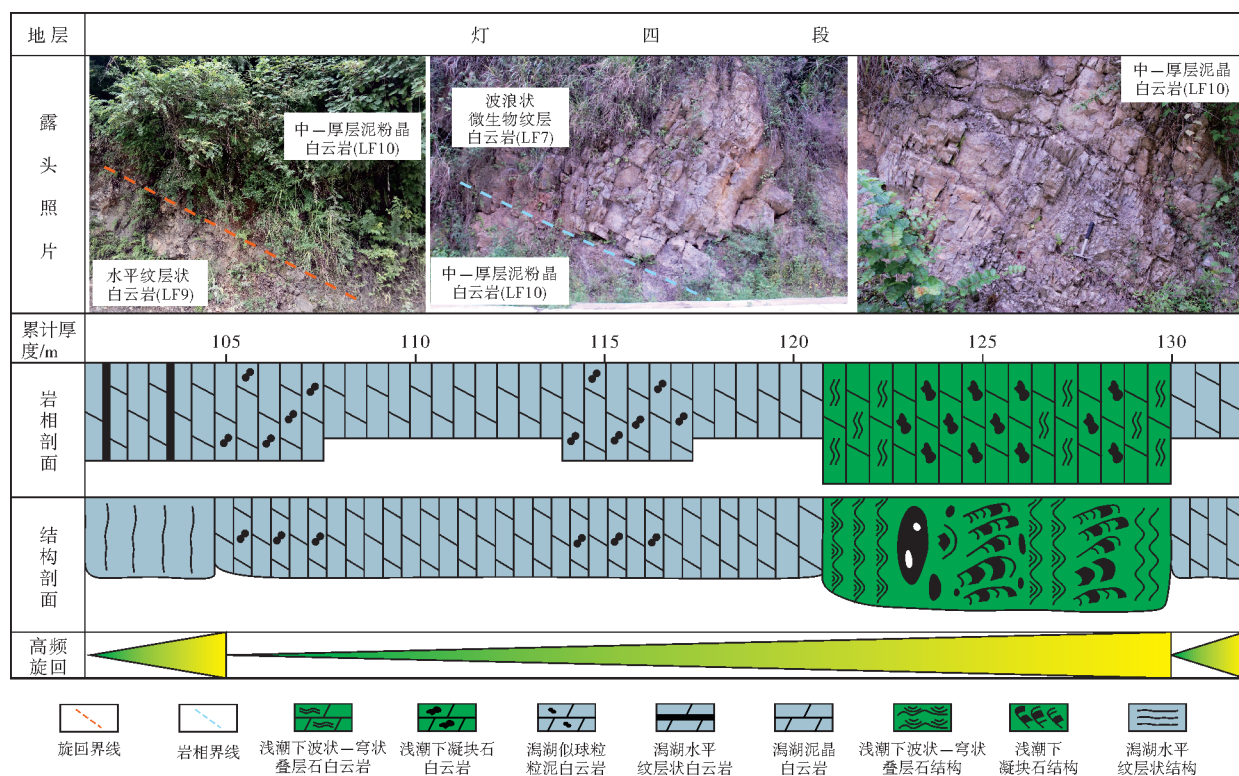


图8 四川盆地福成剖面灯四段潟湖旋回

Fig. 8 Lagoon cycles in the Member 4 of Dengying Formation at the Fucheng outcrop in Sichuan Basin



