

DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2020.06.003

文章编号:1672-3767(2020)06-0022-12

引用格式:王远翀,刘波,姜伟民,等.川西中三叠统雷口坡组四段微生物岩沉积-成岩演化及储层成因[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(6):22-33.

WANG Yuanchong, LIU Bo, JIANG Weimin, et al. Sedimentary, diagenetic evolution and reservoir formation of microbialites in the fourth member of the Middle Triassic Leikoupo Formation in western Sichuan Basin[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2020, 39(6): 22-33.

## 川西中三叠统雷口坡组四段微生物岩 沉积-成岩演化及储层成因

王远翀<sup>1</sup>, 刘 波<sup>1</sup>, 姜伟民<sup>1</sup>, 宋晓波<sup>2</sup>, 王琼仙<sup>2</sup>, 王文楷<sup>2</sup>, 李 勇<sup>2</sup>

(1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 中国石化 西南油气分公司, 成都 610041)

**摘 要:**川西雷口坡组四段发育优质碳酸盐岩储层,但其成因和成储机制尚不清楚。基于川西 14 口钻井 1 500 余张岩心薄片的详细研究,结合岩性、沉积结构、沉积构造和古生物组合,雷四段共发育 11 种微相类型以及 4 种微相组合。微生物岩储集空间主要为微生物格架孔,其次为凝块/纹层内容孔、晶间孔及裂缝。储层的形成受沉积和成岩的双重控制,发育于泻湖中的微生物丘(以凝块石、叠层石为主)是储层发育的前提,微生物格架孔内的石膏是储层形成的物质基础,高频海平面波动控制下的准同生期暴露溶蚀是储层形成的关键,而埋藏阶段的多期胶结作用在一定程度上破坏了储层。

**关键词:**川西;雷四段;微生物岩;沉积-成岩演化;储层成因

**中图分类号:**TE122.2

**文献标志码:**A

### Sedimentary, diagenetic evolution and reservoir formation of microbialites in the fourth member of the Middle Triassic Leikoupo Formation in western Sichuan Basin

WANG Yuanchong<sup>1</sup>, LIU Bo<sup>1</sup>, JIANG Weimin<sup>1</sup>, SONG Xiaobo<sup>2</sup>,

WANG Qiongxiang<sup>2</sup>, WANG Wenkai<sup>2</sup>, LI Yong<sup>2</sup>

(1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Southwest Petroleum Branch, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China)

**Abstract:** The reservoir formation and mechanism of high-quality microbial carbonate reservoirs in the 4<sup>th</sup> member of Leikoupo Formation are still controversial. Based on the detailed observation of the lithology, sedimentary structures, paleontological features, and microfossil assemblages of more than 1 500 thin sections obtained from 14 wells, 11 microfacies types and 4 microfacies associations were identified in the 4<sup>th</sup> member of Leikoupo Formation in this study. It was found that the main pore type of microbial carbonate was microbial framework pores, followed by dissolution pores in the clot/laminae, inter-crystalline pores and fracture. The formation of reservoir was controlled by both deposition and diagenesis. Microbial mounds (mainly thrombolites and stromatolites) developed in lagoon were the prerequisite of reservoir development. While the gypsum inside the microbial framework pores was

收稿日期:2020-02-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41572117);中国石化“十条龙”重大科技攻关项目(P16092)

作者简介:王远翀(1991—),男,四川达州人,博士研究生,主要从事储层地质学研究. E-mail:wangyuanchong@pku.edu.cn

刘 波(1965—),男,四川彭州人,研究员,博士,主要从事储层地质学研究,本文通信作者.

E-mail:bobliu@pku.edu.cn

the material basis and the corrosion during penecontemporaneous period owing to high frequency sea level fluctuation was the key, the multistage cementation during the subsequent burial period destroys the reservoir to some degree.

**Key words:** western Sichuan Basin; the fourth member of the Leikoupo Formation; microbialites; sedimentary-diagenetic evolution; reservoir formation

20 世纪 70 年代,川西北中坝气田雷口坡组三段气藏的发现为四川盆地雷口坡组油气勘探拉开了序幕<sup>[1]</sup>。随后的 50 年,雷口坡组油气勘探的突破多集中于川中和川东北地区,如川中磨溪气田雷口坡组一段、川东北龙岗气田雷口坡组顶部,而川西的雷口坡组一直没有较大突破。直到 2008 年,在川西雷口坡组四段上亚段白云岩中取得重大突破<sup>[2]</sup>,揭示了川西雷口坡组四段白云岩巨大的勘探潜力。关于雷四段白云岩储层成因,众多学者认为是受印支期构造运动影响下岩溶作用的控制,因为在部分钻井岩心内能直接观察到较为明显的古风化壳岩溶特征<sup>[3]</sup>。然而从 LS1 井、PZ103 井、YaS1 井、YS1 井、MJ1 井、YiS1 井等多口钻井的岩心和薄片观察来看,并未观察到明显的岩溶作用特征,而储层以微生物白云岩为主,因此部分学者<sup>[4]</sup>认为川西雷四段储层属于微生物碳酸盐岩储层,但对于微生物碳酸盐岩的成储机制仍有争议。刘树根等<sup>[4]</sup>认为川西雷四段储层发育受礁滩沉积相控制,结合早期的白云石化和埋藏溶蚀等建设性成岩作用,储层得以形成;Jiang 等<sup>[5]</sup>强调了 TSR 对储层发育的控制作用;而王琼仙等<sup>[6]</sup>认为早期的白云石化、准同生期溶蚀和埋藏溶蚀共同控制了储层的发育。

本研究利用野外、岩心、测井、物性以及地球化学测试数据,以川西中三叠统雷口坡组四段碳酸盐岩为研究对象,探究岩性、沉积构造和古生物化石的组合关系、从沉积与成岩演化的角度研究川西雷四段白云岩储层的成因。

