https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.138



四 川 盆 地 震 旦 系 灯 影 组 丘 滩 体 储 层 沉 积 模 式 与 物 性 特 征

徐哲航^{1,2},兰才俊^{1,2},马肖琳^{1,2},胡超^{1,2},陈浩如³,李平平^{1,2},邹华耀^{1,2*}

1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249

2. 中国石油大学地球科学学院,北京 102249

3. 中国地质大学资源学院,湖北武汉 430074

摘 要:研究丘滩复合体沉积模式有助于预测四川盆地灯影组优质储层.基于钻井和露头资料,通过微观薄片鉴定,发现丘滩体主要的岩石结构为藻白云岩,并可进一步细分为5种微相:丘基、丘核、丘坪、丘盖和丘翼.识别出3种典型的微相组合类型,包括反映加积的"丘基一丘核一丘坪"序列,反映迁移的"丘基一丘核一丘翼"序列,反映终止的"丘基一丘核一丘盖"序列.结合沉积相带分布,将灯影组丘滩分为加积型台缘丘滩、迁移型台缘丘滩、台内丘滩、台内台坪4种类型.其中加积型台缘丘滩体主要沉积"丘基一丘核一丘坪"序列,旋回性明显,丘核多发育格架残留孔、洞,并在反映储集性能的储层总厚度、孔隙度、渗透率等方面均有优势,是四川盆地灯影组最有利的丘滩储集体.

关键词: 丘滩复合体;藻白云岩;台地边缘;格架残留孔、洞;灯影组;四川盆地;沉积学. 中图分类号: P618.13 文章编号: 1000-2383(2020)04-1281-14 收稿日期: 2019-06-10

Sedimentary Models and Physical Properties of Mound-Shoal Complex Reservoirs in Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin

Xu Zhehang^{1,2}, Lan Caijun^{1,2}, Ma Xiaolin^{1,2}, Hu Chao^{1,2}, Chen Haoru³, Li Pingping^{1,2}, Zou Huayao^{1,2*}

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

3. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Mound-shoal complex sedimentary models are important for the high-quality reservoir exploration of the Dengying Formation in the Sichuan basin. Based on core and outcrop profile and thin section observation, it is found that the main rock type of the mound-shoal complex is cyanobacteria dolostone. The mound-shoal complex consists of five microfacies including mound base, mound core, mound flat, mound cap and mound flank. There are three types of vertical combination rules of these microfacies, namely, the mound base-core-flat sequence reflecting aggradation, the mound base-core-flank sequence reflecting migration and the mound base-core-cap reflecting termination. According to the distribution of sedimentary facies, the mound-shoal complex of the Dengying Formation is divided into four types including aggradation platform margin mound-shoal complex, migration platform margin mound-shoal complex, platform interior mound-shoal complex and platform interior flat. The study

作者简介:徐哲航(1993-),男,在读博士,主要从事四川盆地碳酸盐岩储层研究.ORCID:0000-0002-1566-776X.

E-mail:xuzhehang93@outlook.com

引用格式:徐哲航,兰才俊,马肖琳,等,2020.四川盆地震旦系灯影组丘滩体储层沉积模式与物性特征.地球科学,45(4):1281-1294.

基金项目:国家自然基金项目(No.U1663210);中国石油化工股份有限公司项目(No.P16108);国家科技重大专项(No.2017ZX05005-003-003).

^{*}通讯作者:邹华耀(1963-),男,教授,ORCID: 0000-0002-8435-9488. E-mail:huayaozou@cup.edu.cn

shows that the aggradation platform margin mound-shoal complex mainly deposits the mound base-core-flat sequence, with obvious cyclicity. Its mound core develops a large number of framework residual pores and holes. Due to its advantages in total reservoir thickness, porosity and permeability, it is concluded that the aggradation platform margin mound-shoal complex is the high-quality reservoir of the Dengying Formation in the Sichuan basin.

Key words: mound-shoal complex; cyanobacteria dolostone; platform margin; framework residual pore; Sinian Dengying Formation; Sichuan basin; sedimentology.

0 引言

四川盆地震旦系灯影组是我国最古老的超深 层碳酸盐岩油气勘探层系之一,广泛发育微生物白 云岩储层.早在1964年,威远地区的勘探获得探明 地质储量约400×10⁸m³的天然气藏(戴金星,2003). 随后陆续在资阳、安平店、龙女寺、林滩场等地区部 署探井,但没有取得大的突破(孙玮等,2017).直到 2011年,高石梯-磨溪地区的高石1井试气成功,揭 开了安岳整装大气田发现的序幕.截至2015年12 月,高一磨地区天然气储量规模达5000×10⁸m³以 上(杜金虎等,2016),可见灯影组油气勘探具有巨 大潜力.灯影组时期高一磨地区与威远地区都属于 绵阳-长宁裂陷边缘带(魏国齐等,2015;段金宝 等,2019),但高一磨地区储层物性更好、储量也更 大(戴金星,2003;周进高等,2015).在高一磨区块 内也划分出了台缘带、台地内部等不同的储层类型 (陈娅娜等,2017).再比较其他勘探效果较差地区的 结果(刘树根等,2007),可知四川盆地灯影组天然 气藏的储层发育与沉积相带展布密切相关,而优质 储集相带如何发育分布就成为了亟待解决的问题.

前人对于四川盆地灯影组的研究认为微生物 丘滩复合体是储层发育的有利相带(刘静江等, 2016;单秀琴等,2016).丘滩体形成过程中起主要 作用的微生物是蓝细菌(Cyanobacteria)(Burne and Moore,1987),过去被称为"蓝绿藻(blue-green alage)",因此本文所使用的藻特指以蓝细菌为主参与 造丘的微生物.前人对丘滩体中岩石类型和微相划 分已经有了一些系统的研究(Monty *et al.*,1995;李 凌等,2013),对比丘滩体中各微相之间的物性差别 有利于寻找发育储层的位置(李凌等,2013;李朋威 等,2015),通过台缘带与台内带的划分可以区分不 同储层类型(陈娅娜等,2017;邢凤存等,2018).另 外在其他区域地层的海相碳酸盐岩油气藏勘探中, 常使用建立有利储层发育相带沉积模式的方法来 研究储层(Ronchi *et al.*,2010; Grotzinger and AlRawahi,2014; Osburn et al.,2014; 邢凤存等,2017; 闫博等,2017;李秋芬等,2018).笔者之前已经基于 林1井、丁山1井、焦石1井、天星1井、马深1井等井 资料与南江杨坝、峨边先锋、宁强胡家坝等野外露 头资料,主要运用岩心观察与薄片鉴定手段总结了 四川盆地灯影组丘滩体的沉积演化特征(徐哲航 等,2018).在此基础上,本文补充了遵义松林、南郑 福成、旺苍正源、彭水廖家槽等几个野外露头资料, 深入研究四川盆地全盆范围内灯影组不同微相组 合所反映的地质意义,据此划分出不同的丘滩体类 型,再通过物性数据对比寻找储层发育的有利相 带,为我国超深层碳酸盐岩储层勘探提供参考.

