

川北地区旺 1C 井灯影组二段微生物 丘滩沉积微相和储集层特征*

罗 冰¹ 刘艺妮² 张本健¹ 曾 帆² 周 刚¹ 王文之¹ 胡明毅²

1 中国石油西南油气田公司勘探开发研究院, 四川成都 610400

2 长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430100

摘 要 近年来在川北蓬萊地区灯影组二段勘探取得重大发现和突破, 但由于该地区灯二段埋深大, 取心资料少, 微生物丘滩微相类型复杂, 储集层非均质性强, 制约了该区勘探开发进程。以川北地区全取心的科学探索井——旺 1C 井资料为基础, 对该区灯二段微生物丘滩微相类型、微相组合序列、沉积相演化和储集层特征进行了研究。结果表明: (1) 旺 1C 井灯二段主要发育微生物白云岩、颗粒白云岩、晶粒白云岩和白云质角砾岩等, 以藻叠层白云岩、藻凝块白云岩、葡萄花边白云岩、砂屑白云岩和泥晶白云岩最为发育; (2) 灯二段主要为一套局限台地沉积, 细分为微生物丘、颗粒滩、潮坪 3 种亚相以及丘基、丘核、丘顶、砂屑滩、潮下云坪等微相; (3) 灯二段与微生物丘滩沉积相关的微相组合可分为潮下云坪—丘基—丘核、潮下云坪—砂屑滩、潮下云坪—丘基—丘核—砂屑滩等 3 种类型, 单个微相组合序列厚度规模较大, 一般在 25~50 m 之间; (4) 灯二段微生物丘滩储集层发育原生孔隙和次生溶蚀孔隙等储集空间, 该区储集层主要受微相、高频层序和成岩作用等因素控制, 其中丘核和丘顶微相储集层物性相对较好, 其次为砂屑滩微相, 潮下云坪微相储集层物性最差。研究成果可为川北地区超深层微生物丘滩储集层分布预测和天然气勘探开发提供地质理论依据。

关键词 微生物丘 颗粒滩 微相组合序列 储集层特征 储集层主控因素 灯影组 四川盆地

第一作者简介 罗冰, 男, 1982 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事油气地质及勘探部署方面的研究。

E-mail: lb2001@petrochina.com.cn。

通讯作者简介 胡明毅, 男, 1965 年生, 二级教授, 博士生导师, 主要从事储集层沉积学和油气田勘探研究。E-mail: humingyi65@163.com。

中图分类号: P588.24⁺5 文献标志码: A

Sedimentary microfacies and reservoir characteristics of microbial mound-bank complex in the Member 2 of Dengying Formation in Well Wang-1C, northern Sichuan Basin

LUO Bing¹ LIU Yini² ZHANG Benjian¹ ZENG Fan² ZHOU Gang¹ WANG Wenzhi¹ HU Mingyi²

1 Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu 610400, China

2 School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

* 国家科技重大专项(编号: 2025ZD1400402)、国家自然科学基金项目(编号: 42072171)、中国石油创新基金项目(编号: 2024DQ02-0106)和中国石油西南油气田分公司“揭榜挂帅”项目(编号: XNS 勘探院 JS2022-180)共同资助。[Co-funded by National Science and Technology Major Project(No. 2025ZD1400402), National Natural Science Foundation of China (No. 42072171), Fund of Creative Research by PetroChina(No. 2024DQ02-0106), and the PetroChina Southwest Oil and Gas Field Branch to Undertake Key Research Project(No. XNS-KYY-JS2022-180)]

收稿日期: 2025-05-11 改回日期: 2025-07-28

Abstract Following the discovery of the Anyue extra-large gas field in central Sichuan, significant exploration breakthroughs have been achieved in Member 2 of Dengying Formation in the Penglai area of northern Sichuan Basin in recent years. However, the exploration and development of this region remain constrained due to the complex microfacies types, considerable burial depth and strong heterogeneity of microbial mounds and shoals within the Dengying Formation. Based on core data from Well Wang-1C—a fully cored scientific exploration well located in northern Sichuan Basin—this study systematically investigates the microfacies types, sedimentary evolution, and reservoir characteristics of microbial mounds-bank complex in the Member 2 of Dengying Formation. The main findings are as follows: (1) Four primary dolomite lithofacies are identified in the Member 2 of Dengying Formation at Well Wang-1C: microbial dolomite, granular dolomite, crystalline dolomite, and dolomite breccia. Among these, laminated stromatolite dolomite, thrombolite dolomite, botryoidal dolomite, and mud-crystalline dolomite are the most developed. (2) Member 2 is predominantly composed of restricted platform deposits, with key microfacies including basal mound, core mound, mound crest, grain bank, and subtidal flat. (3) Three distinct microfacies assemblages can be recognized within the microbial mound-bank system: (Ⅰ) subtidal flat-basal mound-core mound, (Ⅱ) subtidal flat-grain dolomite bank, and (Ⅲ) subtidal flat-basal mound-core mound-grain dolomite bank. Each assemblage exhibits a substantial thickness, typically ranging from 25 to 50 m. (4) Reservoir spaces in the microbial mound-bank complex include primary pores and secondary dissolution pores. Reservoir development is primarily controlled by microfacies distribution, high-frequency sea-level fluctuations, and diagenetic processes. Notably, the microbial mound-core and mound-crest facies exhibit the most favorable reservoir properties, followed by granular shoal facies, whereas the subtidal flat facies displays the poorest physical characteristics. The above results can provide geological theoretical basis for the prediction of the distribution of ultra-deep microbial mound and flat reservoirs, and the exploration and development of natural gas in the northern Sichuan Basin.