## 1 地质背景

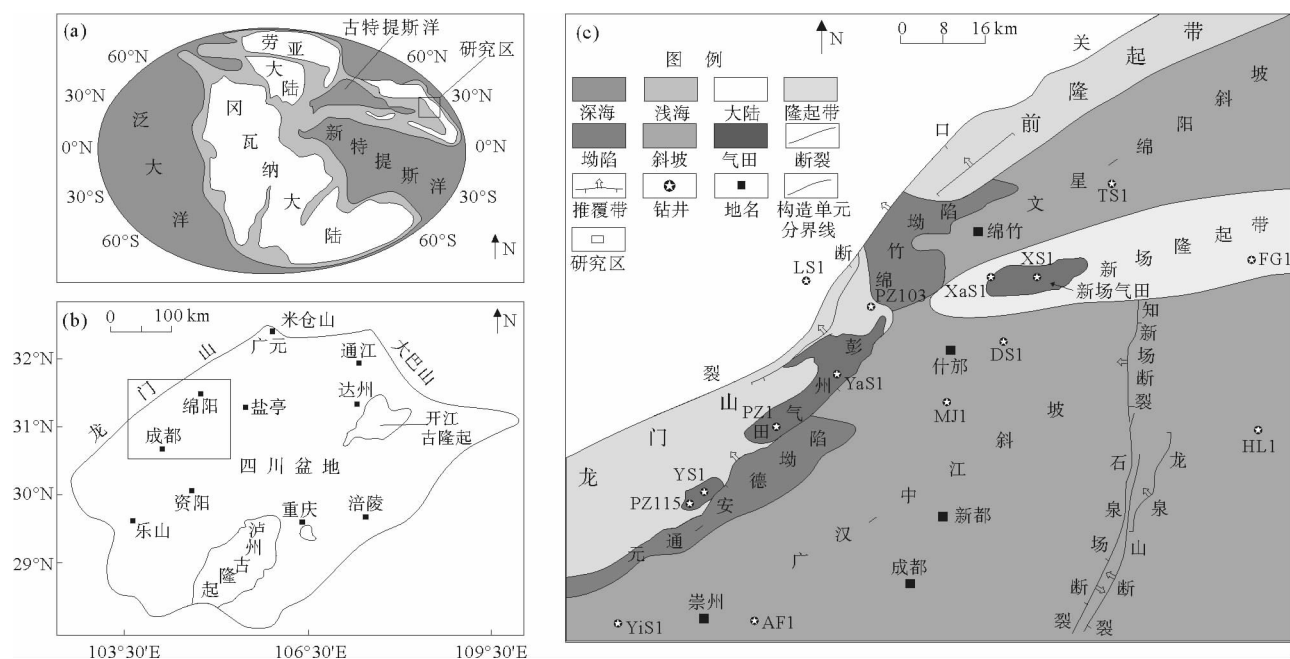
中三叠世安尼阶,扬子地块位于北纬 25°,古特提斯洋的东侧(图 1)。四川盆地处于扬子地块西北,地处于干旱气候带<sup>[7]</sup>(图 1(a))。雷口坡组发育一套“碳酸盐岩+蒸发岩”为主的局限台地-蒸发台地沉积,自下而上划分为四个岩性段:雷一段—雷三段以晶粒白云岩、颗粒灰岩夹薄层膏岩为主;雷四段细分为三个亚段,下中亚段以膏岩夹膏质白云岩、白云质膏岩为主,上亚段发育微生物白云岩/灰岩(凝块石、叠层石)、颗粒白云岩/灰岩、晶粒白云岩<sup>[7]</sup>。

## 2 微相类型

碳酸盐岩微相分析是沉积相分析和古环境解释的基本研究内容,通过识别碳酸盐岩颗粒类型及组合、基质类型、沉积构造、生物化石及沉积结构等微观特征,对碳酸盐岩微相进行识别,为沉积环境分析提供依据<sup>[8]</sup>。通过川西地区 14 口重点钻井雷四段 1 500 余张岩心薄片的详细研究,认为川西雷口坡组雷四段发育四大类岩石类型:微生物岩、颗粒岩、膏岩和晶粒灰岩/白云岩,又可细分为 11 种微相类型。微生物岩包括凝块石灰岩/白云岩微相(MF-1)、膏质凝块石白云岩微相(MF-2)、叠层石白云岩微相(MF-3)、膏质叠层石白云岩微相(MF-4);颗粒岩包括含小粟虫泥粒灰岩/白云岩微相(MF-5)、含似球粒、生屑砂屑灰岩/白云岩微相(MF-6)、含砂屑似球粒灰岩/白云岩微相(MF-7);膏岩可细分为膏岩微相(MF-8)和含云膏岩微相(MF-9);晶粒灰岩/白云岩可细分为泥晶灰岩/白云岩微相(MF-10)和粉晶白云岩微相(MF-11)(表 1)。

### 2.1 微生物岩

微生物岩(Microbialite)是由底栖微生物群落通过捕获与黏结碎屑沉积物,或经与微生物活动相关的无机或有机诱导矿化作用在原地形成的沉积物(岩)<sup>[9]</sup>。在川西雷四段微生物岩中,识别出的微生物类型主要为葛万菌和附枝菌(图 2(a)、2(b))。由于不同种类微生物岩在宏观结构上的区别较大,容易识别,因此本研究采用 Riding<sup>[10]</sup>的分类方案,将川西雷四段微生物岩分为凝块石和叠层石两大类,再根据矿物成分细分为凝块石灰岩/白云岩、膏质凝块石白云岩、叠层石白云岩和膏质叠层石白云岩四类。



(a) 中晚三叠世(240~220 Ma B.P.)全球古地理简图<sup>[7]</sup>; (b) 四川盆地中三叠世构造简图; (c) 川西现今构造单元及重点钻井分布图<sup>[1]</sup>

