



川中地区灯影组四段微生物岩沉积模式及主控因素

李安鹏, 高达, 胡明毅, 赵玉茹, 朱传勇, 戴逸晨

引用本文:

李安鹏, 高达, 胡明毅, 赵玉茹, 朱传勇, 戴逸晨. 川中地区灯影组四段微生物岩沉积模式及主控因素[J]. 沉积学报, 2023, 41(4): 1080–1096.

LI AnPeng, GAO Da, HU MingYi, ZHAO YuRu, ZHU ChuanYong, DAI YiChen. Deposition Model and Main Factors Controlling Depositional Processes for Microbialites in the Fourth Member, Dengying Formation, Central Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(4): 1080–1096.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

肥城邓家庄剖面寒武系微生物碳酸盐岩沉积序列

Sedimentary Succession of Cambrian Microbial Carbonates at Dengjiazhuang Section at Feicheng

沉积学报. 2020, 38(1): 64–75 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.071>

华北地台马沟剖面寒武系苗岭统微生物岩的组构特征、沉积环境和地质意义

Fabric Characteristics, Depositional Environment and Geological Implications of Cambrian Miaolingian Microbialites at Magou Section, North China Platform

沉积学报. 2019, 37(6): 1193–1209 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.018>

塔里木盆地寒武统台缘带沉积结构特征及其形成过程

Sedimentary Texture and Formation Process of the Lower Cambrian Platform Marginal Zone in the Tarim Basin, NW China

沉积学报. 2018, 36(4): 706–721 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2018.059>

鄂尔多斯盆地东北部奥陶系马五1+2微生物碳酸盐岩沉积特征及储集意义

Sedimentary Characteristics and Reservoir Significance of Microbial Carbonate in Ma51+2 Member of Ordovician in Northeastern Ordos Basin

沉积学报. 2016, 34(5): 963–972 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2016.05.015>

川南先锋地区二叠系—三叠系界线附近碳酸盐微相及沉积演化

Microfacies and Evolution of Sedimentary on Carbonate Rocks around the Permian–Triassic Boundary in Xianfeng, South Sichuan

沉积学报. 2015, 33(5): 865–877 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2015.05.003>

文章编号:1000-0550(2023)04-1080-17

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2021.156

川中地区灯影组四段微生物岩沉积模式及主控因素

李安鹏^{1,2}, 高达^{1,2}, 胡明毅^{1,2}, 赵玉茹^{1,2}, 朱传勇^{1,2}, 戴逸晨^{1,2}

1. 长江大学地球科学学院, 武汉 430100

2. 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 武汉 430100

摘要 为建立川中地区灯影组四段微生物岩的沉积模式,明确微生物岩沉积的主控因素,利用钻井、岩心、薄片等资料,从中观和微观尺度开展了精细的沉积微相分析。在研究区识别出8种岩相,其中微生物岩包括凝块石和叠层石,并将叠层石划分为波状凝集叠层石、波状骨架叠层石和层状细粒叠层石。这些岩相在垂向上有序组合,发育了潮下一局限泻湖沉积、潮下带凝块石、浅潮下一潮间带叠层石—颗粒滩复合体、潮间带叠层石等4种岩相组合。连井层序地层格架内微相对比显示,微生物丘和颗粒滩主要发育在层序的上部,且在灯四段由下至上发育规模变大。平面上,丘滩体在台地边缘发育规模大,向局限台地内规模减小且分布连续性变差。综合以上认识,提出了灯影组四段微生物岩的沉积模式。凝块石主要发育在浪基面之下的潮下带,水动力弱,局部微生物捕获黏结颗粒形成凝块。波状凝集叠层石主要发育在潮间带下部,各种菌类等微生物繁盛,受强烈的波浪和潮汐作用的影响,微生物捕获黏结大量鲕粒、似球粒等颗粒。波状骨架叠层石主要发育在能量中等的潮间带上部,主要受潮汐作用的影响,微生物通过诱导沉淀和原地钙化作用形成泡沫绵层,并捕获黏结少量球粒。层状细粒叠层石主要发育在潮间带上部,微生物沉积作用以诱导沉淀为主。

关键词 微生物岩;叠层石;凝块石;层序地层;沉积模式;灯影组;四川盆地

第一作者简介 李安鹏,男,1996年出生,硕士研究生,碳酸盐岩沉积学,E-mail: lapcjd1996@foxmail.com

通信作者 高达,男,副教授,沉积学和层序地层学,E-mail: gaoda18@gmail.com

中图分类号 P588.24⁺5 **文献标志码** A

0 引言

微生物岩是底栖微生物群落捕获和黏结碎屑沉积物、化学沉淀物所形成的原地有机沉积^[1]。它具有类型多样、结构丰富、成因复杂等特征,同时也容易形成优质的油气储集层。因此关于微生物岩岩石类型分类、沉积环境、储层特征及成因等方面的研究既是沉积学领域的热点和难点,也是油气地质学领域的焦点之一^[2-4]。Riding^[5]将微生物岩划分为叠层石、凝块石、树枝石、均一石等4种类型,又将叠层石细分为骨架叠层石、凝集叠层石、细粒叠层石、陆地叠层石和泉华。我国学者也对微生物岩的分类开展了诸多深入探讨^[6-9]。微生物岩丰富的沉积结构同时体现在巨观(几十米)、宏观(几十厘米至几米)、中观(厘米级)、微观(几十微米到几毫米)等四种不同尺度^[10]。

不同类型和不同沉积结构的微生物岩在垂向上和侧向上形成复杂多变的沉积组合^[11-13],给沉积环境解释带来困难;综合不同尺度的结构特征对微生物岩开展精细的微相分析是解释沉积环境进而建立沉积模式的关键^[12-15]。近年来,优质的微生物碳酸盐岩储层在全球重要含油气盆地中持续发现,包括墨西哥湾地区上侏罗统 Smackover 组、滨里海盆地地下石炭统韦宪阶—谢尔普霍夫阶、西伯利亚中—新元古界至下寒武统^[2],以及我国塔里木盆地寒武系肖尔布拉克组^[16]、四川盆地震旦系灯影组和三叠系雷口坡组^[17-18]、鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组^[19]。微生物碳酸盐岩储层也成为了我国西部海相盆地深层—超深层碳酸盐岩油气勘探新领域。因此,亟需开展深入细致的沉积学工作,以深化微生物碳酸盐岩沉积模式的认识并指导深层油气勘探。

收稿日期: 2021-07-30; **修回日期**: 2021-11-10; **录用日期**: 2021-12-01; **网络出版日期**: 2021-12-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41502104);湖北省自然科学基金项目(2017CFB533);油气资源与勘探技术教育部重点实验室开放基金(K2018-06) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41502104; Natural Science Foundation of Hubei Province, No. 2017CFB533; Open Fund of Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources (Yangtze University), Ministry of Education, No. K-2018-06]

埃迪卡拉纪晚期,川中地区灯影组在碳酸盐岩台地之上发育了连续厚层的微生物岩,沉积特征复杂多样。大量前人研究识别出藻(纹层)云岩、叠层石云岩、凝块石云岩、藻黏结凝块云岩、藻黏结骨架云岩、泡沫绵层云岩等多种岩相类型^[12-13,20-21]。对于灯影组微生物岩的结构和分类,不同作者在研究中所采用的描述尺度存在差异。如许多作者使用中观尺度(岩心)特征进行命名,如柱状叠层石、波状叠层石、似波状叠层石、层纹状叠层石等^[13,22];也有主要依据微观特征进行命名的,如藻黏结骨架云岩、泡沫绵层云岩、藻绵层云岩、泡沫状藻云岩等^[21-23]。由于不同尺度上的结构描述差异,造成在分析沉积环境时难以准确对比。关于区内灯四段微生物岩的沉积环境,多数研究认为主要为潮坪环境,包括潮下带上部至潮上带^[12,21-24]。但不同学者对于叠层石、凝块石等主要微生物岩类型的沉积环境解释存在差异。部分研究认为叠层石发育在潮间—潮上带^[21-23],将其解释为潮下带上部—潮间带^[12,24]。对于凝块石,多数研究认为其沉积环境比叠层石沉积环境水体更深^[12,23-25],但有的认为其形成于浪基面之下的潮下带^[25],也有认为其形成于邻近颗粒滩环境的浪基面之上的潮下带^[23-24]。

川中地区灯影组微生物岩储层具有巨大的勘探潜力,截至2019年底,灯四段气藏累计提交天然气探明储量达 $5\,940\times 10^8\text{ m}^3$ ^[26]。然而,沉积环境解释的差异造成了对微生物岩沉积模式和主控因素认识的不足,进而制约着有利微相和相关储层的分布预测。本文利用川中地区灯四段的钻井、岩心、薄片等资料,通过中观和微观尺度结构分析,划分灯四段岩相类型,建立岩相组合并分析沉积环境,最终建立川中地区灯四段微生物岩的沉积模式,进而深入分析各类微生物岩的成因。研究结果对于深化认识微生物碳酸盐岩沉积环境、预测相关储集层的分布具有重要意义。

1 区域地质概况

四川盆地位于中国西南部,盆地边缘主要受米仓山、大巴山、龙门山等构造带共同制约,盆地面积约为 $2.7\times 10^4\text{ km}^2$ (图1a)^[27]。川中地区位于四川盆地的中部,进一步可划分为高石梯—磨溪构造和龙女寺构造^[28](图1b)。震旦纪晚期灯影组沉积期,四川盆地发育近南北走向的裂陷槽,在裂陷槽东侧的高

石梯—磨溪古隆起之上发育了大型浅水碳酸盐岩台地^[28]。川中地区主要发育台地边缘丘滩相和局限台地丘滩相^[18]。

震旦系灯影组与下伏陡山沱组整合接触,与上覆寒武系不整合接触,在川中地区地层厚770~1 040 m^[23](图1c)。根据主要岩性和测井响应的差异,可将灯影组划分为四段:灯一段厚度为20~70 m,岩性主要为含泥泥晶—粉晶云岩,含有少部分菌藻;灯二段厚度为440~520 m,下部为富藻段,以葡萄—花边构造的藻云岩为主,上部为贫藻段,以泥晶云岩为主;灯三段厚度为50~100 m,岩性以泥岩和砂岩为主;灯四段厚度为260~350 m,岩性主要为砂屑云岩、藻云岩和叠层石云岩^[23]。

2 岩相类型

基于川中地区内15口重点取心井、共456 m的岩心以及122张薄片的观察和鉴定,精细描述了灯四段碳酸盐岩的中观和微观结构特征,并将灯四段的岩相划分为8种主要类型,对8种岩相的中观特征、微观特征、微生物沉积作用和沉积环境的总结见表1。

水平层理泥晶云岩(F1)和皱状纹层云岩(F2)均发育于潮下一局限潟湖环境。F1中观尺度下见水平层理,微观尺度下顺层发育黄铁矿,这些沉积特征共同指示它的沉积环境为浪基面以下的局限潟湖^[12]。F2的主要成分也为泥晶白云石,中观尺度上以密集纹层为特征,垂向上常与F1交互发育,由此可知它的形成环境为低能潮下带和局限潟湖。