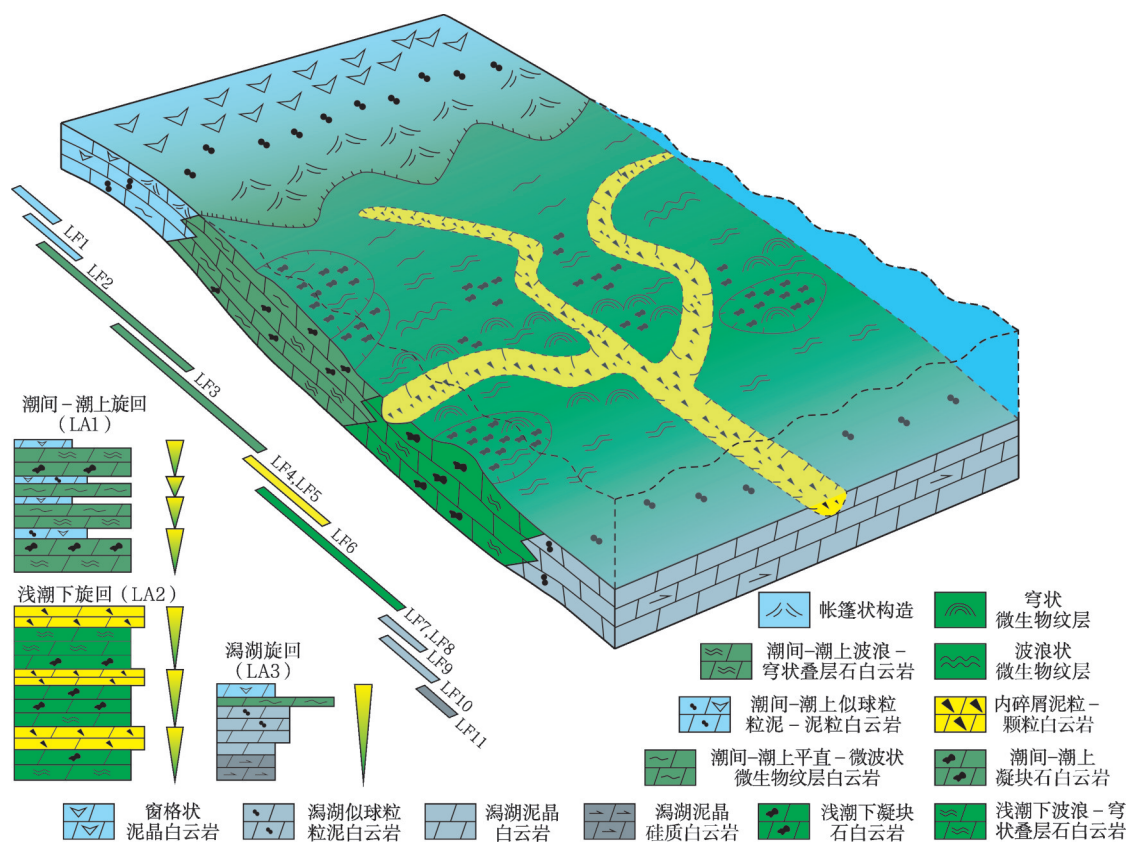


图9 四川盆地灯影组碳酸盐台地上微生物岩沉积模式(据文献[40,46],修改)

Fig. 9 Microbialite sedimentary model of Dengying Formation on carbonate platform in Sichuan Basin(cited from reference[40,46], modified)

叠置。地层厚度统计发现,潮间—潮上带微生物岩累计厚度小于浅潮下带微生物岩。在潮上带,发育窗格状的泥晶白云岩和似球粒粒泥—泥粒白云岩。此外,双向的潮汐流可能诱导出切入台地的潮道(潮渠),形成从潮下带向潮间带延伸的蜿蜒水道,其中沉积了以周围被打碎的微生物岩为主的内碎屑颗粒—泥粒碳酸盐岩。因此在垂向上,可形成优质储层的叠层石与凝块石主要发育在潮间—潮上带下部和浅潮下带上部。

高频低幅度(即五级)海平面波动可能导致碳酸盐台地内频繁的淹没和暴露,形成广泛分布重复出现的米级向上变浅潮坪旋回,在许多台地中均可观察到<sup>[47-49]</sup>。该模式符合前人研究建立的上扬子构造沉积格局<sup>[22-23]</sup>,即台地内部广泛分布潮坪和潟湖,并因受到台地边缘狭窄的似礁叠置微生物岩沉积和颗粒碳酸盐岩障壁作用而相对局限。