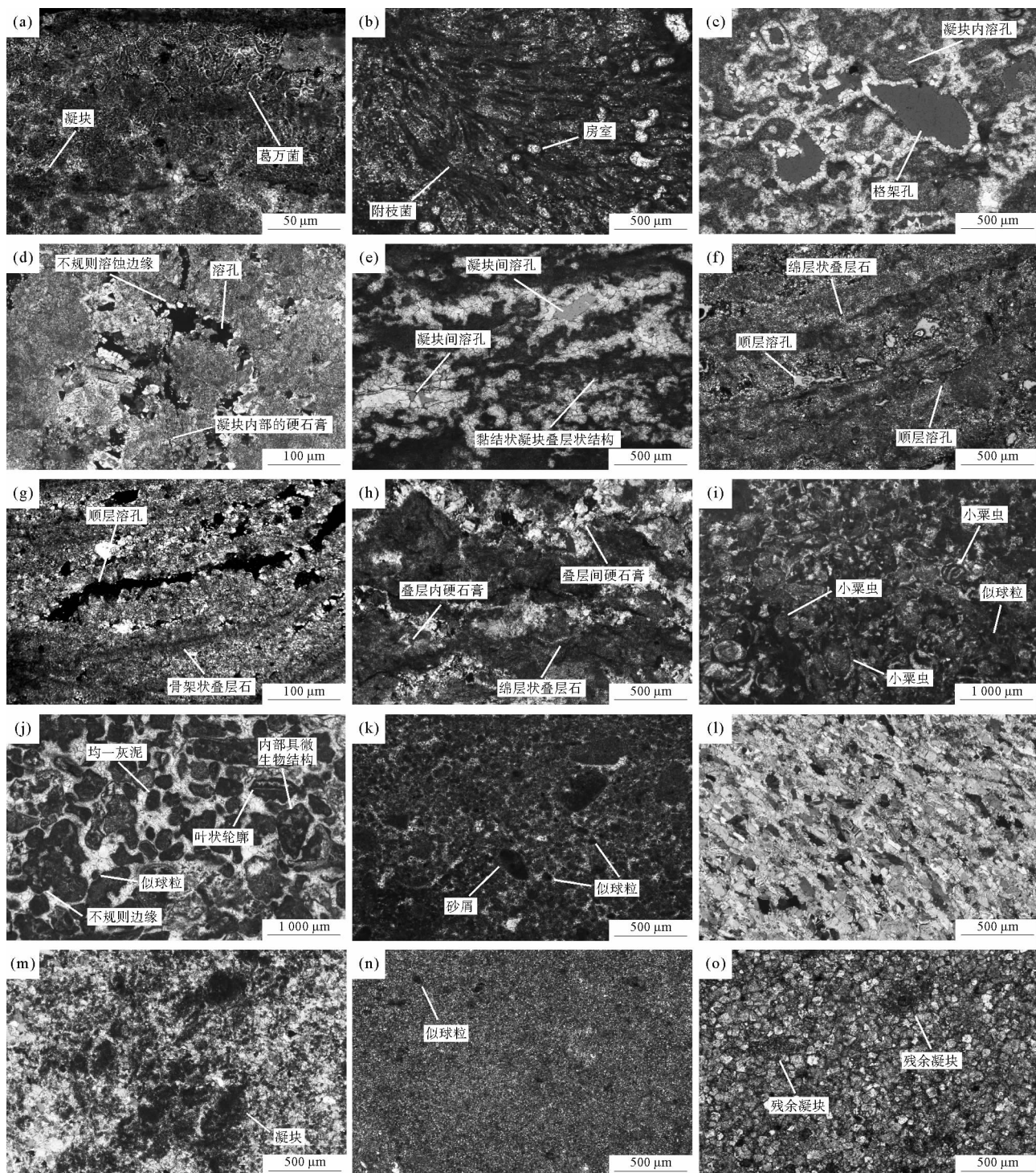
图 1 川西中三叠世大地构造背景及雷四段重点钻井分布图

Fig. 1 Tectonic background in the Middle Triassic and distribution of key wells in the fourth member of Leikoupo Formation in western Sichuan

MF-1:凝块石灰岩/白云岩,主要发育于雷四上亚段,宏观上为丰富的微生物粘结结构,部分层段见大量针状和不规则溶孔。显微镜下见四种类型的凝块状结构:①致密的泥晶凝块石,凝块内部由均一的灰泥组成;②斑块状泥晶凝块石,凝块内部可见斑块状的泥晶,颜色较灰泥深;③似球粒黏结状凝块石,凝块内见大量似球粒和少量的砂屑;④泡沫绵层状凝块石,凝块内部多为干净的粉晶白云石,凝块边缘见泥晶套,较脏。在凝块石灰岩/白云岩中见小粟虫、单列串珠虫和双列串珠虫以及葛万菌和附枝菌。凝块间发育大量溶孔,凝块内部见少量溶孔(图 2(c))。从微生物黏结的沉积物类型(灰泥、似球粒和砂屑)来看,凝块石灰岩/白云岩在水体能量较低和较高的环境中均能发育。

MF-2:膏质凝块石白云岩,主要发育于雷四中亚段和雷四下亚段,在上亚段中偶见。与 MF-1 中的凝块状结构特征类似,但在凝块之间,多被硬石膏晶体完全充填,凝块内也可见少量斑点状的硬石膏,常见于水体较浅的环境。凝块间的石膏也可见溶蚀现象,溶孔内的石膏见不规则的溶蚀边缘(图 2(d))。

MF-3:叠层石白云岩,发育于雷四上亚段,由于层面起伏,不规则,因此在宏观上很容易识别,部分层段见大量顺层展布的溶孔。显微镜下,暗色纹层和亮色纹层交替发育,通常单个韵律为几毫米厚,表明叠层石白云岩发育在水体能量频繁变化的环境。见四种类型的叠层状结构:①黏结状凝块叠层石,为凝块状和叠层状的过渡结构,由凝块状结构构成,具有一定的定向性,明暗相间的纹层不明显,其内可见凝块间溶孔,定向性不强(图 2(e));②纹层状细粒黏结状叠层石,暗色纹层不规则,厚度较薄,多为 0.05~0.1 mm,暗色之间的亮色纹层厚度较大,其内黏结大量的似球粒和少量砂屑;③绵层状叠层石,暗色纹层和亮色纹层厚度均较大,暗色纹层多由凝块石组成,黏结灰泥和似球粒,其内可见凝块间溶孔,亮色纹层胶结粉晶白云石,可见定向的溶孔(图 2(f));④骨架状叠层石,亮色和暗色纹层厚度均较薄,表明水体能量变化的频率较快,纹层间发育顺层溶孔(图 2(g))。四种类型的叠层状结构表明叠层石尽管能量相对较高,但水体能量变化的频率也有快有慢,黏结状凝块叠层石最慢,纹层状细粒黏结状叠层石次之,绵层状叠层石较快,骨架状叠层石最快。



(a) 葛万菌, PZ115 井, 6 316 m; (b) 附枝菌, YS1 井, 5 766.7 m; (c) 凝块石白云岩, YS1 井, 6 228.6 m; (d) 膏质凝块石白云岩, TS1 井, 5 844.2 m; (e) 黏结状凝块叠层石, YS1 井, 6 224.7 m; (f) 绵层状叠层石, AF1 井, 5 706.7 m; (g) 骨架状叠层石, YS1 井, 5 885.5 m; (h) 膏质叠层石白云岩, TS1 井, 5 843.50 m; (i) 含小粟虫生屑泥粒灰岩, YS1 井, 6 127.39 m; (j) 含似球粒砂屑白云岩, YS1 井, 6 119.9 m; (k) 含砂屑似球粒白云岩, YaS1 井, 5 785.9 m; (l) 膏岩, TS1 井, 5 847.1 m; (m) 含膏岩, TS1 井, 5 845.2 m; (n) 泥晶灰岩, AF1 井, 5 709.2 m; (o) 粉晶白云岩, AF1 井, 5 691.59 m

图 2 川西雷四段微相类型微观特征

Fig. 2 Microscopic characteristics of microfacies types of the fourth member of Leikoupo Formation in western Sichuan

MF-4:膏质叠层石白云岩,偶见于雷四中亚段和雷四上亚段,叠层状结构多以黏结状凝块叠层石、绵层状叠层石为主,亮色纹层内充填硬石膏,在暗色纹层内可见斑点状的硬石膏(图2(h))。常见于水体较浅的膏湖环境。