粒泥—泥粒云岩(F3)和泥粒—颗粒云岩(F4)在垂向上常常交互发育,微观尺度上均以颗粒结构为主,仅局部见菌黏结结构。F3在微观尺度上具粒泥结构和泥粒结构交替形成的毫米级纹层,反映其主要沉积于中—低能的潮下带,且在正常浪基面之上。F4由大量的颗粒组成,内部常见纹层和窗格孔,在部分钻井中F4与F6A交互发育。该岩相以大量颗粒为主的结构指示中等—强的水动力条件,结合其他沉积构造特征将F4的沉积环境解释为潮间带下部^[23-24]。

研究区灯四段发育凝块石(F5)和叠层石(F6)两种微生物岩类型。其中F5在中观和微观尺度上都显示出清晰的凝块结构,F5通常与F2交互发育。以泥晶和颗粒为主的结构组分和菌黏结作用的发育共同指示弱水动力条件,沉积环境应为浪基面以下的浅水潮下带^[25]。

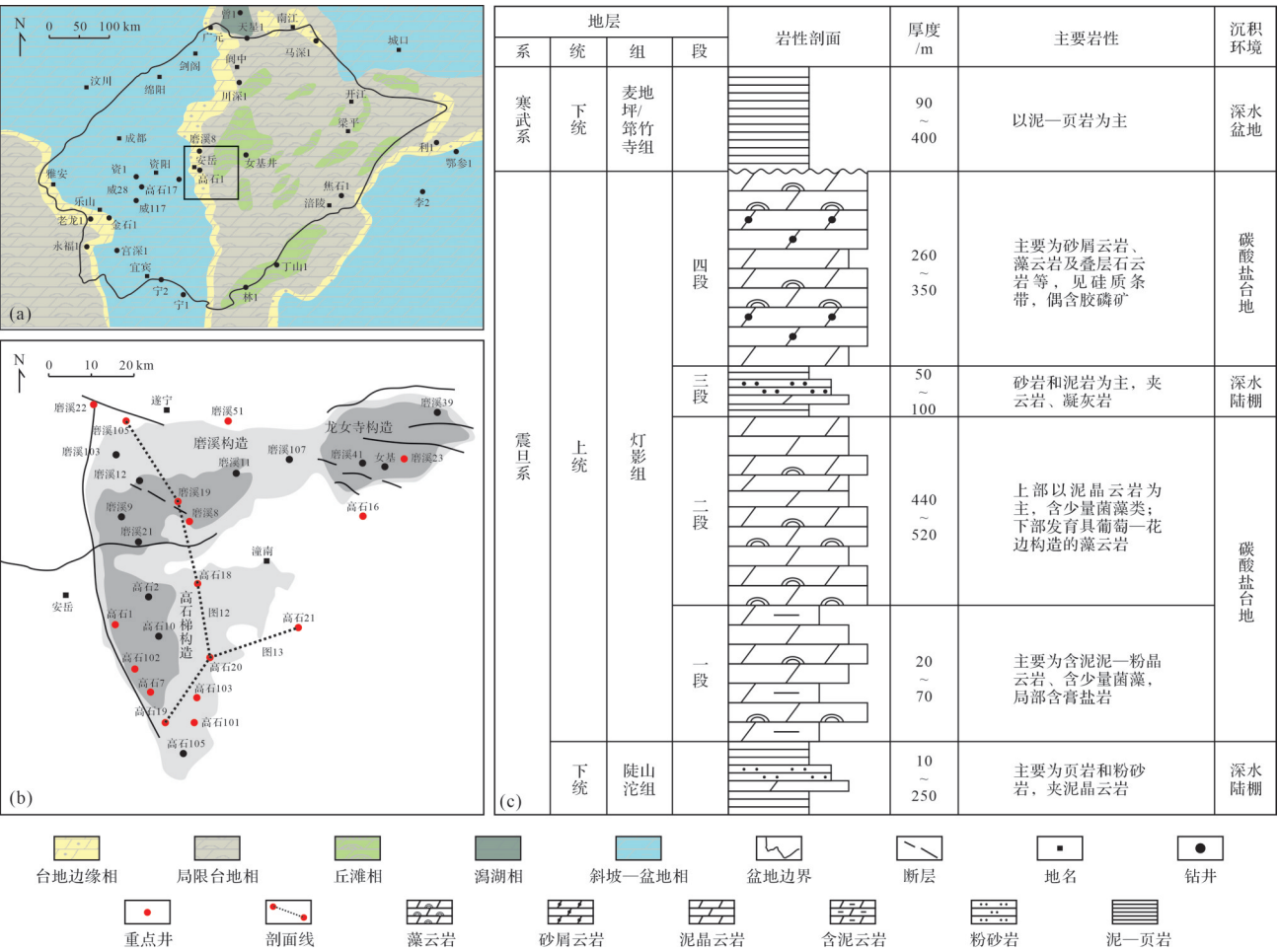


图1 研究区位置及灯影组地层综合柱状图
(a)四川盆地灯影组四段沉积岩相古地理图(据文献[27]修改);(b)研究区位置及钻井分布图;(c)川中地区灯影组综合柱状图(地层资料据文献[23])
Fig.1 Location of the study area and composite stratigraphic section of the Dengying Formation

川中地区灯四段叠层石(F6)在中观尺度上主要表现为波状和平行层状的纹层,在微观尺度上表现为颗粒纹层结构、泡沫绵层结构、菌泥晶纹层结构等。综合两个尺度的特征,将灯四段叠层石划分为波状凝集叠层石(F6A)、波状骨架叠层石(F6B)和层状细粒叠层石(F6C)。F6A中含有大量颗粒,镜下见颗粒纹层和断续的菌纹层,F6A常与F3、F4等岩相伴生。大量颗粒指示它形成于强水动力条件,并通过微生物席捕获和黏结颗粒而成岩,沉积环境主要为与F4沉积环境相似的潮间带下部^[29]。F6B微观尺度上由富含球粒的纹层和泡沫绵层纹层相交组成,球粒直径为0.03~0.05 mm,泡沫绵层由暗色泥晶包裹的圆状空腔组成,单个空腔直径为0.05~0.1 mm,腔内充填亮晶白云石(图5g,h)。F6B中两种纹层交互指示水动力条件的间歇变化,窗格孔的发育反映间歇性暴露,且F6B通常与F6A和F6C交互发育,沉

积环境解释为潮间带^[30]。F6C中泥晶纹层结构和细小球粒共同指示弱水动力条件,通常与F6B在垂向交互叠置发育,沉积环境解释为潮间带上部^[31]。
薄层状窗格孔泥晶云岩(F7)和角砾岩(F8)均发育于潮间带上部—潮上带的环境。常见F7和F8、F6C叠置发育,这些沉积特征共同指示弱水动力和间歇性暴露的潮间带上部—潮上带环境。F8常出现在向上变浅的沉积旋回顶部以薄层状产出,垂向上与F6C叠置发育,反映以暴露为主的潮上带环境。

3 岩相组合

基于多口钻井连续取心段的精细描述,总结了区内灯四段的岩相组合,并分析了沉积环境。总体上,区内灯四段主要发育潮下一局限潟湖岩相组合、潮下带凝块石岩相组合、浅潮下一潮间带叠层石—颗粒滩复合体岩相组合和潮间带叠层石岩相组合。

表1 川中地区灯四段岩相特征及沉积环境

Table 1 Lithofacies characteristics and sedimentary environment of the Fourth member of the Dengying Formation in central Sichuan Basin

岩相类型	中观特征	微观特征	微生物沉积作用	沉积环境
水平层理泥晶云岩(F1)	灰黑—黑色,发育水平层理(图2a)	偶见分散或顺层分布的黄铁矿(图3a)	不发育微生物相关的结构	局限潟湖,水动力弱的还原环境
皱状纹层云岩(F2)	灰—深灰色,发育密集的毫米级纹层(图2b),形态为皱状	主要成分为泥晶,少量纹层中球粒的粒径一般为0.01 mm(图3b)	可见微生物诱导作用形成的泥晶	潮下带和局限潟湖,水动力弱
粒泥—泥粒云岩(F3)	浅灰色,发育块状层理,无明显纹层	粒泥和泥粒结构的纹层交互发育,颗粒大小一般为0.1~0.2 mm,类型主要为鲕粒和似球粒(图3c,d),见鸟眼孔(图3d)	粒泥结构纹层中局部可见菌黏结结构(图3c)	浪基面之上的潮下带,水动力中等,波浪作用主控
泥粒—颗粒云岩(F4)	浅灰色,发育块状层理和不清晰的交错层理	泥粒和颗粒结构的纹层交互发育,见窗格孔(图3e),颗粒粒径一般为0.2~0.5 mm,类型以鲕粒和似球粒为主(图3f,g)	泥粒结构纹层中的部分区域见黏结结构	潮间带下部,水动力强,波浪和潮汐作用主控
凝块石(F5)	灰黑色凝块分布在浅灰色基质中(图2c,d),发育块状层理	大部分凝块由似球粒和泥晶组成(图4),似球粒的粒径主要0.1~0.2 mm,部分凝块边缘发育不同厚度的菌纹层(图4f~i),纹层形态为波状(图4g,i)	凝块内部和边缘可见钙化丝状和放射状蓝细菌(图4c,e),微生物沉积作用包括捕获黏结作用和诱导沉淀作用	浪基面之下的潮下带,水动力弱
波状凝集叠层石(F6A)	深灰—灰黑色,毫米级纹层,形态为波状、簇状、花状等(图2e,f)	主要由泥晶菌纹层和富含颗粒的纹层交互(图5a,d),菌纹层呈连续或不连续状发育,并黏结少量细小的球粒(直径0.01~0.03 mm),富含颗粒的层主要由直径0.05~0.2 mm的似球粒组成(图5b,c)	各种菌类等微生物繁盛,微生物沉积作用以捕获黏结作用为主	潮间带下部,水动力强,波浪和潮汐作用主控
叠层石(F6) 波状骨架叠层石(F6B)	深灰—灰黑色,发育大量毫米级纹层,形态为不规则的线状(图2g)	纹层由富含球粒的颗粒层和泡沫绵层组成(图5e~h),且常见窗格构造(图5e,f)	大量菌纹层和泡沫绵层,见不清晰的葛万菌和肾形菌,微生物沉积作用包括捕获黏结作用和诱导沉淀作用	潮间带,水动力中等,潮汐作用主控
层状细粒叠层石(F6C)	灰色和深灰—灰黑色的连续平直纹层交替发育(图2h)	富菌泥晶纹层和富含细小球粒的纹层交互发育(图5i)	大量菌纹层,微生物沉积作用以诱导沉淀作用为主	潮间带上部,水动力弱,潮汐作用主控
薄层状窗格孔泥晶云岩(F7)	浅灰—灰色,毫米级纹层平行排布,发育干裂构造和鸟眼孔(图2i)	由泥晶组成,可见干裂纹穿过纹层,发育不同程度充填的窗格孔	不发育微生物相关的结构	潮间带上部—潮上带,水动力弱
角砾岩(F8)	密集的角砾,角砾粒径主要为1~3 cm,部分呈层状产出(图2j)	角砾内部主要由泥晶组成	不发育微生物相关的结构	潮上带