1 地质背景

四川盆地灯影组时期气候干热,主要为碳酸盐 台地沉积(刘静江等,2015),发育微生物丘、颗粒 滩、台坪、潟湖亚相(图1a).在川中震旦系勘探过程 中,发现在盆地内部绵阳-长宁-带存在一条近南 北向的裂陷槽.裂陷槽的发育开始于灯影组一段时 期,随后逐步扩大,在灯影组四段时期穿过全盆.裂 陷槽两侧发育多期次台地边缘微生物丘滩复合体 (段金宝等,2019).由于两期桐湾运动,盆地在灯二 末和灯四末均有所抬升,受到不同程度的剥蚀.

四川盆地灯影组可分为4个岩性段,每段都有 其典型岩性特征.灯一段贫微生物段,川南汉源一 峨边一带主要岩性为泥晶白云岩和泥质白云岩(林 孝先等,2018);灯二段富微生物段,主要发育各类 藻白云岩、葡萄花边状白云岩,川北福成一镇巴一 带少见藻白云岩发育,为砂质白云岩或泥晶白云 岩;灯三段贫微生物段,川西南主要为泥页岩沉积, 川北则以粉砂岩、粉砂质泥岩为主;灯四段富微生 物段,但藻白云岩厚度较灯二段薄,且普遍发育硅 质白云岩常见硅质条带(图 1b).

微生物丘滩复合体主要沉积在灯二段和灯四段.在台地边缘和裂陷边缘,丘滩体沉积厚度大分 布范围广(图1),同时在台地内部也有发育.丘滩复



Fig. 1 Tectonic partition in the Sichuan basin, distribution of microbial mound-shoal complex and lithological characteristics of the Dengying Formation



合体往往发育多个沉积旋回,单旋回厚度大部分介于1~10m,累计厚度可达50~260m;根据川中高 石梯一磨溪地区三维地震资料解释统计,平面展布 可达几十到上百平方千米(周进高等,2017).

2 丘滩体储层沉积模式

2.1 岩石类型

四川盆地灯影组微生物丘滩复合体中岩石结 构主要包括粘结结构、颗粒结构、晶粒结构三大类 (王文之等,2016).粘结结构的岩石类型即为藻白云 岩,可根据形态学分为:藻纹层白云岩、藻叠层白云 岩、泡沫绵层白云岩、藻凝块白云岩等(Riding, 2000;梅冥相,2007;彭瀚霖等,2014);颗粒结构的 岩石类型有藻砂屑白云岩、藻砾屑藻白云岩、核形 石白云岩等;晶粒结构的岩石类型包括泥晶白云 岩、粉晶白云岩、细晶白云岩、中晶白云岩等.此外 还有一种藻格架白云岩,是以蓝细菌为主的微生物 粘结形成,但又具有生物格架的特征,属于粘结格 架(朱筱敏,2008).

藻纹层白云岩具有粗细不一的稀疏细纹,反映 较弱的水动力(图2a);水动力增强,细纹繁盛发育 可成为多种形态的藻叠层白云岩(Flügel and Munnecke, 2010)(图 2b); 而形态不规则的藻凝块白云 岩常发现在藻叠层白云岩附近(李凌等,2013)(图 2c,图 2d);泡沫绵层白云岩镜下特征(图 3f,图 3g) 明显,像泡沫板又如多孔生物海绵,可见多个相连 的圈状结构;藻格架白云岩(图2c,图2e,图2h,图 2i,图3a,图3b,图3h)发育格架状构造,是由藻叠 层、藻凝块、泡沫绵层白云岩造架成孔进一步发育 而来(徐哲航等,2018),常见残留格架孔、洞.藻砂 屑、藻砾屑白云岩是微生物丘被波浪打碎后形成 (图 3c,图 3d);而蓝细菌粘结碳酸盐沉积物所形成 的具有圈层结构的颗粒是核型石(图 2e).微生物丘 中,有部分泥晶白云岩是蓝细菌粘结云泥形成,也 称为均一石(林孝先等,2018)(图2f);在细、中晶白 云岩中常可见到残余的粘结结构或颗粒结构,大多 经历了埋藏期成岩作用的改造(宋金民等,2018).



图 2 四川盆地灯影组常见岩石类型、沉积微相和储集空间的野外露头与岩心照片

Fig. 2 Outcrop and core photos of common rock types and sedimentary microfacies and reservoir space of the Dengying Formation in the Sichuan basin

a. 藻纹层白云岩,常见于丘基、丘坪,峨边先锋,灯二段;b. 藻叠层格架白云岩,常见于丘核,遵义松林,灯二段;c. 藻凝块白云岩,常见于 丘核,南江杨坝,灯二段;d. 藻凝块格架白云岩,常见于丘核,凝块间格架残留孔,峨边先锋,灯二段;e. 核形石白云岩,常见于丘翼,南江 杨坝,灯二段;f. 泥晶白云岩,常见于丘盖,天星1井,2536m,灯四段;g. 白云岩内部的短期褐黄色暴露风化面,高频层序界面,宁强胡家 坝,灯四段;h. 藻格架白云岩,常见于丘核,发育层状溶洞与顺层溶孔、溶洞,磨溪22井,5417.84m,灯四段;i. 藻叠层格架白云岩,常见于 丘核,层状格架残留洞,宁强胡家坝,灯四段

2.2 微相划分

根据野外、岩心观察和前人研究成果,将微生物 丘滩复合体划分为丘基、丘核、丘坪、丘盖、丘翼5个 微相(李凌等,2013;刘静江等,2016)(表1).如果依 附于丘的滩(丘翼)比较发育,称为微生物丘滩复合 体,而如果滩(丘翼)相对不发育则认为是微生物丘.