Key words microbial mound, grain bank, microfacies assemblage, reservoir characteristics, reservoir main control factors, Dengying Formation, Sichuan Basin

About the first author LUO Bing, born in 1982, senior engineer, is engaged in researches on oil and gas geology and exploration development. E-mail: lb2001@petroChina.com.cn.

About the corresponding author HU Mingyi, born in 1965, professor, Ph.D. supervisor, is engaged in researches on reservoir sedimentology and oil and gas exploration. E-mail: humingyi65@163.com.

近十余年来, 针对四川盆地震旦系灯影组微生物丘滩气藏进行了较为系统的勘探及研究, 成效显著 (魏国齐等, 2013; 邹才能等, 2014; 汪泽成等, 2020; 邓宾等, 2024)。“十二五”期间, 在灯影期德阳—安岳裂陷东侧川中古隆起核部高石梯—磨溪地区发现安岳特大型气田, 探明储量超万亿立方米。2020 年, 在德阳—安岳裂陷东侧高磨气田以北的蓬莱—中江地区灯影组二段 (以下简称“灯二段”) 台缘带部署的蓬探 1 井测试获日产百万立方米高产气流, 预示着川中古隆起北斜坡勘探取得战略性突破, 其后多口探井钻揭灯二段厚层孔

洞型白云岩储集层含气性良好, 有望成为继安岳气田后的又一特大型气田。然而, 该区灯二段埋深大, 一般在 6000~8000 m 之间, 钻井取心少, 导致目前对该区微生物丘滩沉积微相类型、微相组合序列、储集层精细刻画和分布预测等方面研究薄弱, 制约了该区以微生物丘滩储集层为主的天然气藏勘探开发进程。

为了深入揭示川北地区灯影组超深层微生物丘滩微相类型、微相组合序列和储集层非均质性特征, 中国石油西南油气田分公司在川北地区部署了一口科学探索井——旺 1C 井, 并对其灯二段进行

了全井段取心。该井灯二段起始深度为 393.45 m, 底深 1113.2 m, 岩心长度 719.75 m。笔者以旺 1C 井灯二段为研究对象, 基于对全井段岩心和薄片精细观察, 对灯二段微生物丘滩微相类型及发育特征进行了深入研究, 进而总结该区沉积微相组合序列及沉积演化特征, 剖析该区储集层发育特征及主控因素。研究成果可为川北地区超深层微生物丘滩储集层分布预测和天然气勘探开发提供地质理论依据。

1 区域地质背景

四川盆地位于上扬子板块西北部, 为一大型含油气叠合盆地。受基底断裂影响, 晚震旦世灯影期四川盆地呈现隆坳相间的沉积格局, 主体以浅水碳酸盐台地沉积为主(图 1-a) (刘静江等, 2015; 周进高等, 2017; 汪泽成等 2020; 文龙等, 2021; 赵文智等, 2022)。根据岩性以及微生物发育特征, 将盆地内灯影组自下而上分为 4 段: 灯一段为贫藻段, 岩性以泥粉晶白云岩为主; 灯二段为富藻段, 岩性以藻叠层白云岩、藻凝块白云岩和葡萄

花边白云岩为主, 夹泥粉晶白云岩及颗粒白云岩等; 灯三段沉积水体快速加深, 发育一套陆棚沉积, 岩性主要为粉砂岩和泥岩; 灯四段为富藻段, 岩性以藻叠层白云岩、藻凝块白云岩为主, 夹泥粉晶白云岩(图 1-b)。

晚震旦世灯影期, 四川盆地发育稳定的碳酸盐台地沉积, 主要发育局限台地、台地边缘、斜坡和盆地相带。由于该时期微生物繁盛, 沿碳酸盐岩台地边缘以及台地内部古地貌高地势处发育大量微生物丘滩体(图 1-a)。灯二段沉积早期, 受基底拉张作用影响, 德阳—安岳一带开始裂陷, 形成德阳—安岳裂陷槽, 致使四川盆地灯二段自西向东为台—槽—台的沉积格局(刘树根等, 2016; 彭瀚霖等, 2021)。灯二段沉积末期, 受桐湾运动 I 幕影响, 四川盆地发生抬升, 造成灯二段顶部地层发生剥蚀, 裂陷槽周缘地区灯二段被局部剥蚀(李启桂等, 2013)。