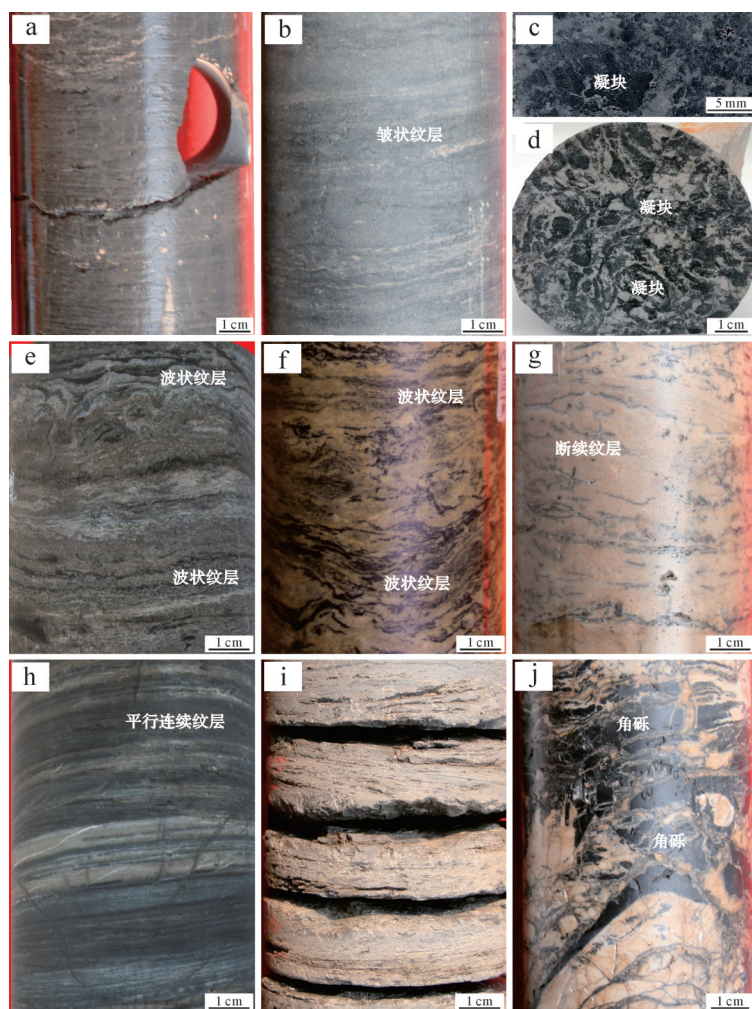


图2 川中地区灯四段主要岩相类型岩心特征

(a)水平层理泥晶云岩(F1),见水平层理,高石20井,5 240.37~5 240.63 m;(b)皱状纹层云岩(F2),磨溪105井,5 321.18~5 322.28 m;(c)凝块石(F5),凝块的颜色为灰黑色,磨溪22井,5 413.8 m;(d)凝块石(F5),灰黑色凝块分布在浅灰色的基质中,高石101井,5 516.9 m;(e)波状凝集叠层石(F6A),磨溪51井,5 343.64~5 444.90 m;(f)波状凝集叠层石(F6A),磨溪105井,5 360.58~5 360.87 m;(g)波状骨架叠层石(F6B),见孔洞,磨溪105井,5 309.01~5 309.26 m;(h)层状细粒叠层石(F6C),纹层呈平行状排布,高石21井,5 321.56~5 321.71 m;(i)薄层状窗格孔泥晶云岩(F7),发育顺层窗格孔,高石20井,5 213.02~5 213.26 m;(j)角砾岩(F8),层状分布的砾石呈棱角状,磨溪105井,5 357.46~5 357.66 m

Fig.2 Core photographs of the major types of lithofacies of the Fourth member of the Dengying Formation in central Sichuan Basin

3.1 潮下一局限潟湖岩相组合

此岩相组合由具有水平层理的水平层理泥晶云岩(F1)和皱状纹层云岩(F2)组成。以高石18井取心段为例,组合中岩石组分以泥晶为主,仅含有少部分颗粒和纹层(图6)。F1和F2交互出现,从下至上泥晶含量减少,颗粒和纹层的含量增多。F1和F2均形成于水循环局限的低能水动力,反映潮下一局限潟湖环境。

3.2 潮下带凝块石岩相组合

此岩相组合包括皱状纹层云岩(F2)和凝块石(F5),二者叠置交互构成多个高频旋回,单个旋回厚约2 m。以磨溪105井取心段为例,旋回的下部以F2为主,厚度较大,向上过渡为F5,颗粒含量增加、纹层

发育程度减弱(图7)。F2和F5均形成于弱水动力环境,位于正常浪基面以下的浅潮下带。在该环境微生物作用难以形成连续的菌纹层,无法捕获和黏结大量颗粒,以间断发育凝块石为特征。

3.3 浅潮下一潮间带叠层石—颗粒滩复合体岩相组合

该岩相组合主要由波状凝集叠层石(F6A)、粒泥—泥粒云岩(F3)、泥粒—颗粒云岩(F4)等岩相组成。高石18井取心段揭示,以连续厚层的F6A为主,夹少量的F3和F4(图8)。从F3向上过渡为F4和F6A,颗粒由少变多、菌纹层发育变好。高石20井取心段揭示,F4和F6A交互叠置形成至少3个旋回,在F6A之上过渡为F7(图9)。

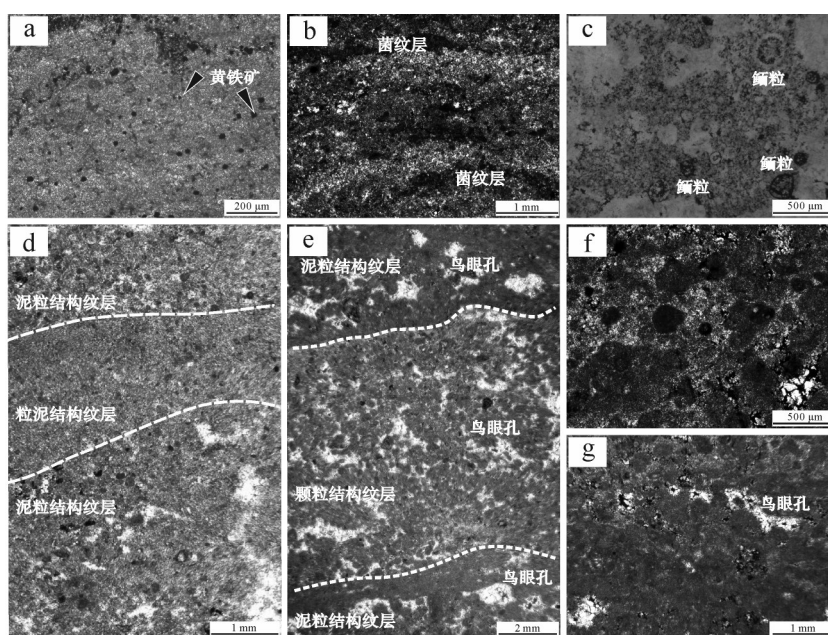


图3 川中地区灯四段主要岩相(F1~F4)镜下特征

(a)水平层理泥晶云岩(F1),成分以泥晶为主,见分散的黄铁矿顺层分布,高石20井,5 240.8 m;(b)皱状纹层云岩(F2),见菌纹层和球粒,高石18井,5 212.7 m;(c)粒泥—泥粒云岩(F3),泥晶基质中局部见同心鲕,高石101井,5 498.3 m;(d)粒泥—泥粒云岩(F3),由粒泥岩和泥粒岩构成的纹层,高石101井,5 508.7 m;(e)泥粒—颗粒云岩(F4),见由泥粒岩和颗粒岩构成的纹层,高石20井,5 220.8 m;(f)泥粒—颗粒云岩(F4),泥粒岩中颗粒之间为泥晶,高石20井,5 220.8 m;(g)泥粒—颗粒云岩(F4),泥粒岩中见纹层状窗格孔,高石20井,5 220.8 m

Fig.3 Thin-section photographs of the major types of lithofacies (F1-F4) of the Fourth member of the Dengying Formation in central Sichuan Basin

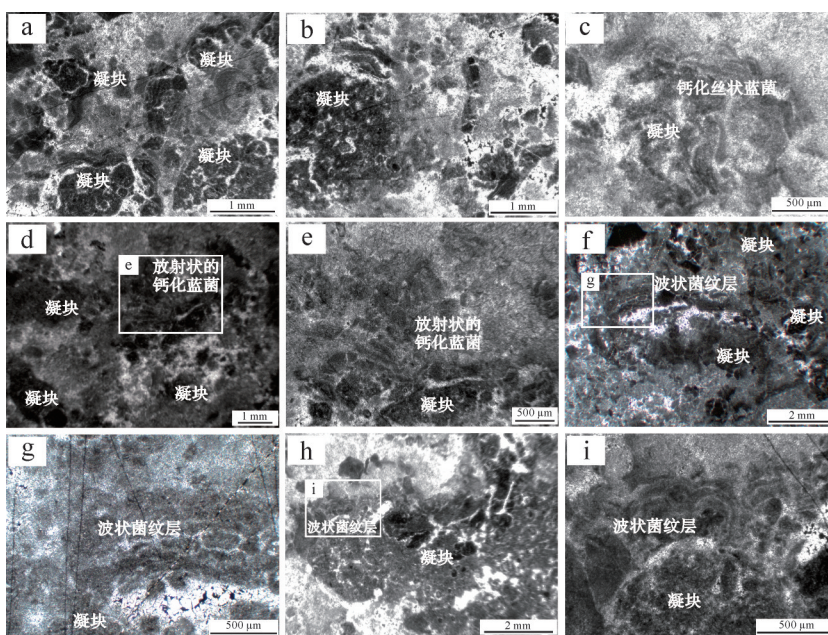


图4 川中地区灯四段凝块石(F5)镜下特征(磨溪22井)

(a)大量凝块分布在基质中,5 413.8 m;(b)凝块内以及基质之间为泥粒结构,5 413.8 m;(c)凝块内部和边缘见钙化丝状蓝菌,5 413.8 m;(d)凝块边缘可见钙化丝状蓝菌呈放射状生长,5 413.7 m;(e)图d凝块边缘钙化丝状蓝菌的放大照片,5 413.7 m;(f)凝块边缘可见波状菌纹层,5 413.8 m;(g)图f中凝块边缘波状菌纹层的放大照片,5 413.8 m;(h)凝块边缘的微生物纹层表现为波状,5 413.8 m;(i)图h凝块边缘的微生物纹层的放大照片,5 413.8 m

Fig.4 Thin-section photographs of thrombolite (F5) of the Fourth member of the Dengying Formation in central Sichuan Basin