丘基位于微生物丘的底部,是丘滩体发育的初始阶段,以结构简单的藻纹层白云岩为主,含有少量颗粒.在多期微生物丘旋回中,某一期旋回的丘 基常是上一期旋回的顶部;丘核位于微生物丘的中部,微生物繁茂发育,包含多种藻白云岩类型(Kennard and James, 1986; Krause *et al.*,2004)特别是藻 格架白云岩.丘核是沉积厚度最大的微相,也是孔、 洞发育最密集的位置;丘滩体顶部分两种情况:丘 坪和丘盖,丘盖以泥晶白云岩为主,包含少量藻纹 层白云岩(图 3e).前人研究认为丘体顶部发育丘 盖,说明在其"生长"晚期发生了快速海侵(李凌等, 2013).本质上,这是丘体沉积速率小于海平面上升 速度,使得海平面相对变深,水动力减弱丘体发育 终止;而丘坪反映丘体快速"生长",海平面相对变 浅导致顶部暴露水面发生潮坪化,因为容纳空间不 足以发育复杂结构构造,岩石类型以藻纹层白云岩 为主包含少量颗粒岩.受暴露影响,丘坪具有暴露 标志,如暴露成因的角砾、暴露风化面(图 2g)等.丘 翼微相沉积于微生物丘的两侧,常见丘体被破浪作 用打碎形成的颗粒白云岩.陈娅娜等(2017)报道了 灯影组微生物丘滩复合体"大丘小滩"的特点,有的 微生物丘不发育主要岩性是颗粒岩的丘翼.并且丘 翼微相中的颗粒常常被藻包覆缠绕,也会发育一些 粘结结构,再加上埋藏期成岩作用改造(宋金民等,



Fig.3 Types of microfacies vertical combination rules

表1 四川盆地震旦系灯影组微生物丘滩复合体沉积微相划分

Table 1 Sedimentary microfacies of the microbial mound-shoal complex of Sinian Dengying Formation in Sichuan basin

亚相	微相	位于丘体位置	岩石类型
微生物丘滩复合体 (微生物丘)	丘基	底部	藻纹层白云岩、少量颗粒(藻砂屑、核型石)白云岩
	丘核	中部	藻格架白云岩、泡沫绵层白云岩、藻叠层白云岩、藻凝块白云岩
	丘坪	顶部	藻纹层白云岩、少量颗粒(藻砂屑、核型石)白云岩、角砾状藻白云岩
	丘盖	顶部	泥晶白云岩、藻纹层白云岩
	丘翼	两翼	颗粒(藻砂屑、藻砾屑、核型石)白云岩、角砾状藻白云岩

2018)使得原始的颗粒结构遭到破坏,这都增加了 识别丘翼微相的难度.

2.3 微相叠置组合类型

微生物丘滩复合体在垂向上往往具有旋回分布的特征.根据露头、岩心的实际观察与前人研究的成果(李凌等,2013;徐哲航等,2018),笔者发现 丘滩体可呈现3种旋回类型,具有不同的微相叠置 组合,分别是反映垂向加积的"丘基一丘核一丘坪" 序列、侧向迁移的"丘基一丘核一丘翼"序列以及丘 体发育终止的"丘基一丘核一丘薰"序列(图4).归 结到底是古地貌、古环境、海平面升降变化3个控制 因素(冯冲等,2015)导致了单个丘滩体旋回的顶部 所发育微相的不同,进而导致了多期微相组合旋回 的不同,现分别介绍如下.

2.3.1 加积型微相组合 垂向加积型的微相叠置 组合是"丘基一丘核一丘坪",并且以顶部丘坪为下 一期旋回的丘基继续沉积多旋回的加积型丘滩复 合体(图4a).前文已经介绍丘坪微相反映丘体快速 "生长",海平面相对变浅导致顶部暴露水面,当海 平面上升容纳空间足够时,发育新一期结构复杂的 丘核,不断沉积"丘基一丘核一丘坪(丘基)一丘 核一丘坪(丘基)"的微相组合,具有沉积厚度厚、旋回性明显的特点.

2.3.2 迁移型微相组合 侧向迁移型的微相组合 在垂向上的叠置关系是"丘基-丘核-丘翼",并且 以顶部丘翼为下一期旋回的丘基(图4b).由上一节 可知,丘翼微相位于丘体两侧,主要沉积丘体破碎 形成的颗粒岩.在实际应用中,识别发育粘结结构 或是残余结构的颗粒常需要借助显微镜观察的辅 助.甚至因为某些区域破浪作用较弱等原因颗粒岩 不发育,丘体两侧沉积物与丘核界线不明显.但因 为侧向迁移作用,仍应该是下一期丘体的翼部位于 前一期丘体的顶部.迁移型微相组合垂向上的旋回 性特征不如加积型组合明显,表现为单期丘核更厚 (往往在10~20 m范围内),这也意味着实际应用中 丘翼微相的相标志不明显时,迁移型组合垂向上旋 回性不强的特征(具有大厚度的丘核微相)就成为 了一种重要的识别标志.

2.3.3 终止型微相组合 终止型微相组合在垂向 上的叠置关系是"丘基一丘核一丘盖",环境适合时 会以顶部丘盖为下一期旋回的丘基继续沉积丘滩 复合体旋回(图4c).因为顶部丘盖微相的成因是丘



- Fig. 4 The depositional models of the microbial mound-shoal complex reservoir types in the Dengying Formation, Sichuan basin
- a.加积型台缘丘滩体沉积模式,以胡家坝剖面灯四段为例;b.迁移型台缘丘滩体沉积模式,以先锋剖面灯二段为例;c.台内丘滩体 沉积模式,以福成剖面灯四段为例;d.台内台坪沉积模式,以杨坝剖面灯四段为例

体"生长"速度小于海平面上升速度,使得海平面相 对变深丘体发育终止,有时丘盖微相之后继续沉积 的是台坪相带.

2.4 丘滩体沉积模式

依据微生物丘滩复合体垂向叠置样式和所处的 台地位置的不同,可将四川盆地灯影组沉积相控制 的储层类型分为加积型台缘丘滩体、迁移型台缘丘 滩体、台内丘滩体和台内台坪4类.本文选取宁强胡 家坝剖面、峨边先锋剖面、南郑福成剖面和南江杨坝 剖面作为野外露头代表,建立四者的沉积模式(图5) 如下,模式图中垂直高度为几十米,而横向展布可达 数千米.