旺 1C 井地处四川盆地北部广元市旺苍县(图 1-a), 与川北蓬莱探区具有相似的沉积演化背景。灯二段岩性以藻纹层白云岩、藻凝块白云

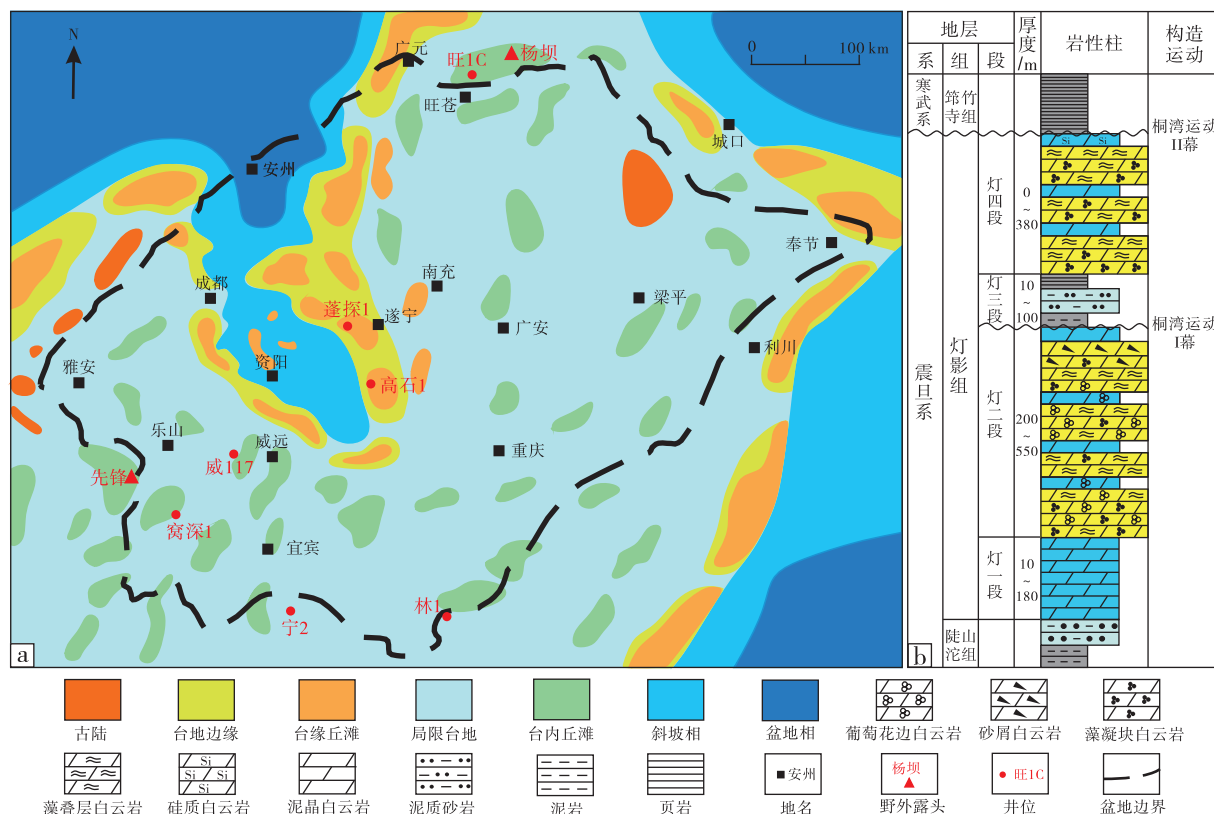


图 1 四川盆地灯影组二段沉积相(a)及地层柱状剖面图(b) (据汪泽成等, 2020; 有修改)

Fig. 1 Sedimentary facies(a) and stratigraphic column(b) of the Member 2 of Dengying Formation in Sichuan Basin

(modified from Wang et al., 2020)

岩、葡萄花边白云岩、砂屑白云岩和泥晶白云岩为主，厚度为 719.75 m。灯二段沉积后，受桐湾 I 幕构造运动影响，该区遭受抬升暴露，顶部发育一套白云质角砾岩，上部地层孔洞中充填大量沥青，指示灯二段存在油气充注历史。灯三段岩性以泥质粉砂岩、泥岩、泥质云岩为主，厚 45.6 m，属于水体相对较深的混积陆棚沉积。灯四段岩性以藻叠层白云岩、藻纹层白云岩、藻凝块白云岩、粉晶白云岩和泥晶白云岩为主，厚 214.8 m。