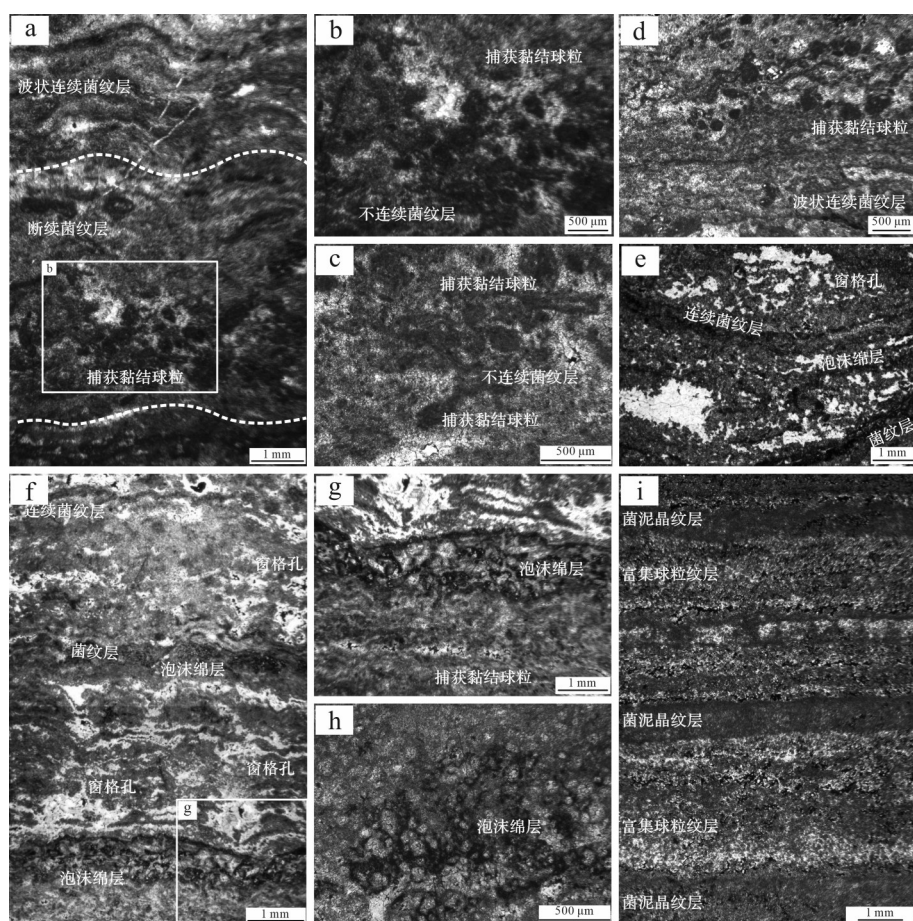


图5 川中地区灯四段叠层石(F6)镜下特征

(a)泥晶菌纹层和富含颗粒的纹层交互(F6A),磨溪51井,5 343.6 m;(b)图a中富含颗粒纹层的放大照片,富含颗粒的层主要由直径0.05~0.20 mm的似球粒组成(F6A),磨溪51井,5 343.6 m;(c)暗色菌纹层连续程度不同(F6A),磨溪51井,5 343.6 m;(d)泥晶菌纹层和富含颗粒的纹层交互(F6A),高石18井,5 134.5 m;(e)富含球粒的颗粒层和泡沫绵层结构层,发育窗格孔(F6B),磨溪105井,5 315.5 m;(f)菌纹层间见泡沫绵层结构和窗格构造(F6B),高石21井,5 284.3 m;(g)图f泡沫绵层的放大照片,球粒直径一般0.03~0.05 mm,发育窗格构造(F6B),高石21井,5 284.3 m;(h)泡沫绵层由暗色泥晶包裹的圆状空腔组成,单个空腔直径一般为0.05~0.10 mm,腔内充填亮晶白云石(F6B),磨溪105井,5 315.5 m;(i)富含菌泥晶的纹层和富含细小球粒的纹层交互发育(F6C),高石21井,5 320.5 m

Fig.5 Thin-section photographs of stromatolite (F6) of the Fourth member of the Dengying Formation in central Sichuan Basin

该岩相组合中大量颗粒的出现指示中等一强的水动力。凝集叠层石的发育反映此岩相组合主要位于潮间带,总体上该岩相组合主要形成于潮间带下部至正常浪基面以上的浅潮下带。

3.4 潮间带叠层石岩相组合

该岩相组合由波状骨架叠层石(F6B)、层状细粒叠层石(F6C)、薄层状窗格孔泥晶云岩(F7)和角砾岩(F8)组成。高石21井取心段发育F6B和F6C为主的一套沉积序列(图10a~f)。F6C中可见溶蚀刻痕(图10f),向上过渡为F7和F8(图10g)。该岩相组合主要受潮汐水动力控制,具有清晰纹层的叠层石形成于能量较弱的潮间带,在其之上发育的F7和F8则主要形

成于潮上带,叠层石的生长终止。

4 微相展布特征

取心段的研究发现灯四段的岩相类型复杂且在垂向上叠置变化快。为了查明灯四段沉积微相展布特征,在明确主要岩相及岩相组合测井曲线特征的基础上,开展了单井微相分析和连井微相对比,并编制了灯四段上部微相平面分布图。

4.1 灯四段微相划分

依据岩心和测井曲线特征,可将灯四段划分为潮坪—局限潟湖、颗粒滩、叠层石丘、凝块石丘、丘滩复合体等5种微相。

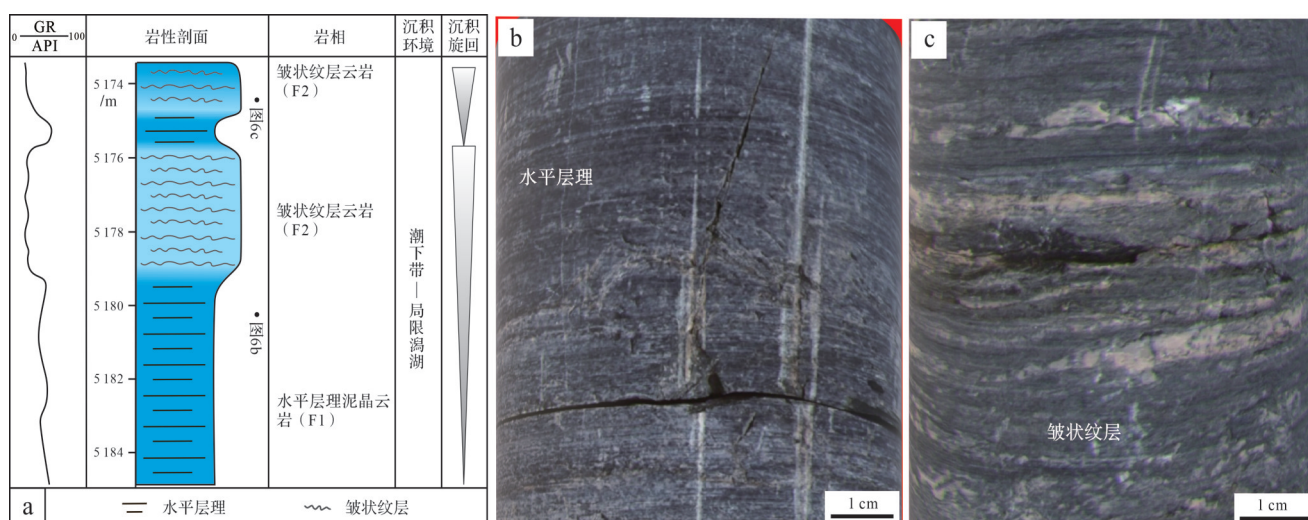


图6 川中地区灯四段潮下一局限潟湖岩相组合特征

(a)高石18井5 181.40~5 175.32 m取心段综合柱状图;(b)水平层理泥晶云岩(F1),5 181.40~5 181.65 m;(c)皱状纹层云岩(F2),5 174.17~5 174.32 m

Fig.6 Subtidal-restricted lagoon lithofacies association of the Fourth member of the Dengying Formation in central Sichuan Basin

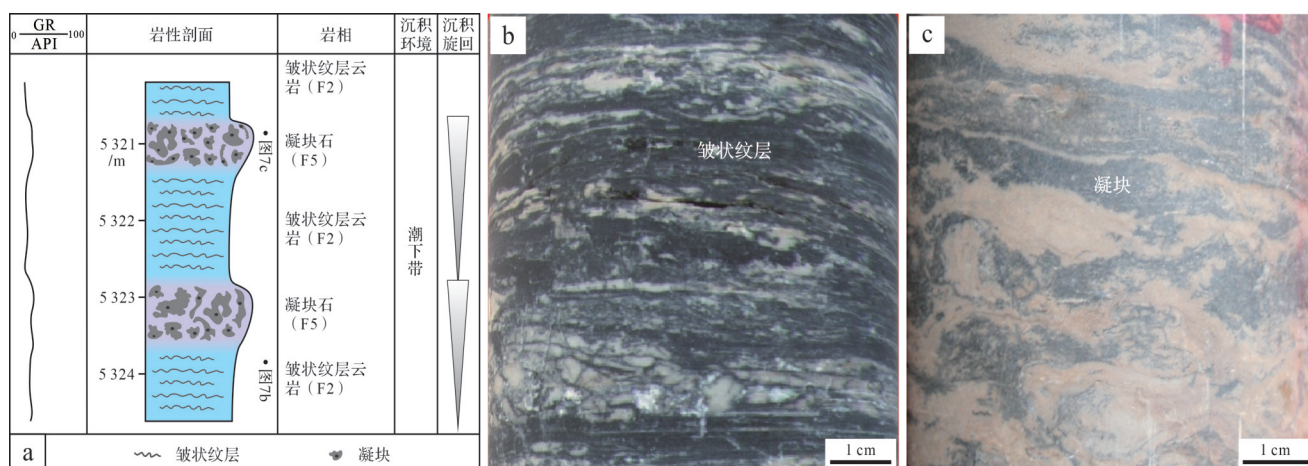


图7 川中地区灯四段潮下带凝块石岩相组合

(a)磨溪105井5 320.32~5 324.48 m取心段综合柱状图;(b)皱状纹层云岩(F2),5 323.84~5 323.92 m;(c)凝块石(F5),5 320.75~5 321.05 m

Fig.7 Subtidal thrombolite lithofacies association of the Fourth member of the Dengying Formation in central Sichuan Basin

潮坪—局限潟湖微相由潮下一局限潟湖岩相组合(图6)和反映潮上环境的F7和F8岩相构成,自然伽马(GR)曲线上以中—高值、齿化为主要特征,总体属于水循环局限背景下的低能沉积。颗粒滩由反映浅潮下一潮间环境的F3和F4在垂向上相交互构成,是浅潮下一潮间带叠层石—颗粒滩复合体岩相组合的主体部分(图8,9),GR曲线以低值箱型为标志。该微相内各类颗粒大量发育,并有少量菌黏结结构。叠层石丘由潮间带叠层石(图10)和浅潮下一潮间带叠层石—颗粒滩复合体岩相组合(图8,9)部分构成,GR曲线表现为低值弱齿化的特征。叠层石丘微相中发育中观和

微观尺度上的各种微生物结构,以菌纹层结构为主。凝块石丘由潮下带凝块石岩相组合(图7)构成,GR测井响应与叠层石丘相似。叠层石丘、凝块石丘与颗粒滩在垂向上叠置发育,共同组成丘滩复合体。

4.2 灯四段连井微相对比

沉积微相在单井上和连井格架内的分布具有规律性(图11,12)。在单井垂向上,这些沉积微相构成了5个层序(SQ1~SQ5)。层序内部,下部以发育潮坪—潟湖为主,向上过渡为叠层石丘、凝块石丘和/或颗粒滩。不同层序之间,由下至上微生物丘和颗粒滩厚度及占比逐渐增加。