## 2.2 颗粒岩

川西雷四段颗粒岩包括含小栗虫泥粒灰岩/白云岩、含似球粒、生屑砂屑灰岩/白云岩和含砂屑似球粒灰岩/白云岩三类。

MF-5:含小栗虫泥粒灰岩/白云岩,主要发育于雷四上亚段。颗粒类型为个体较为完整的生物颗粒,以底栖类有孔虫为主,含少量介壳碎片、似球粒,颗粒间充填泥晶方解石或白云石(图2(i))。常见于旋回的下部,多为水体能量较低的潟湖环境。

MF-6:含似球粒砂屑灰岩/白云岩,主要发育于雷四上亚段。颗粒类型以砂屑为主,砂屑颗粒边缘形态并不规则,受微生物活动的影响,部分呈叶状轮廓,砂屑内部的结构为均一的灰泥组成和凝块状结构,砂屑颗粒间也发育小的似球粒,椭圆形,内部无明显结构,由均一的灰泥组成(图2(j))。砂屑和似球粒间多充填亮晶方解石和白云石,部分薄片内可见少量粒间孔残留,常见于水体能量较高的环境。

MF-7:含砂屑似球粒灰岩/白云岩,主要发育于雷四上亚段。颗粒类型以似球粒为主,椭圆形,由均一的灰泥组成,偶见砂屑颗粒,似球粒间多充填泥晶方解石和白云石(图2(k)),表明沉积时水体能量不高,常见于滩间环境。

## 2.3 膏岩

川西雷四段膏岩包括膏岩和含云膏岩两类。

MF-8:膏岩,主要发育于雷四下亚段、中亚段。宏观上,膏岩多呈浅灰-灰白色,显微镜下,由硬石膏晶体组成,中-粗晶,整体致密(图2(l)),膏岩呈层状,厚度较大,常见于蒸发环境下的膏湖环境。

MF-9:含云膏岩,主要发育于雷四下亚段、中亚段。宏观上,含云膏岩多呈浅灰-灰白色,发育深灰色的丝状、网状泥晶白云石,显微镜下呈黏结状、丝状,可能与微生物的活动有关,部分薄片可见凝块状结构(图2(m))。常见于蒸发环境下的膏湖环境。

## 2.4 晶粒灰岩/白云岩

川西雷四段晶粒灰岩/白云岩包括泥晶灰岩/白云岩和粉晶白云岩两类。

MF-10:泥晶灰岩/白云岩,主要发育于雷四上亚段。晶粒结构,由泥晶方解石或白云石组成,局部偶见少量的似球粒(图2(n)),水体能量极低,常见于旋回下部,多为潟湖和滩间环境。

MF-11:粉晶白云岩,在雷四段均有发育。晶粒结构,粉晶白云石,多为半自形-它形,表面较脏,局部可见残余的凝块结构,可能由微生物岩重结晶而成(图2(o))。粉晶白云石之间可见少量晶间孔和膏溶孔,水体能量较低,在潟湖和微生物丘环境均有发育。

## 3 微相组合与沉积模式

通过对碳酸盐岩微相类型的识别与研究,能有效确定研究区中三叠统雷口坡组四段的各微相类型沉积水体的水动力特征,再结合纵向组合类型及特征,划分为五级旋回,并推断古沉积环境<sup>[11]</sup>。本研究通过对连续取芯的五口钻井(YiS1井、AF1井、YaS1井、YS1井、MJ1井)薄片的详细鉴定,识别了四种完整的微相组合类型:MA-1,自下而上为膏质凝块石白云岩、含云膏岩、膏岩,沉积环境为膏湖环境;MA-2,自下而上为泥晶灰岩、似球粒灰岩、灰质凝块石白云岩、膏质凝块石白云岩、凝块石白云岩、叠层石白云岩,形成于微生物丘环境;MA-3,自下而上为泥粉晶白云岩、含砂屑似球粒白云岩、凝块石白云岩、含似球粒砂屑白云岩,潟湖-浅滩环境;MA-4,自下而上为含砂屑似球粒白云岩和含似球粒砂屑白云岩,滩间-台内滩环境(图3)。

可见,川西雷四上亚段微生物岩主要为局限台地环境,在潟湖的浅水区域建隆,形成微生物丘,浅滩与微生物丘相伴生,厚度不大。横向上,微生物丘-滩复合体平行于海岸线呈点状展布,而在潟湖的深水区域,则为微生物丘,滩体不发育,丘体间充填灰泥、似球粒等低能沉积物。条带状台内滩分布于汉旺、大邑等地,平行于海岸线,分隔了局限台地和开阔台地(图4)。

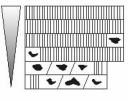
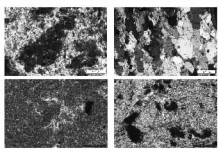
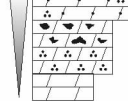
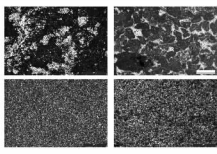
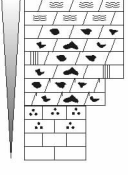
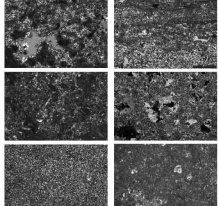
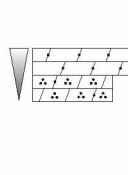
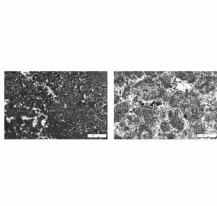












微相组合类型	典型照片	发育层位	沉积环境	微相组合类型	典型照片	发育层位	沉积环境
		雷四中、下亚段	膏湖			雷四上亚段	浅滩 ↑ 潟湖
		雷四上亚段	微生物丘 ↑ 潟湖			雷四上亚段	台内滩 ↑ 滩间
<div> 泥晶灰岩  泥晶白云岩  灰质凝块白云岩  凝块石白云岩  叠层石白云岩  似球粒灰岩  似球粒白云岩  含似球粒白云岩  颗粒白云岩  膏质白云岩  白云质膏岩  膏岩</div>							

图 3 川西雷四段微相组合类型及特征

Fig. 3 Characteristics of microfacies assemblages in the fourth member of Leikoupo Formation in western Sichuan

表 1 川西雷四段主要微相类型及特征

Tab. 1 Main microfacies types and characteristics of the fourth member of Leikoupo Formation in western Sichuan