## 5 结论

基于中观结构特征,灯影组的微生物岩被划分为叠层石和凝块石两大类,与其伴生的碳酸盐岩包

括内碎屑、核形石、鲕粒以及似球粒颗粒—泥晶白云岩。叠层石纹层起伏程度与亮晶胶结物发育特征(如纹层间微观尺度胶结物类型与充填样式)共同指示水动力条件强弱:纹层形态越复杂、亮晶胶结物含量越高,反映沉积期水动力能量越强。对于凝块石,其微观尺度粘结的颗粒意味着较高的水体能量。在宏观尺度识别出微生物层与微生物丘2种建造类型。

识别出四川盆地灯影组沉积期台地上11种不同的岩相,这些岩相组合成3种沉积旋回,分别对应于潮间—潮上、浅潮下以及潟湖3种沉积环境。潮间—潮上环境特征为窗格状和帐篷状暴露构造,伴有多期叠置的微生物层宏观建造。浅潮下环境发育透镜状微生物丘宏观建造,以及以砂屑颗粒—泥粒白云岩为主的潮道。潟湖环境主要以中—厚层状泥晶白云岩为主,上部的薄层微生物岩沉积难以形成宏观建造。由此建立四川盆地灯影组微生物岩沉积模式,指出可形成优质储层的微生物岩主要发育在潮间—潮上带下部和浅潮下带上部。

## 参考文献

- [1] AL-SIYABI H A. Exploration history of the ara intrasalt carbonate stringers in the south Oman salt basin[J]. *GeoArabia*, 2005, 10(4): 39–72.
- [2] 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.
- [3] BAPTISTA R J, FERRAZ A E, SOMBRA C, et al. The presalt Santos Basin, a super basin of the twenty-first century[J]. *AAPG bulletin*, 2023, 107(8): 1369–1389.
- [4] 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滩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 Xiaoerbulake Formation in Tarim Basin, Northwest China, and its implications for exploration[J]. *Oil & gas geology*, 2019, 40(2): 392–402.
- [5] YANG Minglei, YU Xinya, ZHU Dancheng, et al. Depositional framework and reservoir characteristics of microbial carbonates in the fourth member of the Middle Triassic Leikoupo Formation, western Sichuan Basin, South China[J]. *Marine and petroleum geology*, 2023, 150: 106113.
- [6] 戴金星, 倪云燕, 刘全有, 等. 四川超级气盆地[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(6): 1081–1088.  
DAI Jinxing, NI Yunyan, LIU Quanyou, et al. Sichuan super gas basin in Southwest China[J]. *Petroleum exploration and development*, 2021, 48(6): 1081–1088.
- [7] 张本健, 钟原, 周刚, 等. 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[J]. *海相油气地质*, 2023, 28(1): 1–10.  
ZHANG Benjian, ZHONG Yuan, ZHOU Gang, et al. Sedimentary microfacies evolution and comprehensive evaluation of gas reservoir of the Dengying Member 2 in Penglai area, central Sichuan Basin[J]. *Marine origin petroleum geology*, 2023, 28(1): 1–10.
- [8] 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.
- [9] BURNE R V, MOORE L S. Microbialites: organosedimentary deposits of benthic microbial communities[J]. *Palaos*, 1987, 2(3): 241–254.
- [10] GREY K, AWRAMIK S M. Handbook for the study and description of microbialites[M]. Australia: Geological Survey of Western Australia, 2020.
- [11] SHAPIRO R S. A comment on the systematic confusion of thrombolites[J]. *Palaos*, 2000, 15(2): 166–169.
- [12] 韩作振, 陈吉涛, 迟乃杰, 等. 微生物碳酸盐岩研究: 回顾与展望[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(4): 29–38.  
HAN Zuozhen, CHEN Jitao, CHI Naijie, et al. Microbial carbonates: a review and perspectives[J]. *Marine geology & Quaternary geology*, 2009, 29(4): 29–38.
- [13] LOUCKS R G. Domal, thrombolitic, microbialite biostromes and associated lithofacies in the Upper Albian Devils River trend along the northern, high-energy margin of the Maverick Basin[J]. *Sedimentary geology*, 2018, 371: 75–88.
- [14] 张荫本, 唐泽尧, 陈季高. 粘结岩分类及应用[J]. *天然气勘探与开发*, 1996(4): 24–33.  
ZHANG Yinben, TANG Zeyao, CHEN Jigao. Bond rock classification and application[J]. *Natural gas exploration and development*, 1996(4): 24–33.
- [15] GROTZINGER J, AL-RAWAHI Z. Depositional facies and platform architecture of microbialite-dominated carbonate reservoirs, Ediacaran–Cambrian Ara Group, Sultanate of Oman[J]. *AAPG bulletin*, 2014, 98(8): 1453–1494.
- [16] LI Yingqiang, HE Dengfa, LI Di, et al. Ediacaran (Sinian) palaeogeographic reconstruction of the Upper Yangtze area, China, and its tectonic implications[J]. *International geology review*, 2020, 62(12): 1485–1509.
- [17] 杜金虎. 古老碳酸盐岩大气田地质理论与勘探实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2015.  
DU Jinhu. Geologic theory and exploration practice of ancient large carbonates gas field[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015.
- [18] MIAO Zhengshuo, PEI Yangwen, SU Nan, et al. Spatial and temporal evolution of the Sinian and its implications on petroleum exploration in the Sichuan Basin, China[J]. *Journal of petroleum science and engineering*, 2022, 210: 110036.
- [19] 杨伟强, 刘正, 陈浩如, 等. 四川盆地寒武统龙王庙组颗粒滩沉积组合及其对储集层的控制作用[J]. *古地理学报*, 2020, 22(2): 251–265.  
YANG Weiqiang, LIU Zheng, CHEN Haoru, et al. Depositional combination of carbonate grain banks of the Lower Cambrian Longwangmiao Formation in Sichuan Basin and its control on reservoirs[J]. *Journal of palaeogeography*, 2020, 22(2): 251–265.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] LAN Caijun, XU Zhehang, YANG Dailin, et al. Stratigraphy and depositional evolution of the terminal Ediacaran platform in the central to northern Sichuan Basin, southwest China[J]. *Palaeogeography, palaeoclimatology, palaeoecology*, 2022,