2 岩石类型及特征

通过对旺 1C 井灯二段岩心以及薄片进行精细观察，按结构特征将其分为微生物白云岩、颗粒白云岩、晶粒白云岩和白云质角砾岩等 4 个大类。

2.1 微生物白云岩

根据灯二段微生物结构特征，将微生物白云岩细分藻叠层白云岩、藻凝块白云岩、泡沫绵层白云岩、葡萄花边白云岩和核形石白云岩等 5 种类型（范承蒙等，2024）。

藻叠层白云岩：由丝状蓝细菌构成。岩心可见

藻纹层呈水平层状、微波状、丘状等起伏形态，单层纹层厚度多在 0.5~3.0 mm 之间（图 2-a）。显微镜下可见暗色的富微生物纹层与亮色的贫微生物纹层相间发育，其中暗纹层为富含有机质的微生物层，亮纹层为贫有机质层（图 3-a）。

藻凝块白云岩：多呈浅灰色—灰色，由暗色细菌群落在生长过程中粘连、融合及捕获泥晶、细碎屑物质组成，呈凝絮状或枝状集合体（图 3-b），整体具有向上生长的趋势。凝块石相互连接形成抗浪构造，发育大量顺层藻格架溶蚀孔隙（图 2-b，2-c），是研究区重要的储集岩类之一。

泡沫绵层白云岩：显微镜下呈圆形、椭圆形，球体直径在 0.1~0.5 mm 之间，是由球状藻类微生物矿化形成。泡沫体边缘高度泥晶化或富含有机质，整体呈暗黑色；泡沫体内部见多期亮晶白云石胶结，由边缘至内部晶体逐渐变大（图 3-c）。

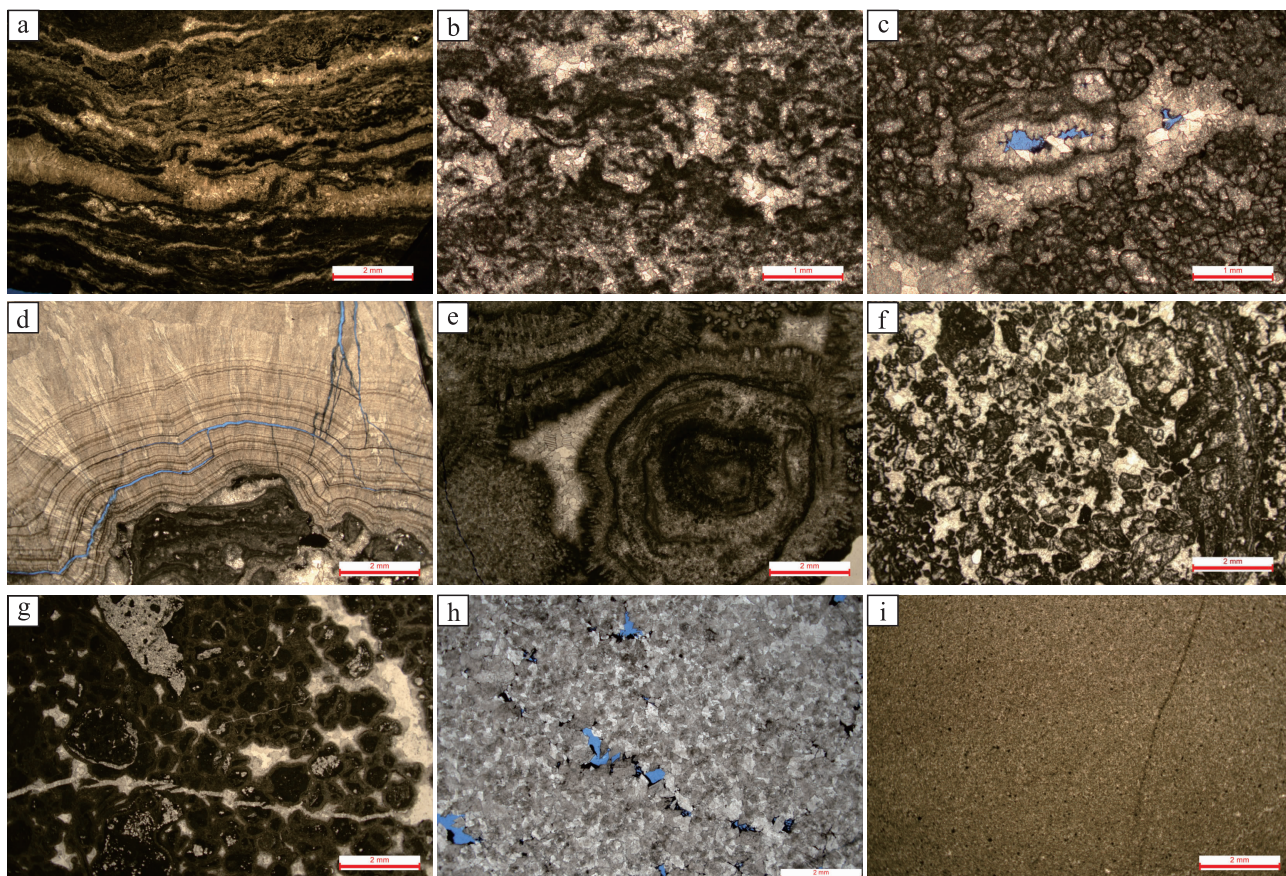
葡萄花边白云岩：横切面为半球形葡萄状集合体，纵切面为明暗相间的花边，由亮暗交替层的栉壳、被壳组成，亮层具有纤维状或叶片状的白云石特征，暗层具有藻粘结结构白云石特征（图 2-h，2-i；图 3-d）。葡萄花边白云岩多是在沉积期由于