微相类型	沉积结构	颗粒类型	颗粒/晶粒大小	生物组合	详细描述	水体能量	沉积环境
MF1 凝块石灰岩/白云岩	凝块状结构,凝块发育四种显微结构:致密泥晶黏结、斑块状泥晶黏结、似球粒黏结和泡沫绵层状	似球粒、少量砂屑	泥微晶(凝块)粉砂(似球粒)	小栗虫、单列串珠虫、双列串珠虫	中等强度的白云石化,凝块具不规则形状,凝块多为泥微晶,似球粒多见于凝块内部,凝块间见多期胶结物,剩余大量储集空间,凝块内见斑点状溶孔	中-高	微生物丘潟湖
MF2 膏质凝块石白云岩	黏结状凝块状	少量似球粒	泥微晶(凝块)、粉砂(似球粒)粉-细晶(硬石膏)	小栗虫(少量)	强烈的白云石化,泥-粉晶,凝块具不规则形状,见均一成分的凝块和似球粒黏结而成的凝块,凝块间完全或部分充填硬石膏	低-中	微生物丘膏湖
MF3 叠层石白云岩	叠层状结构,叠层发育四种显微结构:黏结状凝块叠层石、纹层状细粒黏结状叠层石、绵层状叠层石和骨架状叠层石	似球粒、少量砂屑	泥微晶(叠层)、粉砂(似球粒)粉-细晶(叠层间白云石)	小栗虫(少量)	强烈的白云石化,泥-粉晶,叠层呈不规则起伏状,角度低-中等,见均一成分的叠层和似球粒、凝块、粉砂黏结而成的叠层,叠层间胶结粉-细晶白云石、方解石,发育顺层展布的溶孔	中-高	微生物丘
MF4 膏质叠层石白云岩		少量似球粒、少量砂屑	泥微晶(叠层)、粉砂(似球粒)粉-细晶(硬石膏)	小栗虫(少量)	强烈的白云石化,泥-粉晶,叠层状结构,不规则波状起伏,见均一成分的叠层、似球粒和灰泥黏结而成的纹层,单个纹层内可见硬石膏斑点,纹层间完全或部分充填硬石膏	中-高	微生物丘
MF5 含小栗虫泥粒灰岩/白云岩	颗粒结构	生物碎屑	粉砂(生屑颗粒)	小栗虫(主要)介壳(少量)	微弱的白云石化,生屑为粉砂,生屑间见泥微晶白云石和方解石胶结	低	潟湖(滩间)
MF6 含似球粒、生屑砂屑灰岩/白云岩	颗粒结构	砂屑(主要)似球粒	粉-细砂(砂屑)粉砂(似球粒)	小栗虫(少量)	中等强度的白云石化,砂屑磨圆较好,颗粒间胶结白云石和方解石,可见少量残余的原生粒间孔,多为亮晶胶结	高	浅滩
MF7 含砂屑似球粒灰岩/白云岩	颗粒结构	似球粒少量砂屑	粉砂(似球粒)粉-细砂(砂屑)	小栗虫(少量)	中等强度的白云石化,似球粒为主,颗粒间胶结白云石和方解石,扫描电镜下可见粒间孔	低-中	潟湖(滩间)浅滩

续表 1

微相类型	沉积结构	颗粒类型	颗粒/晶粒大小	生物组合	详细描述	水体能量	沉积环境
MF8 膏岩	晶粒结构	无	中-细晶(硬石膏)	无	中-细晶硬石膏晶体,板状和长条状,完全胶结	低	膏湖
MF9 含云膏岩	晶粒结构	无	中-细晶(硬石膏)	无	中-细晶硬石膏晶体,可见丝带状微生物结构	低	膏湖
MF10 泥晶灰岩/白云岩	晶粒结构	少量似球粒	泥微晶	无	泥微晶方解石/白云石,偶见似球粒	极低	潟湖
MF11 粉晶白云岩	晶粒结构,具有残余凝块状结构	少量似球粒	粉晶	小栗虫(少量)	粉晶白云石,半自形-它形,表面较脏,多由微生物岩重结晶而来,局部可见残余凝块状结构,发育少量似球粒,见膏溶孔	低	潟湖微生物丘