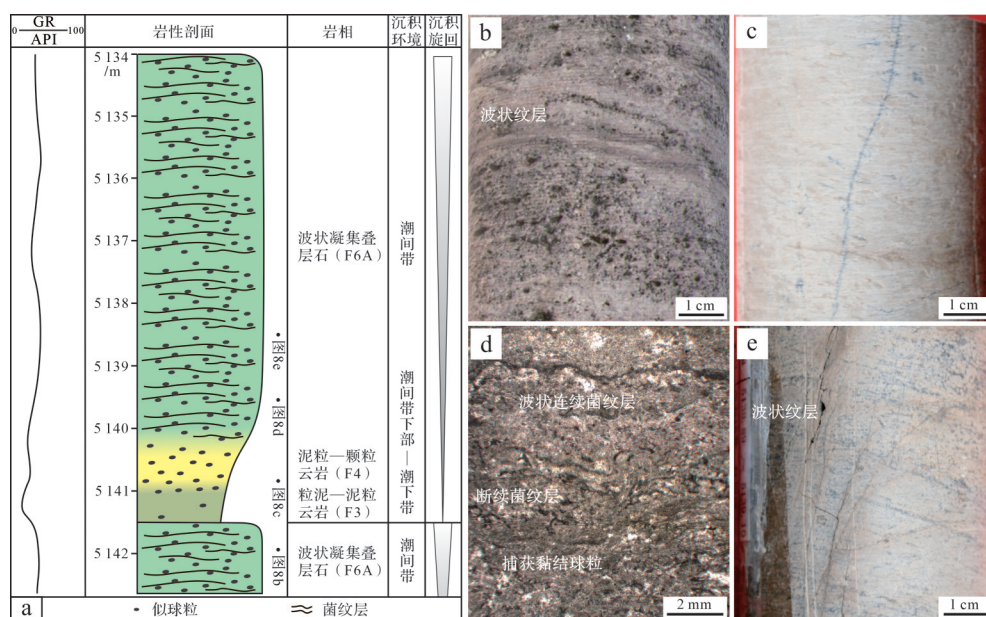


图8 川中地区灯四段浅潮下一潮间带叠层石—颗粒滩复合体岩相组合

(a)高石18井5 134.00~5 142.73 m取心段综合柱状图;(b)波状凝集叠层石(F6A),5 134.00 m;(c)泥粒—颗粒云岩(F4),5 140.39~5 140.52 m;(d)波状凝集叠层石(F6A)镜下照片,5 139.50 m;(e)波状凝集叠层石(F6A),5 138.89~5 139.10 m

Fig.8 Shallow-subtidal to intertidal stromatolite-shoal complex lithofacies association of the Fourth member of the Dengying Formation in central Sichuan Basin

在近南北向的连井剖面上,灯四段沉积早中期,北部的磨溪105井以潟湖和颗粒滩微相组合为主,中部和南部的钻井以丘滩体和潟湖微相交替发育为特征(图11)。在近东西向连井剖面上,高石19井丘滩复合体的厚度最大,且连续性好,指示台地边缘环境。向东部的高石20井和高石21井,丘滩体的厚度逐渐减薄,出现较为密集的高频旋回,反映水浅和相变化快的局限台地环境(图12)。灯四段沉积晚期,区域上丘滩体的厚度和侧向连续性均变好(图11,12)。

4.3 灯四段上部微相平面展布

川中地区灯四段沉积期古地貌具有东西分异的特点,区内西侧沉积近南北走向的高地貌,主要发育台地边缘丘滩相;东侧沉积地貌低,主要发育局限台地相^[32]。在相分析的基础上,编制了沉积微相平面展布图(图13)。灯四段上部台地边缘相呈近南北向分布,以西为斜坡—盆地相,向东过渡为局限台地潮坪—潟湖相(图13)。台地边缘带以大面积的微生物丘和颗粒滩沉积发育为特征,丘滩体整体上呈南北向分布,钻井间的连续性良好。向局限台地环境,丘滩体发育的规模略有减小,井间的连续性变差。

5 灯四段微生物岩沉积模式

在精细相分析和层序地层格架内相对比的基础上,建立了川中地区灯四段微生物岩沉积模式(图14)。灯四段的沉积环境主要为台地边缘—局限台地环境,具体的沉积环境可依据平均高潮线、平均低潮线和正常浪基面进一步细分。在不同环境下,沉积组分(颗粒和菌纹层)和微生物沉积作用(捕获黏结作用和诱导沉淀作用)的分布具有规律性。

在浪基面以下的低能环境中,主要发育局限潟湖和凝块石丘这两种微相,它们分布在研究区东部的局限台地和台地边缘的外侧(图13),岩相包括水平层理泥晶云岩(F1)、皱状纹层云岩(F2)和凝块石(F5)。在该环境中,总体水动力弱,沉积物以泥晶为主,含少部分颗粒。微生物沉积作用总体弱,仅在正常浪基面附近及以下的浅水区发育小规模凝块石,发育少量微生物纹层状构造。这与贵州中东部奥陶系红花园组凝块石^[33]和西班牙东南部中新世陆架坡折—上陆坡之上发育的凝块石^[34]特征类似。在浪基面附近及以上开始发育粒泥—泥粒云岩(F3),向上至潮间带下部,随着水动力增强,以发育泥粒—颗粒云岩(F4)为主,这些岩相分布在局限台地的局部地貌高地、台地边缘等区域(图13)。

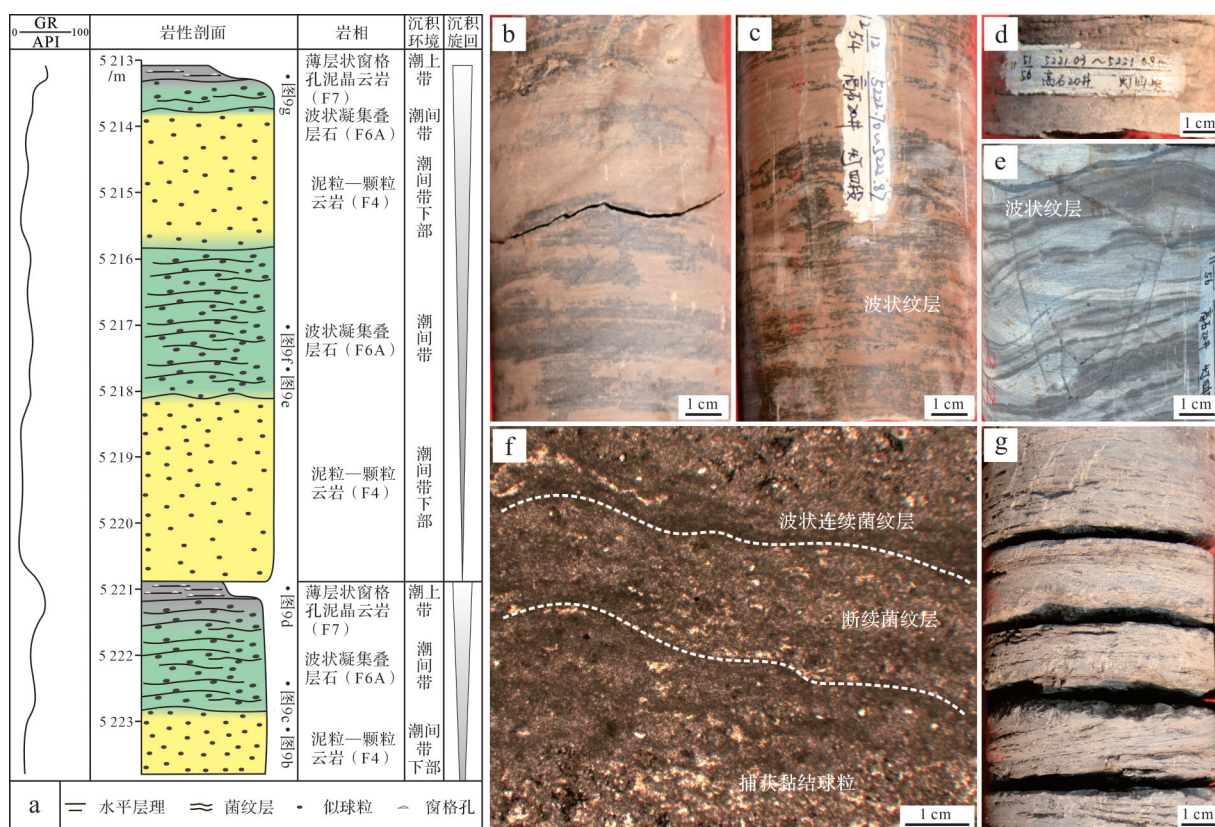


图9 川中地区灯四段潮间叠层石—颗粒滩复合体岩相组合

(a)高石20井5 213.10~5 223.84 m取心段综合柱状图;(b)泥粒—颗粒云岩(F4),5 224.63~5 224.79 m;(c)波状凝集叠层石(F6A),5 222.70~5 222.87 m;(d)薄层状窗格孔泥晶云岩(F7),5 221.03~5 221.08 m;(e)波状凝集叠层石(F6A),5 217.50~5 218.10 m;(f)波状凝集叠层石(F6A)显微照片,5 217.00 m;(g)薄层状窗格孔泥晶云岩(F7),5 213.02~5 213.26 m

Fig.9 Intertidal stromatolite-shoal complex lithofacies association of the Fourth member of the Dengying Formation in central Sichuan Basin

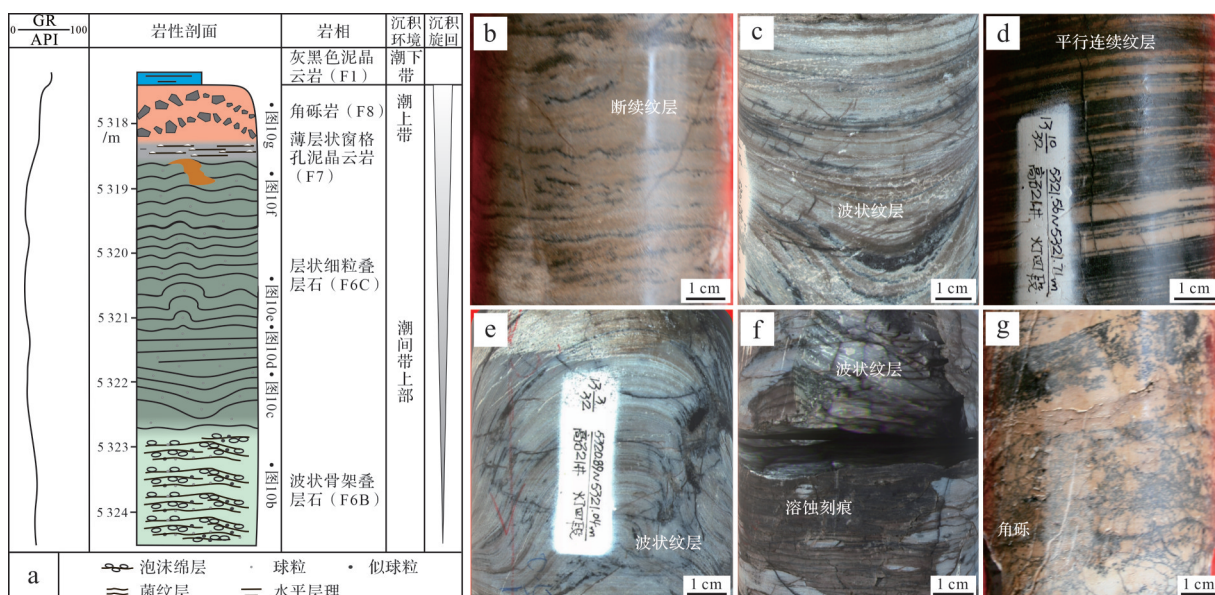


图10 川中地区灯四段潮间带叠层石岩相组合

(a)高石21井5 317.27~5 324.54 m取心段综合柱状图;(b)波状骨架叠层石(F6B),5 323.21~5 323.43 m;(c)层状细粒叠层石(F6C),5 321.98 m;(d)层状细粒叠层石(F6C),5 321.56~5 321.71 m;(e)层状细粒叠层石(F6C),5 320.00 m;(f)层状细粒叠层石(F6C),5 318.70 m,具溶蚀刻痕;(g)角砾岩(F8),5 318.33~5 318.59 m