a—藻叠层白云岩，862.96~863.14 m；b—藻凝块白云岩，421.80~421.92 m；c—藻凝块白云岩，发育溶蚀孔洞，826.48~826.75 m；d—泥晶白云岩，可见缝合线，501.67~501.82 m；e—粉晶白云岩，524.61~524.80 m；f—含藻纹层泥晶白云岩，发育裂缝，沥青充填，518.13~518.25 m；g—砾屑白云岩，452.45~452.53 m；h—葡萄花边白云岩，发育溶洞，805~805.23 m；i—葡萄花边白云岩，胶结作用强烈，见晶间残余孔洞，853.62~853.92 m

图 2 川北地区旺 1C 井灯影组二段岩石类型

Fig. 2 Rock types of the Member 2 of Dengying Formation in Well Wang-1C, northern Sichuan Basin



a—藻叠层白云岩, 572.75 m; b—藻凝块白云岩, 433.25 m; c—泡沫绵层白云岩, 425 m; d—葡萄花边白云岩, 见明暗相间的胶结物, 607.5 m; e—核形石白云岩, 653.75 m; f—砂屑白云岩, 475.25 m; g—藻砂屑白云岩, 640.75 m; h—粗粉晶—细晶白云岩, 发育晶间溶孔, 408.5 m; i—泥晶白云岩, 672.5 m

图 3 川北地区旺 1C 井灯影组二段岩石学特征

Fig. 3 Petrological characteristics of the Member 2 of Dengying Formation in Well Wang-1C, northern Sichuan Basin

相对海平面下降局部暴露抬升形成角砾状核心、相对海平面上升形成纤状胶结物而成, 因此多为沉积成因。区域上葡萄花边白云岩在灯二段中下部广泛分布, 具有一定的地层对比意义 (郝毅等, 2015; 鲁鹏达等, 2023)。

核形石白云岩: 核形石大小多在 0.2 mm 以上, 通常呈球状或椭球状, 由核心和包覆圈层组成。核心多为碳酸盐岩碎屑, 圈层由富藻暗层和富屑亮层相间组成的同心圈层结构 (图 3-e), 且整体亮层厚、暗层相对较薄 (张云峰等, 2022)。

2.2 颗粒白云岩

主要发育在灯二段中上部, 可分为砾屑白云岩、砂屑白云岩和鲕粒白云岩。旺 1C 井以砂屑白云岩为主, 颗粒粒径一般为 0.2~0.7 mm, 以中—粗砂级为主, 分选、磨圆较好 (图 3-f)。砾屑白云

岩颗粒粒径为 2 mm 以上, 磨圆较好, 粒间多充填泥晶白云石, 岩性致密 (图 2-g)。

2.3 晶粒白云岩

在灯二段广泛发育, 可分为泥晶白云岩、粉晶白云岩和细晶白云岩。泥—粉晶白云岩以深灰色中层为主, 岩石较致密, 重结晶作用较弱, 未见微生物痕迹 (图 2-d); 白云石晶体直径小于 0.05 mm, 分布均匀, 多为自形晶, 晶面平直, 晶间溶孔不发育。细晶白云岩中白云石晶体直径在 0.02~0.10 mm 之间, 重结晶作用明显, 多呈他形—半自形, 且随着晶粒增大自形程度具变好的趋势; 晶体多呈线接触, 可见大量晶间孔 (图 3-h), 部分细晶白云岩中可见微生物痕迹、残余颗粒结构。

2.4 白云质角砾岩

岩心观察表明, 旺 1C 井白云质角砾岩纵向上

分布较少，主要发育在灯二段顶部。角砾大小混杂，直径一般在 0.5~3.5 cm 之间，分选、磨圆差，以次棱角状为主，呈杂乱堆积，成分主要为藻凝块白云岩和藻纹层白云岩，角砾间普遍发育粒状白云石胶结物。白云质角砾岩是灯二段沉积后，受桐湾运动 I 幕影响而抬升暴露地表并遭受表生期岩溶作用而形成的。

3 沉积学特征

3.1 沉积相类型

对灯二段沉积特征综合分析表明，旺 1C 井主要为一套局限台地沉积，细分为微生物丘、颗粒滩和潮坪 3 种亚相，并可进一步划分出丘基、丘核、丘顶、颗粒滩、潮下云坪等微相类型(图 4)。