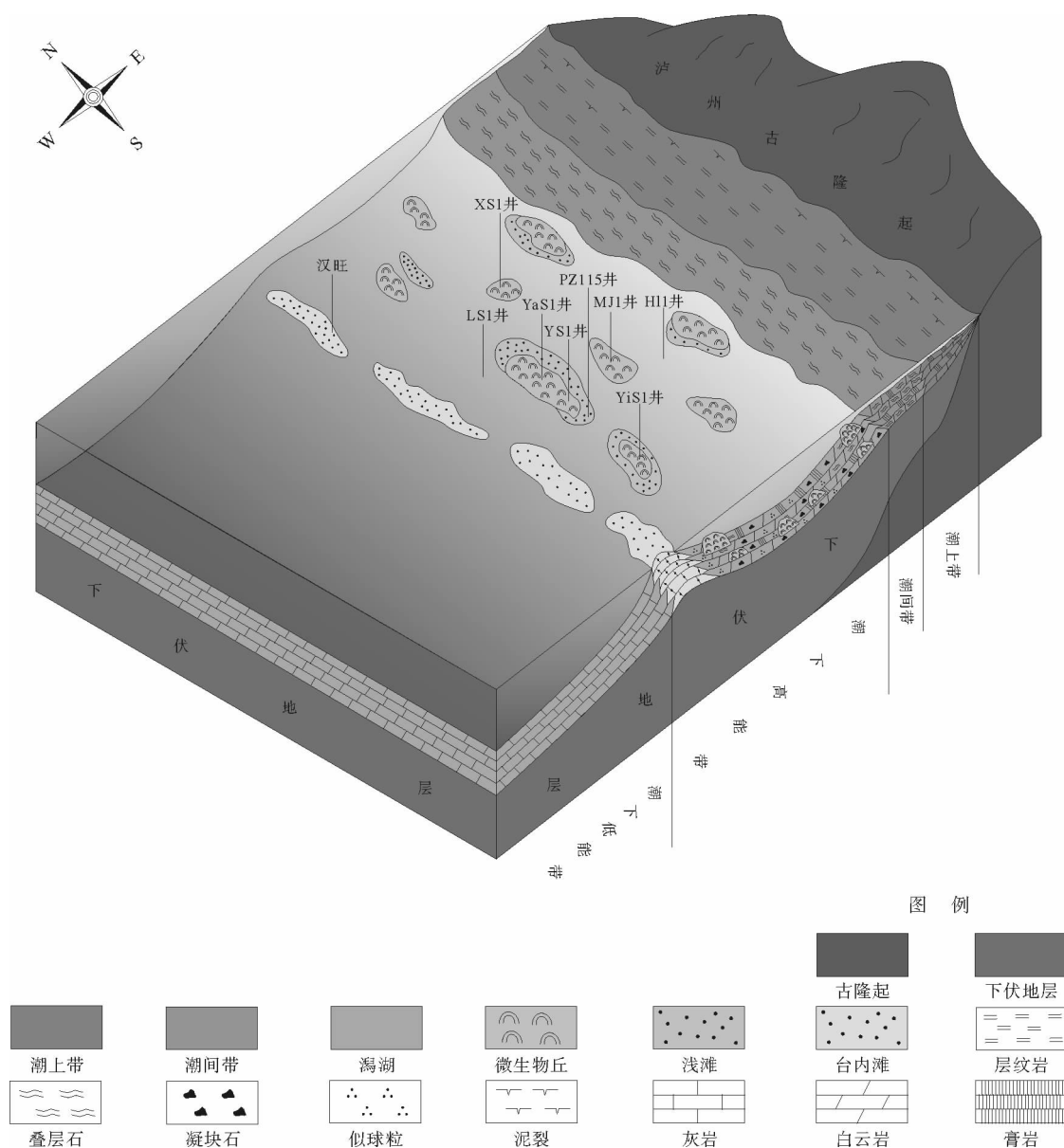


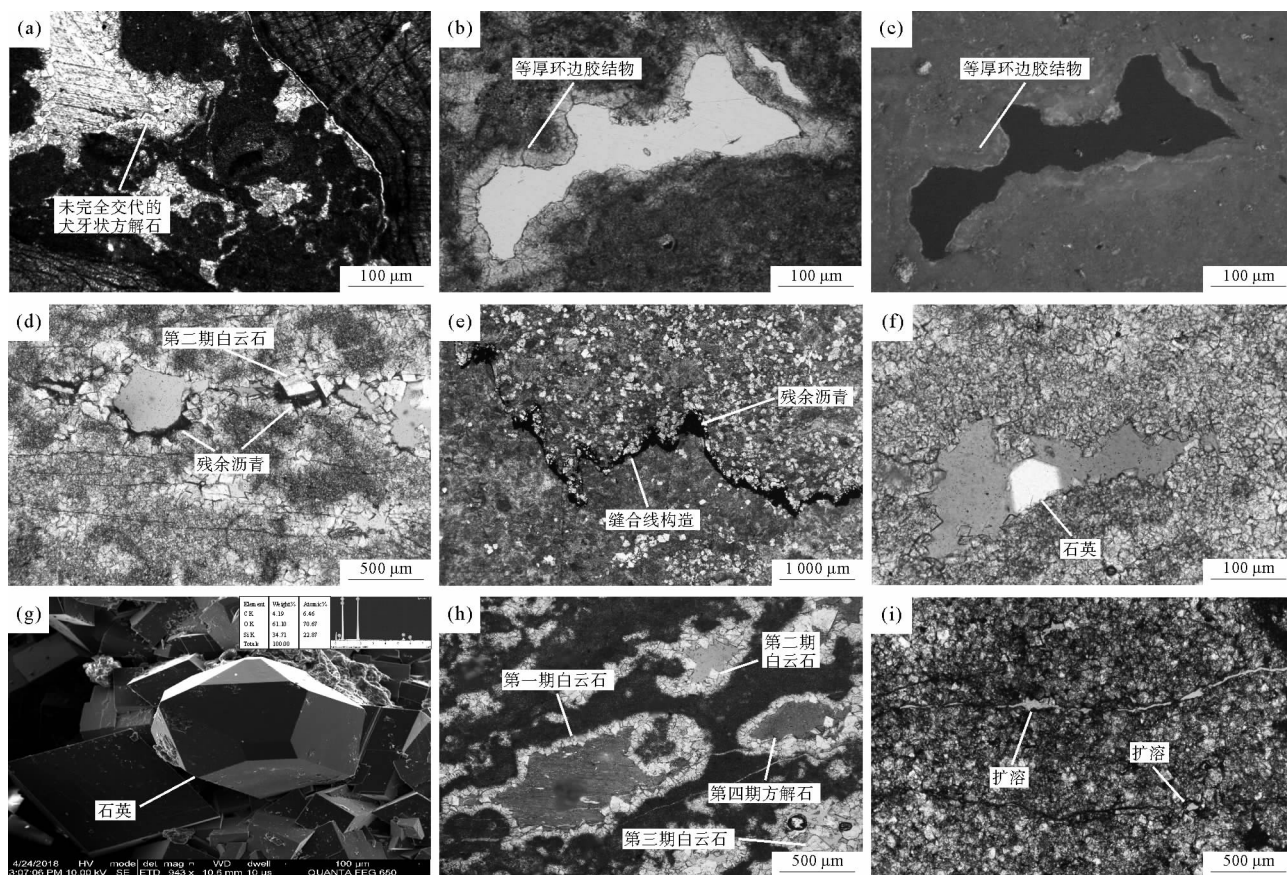
图 4 川西雷四上亚段微生物岩沉积模式

Fig. 4 Sedimentary model of the microbialites of the upper submember in the fourth member of Leikoupo Formation in western Sichuan

## 4 成岩及孔隙演化

### 4.1 同生成岩阶段

同生期,原始的灰泥和似球粒被微生物捕获、黏结,形成凝块状和叠层状微生物结构,微生物降解作用释放的氨气会增加微环境的碱度,促进碳酸钙沉淀,加速微生物固结成岩,有效抵抗早期的压实作用<sup>[12]</sup>。此外,干旱气候、局限环境下强蒸发作用使格架孔内沉淀出石膏(图 2(h))。准同生期高频海平面波动控制的周期性大气淡水淋滤作用使石膏溶解,形成凝块、叠层间的溶孔、凝块内溶孔(图 2(c)),部分硬石膏溶蚀成港湾状(图 2(d))。在大气淡水潜流带,溶孔内胶结了一期犬牙状方解石,随后经历白云石化作用被交代为白云石,部分犬牙状白云石内见未被完全交代的方解石(图 5(a))。此外,微生物岩经历的白云石化作用主要发生在准同生期,理由如下:①微生物白云岩中的微生物结构内部多由泥晶、粉晶白云石组成,且与微生物岩伴生的晶粒白云岩中,白云石多呈泥晶、粉晶,表面较脏,晶形呈半自形-它形(图 2(o));②微生物白云岩与晶粒白云岩的阴极发光分析表明,基质均呈暗红色发光特征(图 5(b)、5(c)),说明白云石化发生在同生-准同生期<sup>[13]</sup>;③不同岩石类型碳、氧同位素分析表明,灰岩的碳同位素值介于 1.67‰~2.25‰(平均值 1.94‰),白云岩的碳同位素值介于 1.49‰~3.75‰(平均值 2.56‰),相差并不大,表明白云石化流体来源于同期海水(图 6(a))<sup>[14]</sup>;④微生物白云岩、膏质微生物白云岩、晶粒白云岩及灰质白云岩的白云石有序度分析表明,有序度介于 0.38~0.89(平均值 0.64),较低,说明白云石化作用发生的时期较早<sup>[15]</sup>(图 6(b))。