- 601: 111142.
- [23] DING Yi, LI Zhiwu, LIU Shugen, et al. Sequence stratigraphy and tectono-depositional evolution of a Late Ediacaran Epeiric platform in the Upper Yangtze area, South China[J]. *Precambrian research*, 2021, 354: 106077.
- [24] 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.
- [25] WEN Long, RAN Qi, TIAN Weizhen, et al. Strike-slip fault effects on diversity of the Ediacaran mound-shoal distribution in the central Sichuan intracratonic basin, China[J]. *Energies*, 2022, 15(16): 5910.
- [26] FLÜGEL E. *Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application*[M]. Heidelberg: Springer, 2010.
- [27] XU Zhehang, LAN Caijun, ZHANG Benjian, et al. Impact of diagenesis on the microbial reservoirs of the terminal Ediacaran Dengying Formation from the central to northern Sichuan Basin, SW China[J]. *Marine and petroleum geology*, 2022, 146: 105924.
- [28] TUCKER M E, WRIGHT V P, DICKSON J A D. *Carbonate sedimentology*[M]. Boston: Blackwell Scientific Publications, 1990.
- [29] 杨仁超, 樊爱萍, 韩作振, 等. 山东寒武系毛庄阶微生物团块的形态特征与成因[J]. *中国科学(地球科学)*, 2013, 43(3): 423-432.
- YANG Renchao, FAN Aiping, HAN Zuozhen, et al. Characteristics and genesis of microbial lumps in the Maozhuang Stage(Cambrian Series 2), Shandong Province, China[J]. *Scientia sinica(terrae)*, 2013, 43(3): 423-432.
- [30] 唐玄, 刘树根, 宋金民, 等. 四川盆地东北缘灯影组核形石特征及环境意义[J]. *沉积学报*, 2018, 36(2): 232-242.
- TANG Xuan, LIU Shugen, SONG Jinmin, et al. Characteristics and environmental significance of the Sinian Dengying Formation oncoids in the northeastern Sichuan Basin[J]. *Acta sedimentologica sinica*, 2018, 36(2): 232-242.
- [31] SUN Yaobin, ZHANG Yunfeng, XI Aihua, et al. Petrographic and geochemical characteristics of oncolites in the Ediacaran Dengying Formation of the Upper Yangtze area, China: implications for their paleo-environment[J]. *Sedimentary geology*, 2022, 442: 106296.
- [32] 田腾振, 李泽奇, 鲁鹏达, 等. 震旦系灯影组核形石白云岩成因机制及其意义: 以柳湾剖面为例[J]. *地球科学*, 2023, 48(4): 1568-1586.
- TIAN Tengzhen, LI Zeqi, LU Pengda, et al. Genetic mechanism and significance of oncoidal dolostone in Sinian Dengying Formation: a case study of Liowan section[J]. *Earth science*, 2023, 48(4): 1568-1586.
- [33] 赵东方, 胡广, 张文济, 等. 渝北巫溪鱼鳞剖面灯影组鲕粒沉积特征及其地质意义[J]. *地质论评*, 2018, 64(1): 191-202.
- ZHAO Dongfang, HU Guang, ZHANG Wenji, et al. Sedimentary characteristics of ooids of Sinian (Ediacaran) Dengying Formation on the Yulin section in Wuxi, Chongqing, and geological implications[J]. *Geological review*, 2018, 64(1): 191-202.
- [34] LU Chaojin, LI Fei, OEHLERT A M, et al. Reconstructing paleoceanographic conditions during the Middle Ediacaran: evidence from giant ooids in South China[J]. *Precambrian research*, 2020, 351: 105945.
- [35] GROTZINGER J, ADAMS E W, SCHRODER S. Microbial-metazoan reefs of the terminal Proterozoic Nama group(c.550-543 Ma), Namibia[J]. *Geological magazine*, 2005, 142(5): 499-517.
- [36] BRAGA J C, MARTIN J M, RIDING R. Controls on microbial dome fabric development along a carbonate-siliciclastic shelf-basin transect, Miocene, SE Spain[J]. *Palaios*, 1995, 10(4): 347-361.
- [37] SUOSAARI E P, REID R P, PLAYFORD P E, et al. New multi-scale perspectives on the stromatolites of Shark Bay, western Australia[J]. *Scientific reports*, 2016, 6(1): 20557.
- [38] 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.
- [39] 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*, 2020, 22(2): 235-250.
- [40] DING Yi, CHEN Daizhao, ZHOU Xiqiang, et al. Cavity-filling dolomite speleothems and submarine cements in the Ediacaran Dengying microbialites, South China: responses to high-frequency sea level fluctuations in an 'aragonite-dolomite sea'[J]. *Sedimentology*, 2019, 66(6): 2511-2537.
- [41] PRATT B R, JAMES N P, COWAN C A. Peritidal carbonates[M]//WALKER R G, JAMES N P. *Facies models: response to sea level change*. St. John's (Nfld.): Geological Association of Canada, 1992: 303-322.
- [42] KOESHIDAYATULLAH A, AL-RAMADAN K, COLLIER R, et al. Variations in architecture and cyclicity in fault-bounded carbonate platforms: Early Miocene Red Sea Rift, NW Saudi Arabia[J]. *Marine and petroleum geology*, 2016, 70: 77-92.