微生物丘发育在局限台地内水下高地势处，形

成于沉积水体较浅、弱—中等的水动力条件下。其沉积环境稳定且开放，水体清澈，生物繁盛，造丘微生物以蓝细菌为主（任佳鑫等，2023；Xia *et al.*, 2025）。构成微生物丘的岩石类型多样，包括藻叠层白云岩、藻凝块白云岩、泡沫绵层白云岩、葡萄花边白云岩、核形石白云岩等。根据岩石类型和沉积水体特征，将旺 1C 井灯二段微生物丘亚相划分为丘基、丘核和丘顶微相。丘基微相位于微生物丘底部，主要由泥晶白云岩和藻纹层泥晶白云岩组成，水动力条件较弱；丘核微相为微生物丘的主体部分，主要由藻叠层白云岩、藻凝块白云岩和葡萄花边白云岩组成，水动力条件相对较强；丘顶微相位于藻丘顶部，岩性主要为白云质角砾岩，为微生物丘局部暴露发生岩溶而形成(图 4)。

颗粒滩亚相主要发育于水体较浅的高能沉积环境之中，其受波浪作用持续影响，水动力较强，形

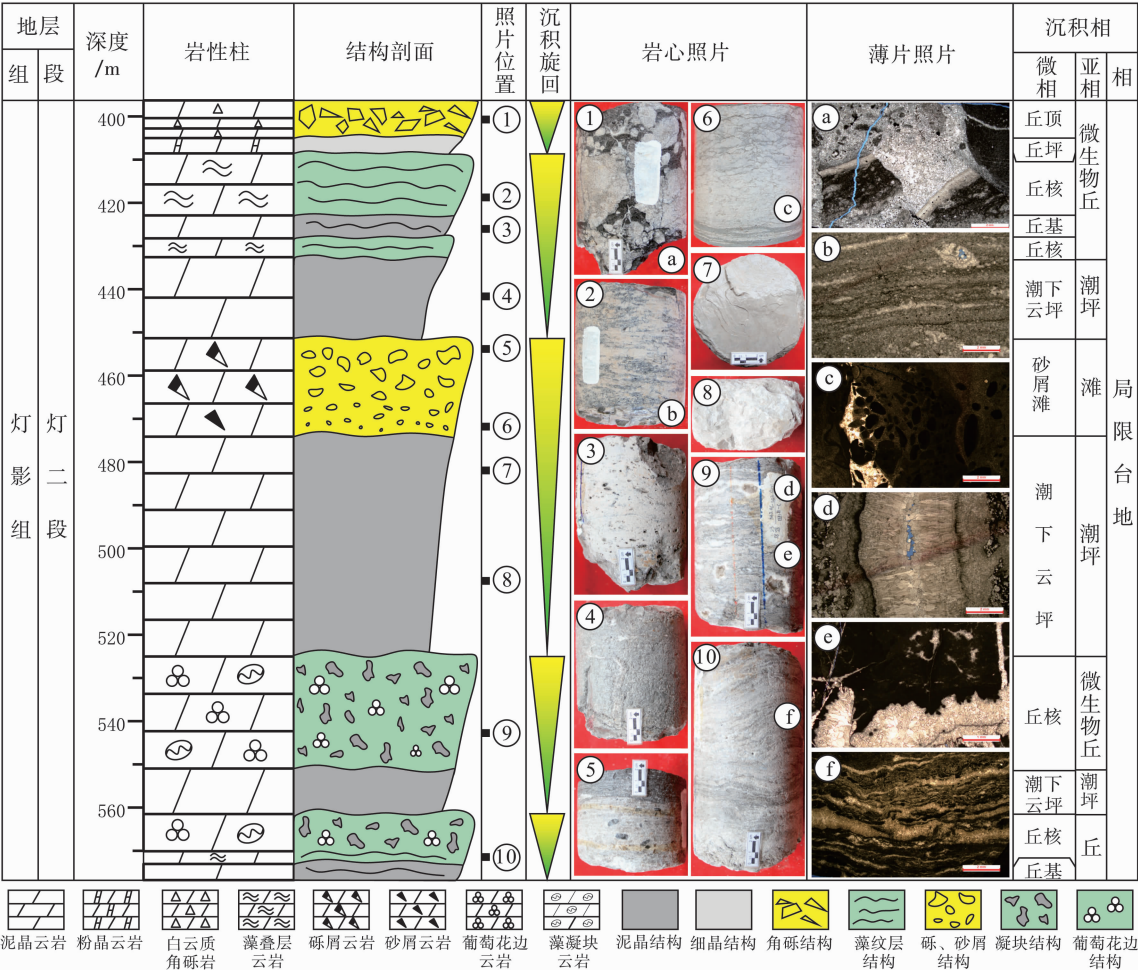


图 4 川北地区旺 1C 井灯影组二段微生物丘、滩—潮坪沉积微相剖面图

Fig. 4 Comprehensive columnar diagram of microbial mound-bank and tidal flat of the Member 2 of Dengying Formation in Well Wang-1C, northern Sichuan Basin