Fig.10 Intertidal stromatolite lithofacies association of the Fourth member of the Dengying Formation in central Sichuan Basin

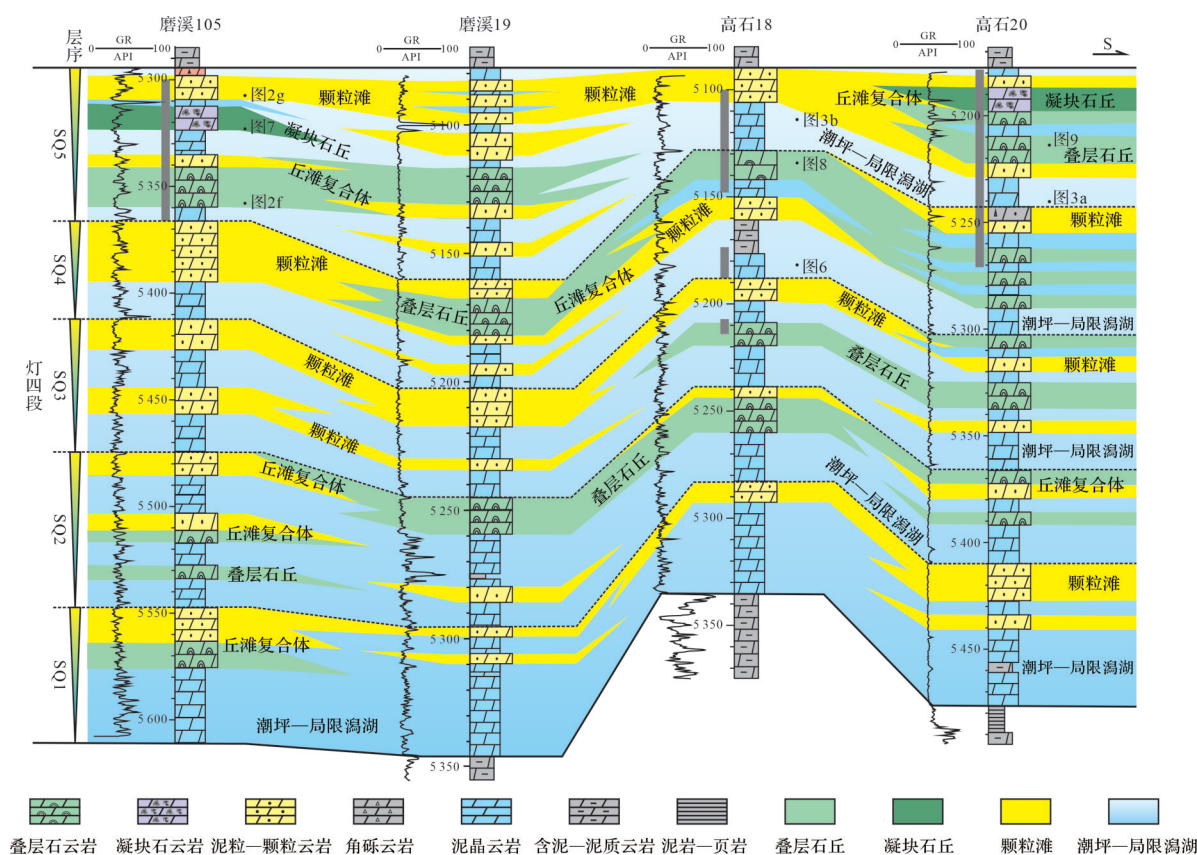


图 11 川中地区磨溪 105 井—高石 20 井灯四段层序地层格架内的微相分布(连井位置见图 1)

Fig.11 Microfacies distribution in the sequence stratigraphic framework of the Fourth member of the Dengying Formation, wells MX105-GS20, central Sichuan Basin (well locations in Fig.1)

潮间带主体以发育波状凝集叠层石(F6A)、波状骨架叠层石(F6B)、层状细粒叠层石(F6C)等典型微生物岩为特征,它们在微观尺度以各种形态的菌纹层、泡沫绵层、不同类型和不同大小的颗粒及广泛发育的窗格孔为标志,反映适宜蓝细菌生长的沉积条件,微生物诱导沉淀、捕获黏结等沉积作用十分活跃。其中,波状凝集叠层石(F6A)可与西澳大利亚巴哈马岛现代正常海洋中潮间带的叠层石相对比,都是通过微生物席捕获黏结动荡海水中的碳酸盐颗粒而形成^[29]。波状骨架叠层石(F6B)显示出的特征可与伊比利亚半岛的侏罗—白垩纪浅海叠层石相类比^[30]。层状细粒叠层石(F6C)与我国柴达木盆地西部下干柴沟组上段咸化湖盆的微生物岩相似,均沉积于低能深水区^[31]。由平均低潮线向平均高潮线,随着水动能的减弱,颗粒含量不断减少,微生物的捕获黏结作用减弱,诱导沉淀作用增强,菌纹层发育连续性变好。潮间带发育的各类微生物岩和潮间带下部—潮下带上部的颗粒岩沉积交互,构成了微生物丘和丘滩复合体,广泛分布在台

地边缘和宽浅的局限台地(图 13)。潮上带以发育薄层状窗格孔泥晶云岩(F7)和角砾岩(F8)为主,见干裂等暴露标志,在微生物丘和丘滩复合体微相的顶部局部发育。

6 灯四段微生物岩沉积作用的主控因素

微生物与环境的协调作用是微生物碳酸盐岩形成的关键^[1],这种作用主要影响微生物对沉积物的捕获和黏结、微生物自身的钙化以及碳酸盐的原地沉淀^[5,35]。基于川中地区灯四段叠层石、凝块石等微生物岩的中观和微观特征,分析认为沉积环境水动力作用(水动力类型及强弱差异)和微生物沉积作用(诱导沉淀作用和捕获黏结作用)是控制微生物岩沉积的主要因素(图 15)。

在正常浪基面以下的浅水潮下带,水动力作用总体较弱。微生物未形成稳定的纹层,主要通过捕获黏结水体中悬浮颗粒的形式形成凝块结构,进而形成凝块石(F5)。在潮间带下部,水动力类型主要

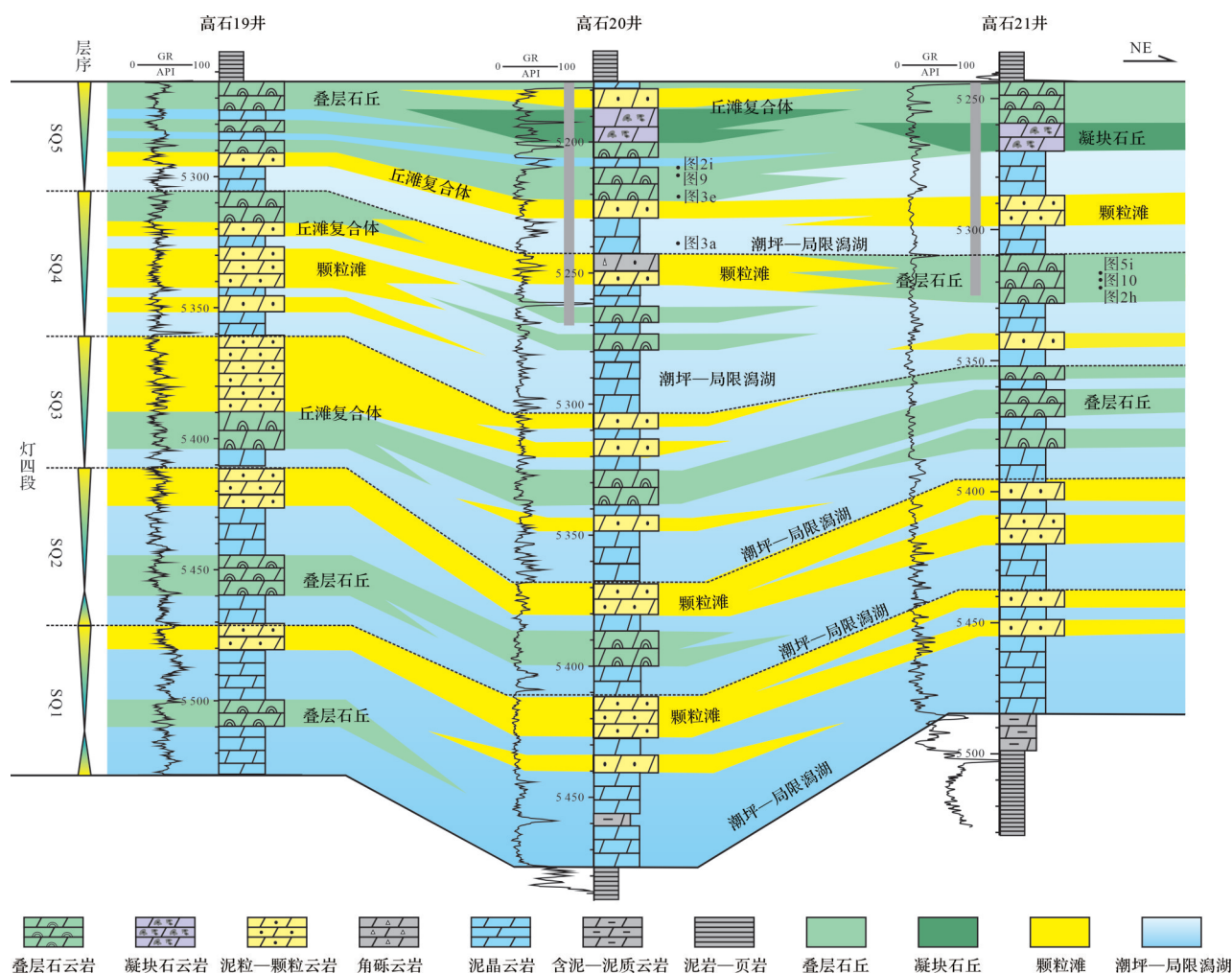


图12 川中地区高石19井—高石21井灯四段层序地层格架内的微相分布(连井位置见图1)