- [43] XI Haiwei, BURGESS P M, KOZLOWSKI E, et al. Spatial self-organization of marine agglutinated microbial carbonate build-ups: insights from stratigraphic forward modelling using Stomatobyte3D [J]. *Sedimentary geology*, 2022, 429: 106081.
- [44] JIANG Ganqing, CHRISTIE-BLICK N, KAUFMAN A J, et al. Carbonate platform growth and cyclicity at a terminal Proterozoic passive margin, Infra Krol Formation and Krol Group, Lesser Himalaya, India [J]. *Sedimentology*, 2003, 50 (5): 921–952.
- [45] SAMI T T, JAMES N P. Peritidal carbonate platform growth and cyclicity in an Early Proterozoic foreland basin, Upper Pethei Group, northwest Canada [J]. *Journal of sedimentary research*, 1994, 64(2b): 111–131.
- [46] METTRAUX M, HOMEWOOD P, AL BALUSHI S, et al. Neoproterozoic microbialites in outcrops of the Qarn Alam salt dome, central Oman [J]. *GeoArabia*, 2014, 19(3): 17–79.
- [47] MUTTI M. Association of tepees and palaeokarst in the Ladinian Calcare Rosso (southern Alps, Italy) [J]. *Sedimentology*, 1994, 41(3): 621–641.
- [48] HUSINEC A, READ J F. Assessing Milankovitch forcing in disconformity-prone cyclic shallow-water carbonates, Upper Jurassic(Kimmeridgian), Adriatic Platform, Croatia [J]. *Sedimentology*, 2022, 69(4): 1789–1815.
- [49] SEVILLANO A, BÁDENAS B, ROSALES I, et al. Orbital cycles, differential subsidence and internal factors controlling the high-frequency sequence architecture in a Sinemurian shallow carbonate platform (Mallorca Island, Spain) [J]. *Sedimentary geology*, 2020, 407: 105729.