2.4.1 加积型台缘丘滩体 四川盆地北部的胡家坝 剖面灯四段(郭旭升等,2018)与高一磨地区高石6 井、磨溪22井灯四段(陈娅娜等,2017)发育加积型台 缘丘滩体.在台地边缘水动力强营养丰富,微生物丘 生长速度与海平面相对上升速度相近,易发生垂向 加积(图 3a),以"丘基-丘核-丘坪"的加积型微相 组合为主要叠置样式发育加积型台缘丘滩体储层类 型.该类型丘滩体大多是以台地边缘颗粒滩为最底 部丘基"生长"起来的(刘静江等,2015),丘核中发育 多组合各类型藻白云岩,常见格架状构造,微生物格 架孔、洞最为发育.顶部沉积薄层丘坪后又以之为丘 基发育下一期微生物丘.加积型台地边缘丘滩体位 于古地貌高部位,且海平面升降变化明显导致丘体 暴露频繁,易受到准同生期大气淡水淋滤溶蚀.而受 准同生溶蚀影响弱的部位,粒间孔、格架孔常充填亮



图 5 四川盆地灯影组常见岩石类型、沉积微相和储集空间的薄片镜下照片

Fig. 5 Thin section micrographs of common rock types, sedimentary microfacies and reservoir space of the Dengying For mation, Sichuan basin

a.层状格架残留孔,藻叠层格架白云岩,常见于丘核,宁强胡家坝,灯四段,单偏光;b.层状格架残留孔、洞,藻凝块格架白云岩,常见于丘 核,宁强胡家坝,灯四段,单偏光;c.残余藻砂屑白云岩,常见于丘翼,残余粒间孔,马深1井,8106.7m,灯四段,单偏光;d.藻砂屑白云岩, 常见于丘翼,南江杨坝,灯四段,单偏光;e.泥晶白云岩,常见于丘盖,丁山1井,3571.9m,灯四段,单偏光;f.泡沫绵层白云岩,常见于丘 核,林1井,2765.97m,灯四段,单偏光;g.泡沫绵层白云岩,常见于丘核,少量格架残留孔,遵义松林,灯二段,单偏光;h.格架残留洞,藻 凝块格架白云岩,常见于丘核,天星1井,2189.33m,灯四段,单偏光;i.裂缝,南江杨坝,灯二段,单偏光

晶白云石胶结物,反映较强的水体能量.

2.4.2 迁移型台缘丘滩体 迁移型台地边缘也称 为"缓坡型"台地边缘(魏国齐等,2015),在川北杨 坝剖面与川西南先锋剖面灯二段(徐哲航等, 2018)、川东南林1井与川中高石10井、磨溪8井等 井灯四段(陈娅娜等,2017)都有符合其特征的报道. 微生物丘生长速度比海平面相对上升速度更快时 会发生侧向迁移(图3b),垂向上以"丘基-丘核-丘翼"的迁移型微相组合为主,也可以见到"丘基-丘核-丘坪"和"丘基-丘核-丘盖"的组合.在岩 石类型上迁移型台缘丘滩体与加积型台缘丘滩体 区别不大,同样常以台地边缘颗粒滩为最底部丘 基,丘核中发育多组合各类型的藻白云岩.但是迁 移型台缘丘滩相对加积型台缘丘滩受海平面升降 变化影响较小,准同生期大气淡水淋滤溶蚀作用也 较弱,而准同生期胶结作用较强,孔、洞大多被白云 石胶结物充填完全.另外,迁移型台缘丘滩在垂向 上的沉积旋回性特征不如加积型台缘丘滩明显,易 发育厚层的丘核微相.因此,除旋回顶部沉积的微 相不同外,孔、洞中胶结物的充填程度和垂向上旋 回韵律是否明显也是区别加积型台缘和迁移型台 缘的关键.

2.4.3 台内丘滩体 在川北南郑福成剖面灯四段、 川东南丁山1井、川中磨溪10井灯四段发育台内丘 滩体.局限台地内部相对高部位会沉积台内颗粒 滩,水动力与台缘比相对较弱且营养不够丰富,微 生物丘生长速度缓慢,发育台内丘滩体储层类型 (图 3c).台内丘滩复合体主要以台内滩或台内洼 地、潟湖周围高部位为最底部丘基"生长",丘核中 藻白云岩类型较少,偶见格架状构造,丘核的规模 也小.因为丘体生长速度缓慢,当速度低于海平面 上升速度时,顶部沉积较厚的丘盖.台地内部海平 面变化频率减弱,丘体暴露时间减短,近地表大气 淡水溶蚀作用影响较小而胶结作用强烈.台内丘滩 体储集空间发育程度不如台缘丘滩体,填隙物多为 云泥,反映较弱的水体能量.台内丘滩体在垂向上 主要沉积"丘基-丘核-丘盖"的终止型微相组合, 也具有迁移的特征,且丘滩体规模较小旋回数少于 台缘带.

2.4.4 台内台坪 在川北杨坝剖面灯四段、川东焦 石1井可观察到局限台地内部分布面积最广的台坪 相带,主要沉积以泥粉晶白云岩为主的云坪和以藻 纹层白云岩为主的藻云坪.在灯影组沉积期内,薄 层、结构简单的藻叠层、藻凝块小型丘可发育在台 坪之上(图 3d),台内台坪相带的储层就发育其中.

3 丘滩体储层物性特征和对比

3.1 储集空间

3.1.1 孔隙 (1)格架残留孔:格架孔是包括藻叠 层、藻凝块、泡沫绵层、藻格架等藻白云岩中原生孔 隙的统称.微观薄片观察时可见窗格孔,多个窗格 孔连接形成宏观手标本上可见的格架孔、洞(图2h, 2i).由于在地质历史演化过程中,原生孔隙受多期 成岩作用改造难以保留至今,所以藻白云岩中现存 的主要孔隙是格架残留孔(斯春松等,2014).灯二段 常见的"葡萄花边状"白云岩的形成需要经历多期 胶结,其"葡萄花边"残留孔也属于格架残留孔.格 架残留孔(图3a,3b,3h)是四川盆地灯影组的主要 储集空间.

(2)粒间、粒内溶孔:丘翼微相颗粒白云岩中的 主要孔隙为粒内溶孔和粒间溶孔(图3c),粒内溶孔 是颗粒(灯影组以砂屑、藻砂屑、核形石为主,少见 鲕粒)内部物质受溶蚀作用后形成.由于灯影组没 能如下三叠统飞仙关组那般形成大规模鲕粒滩(姚 根顺等,2014),颗粒含量普遍偏低,在沉积期难以 形成完全依赖颗粒支撑的结构,所以原生粒间孔很 难见到.

(3) 晶间(溶)孔: 晶间孔主要存在于两种岩石 类型中. 一种是受强烈重结晶作用, 岩石原始结构 被严重破坏的细、中晶白云岩, 受溶蚀作用形成晶 间溶孔. 另一种是藻白云岩, 其微生物格架孔由于 埋藏期胶结作用半充填白云石胶结物, 残留孔隙位 于白云石矿物晶体之间(图 3a, 图 3h), 这种"晶间 孔"根据其成因仍应该属于格架残留孔.