Fig.12 Microfacies distribution in the sequence stratigraphic framework of the Fourth member of the Dengying Formation, wells GS19-GS21, central Sichuan Basin (well locations in Fig.1)

为波浪和潮汐主控,水动力作用强,形成高能砂屑滩。同时,各种菌类等微生物繁盛,微生物席主要通过捕获黏结颗粒形成菌纹层,进而形成凝集叠层石(F6A)。另外,菌纹层的形态会受到沉积环境中水动力条件的控制^[11]。由于此处的水动力持续较强,菌纹层难以稳定发育,从而表现出断续的波状结构。在潮间带上部,水动力类型过渡为以潮汐作用为主,强度中等,且向平均高潮线潮汐水动力逐渐减弱,水体中悬浮的颗粒减少。该环境适宜各种菌类等微生物的持续生长,微生物席稳定发育。菌纹层主要的生长方式是微生物诱导的碳酸盐原地沉淀和菌丝体的钙化作用^[36]。微生物通过诱导沉淀和原地钙化作用形成泡沫绵层结构,同时捕获黏结少量颗粒,形成了波状骨架叠层石(F6B)。在靠近潮上带的区域,潮汐作用最弱,微生物沉积作用以诱导沉淀碳酸盐泥晶

为主,此时发育大量平行排布的以泥晶成分为主的菌纹层,形成层状细粒叠层石(F6C)。

7 结论

(1) 基于连续钻井取心段的精细描述和分析,识别出包括凝块石和叠层石两类微生物岩在内的8种岩相类型,并将叠层石划分为波状凝集叠层石、波状骨架叠层石和层状细粒叠层石。总结了川中地区灯四段主要发育的4种岩相组合,包括潮下一局限潟湖岩相组合、潮下带凝块石岩相组合、浅潮下一潮间带叠层石—颗粒滩复合体岩相组合和潮间带叠层石岩相组合。

(2) 依据岩心和测井特征,可将灯四段划分为潮坪—局限潟湖、颗粒滩、叠层石丘、凝块石丘、丘滩复合体等5种微相。连井剖面层序格架内的微相对比

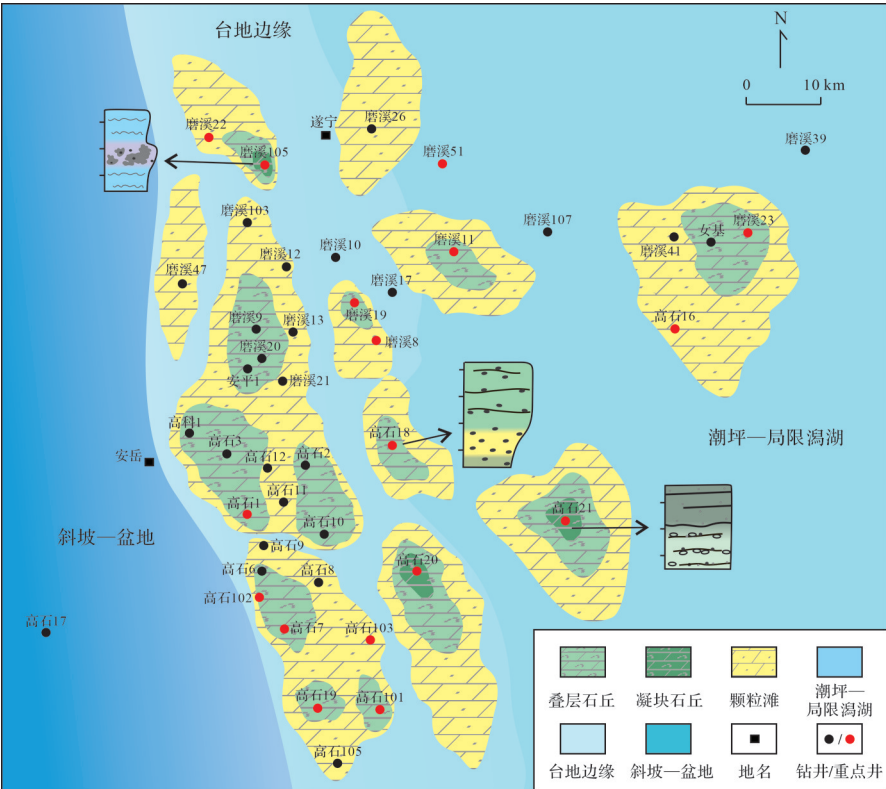


图 13 川中地区灯四段上部沉积微相平面分布

Fig.13 Microfacies distribution in the upper part of the Fourth member of the Dengying Formation in central Sichuan Basin

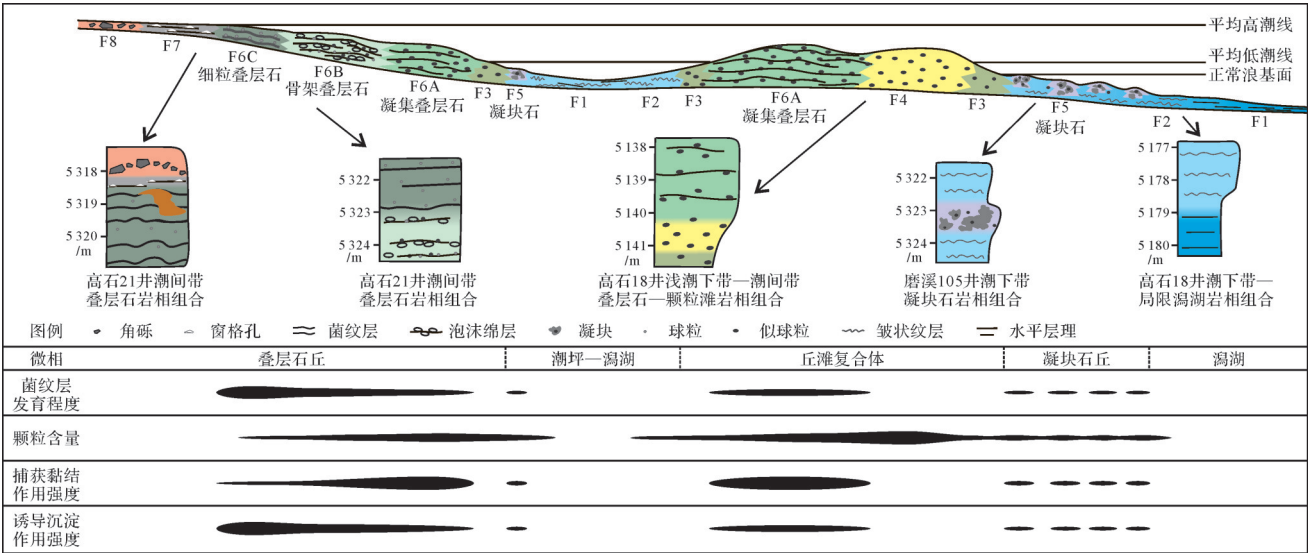


图 14 川中地区灯四段微生物岩沉积模式

Fig.14 Deposition model for microbialites in Fourth member of the Dengying Formation, central Sichuan Basin

显示,叠层石丘、凝块石丘和/或颗粒滩主要发育在层序的上部,且在灯四段由下至上发育规模变大。平面上,台地边缘以大面积的微生物丘和颗粒滩相发育为特征;局限台地内丘滩体的规模略有减小且分布连续性变差。

(3) 建立了川中地区灯四段微生物岩沉积模式。凝块石发育于浪基面以下的局限台地,水动力条件弱;波状凝集叠层石发育在潮间带下部高能滩体附近,水动力条件强;波状骨架叠层石发育在水动力条件中等的潮间带上部,向上水动力条件逐渐减弱,发

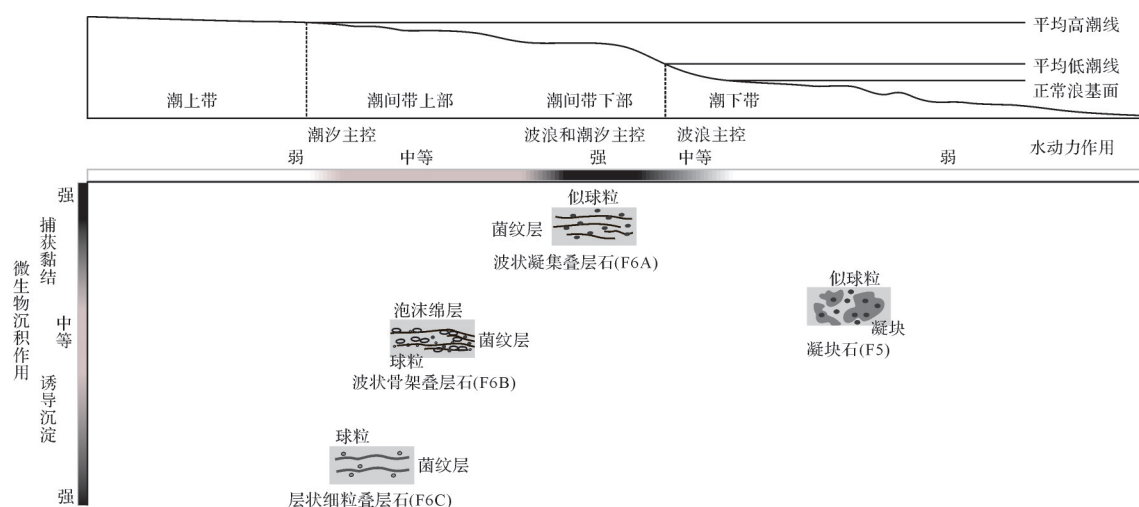


图 15 川中地区灯四段微生物岩沉积作用的主控因素

Fig.15 Main controlling factors of the deposition processes of the microbialites, Fourth member of the Dengying Formation, central Sichuan Basin

育层状细粒叠层石。明确了沉积组分(颗粒和菌纹层)以及微生物沉积作用(捕获黏结作用和诱导沉淀作用)的分布规律。

(4) 深入分析了水动力和微生物沉积作用对川中地区灯四段微生物岩沉积的控制作用。潮下带浪基面以下的低能带,局部少量发育的菌类通过捕获黏结作用形成凝块石;波浪潮汐作用强的潮间带下部,微生物席大量发育,通过捕获黏结颗粒形成凝集叠层石;潮间带上部,随着潮汐水动力的减弱,微生物作用以诱导沉淀为主,形成骨架叠层石和细粒叠层石。

参考文献(References)