成藻砂屑和少量砾屑等碳酸盐岩颗粒。颗粒间以亮晶胶结物沉积为主, 旺 1C 井颗粒滩主要发育砂屑滩微相(图 4)。

潮坪亚相通常发育于地势平坦、沉积水体较浅的部位, 沉积界面处于平均海平面附近, 波浪作用较弱, 可见水平层理等沉积构造。根据岩性和沉积特征, 旺 1C 井灯二段主要发育潮下云坪微相, 岩性以泥晶白云岩为主, 水平层理发育(图 4), 未见鸟眼等暴露环境沉积构造, 表明沉积时水动力条件较弱、水体较深。

3.2 微相组合序列

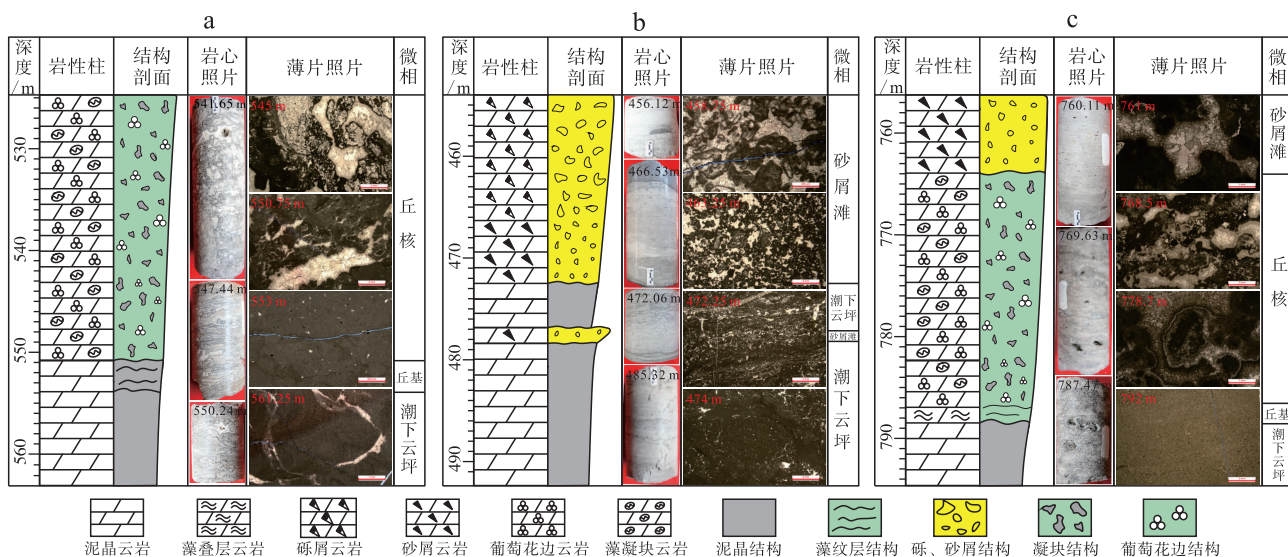
灯二段沉积时期, 海平面频繁变化, 旺 1C 井岩心可见多个水体逐渐变浅的反旋回沉积序列, 这些沉积旋回控制了微生物丘滩的发育。通过对灯二段沉积微相进行深入分析, 纵向上识别出潮下云坪—丘基—丘核、潮下云坪—砂屑滩、潮下云坪—丘基—丘核—砂屑滩 3 类微相组合序列。

潮下云坪—丘基—丘核微相组合序列为海平面下降过程中形成的向上变浅的反旋回结构, 旋回底部为泥晶白云岩, 向上逐渐过渡为藻纹层泥晶白云岩→藻凝块白云岩→葡萄花边白云岩。根据岩性变化顺序, 将潮下云坪—丘基—丘核微相组合分为海平面快速下降和海平面缓慢下降 2 种类型, 其中海平面快速下降型由下至上岩性依次为泥晶白云岩→

藻凝块白云岩和葡萄花边白云岩, 海平面缓慢下降型岩性表现为泥晶白云岩→藻纹层白云岩→藻叠层白云岩→藻凝块白云岩和葡萄花边白云岩, 两者区别在于缓慢型微生物丘基底岩性为藻纹层白云岩和藻叠层白云岩, 由丝状蓝细菌建造(图 5-a)。潮下云坪—丘基—丘核微相组合序列单个旋回厚度较大, 一般在 30~50 m 之间。

潮下云坪—砂屑滩微相组合序列为海平面下降时形成的沉积序列, 下部潮下云坪微相以泥晶白云岩为主, 藻类不发育, 上部砂屑滩以颗粒白云岩为主(图 5-b)。该微相组合沉积过程表现为: 早期沉积水体相对较深, 以泥晶白云岩沉积为主, 但随着海平面下降, 沉积水体变浅, 在波浪的拍击作用下泥晶白云岩遭到破坏, 经淘洗和短距离搬运形成砂屑滩沉积。潮下云坪—砂屑滩微相组合序列单个旋回厚度一般在 25~35 m 之间。