(4)角砾间残留孔:四川盆地灯影组中角砾类 型众多,如岩溶角砾、热液角砾、风暴角砾以及丘坪 微相暴露成因的角砾和丘翼微相中破浪作用形成 的角砾等.角砾之间常被胶结物充填,残留下的孔 隙可成为有效的储集空间.

3.1.2 洞 洞的直径大于2 mm,包括格架残留洞 和溶洞.在四川盆地灯影组时期微生物丘发育格架 状构造所形成的储集空间往往直径较大,可称为格 架洞.准同生时期形成的溶洞叠加发育在格架洞 上,受原生孔、洞的控制,具有组构选择性(陈娅娜 等,2017),多具有层状的形态,顺层分布(图 2h,图 2i).也有格架残留孔受溶蚀作用连通扩大形成的溶 洞.通过岩心观察结合前人研究(单秀琴等,2016) 可以发现,四川盆地灯影组溶洞普遍发育,在岩心 上常可观察到直径大于2 mm的洞作为灯影组的主 力储集空间.

3.1.3 裂缝 裂缝包括构造缝、溶蚀缝和压溶缝. 四川盆地灯影组主要储集空间的格架残留孔相对 较孤立,裂缝可以起到连接作用,尤其是未被充填 或半充填的构造裂缝,不但可作为油气运移的通道 并且也具有一定的储集意义(图 3i).据前人研究灯 影组裂缝至少可分为早、晚2期,早期裂缝基本被胶 结或者充填,而具有切割早期裂缝特征的晚期裂缝 则大部分可形成有效缝(姚根顺等,2014).在碳酸盐 岩地层中,储层渗透率数值与孔隙度大小相关性不 明显,但容易受到裂缝的影响(图 6b,图 6c).

3.2 储层物性

四川盆地内前人在灯影组发现大中型气田的 地区包括安岳气田、威远气田和资阳含气构造(杜 金虎等,2016).威远气田灯影组储层平均厚度为 90 m,有效储层段岩心全直径样品孔隙度平均值 为3.15%,柱塞样品平均孔隙度为1.85%,渗透率绝 大多数小于 0.1×10^{-3} µm²(戴金星,2003);资阳含 气区灯影组储层平均厚27 m,柱塞样品平均孔隙度 为1.53%,全直径样品平均孔隙度为3.74%,裂缝发 育程度与威远地区相比较少,柱塞样品平均瓷透率 为 0.0061×10^{-3} µm²;在安岳气田发现之前,研究者 们认为四川盆地灯影组储层具有低孔低渗的特征 (刘树根等,2008).安岳气田灯影组储层厚度在 120~210 m之间,柱塞样品平均孔隙度为3.24%, 全直径样品平均孔隙度为4.2%,渗透率在 $0.01\times$ $10^{-3}~67\times10^{-3}$ µm²之间,平均为 1.09×10^{-3} µm²(杜





Fig.6 Porosity and permeability characteristics of the mound-shoal complex of the Sinian Dengying Formation in the Sichuan basin

a.不同微相孔隙度分布特征;b.不同微相渗透率分布特征;c.不同微相孔渗交汇图





Fig. 7 Relationship between the mound-shoal complex and reservoir development, Well Lin 1

金虎等,2016).虽然灯影组储层平均孔隙度不算高, 但是部分好储层的孔隙度可达到10%以上(周进高 等,2015;陈娅娜等,2017)(图6c),因此有必要分析 丘滩体内不同微相和不同丘滩类型物性的好坏来 寻找储层发育的有利相带.

通过对丁山1井、林1井、焦石1井、天星1井、 马深1井、胡家坝剖面的211个柱塞样品物性资料 分析发现,丘核微相物性最好平均孔隙度为4.34%, 平均渗透率为3.004×10⁻³μm²,丘翼与丘坪微相也 具有较高的平均孔隙度,分别为2.99%与2.26%.丘 核与丘翼微相是丘滩体中储层发育的有利位置.

3.3 丘滩体储层发育机理

过去研究常认为礁丘类储层顶部储集性能最 好(李秋芬等,2018),但随着对四川盆地灯影组微 生物丘类储层研究的深入,越来越多的学者发现丘 体核部发育最好的储层(李凌等,2013;刘静江等, 2016).通过对林1井取心段的观察可以发现,丘滩 复合体的孔隙度好于台坪和潟湖亚相,而丘核是丘 滩体中孔隙度最好的部位(图7).这是因为微生物 丘中的格架残留孔、洞是灯影组的主要储集空间, 其在丘核微相中最为发育,并且丘核位于高频层序 顶部,海平面相对下降时易受准同生期大气淡水溶 蚀,发育顺层溶孔和层状晶洞(单秀琴等,2016).

四川盆地灯影组时期孔隙主要形成于沉积期 和准同生期,储层受沉积相控制明显.藻叠层、藻凝 块等藻白云岩沉积形成的格架孔、洞为储层发育提 供了良好的基础,在此基础上受到准同生期大气淡 水组构选择性的溶蚀扩大,叠加在格架残留孔、洞 上的顺层溶孔与层状晶洞是优质的储集空间.

3.4 丘滩体储层对比

前文已根据丘滩体垂向叠置类型和在台地内 分布位置的不同,将四川盆地灯影组储层类型分为 了加积型台缘丘滩体、迁移型台缘丘滩体、台内丘 滩体、台内台坪4类.通过对四川盆地灯四段钻井、 露头资料的调研可以发现,胡家坝剖面的微相叠置 组合具有加积型台缘丘滩体沉积特征,林1井具有 迁移型台缘丘滩体沉积特征,丁山1井具有台内丘 滩体沉积特征,而焦石1井则具有台内台坪沉积特征.以这3口井和1个露头的灯四段地层作为代表, 对4种储层类型进行对比,以选出储层发育的有利 位置(图8).

首先在藻白云岩发育程度上,胡家坝剖面常见 加积型丘滩体,藻白云厚度占地层厚度的61.36%, 常见格架状构造,格架孔、洞中虽充填有白云石胶 结物、石英与沥青,但残余孔洞多且易于观察,剖面 顶部多孔层与少孔层旋回性明显;林1井发育迁移 型丘滩体,藻白云岩厚度占地层厚度的49.59%,也 常见格架状构造,但孔、洞多被全充填(图7).林1井 第13回次取心段中大量发育藻砾屑、角砾状藻白云 岩,丘与滩都可观察到;而发育台内丘滩体的丁山1 井藻白云岩厚度占地层厚度的45.62%,虽然藻白云 岩厚度较大,但主要沉积藻纹层白云岩(图3e)孔隙 不发育,格架状构造也比较少见;主要为台内台坪 沉积的焦石1井藻白云岩厚度占地层厚度的 16.88%,主要岩石类型是藻纹层白云岩,仅顶部可 观察到一些具有残余结构的粉、细晶白云岩.