(a) 未完全交代的犬牙状方解石, MJ1 井, 6 197.1 m; (b) 等厚环边胶结物(单偏光), YS1 井, 6 229.5 m; (c) 等厚环边胶结物(阴极发光), YS1 井, 6 229.5 m; (d) 第二期自形白云石及残余沥青, YaS1 井, 5 782.6 m; (e) 缝合线构造, 充填残余沥青, YS1 井, 6 170.5 m; (f) 单晶石英, YS1 井, 6 219.5 m; (g) 单晶石英(扫描电镜), YS1 井, 6 219.5 m; (h) 粗晶方解石胶结物, YS1 井, 6 224.70 m; (i) 裂缝, 并局部扩溶, YS1 井, 6 191.70 m

图 5 川西雷四段微生物岩成岩作用微观特征

Fig. 5 Microscopic characteristics of diagenesis of microbialites in the fourth member of Leikoupo Formation in western Sichuan

## 4.2 早成岩阶段

微生物岩进入浅埋藏环境后,在海水潜流带,格架孔内胶结了一期等厚环边方解石,后被交代为等厚环边白云石,阴极发光呈暗红色光,与基质具有相似的发光特征(图 5(b)、5(c))。此外,微生物格架孔内流体循环相对受限,在第一期胶结物后缓慢沉淀了第二期白云石晶体,由于生长过程较为缓慢,白云石晶体自形程度较好,较为干净(图 5(d))。

## 4.3 中-晚成岩阶段

中-深埋藏期,随着埋藏深度的增加,温度和压力随之增加,准同生期微生物格架孔内未被溶蚀的石膏脱水转化为硬石膏,此外,压溶作用发育,缝合线产生,部分颗粒被压溶,在这一时期发生过至少一次油气充注,在缝合线内和部分第二期白云石晶体表面可见残余沥青充填(图 5(d)、5(e))。孔隙内流体的循环受到限制,在第二期白云石晶体之后沉淀了第三期晶体较大的白云石和少量单晶石英晶体(图 5(f)、5(g))。在自形白云石晶体之后,部分孔隙被粗晶方解石完全充填,孔隙受到破坏(图 5(h))。由于埋藏过程中应力释放以及构造抬升的影响,雷四段发生了多期破裂作用,且部分裂缝发生了扩溶,对储层具有一定建设性作用(图 5(i)),但贡献较小。

总的来说,川西雷四段微生物岩尽管经历了较为复杂的成岩演化,但孔隙的成因属于早期成因,埋藏期多期胶结作用对其造成了一定的破坏,而埋藏期溶蚀作用对孔隙进行了调整,对储层贡献不大。

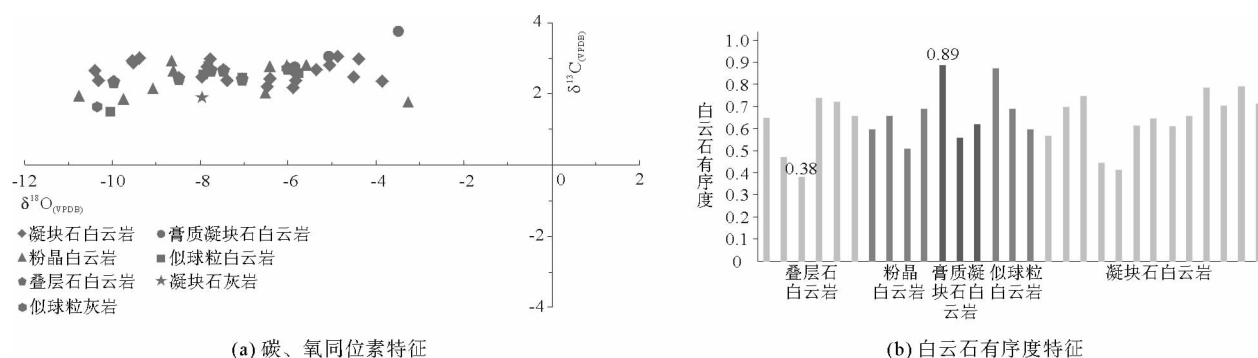


图 6 川西雷四段不同岩石类型地球化学特征

Fig. 6 Characteristics of geochemistry of lithofacies in the fourth member of Leikoupo Formation in western Sichuan

## 5 储层成因

### 5.1 储层发育机理

微生物岩成岩演化表明,微生物格架孔(凝块间溶孔、叠层间溶孔)形成于同生期,格架孔内沉淀的石膏是储层发育的物质基础,准同生期暴露溶蚀作用是储层形成的关键,而埋藏期多期胶结作用对储层造成了一定破坏。

从储层分布来看,川西雷四段微生物岩储层,具有单层薄、多层叠置的幕式发育特点,单个储层厚度介于 0.8~1.2 m,受高频海平面波动控制,优质储层段(孔隙发育段)主要位于高频旋回的上部,沉积环境为微生物丘(图 7)。此外,微生物岩优质储层主要分布于雷四上亚段的下部,距离雷口坡组顶部 45~70 m,且地震资料显示,在川西鸭子河-马井构造带附近,雷口坡组顶部并未见明显的削截现象,说明川西雷四段微生物岩储层不受雷顶不整合面的控制,而是与微生物丘的发育和高频海平面变化控制下的早期溶蚀作用有关。

### 5.2 储层保存机理

在没有异常压力和异常热源存在条件下,碳酸盐岩的孔隙度与埋藏深度呈负相关关系<sup>[16]</sup>,而川西雷四段微生物岩的主要孔隙类型为微生物格架孔,形成于准同生期,这些早期孔隙在埋藏过程中的保存尤为关键。分析表明,雷四段微生物岩储层孔隙能够得以保存的机理主要为微生物作用、油气充注和快速埋藏封闭。

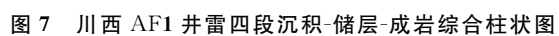


Fig. 7 Comprehensive diagram of sedimentary features, development of reservoir and diagenetic features in the fourth member of the Leikoupo Formation in well AF1 in western Sichuan

微生物的钙化作用不仅促进了凝块和叠层结构的快速成形,同时增强了凝块和叠层的抗压实能力(同生期压实作用),保存了一部分的原始孔隙空间<sup>[12]</sup>。

油气充注可以减缓和抑制孔隙内胶结物的形成,保存有效储层孔隙<sup>[17]</sup>。川西雷四段油气充注发生在白云石化之后,第三期白云石晶体沉淀之前,表明在中-深埋藏期,油气进入孔隙,抑制了孔隙内碳酸盐岩-地层水的溶蚀-沉淀过程,阻止了成岩作用的继续进行,在排烃之后无新的饱和流体进入孔隙,孔隙得以保存,形成现今的优质储层。若孔隙空间较小,油气充注之后未被后期流体带走,也会对储层空间形成一定的封堵作用<sup>[18]</sup>。