编辑:黄革萍

## Multi-scale structural characteristics and a new depositional model of microbialites of the Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin, SW China

XU Zhehang<sup>1,2,3</sup>, LI Wenzheng<sup>1,2,3</sup>, QIAO Zhanfeng<sup>1,2,3</sup>, CHEN Zheng'an<sup>4</sup>,  
LAN Caijun<sup>5</sup>, YANG Dailin<sup>5</sup>, SUN Xiaowei<sup>1,2,3</sup>, ZHU Xinjian<sup>1,2,3</sup>,  
WANG Yongxiao<sup>1,2,3</sup>, CAI Jun<sup>1</sup>, WANG Zeyu<sup>1</sup>

1. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology; 2. State Energy Key Laboratory of Oil and Gas in Carbonate Strata;  
3. Key Laboratory of Carbonate Reservoir, CNPC; 4. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development;  
5. Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company

**Abstract:** The Sinian Dengying Formation reveals a great resource potential in the central part of Sichuan Basin. Describing the microbialite depositional fabrics at multi-scale is beneficial for clarifying their distribution. Based on outcrop, core, and thin section data, this study characterizes the fabrics of microbialites at mesoscopic, microscopic, and macroscopic scales. Two types of microbialites, stromatolites and thrombolites, are identified in the Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin. In addition, non-skeletal grains such as intraclasts, oncoids, ooids, and peloids have also been observed in the Dengying Formation. Based on these petrological characteristics, eleven lithofacies and three sedimentary cycles have been identified, which correspond to three depositional environments, including supratidal-intertidal, shallow subtidal, and lagoon environments. In the supratidal-intertidal environment, the multi-stage microbial biostrome build-ups are observed with the frequently occurrence of the fenestral and teepee structures. The shallow subtidal environment exhibits lens-shaped microbial bioherm build-ups and grain-dominated intraclastic packstone/grainstone. The lagoon cycle is dominated by medium to thick-bedded dolo-mudstone in the lower part. A depositional model for the microbialite of Dengying Formation in Sichuan Basin is established, in which high-quality microbial reservoir are predominantly developed in the lower supratidal-intertidal environment and the upper shallow subtidal environment.

**Key words:** microbialite; sedimentary structure; lithofacies association; depositional model; Dengying Formation; Sichuan Basin

**XU Zhehang**, First author: PhD, Geological Engineer, mainly engaged in sedimentology and reservoir geology of carbonate rocks. Add: 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China. E-mail: xuzh\_hz@petrochina.com.cn

**LI Wenzheng**, Corresponding author: PhD Student, Geological Senior Engineer, mainly engaged in research on sedimentology-reservoir geology and exploration deployment. Add: 920 Xixi Rd., Hangzhou, Zhejiang 310023, China. E-mail: liwz\_hz@petrochina.com.cn