图 8 四川盆地灯影组丘滩体储层综合对比

Fig.8 Comprehensive comparison of the mound-shoal complex of the Dengying Formation in the Sichuan basin



图 9 四川盆地灯影组丘滩体储层厚度对比(a)和孔隙度 - 渗透率对比(b)



其次在储层层数和储层厚度上,发育加积型台 缘丘滩体的胡家坝剖面储层厚度约238m,共有53 套储层;而发育迁移型台内丘滩体的林1井储层厚 度为177m,共有19套储层;灯四段属于台内丘滩储 层的丁山1井的储层厚度为53m,共有10套储层; 主要沉积台内台坪的焦石1井的储层厚度仅为30 m,只有5套储层(图8,图9a).

最后在储层物性特征方面,差别主要反映在孔 隙度上,而渗透率还受到裂缝发育的影响.安岳气 田灯四段主要发育台缘丘滩体储层类型,包括了加 积型与迁移型2种台缘类型(周进高等,2015;陈娅 娜等,2017),孔隙度集中在2.10%~8.59%,平均孔 隙度为4.34%(杜金虎等,2016).通过对胡家坝剖 面、林1井、丁山1井、焦石1井4个资料点的211个 物性资料数据分析发现,发育加积型台缘丘滩体的 胡家坝剖面孔隙度介于1.36%~10.44%,平均孔隙 度为6.11%;发育迁移型台缘丘滩体的林1井孔隙 度分布于1.43%~10.63%,平均孔隙度为3.11%; 发育台内丘滩体的丁山1井孔隙度分布在0.78%~ 7.01%,平均孔隙度为2.09%;主要沉积台内台坪的 焦石1井孔隙度分布在1.03%~3.06%,平均孔隙度 为1.98%.4个资料点渗透率差别不大,但胡家坝剖 面、林1井和丁山1井的渗透率还是比焦石1井稍好 一些(图 9b).

通过以上对比可以发现,随着储层发育位置由 台内变到台缘,沉积相由台坪变为丘滩复合体,藻 白云岩结构越来越复杂,厚度越来越大.储层厚度 逐渐变大,储层层数逐渐增加,物性也越来越好.台 缘丘滩体储层优于台内丘滩体储层,而台内丘滩体 储层又优于台内台坪储层.对于同在台缘带的丘滩 体,加积型台缘丘滩体"生长"较快、容易暴露受到 准同生期大气淡水的溶蚀,而迁移型台缘丘滩体 "生长"较慢,孔、洞易被充填,加积型台缘丘滩体的 储层好于迁移型台缘丘滩体的储层.

4 结论

(1)四川盆地震旦系灯影组时期发育大量微生物丘滩复合体,主要岩石类型是包含藻叠层、藻凝块等不同粘结结构的藻白云岩,可分为丘基、丘核、丘坪、丘盖、丘翼5个微相.

(2) 丘滩体在垂向上呈现3种微相叠置组合,分 别是反映垂向加积的"丘基一丘核一丘坪"、反映侧 向迁移的"丘基一丘核一丘翼"、反映丘体发育终止 的"丘基一丘核一丘盖".

(3)结合丘滩体微相叠置组合与在台地发育的 位置,可将灯影组丘滩体储层类型分为加积型台缘 丘滩、迁移型台缘丘滩、台内丘滩、台内台坪4类.加 积型台缘丘滩垂向上主要沉积"丘基一丘核一丘 坪"的微相组合,并且孔、洞发育,旋回性明显;迁移 型台缘丘滩主要沉积"丘基一丘核一丘翼"的微相 组合,孔、洞多被充填,沉积旋回不易识别;台内丘 滩垂向上主要沉积"丘基一丘核一丘盖"的微相组 合,孔、洞规模较小常见云泥填隙物;台内台坪以结 构简单的小型丘作为储层.

(4)微生物丘滩复合体是四川盆地灯影组的主要油气储集相带,丘核微相储集性能最好,常见格架状构造,其中的格架残留孔、洞是灯影组的主要油气储集空间.

(5)加积型台缘丘滩体储层在藻白云岩厚度、 储层厚度、层数、物性等方面均具有优势,储集性能 优于迁移型台缘丘滩体储层、台内丘滩体储层和台 内台坪储层,是最有利的油气储集相带.

致谢:感谢审稿老师们付出的辛苦劳动及提出 的宝贵修改意见.

References

- Burne, R. V., Moore, L.S., 1987. Microbialites; Organosedimentary Deposits of Benthic Microbial Communities. *Palaios*, 2(3): 241-254. https://doi. org/10.2307/ 3514674
- Chen, Y.N., Shen, A.J., Pan, L.Y., et al., 2017. Features, Origin and Distribution of Microbial Dolomite Reservoirs: A Case Study of 4th Member of Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 44(5): 704-715(in Chinese with English abstract).
- Dai, J. X., 2003. Pool Forming Periods and Gas Sources of Weiyuan Gasfield. *Petroleum Geology & Expeximent*, 25 (5):473-480(in Chinese with English abstract).
- Du, J.H., Wang, Z.C., Zou, C.N., alet, 2016. Geologic Theory and Exploration Practice of Ancient Large Carbonates Gas Field. Petroleum Industry Press, Beijing, 227 (in Chinese).
- Duan, J. B., Mei, Q. H., Li, B. S., et al., 2019. Sinian Early Cambrian Tectonic - Sedimentary Evolution in Sichuan Basin. *Earth Science*, 44(3): 738-755(in Chinese with English abstract).
- Feng, C., Zou, H. Y., Guo, T. L., et al., 2015. Development Mechanism of Permian-Triassic Reef Shoal Reservoir in Northeastern Sichuan Basin. Special Oil & Gas Reservoirs, 22(6):1-4, 141(in Chinese with English abstract).
- Flügel, E., Munnecke, A., 2010. Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 832.
- Grotzinger, J., Al-Rawahi, Z., 2014. Depositional Facies and Platform Architecture of Microbialite - Dominated Carbonate Reservoirs, Ediacaran - Cambrian Ara Group, Sultante of Om. AAPG Bulletin, 98(8): 1453 - 1494. https://doi.org/10.1306/02271412063
- Guo, X.S., Hu, D.F., Duan, J.B., et al., 2018. Rock Features and Sedimentary Environment of the Fourth Member of Dengying Formation in Hujiaba Section of Ningqiang, Northern Sichuan Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 40(6):749-756(in Chinese with English abstract).
- Kennard, J. M., James, N. P., 1986. Thrombolites and Stromatolites: Two Distinct Types of Microbial Structures. *Palaios*, 1(5): 492-503. https://doi. org/10.2307/