雷口坡组埋藏和热演化史表明,雷口坡组在沉积后迅速进入了埋藏环境,且在中白垩世埋深最深达到7 000 m左右<sup>[5]</sup>。在深埋藏环境下,孔隙内流体流速异常缓慢,若无断裂或热液的影响,地层水与围岩处于平衡状态,此时碳酸盐岩-地层水反应是一个近乎封闭体系下的平衡过程<sup>[19]</sup>。深埋藏封闭体系下,平衡的碳酸盐岩-地层水溶蚀-沉淀反应随着埋藏深度的增加趋于沉淀,表现为碳酸盐矿物的少量沉淀,有利于早期孔隙的保存<sup>[18]</sup>。此外,扫描电镜观察表明,在深埋的封闭条件下,孔隙内最后一期矿物表面并未遭受到明显溶蚀(图5(g)),可见深部溶蚀对于早期的孔隙起着调整的作用,对储层的贡献不明显。

## 6 结论

1) 川西中三叠统雷口坡组四段发育11种微相类型、4种微相组合类型,不同组合类型发育于不同的沉积环境,其中,微生物岩相关的微相组合多见于微生物丘,颗粒岩相关的微相组合发育于浅滩,而膏岩相关的微相组合发育于膏湖。

2) 川西中三叠统雷口坡组四段微生物岩储层受控于沉积相及同生-准同生期成岩作用。微生物丘是储层发育的前提,同生期微生物格架孔内沉淀的石膏是雷四段微生物岩储层发育的物质基础,准同生期高频海平面变化控制下的短期暴露溶蚀是储层发育的关键成岩作用,埋藏期的多期次胶结作用对储层进行了一定的破坏,而埋藏溶蚀对储集空间进行了调整,对储层贡献不大。

3) 早期微生物的钙化作用、油气充注和迅速地埋藏有效保护了雷四段微生物岩准同生期形成的孔隙,使之成为优质储层。

### 参考文献:

- [1] 李书兵,许国明,宋晓波.川西龙门山前构造带彭州雷口坡组大型气田的形成条件[J].中国石油勘探,2016,21(3):74-82.  
LI Shubing, XU Guoming, SONG Xiaobo. Forming conditions of Pengzhou large gas field of Leikoupo Formation in Longmenshan piedmont tectonic belt, Western Sichuan Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(3): 74-82.
- [2] HE D F, MA Y S, LI Y Q, et al. New directions in an established gas play: Promising dolomite reservoirs in the Middle Triassic Leikoupo Formation of the Sichuan Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2019, 103(1): 1-29.
- [3] 宋晓波,王琼仙,隆轲,等.川西地区中三叠统雷口坡组古岩溶储层特征及发育主控因素[J].海相油气地质,2013,18(2):8-14.  
SONG Xiaobo, WANG Qiongxiang, LONG Ke, et al. Characteristics and main controlling factors of Middle Triassic Leikoupo paleokarst reservoirs in Western Sichuan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2013, 18(2): 8-14.
- [4] 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.
- [5] JIANG L, HU S Y, ZHAO W Z, et al. Diagenesis and its impact on a microbially derived carbonate reservoir from the Middle Triassic Leikoupo Formation, Sichuan Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2018, 102(12): 2599-2628.
- [6] 王琼仙,宋晓波,王东,等.川西龙门山前雷口坡组四段储层特征及形成机理[J].石油实验地质,2017,39(4):491-497.  
WANG Qiongxiang, SONG Xiaobo, WANG Dong, et al. Reservoir characteristics and formation mechanism of the 4th member of the Leikoupo Formation in Longmen Mountain front[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(4): 491-497.
- [7] 王文楷,许国明,宋晓波,等.四川盆地雷口坡组膏盐岩成因及其油气地质意义[J].成都理工大学学报(自然科学版),2017,

- 44(6):697-707.
- WANG Wenkai, XU Guoming, SONG Xiaobo, et al. Genesis of gypsum-salt in the Leikoupo Formation and its hydrocarbon significance in the Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2017, 44(6):697-707.
- [8] 韩作振, 赵文龙, 高丽华, 等. 青州地区早奥陶纪碳酸盐岩微相分析及沉积环境研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2014, 33(1):9-19.
- HAN Zuozhen, ZHAO Wenlong, GAO Lihua, et al. Early-Ordovician carbonate microfacies and sedimentary environment in Qingzhou area[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2014, 33(1):9-19.
- [9] RIDING R. Calcareous algae and stromatolites[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1991:21-51.
- [10] RIDING R. Microbial carbonates: The geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms[J]. Sedimentology, 2000, 47:179-214.
- [11] FLÜGEL E. Microfacies of carbonate rocks[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009:575-586.
- [12] SLAUGHTER M, HILL R J. The influence of organic matter in organogenic dolomitization[J]. Journal of Sedimentary Research, 1991, 61(2):296-303.
- [13] 黄思静. 碳酸盐岩的成岩作用[M]. 北京:地质出版社, 2010.
- HUANG Sijing. Carbonate diagenesis[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010.
- [14] WARREN J. Dolomite: Occurrence, evolution and economically important associations[J]. Earth-Science Reviews, 2000, 52(1/2/3):1-81.
- [15] 钟倩倩, 黄思静, 邹明亮, 等. 碳酸盐岩中白云石有序度的控制因素——来自塔河下古生界和川东北三叠系的研究[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(3):50-55.
- ZHONG Qianqian, HUANG Sijing, ZOU Mingliang, et al. Controlling factors of order degree of dolomite in carbonate rocks: A case study from Lower Paleozoic in Tahe oilfield and Triassic in northeastern Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(3):50-55.
- [16] SCHMOKER J W, HALLEY R B. Carbonate porosity versus depth: A predictable relation for South Florida[J]. AAPG Bulletin, 1982, 66(12):2561-2570.
- [17] MELVILLE P, JEELANI O A, MENHALI S A, et al. Three-dimensional seismic analysis in the characterization of a giant carbonate field, onshore Abu Dhabi, United Arab Emirates[J]. AAPG Memoir, 2005, 81:123-148.
- [18] 张单明, 刘波, 秦善, 等. 川东北二叠系长兴组碳酸盐岩深埋成岩过程及其意义[J]. 岩石学报, 2017, 33(4):1295-1304.
- ZHANG Shanming, LIU Bo, QIN Shan, et al. Deeply buried diagenetic process and its significance for the carbonate of Changxing Formation in the Northeastern Sichuan Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(4):1295-1304.
- [19] BJØRLYKKE K, JAHREN J. Open or closed geochemical systems during diagenesis in sedimentary basins: Constraints on mass transfer during diagenesis and the prediction of porosity in sandstone and carbonate reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(12):2193-2214.

(责任编辑:高丽华)