- [1] Burne R V, Moore L S. Microbialites: Organosedimentary deposits of benthic microbial communities [J]. *PALAIOS*, 1987, 2(3): 241-254.
- [2] 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.]
- [3] 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.]
- [4] 王龙, Latif K, Riaz M, 等. 微生物碳酸盐岩的成因、分类以及问题与展望: 来自华北地台寒武系微生物碳酸盐岩研究的启示[J]. 地球科学进展, 2018, 33(10): 1005-1023. [Wang Long, Latif K, Riaz M, et al. The genesis, classification, problems and prospects of microbial carbonates: Implications from the Cambrian carbonate of North China Platform [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(10): 1005-1023.]
- [5] Riding R. Structure and composition of organic reefs and carbonate mud mounds: Concepts and categories [J]. *Earth-Science Reviews*, 2002, 58(1/2): 163-231.
- [6] Chen J T, Lee J H. Current progress on the geological record of microbialites and microbial carbonates [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2014, 88(1): 260-275.
- [7] 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.]
- [8] 梅冥相. 微生物碳酸盐岩分类体系的修订: 对灰岩成因结构分类体系的补充[J]. 地学前缘, 2007, 14(5): 222-234. [Mei Mingxiang. Revised classification of microbial carbonates: Complementing the classification of limestones [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14(5): 222-234.]
- [9] 吴亚生,姜红霞,虞功亮,等. 微生物岩的概念和重庆老龙洞剖面P-T界线地层微生物岩成因[J]. 古地理论, 2018, 20(5): 737-775. [Wu Yasheng, Jiang Hongxia, Yu Gongliang, et al. Conceptions of microbialites and origin of the Permian-Triassic boundary microbialites from Laolongdong, Chongqing, China [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2018, 20(5): 737-775.]
- [10] Shapiro R S. A comment on the systematic confusion of

- thrombolites[J]. *PALAIOS*, 2000, 15(2): 166-169.
- [11] 齐永安,王艳鹏,代明月,等. 豫西登封寒武系第三统张夏组凝块石灰岩及其控制因素[J]. 微体古生物学报, 2014, 31(3): 243-255. [Qi Yong'an, Wang Yanpeng, Dai Mingyue, et al. Thrombolites and controlling factors from the Zhangxia Formation of Cambrian series 3 in Dengfeng, western Henan province [J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2014, 31(3): 243-255.]
- [12] 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.]
- [13] 徐哲航,兰才俊,郝芳,等. 四川盆地震旦系灯影组不同古地理环境下丘滩储集体的差异性[J]. 古地理学报, 2020, 22(2): 235-250. [Xu Zhehang, Lan Caijun, Hao Fang, et al. Difference of mound-bank complex reservoir under different palaeogeographic environment of the Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2020, 22(2): 235-250.]
- [14] 付坤荣,黄理力,祝怡,等. 塔中地区晚奥陶世碳酸盐台缘与台内沉积差异:定性和定量的碳酸盐岩微相综合分析[J]. 沉积学报, 2018, 36(1): 101-109. [Fu Kunrong, Huang Lili, Zhu Yi, et al. The depositional diversity between platform margin and platform interior on the Late Ordovician carbonate rimmed-platform of Tazhong area: A case study of qualitative and quantitative integrated microfacies analysis [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(1): 101-109.]
- [15] 高达,林畅松,杨海军,等. 塔中地区良里塔格组沉积微相及其对有利储层的控制[J]. 地球科学:中国地质大学学报, 2013, 38(4): 819-831. [Gao Da, Lin Changsong, Yang Haijun, et al. Microfacies of Late Ordovician Lianglitage Formation and their control on favorable reservoir in Tazhong area [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2013, 38(4): 819-831.]
- [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 Xiaerbulake Formation in Tarim Basin, northwest China, and its implications for exploration [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(2): 392-402.]
- [17] 王鑫,辛勇光,田瀚,等. 四川盆地中三叠统雷口坡组沉积储层研究进展[J]. 海相油气地质, 2020, 25(3): 210-222. [Wang Xin, Xin Yongguang, Tian Han, et al. Research progress on sedimentation and reservoir of Leikoupo Formation of Middle Triassic in Sichuan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2020, 25(3): 210-222.]
- [18] 杨威,魏国齐,谢武仁,等. 四川盆地绵竹—长宁克拉通内裂陷东侧震旦系灯影组四段台缘丘滩体成藏特征与勘探前景[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1174-1184. [Yang Wei, Wei Guoqi, Xie Wuren, et al. Hydrocarbon accumulation and exploration prospect of mound-shoal complexes on the platform margin of the Fourth member of Sinian Dengying Formation in the east of Mianzhu-Changning intracratonic rift, Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(6): 1174-1184.]
- [19] 魏柳斌,包洪平,严婷,等. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系马家沟组五段5亚段微生物碳酸盐岩发育特征及储集意义[J]. 石油学报, 2021, 42(8): 1015-1025. [Wei Liubin, Bao Hongping, Yan Ting, et al. Development characteristics and significance of microbial carbonate reservoirs in the Fifth submember of member 5 of Ordovician Majiagou Formation in the eastern Ordos Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 42(8): 1015-1025.]
- [20] 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.]
- [21] 翟秀芬,汪泽成,罗平,等. 四川盆地高石梯东部地区震旦系灯影组微生物白云岩储层特征及成因[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(8): 1199-1210. [Zhai Xiufen, Wang Zecheng, Luo Ping, et al. Characteristics and origin of microbial dolomite reservoirs in Upper Sinian Dengying Formation, eastern Gaoshiti area, Sichuan Basin, SW China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2017, 28(8): 1199-1210.]
- [22] 郭恒玮,伏美燕,宋荣彩,等. 川中高石梯地区灯四段藻丘类型与沉积模式[J]. 沉积学报, 2022, 40(1): 217-228. [Guo Hengwei, Fu Meiyun, Song Rongcai, et al. Algal type and sedimentary model of the 4th member, Dengying Formation in the Gaoshiti area of Chuanshan [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(1): 217-228.]
- [23] 王文之,杨跃明,文龙,等. 微生物碳酸盐岩沉积特征研究:以四川盆地高磨地区灯影组为例[J]. 中国地质, 2016, 43(1): 306-318. [Wang Wenzhi, Yang Yueming, Wen Long, et al. A study of sedimentary characteristics of microbial carbonate: A case study of the Sinian Dengying Formation in Gaomo area, Sichuan Basin [J]. *Geology in China*, 2016, 43(1): 306-318.]
- [24] 文龙,王文之,张健,等. 川中高石梯—磨溪地区震旦系灯影组碳酸盐岩岩石类型及分布规律[J]. 岩石学报, 2017, 33(4): 1285-1294. [Wen Long, Wang Wenzhi, Zhang Jian, et al. Classification of Sinian Dengying Formation and sedimentary evolution mechanism of Gaoshiti-Moxi area in central Sichuan Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33

- (4): 1285-1294.]
- [25] 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.]
- [26] 田兴旺, 彭瀚霖, 王云龙, 等. 川中安岳气田震旦系灯影组四段台缘—台内区储层差异及控制因素[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(9): 1225-1238. [Tian Xingwang, Peng Hanlin, Wang Yunlong, et al. Analysis of reservoir difference and controlling factors between the platform margin and the inner area of the Fourth member of Sinian Dengying Formation in Anyue gas field, central Sichuan [J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(9): 1225-1238.]
- [27] 赵文智, 魏国齐, 杨威, 等. 四川盆地万源—达州克拉通内裂陷的发现及勘探意义[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(5): 659-669. [Zhao Wenzhi, Wei Guoqi, Yang Wei, et al. Discovery of Wanyuan-Dazhou intracratonic rift and its exploration significance in the Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(5): 659-669.]
- [28] 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.]
- [29] Browne K M. Modern marine stromatolitic structures: The sediment dilemma[M]//Tewari V, Seckbach J. STROMATOLITES: Interaction of microbes with sediments. Dordrecht: Springer, 2011: 291-312.
- [30] Suarez-Gonzalez P, Benito M I, Quijada I E, et al. 'Trapping and binding': A review of the factors controlling the development of fossil agglutinated microbialites and their distribution in space and time[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 194: 182-215.
- [31] 王建功, 杨少勇, 李翔, 等. 柴达木盆地西部地区咸化湖泊微生物岩特征与差异分布[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(6): 1111-1127. [Wang Jiangong, Yang Shaoyong, Li Xiang, et al. The characteristics and differential distribution of microbial carbonates of saline lacustrine in the western Qaidam Basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(6): 1111-1127.]
- [32] 朱正平, 罗文军, 潘仁芳, 等. 川中高石梯—磨溪地区灯影组四段古地貌恢复及其对储层的控制作用[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(6): 730-738. [Zhu Zhengping, Luo Wenjun, Pan Renfang, et al. The paleogeomorphology restoration of Sinian Deng 4 member and its control on reservoir formation in the Gaoshiti-Moxi area in central Sichuan Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(6): 730-738.]
- [33] 梅冥相. 从凝块石概念的演变论微生物碳酸盐岩的研究进展[J]. 地质科技情报, 2007, 26(6): 1-9. [Mei Mingxiang. Discussion on advances of microbial carbonates from the terminological change of thrombolites [J]. Geological Science and Technology Information, 2007, 26(6): 1-9.]
- [34] 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.
- [35] Ehrlich H L. Geomicrobiology: Its significance for geology [J]. Earth-Science Reviews, 1998, 45(1/2): 45-60.
- [36] Rasmussen K A, Macintyre I G, Prufert L. Modern stromatolite reefs fringing a brackish coastline, Chetumal Bay, Belize [J]. Geology, 1993, 21(3): 199-202.

Deposition Model and Main Factors Controlling Depositional Processes for Microbialites in the Fourth Member, Dengying Formation, Central Sichuan Basin

LI AnPeng^{1,2}, GAO Da^{1,2}, HU MingYi^{1,2}, ZHAO YuRu^{1,2}, ZHU ChuanYong^{1,2}, DAI YiChen^{1,2}

1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Wuhan 430100, China

Abstract: In order to establish the deposition model of microbialites in the Fourth member of Dengying Formation in central Sichuan Basin, and to clarify the main controlling deposition factors, a detailed deposition microfacies analysis was carried out on macrostructures and microfabrics using data from drill cores and thin sections. Eight lithofacies were identified in the study area, among which the microbialites include thrombolites and stromatolites. The stromatolites are further divided into wavy-laminated agglutinated stromatolites, wavy-laminated skeletal stromatolite and flat-laminated fine-grained stromatolites. The stacking patterns indicate four types of lithofacies associations: subtidal-restricted lagoon deposition; subtidal thrombolites; shallow-subtidal to intertidal stromatolites to shoal complex; and intertidal stromatolites. The microfacies distribution in the sequence stratigraphic framework shows that microbial mounds and shoals were located mainly in the upper part of the sequences, which became better-developed from bottom to top in this member of the Dengying Formation. The mound-shoals were more developed at the platform margin, decreasing in scale and continuity at the restricted platform. A microbialite deposition model was established based on the macrostructures, microfabrics and vertical sequence of the microbialites for the Fourth member of Dengying Formation. The thrombolites were mainly deposited in the subtidal environment below the wave base, with low hydrodynamics. Clots were locally formed by microbial trapping and binding small grains. The wavy-laminated agglutinated stromatolites were mainly deposited in the lower part of intertidal zone, in which various types of microbes flourished, and were formed by microbial trapping and binding of ooids and peloids in conditions of strong waves and tides. The wavy-laminated skeletal stromatolites were mainly deposited in the upper part of intertidal zone with moderate hydrodynamics dominated by the tide. The sponge structures were formed by microbially induced precipitation and *in situ* calcification, trapping and binding small amounts of pellets. The flat-laminated, fine-grained stromatolites were mainly deposited in the upper intertidal zone, and the deposition processes were predominantly microbially induced precipitation.

Key words: microbialite; stromatolite; thrombolite; sequence stratigraphy; deposition model; Dengying Formation; Sichuan Basin