3514631

- Krause, F. F., Scotese, C. R., Nieto, C., et al., 2004. Paleozoic Stromatactis and Zebra Carbonate Mud - Mounds: Global Abundance and Paleogeographic Distribution. *Geology*, 32(3): 181. doi:10.1130/g20077.1
- Li, L., Tan, X. C., Zeng, W., et al., 2013. Development and Reservoir Significance of Mud Mounds in Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin. *Petroleum Exploration* and Development, 40(6):666-673(in Chinese with English abstract).
- Li, P.W., Luo, P., Song, J.M., et al., 2015. Characteristics and Main Controlling Factors of Microbial Carbonate Reservoirs: A Case Study of Upper Sinian-Lower Cambrian in the Northwestern Margin of Tarim Basin. Acta Petrolei Sinica, 36(9): 1074-1089(in Chinese with English abstract).
- Li, Q.F., Miao, S.D., Li, Y.X., et al., 2018. Reservoir Characteristics and Genesis of the Changxing Formation on the Margin of Yanting - Tongnan Trough, Central Sichuan Basin. *Earth Science*, 43(10):3553-3567(in Chinese with English abstract).
- Lin, X.X., Peng, J., Hou, Z.J., et al., 2018. Study on Characteristics and Geneses of Algal Dolostone of the Upper Sinian Dengying Formation in the Hanyuan-Ebian Area of Sichuan Province, China. Acta Sedimentologica Sinica, 36(1):57-71(in Chinese with English abstract).
- Liu, J.J., Zhang, B.M., Zhou, H., alet, 2016. Mud Mound Systems Classification and Petroleum Geological Features. Petroleum Industry Press, Beijing, 187(in Chinese).
- Liu, J.J., Li, W., Zhang, B.M., et al., 2015. Sedimentary Palaeogeography of the Sinian in Upper Yangtze Region. *Journal of Palaeogeography(Chinese Edition)*, 17(6): 735-753(in Chinese with English abstract).
- Liu, S.G., Ma, Y.S., Huang, W.M., et al., 2007. Densification Process of Upper Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin. *Natural Gas Geoscience*, 18(4): 485-496(in Chinese with English abstract).
- Liu, S.G., Ma, Y.S., Sun, W., et al., 2008. Studying on the Differences of Sinian Natural Gas Pools between Weiyuan Gas Field and Ziyang Gas-Brone Area, Sichuan Basin. *Acta Geologica Sinica*, 82(3): 328-337(in Chinese with English abstract).
- Mei, M.X., 2007. Revised Classification of Microbial Carbonates: Complementing the Classification of Limestones. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 222-234(in Chinese with English abstract).
- Monty, C.L.V., Bosence, D.W.J., Bridges, P.H., et al.,

1995.Carbonate Mud-Mounds: Their Origin and Evolution. Publ. Int. Assoc. Sedimentol., 23, London, 537.

- Osburn, M., Grotzinger, J., Bergmann, K., 2014. Facies, Stratigraphy, and Evolution of a Middle Ediacaran Carbonate Ramp: Khufai Formation, Sultanate of Oman. AAPG Bulletin, 98(8): 1631-1667. https://doi.org/ 10.1306/07291312140
- Peng, H.L., Liu, S.G., Song, J.M., et al., 2014. Characteristics of Microbial Carbonate Rocks in Upper Sinian Dengying Formation of Micang Mountains, North Sichuan, China. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 41(2): 181-191(in Chinese with English abstract).
- Riding, R., 2000. Microbial Carbonates: The Geological Record of Calcified Bacterial-Algal Mats and Biofilms. Sedimentology, 47(s1): 179-214. https://doi.org/10.1046/ j.1365-3091.2000.00003.x
- Ronchi, P., Ortenzi, A., Borromeo, O., et al., 2010. Depositional Setting and Diagenetic Processes and Their Impact on the Reservoir Quality in the Late Visean Bashkirian Kashagan Carbonate Platform (Pre-Caspian Basin, Kazakhstan). AAPG Bulletin, 94(9): 1313–1348. https://doi.org/10.1306/01051009130
- Shan, X. Q., Zhang, J., Zhang, B. M., et al., 2016. Dolomite Karst Reservoir Characteristics and Dissolution Evidences of Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin. Acta Petrolei Sinica, 37(1): 17-29(in Chinese with English abstract).
- Si, C.S., Hao, Y., Zhou, J.G., et al., 2014. Characteristics and Controlling Factors of Reservoir in Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin, China. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 41 (3):266-273(in Chinese with English abstract).
- Song, J. M., Luo, P., Liu, S. G., et al., 2018. The Deposition and Reservoir Characteristics of Dengying Formation in Western Sichuan Basin, China. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 45 (1):27-44(in Chinese with English abstract).
- Sun, W., Liu, S.G., Song, J.M., et al., 2017. The Formation Process and Characteristics of Ancient and Deep Carbonate Petroleum Reservoirs in Superimposed Basins: A Case Study of Sinian (Ediacaran) Dengying Formation in the Sichuan Superimposed Basin, China. Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition), 44(3):257-285 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W.Z., Yang, Y.M., Wen, L., et al., 2016. A Study of Sedimentary Characteristics of Microbial Carbonate: A

Case Study of the Sinian Dengying Formation in Gaomo Area, Sichuan Basin. *Geology in China*, 43(1): 306-318 (in Chinese with English abstract).

- Wei, G.Q., Yang, W., Du, J.H., et al., 2015.Geological Characteristics of the Sinian - Early Cambrian Intracratonic Rift, Sichuan Basin.*Natural Gas Industry*, 35(1):24-35 (in Chinese with English abstract).
- Xing, F.C., Hu, H.R., Hou, M.C., et al., 2018. Carbonate Reservoirs Cycles and Assemblages under the Tectonic and Palaeogeography Control: A Case Study from Sichuan Basin. *Earth Science*, 43(10):3540-3552(in Chinese with English abstract).
- Xing, F. C., Lu, Y. C., Guo, T. L., et al., 2017. Sedimentary Texture Diversity of Different Carbonate Platform Margins and Its Significance for Petroleum Exploration: A Case Study of Carbonate Platform Margins in Feixianguan Period of the Early Triassic, NE Sichuan Basin, China. Acta Petrologica Sinica, 33(4): 1305-1316(in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. H., Lan, C. J., Yang, W. Q., et al., 2018. Sedimentary and Evolutionary Characteristics of Sinian Dengying Formation Microbial Mound in Sichuan Basin.*Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 37(2):15-25 (in Chinese with English abstract).
- Yan, B., Li, Q., Zhang, H., et al., 2017. Migration of Cambrian-Ordovician Carbonate Platform Margin and Its Relationship with the Relative Sea-Level Change in East Tarim Basin. *Petroleum Geology & Oilfield Development in* Daging, 36(3):18-24(in Chinese with English abstract).
- Yao, G.S., Hao, Y., Zhou, J.G., et al., 2014. Formation and Evolution of Reservoir Spaces in the Sinian Dengying Fm of the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 34(3): 31-37(in Chinese with English abstract).
- Zhou, J.G., Yao, G.S., Yang, G., et al., 2015.Genesis Mechanism of the Sinian-Cambrian Reservoirs in the Anyue Gas Field, Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 35(1): 36-44(in Chinese with English abstract).
- Zhou, J.G., Zhang, J.Y., Deng, H.Y., et al., 2017. Lithofacies Paleogeography and Sedimentary Model of Sinian Dengying Fm in the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 37 (1):24-31(in Chinese with English abstract).
- Zhu, X.M., 2008. Sedimentary Petrology. Petroleum Industry Press, Beijing, 483(in Chinese).

附中文参考文献

陈娅娜, 沈安江, 潘立银, 等, 2017. 微生物白云岩储集层特 征、成因和分布——以四川盆地震旦系灯影组四段为 例. 石油勘探与开发, 44(5):704-715.

- 戴金星,2003.威远气田成藏期及气源.石油实验地质,25(5): 473-480.
- 杜金虎,汪泽成,邹才能,等,2016.古老碳酸盐岩大气田地 质理论与勘探实践.北京:石油工业出版社,227.
- 段金宝,梅庆华,李毕松,等,2019.四川盆地震旦纪-早寒武 世构造-沉积演化过程.地球科学,44(3):738-755.
- 冯冲,邹华耀,郭彤楼,等,2015.川东北地区二叠系—三叠系 礁滩相储层发育机理.特种油气藏,22(6):1-4,141.
- 郭旭升,胡东风,段金宝,等,2018.四川盆地北部宁强胡家坝 灯影组四段岩石特征及沉积环境分析.石油实验地质, 40(6):749-756.
- 李凌,谭秀成,曾伟,等,2013.四川盆地震旦系灯影组灰泥丘 发育特征及储集意义.石油勘探与开发,40(6): 666-673.
- 李朋威,罗平,宋金民,等,2015.微生物碳酸盐岩储层特征与 主控因素——以塔里木盆地西北缘上震旦统-下寒武 统为例.石油学报,36(9):1074-1089.
- 李秋芬, 苗顺德, 李永新, 等, 2018. 四川盆地川中地区盐亭一 潼南海槽台缘带二叠系长兴组储层特征及成因探讨. 地球科学, 43(10):3553-3567.
- 林孝先,彭军,侯中健,等,2018.四川汉源一峨边地区上震旦 统灯影组藻白云岩特征及成因研究.沉积学报,36(1): 57-71.
- 刘静江,张宝民,周慧,等,2016.灰泥丘系统分类及石油地 质特征.北京:石油工业出版社,187.
- 刘静江,李伟,张宝民,等,2015.上扬子地区震旦纪沉积古地 理.古地理学报,17(6):735-753.
- 刘树根,马永生,黄文明,等,2007.四川盆地上震旦统灯影组 储集层致密化过程研究.天然气地球科学,18(4): 485-496.
- 刘树根,马永生,孙玮,等,2008.四川盆地威远气田和资阳含 气区震旦系油气成藏差异性研究.地质学报,82(3): 328-337.
- 梅冥相,2007. 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. 地学前缘,14(5): 222-234.
- 彭瀚霖,刘树根,宋金民,等,2014.川北米仓山地区灯影组微 生物碳酸盐岩发育特征.成都理工大学学报(自然科学 版),41(2):181-191.

- 单秀琴,张静,张宝民,等,2016.四川盆地震旦系灯影组白云 岩岩溶储层特征及溶蚀作用证据.石油学报,37(1): 17-29.
- 斯春松,郝毅,周进高,等,2014.四川盆地灯影组储层特征及 主控因素.成都理工大学学报(自然科学版),41(3): 266-273.
- 宋金民,罗平,刘树根,等,2018.四川盆地西部震旦系灯影组 沉积储层特征.成都理工大学学报(自然科学版),45(1): 27-44.
- 孙玮,刘树根,宋金民,等,2017.叠合盆地古老深层碳酸盐岩 油气成藏过程和特征——以四川叠合盆地震旦系灯影 组为例.成都理工大学学报(自然科学版),44(3): 257-285.
- 王文之,杨跃明,文龙,等,2016.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.中国地质,43
 (1):306-318.
- 魏国齐,杨威,杜金虎,等,2015.四川盆地震旦纪一早寒武世 克拉通内裂陷地质特征.天然气工业,35(1):24-35.
- 邢凤存,胡华蕊,侯明才,等,2018.构造和古地理控制下的碳酸盐岩储集体旋回和集群性探讨:以四川盆地为例.地 球科学,43(10):3540-3552.
- 邢凤存,陆永潮,郭彤楼,等,2017.碳酸盐岩台地边缘沉积结构差异及其油气勘探意义——以川东北早三叠世飞仙 关期台地边缘带为例.岩石学报,33(4):1305-1316.
- 徐哲航,兰才俊,杨伟强,等,2018.四川盆地震旦系灯影组微 生物丘沉积演化特征.大庆石油地质与开发,37(2): 15-25.
- 闫博,李强,张宏,等,2017.塔东地区寒武纪一奥陶纪碳酸盐 岩台缘带迁移与相对海平面变化关系.大庆石油地质 与开发,36(3):18-24.
- 姚根顺,郝毅,周进高,等,2014.四川盆地震旦系灯影组储层 储集空间的形成与演化.天然气工业,34(3):31-37.
- 周进高,姚根顺,杨光,等,2015.四川盆地安岳大气田震 旦系一寒武系储层的发育机制.天然气工业,35(1): 36-44.
- 周进高,张建勇,邓红婴,等,2017.四川盆地震旦系灯影组岩 相古地理与沉积模式.天然气工业,37(1):24-31.
- 朱筱敏,2008. 沉积岩石学. 北京:石油工业出版社,483.