潮下云坪—丘基—丘核—砂屑滩微相组合为沉积水动力逐渐增强的反旋回结构。旋回底部潮下云坪微相以泥晶白云岩为主; 旋回中部丘基微相主要由藻纹层泥晶白云岩组成, 丘核微相由藻叠层白云岩和藻凝块白云岩组成, 葡萄花边构造发育; 旋回顶部砂屑滩微相以颗粒白云岩为主(图 5-c)。该微相组合沉积过程表现为: 早期沉积水体相对较深, 发育潮下云坪微相, 岩性以泥晶白云岩为主; 随着海平面下降, 沉积水体逐渐变浅, 蓝细菌等造



a—云坪—藻丘微相; b—云坪—砂屑滩微相; c—云坪—藻丘—砂屑滩微相

图 5 川北地区旺 1C 井灯影组二段微生物丘滩典型沉积微相组合序列

Fig. 5 Typical sedimentary microfacies assemblage of microbial mound-bank of the Member 2 of Dengying Formation in Well Wang-1C, northern Sichuan Basin

丘生物开始大量繁殖,发育藻丘微相,岩性以藻叠层白云岩、藻凝块白云岩、葡萄花边白云岩为主;后期海平面进一步下降,前期形成的微生物丘遭受波浪作用改造而破碎,发育砂屑滩沉积,岩性以藻砂屑白云岩为主,粒间孔、粒间溶孔发育,储集层物性好。潮下云坪—丘基—丘核—砂屑滩微相组合序列单个旋回厚度大,一般可达 50 m。

3.3 沉积相纵向演化特征

灯二段沉积时期,川北地区以微生物丘和潮坪沉积为主,局部发育颗粒滩沉积;岩性以藻凝块白云岩、葡萄花边白云岩、藻叠层白云岩、砂屑白云岩和泥晶白云岩为主。根据旺 1C 井灯二段岩相特征和沉积微相组合,将灯二段划分为 4 个准层序组和 11 个准层序,表明该区灯二段沉积时期发育 4 期四级海平面升降旋回和 11 期五级海平面升降旋回(图 6)。

准层序组 1 (Pss1) 由 3 个潮下云坪—微生物丘亚相的沉积旋回构成,单个沉积旋回岩性由泥晶白云岩—藻纹层白云岩—葡萄花边白云岩和藻凝块白云岩组成,自下向上 3 个旋回的厚度呈逐渐加大趋势,平均旋回厚度为 50 m 左右。准层序组 2 (Pss2) 发育 3 个向上变浅的准层序沉积旋回,旋回自下向上由潮下云坪—微生物丘—颗粒滩微相序列组成,在准层序组 2 的顶部由于相对海平面下降,形成了一套局部暴露岩溶形成的白云质角砾岩沉积。准层序组 3 (Pss3) 发育 3 个潮下云坪—微生物丘组成的沉积旋回,岩性由泥晶白云岩直接过渡为藻凝块白云岩和葡萄花边白云岩,其中下部和上部旋回厚度相对较小,分别为 54 m 和 39 m,中部旋回厚度较大,为 102 m。准层序组 4 (Pss4) 由 2 个准层序序列组成,下部准层序由潮下云坪—颗粒滩微相组合序列组成,上部准层序由潮下云坪—丘核—丘顶微相序列组成,反映该时期发育 2 期次一级海平面上升到下降的沉积过程。灯二段沉积末期,在桐湾运动 I 幕作用影响下,该区地层抬升发生暴露剥蚀,顶部发育一套白云质角砾岩。

3.4 沉积模式

震旦系灯影组为元古代—古生代转折期的地层,该时期海洋生态系统主要发育以微生物主导的碳酸盐沉积。根据对旺 1C 井灯二段微生物碳酸盐岩岩石类型、微相类型、微相组合序列及沉积相演

化规律研究,并结合前人相关研究成果,建立了川北地区震旦系灯二段的浅水碳酸盐岩局限台地沉积模式(图 7)。

该区灯二段主要发育局限台地沉积,进一步细分为潮下云坪、微生物丘、砂屑滩等微相类型。潮下云坪处于古地貌洼地,水动力条件弱,岩性以泥晶白云岩为主。微生物丘和颗粒滩一般形成于古地貌高带。随着水动力条件逐渐增强,微生物丘自下向上发育丘基、丘核和丘顶沉积,且在微生物丘形成过程中,由于相对海平面下降可局部暴露形成白云质角砾岩。颗粒滩既可以在微生物丘的基础上生长发育,也可以直接在古地貌高地上由于强水动力条件改造直接形成砂屑滩沉积。

4 储集层特征及主控因素分析

4.1 储集层特征

对灯二段上部 93 个常规物性样品的测试分析表明,该区灯二段微生物丘滩白云岩储集层孔隙度为 0.22%~3.89%,平均 1.49%。孔隙度主要位于 1%~3%之间,占比达 64%(图 8),表明基质孔隙度总体较低。

灯二段储集空间分为原生孔隙、次生溶蚀孔隙和裂缝等(姚根顺等,2014)。原生孔隙主要为藻格架孔、晶间孔(图 9-a, 9-g)、晶间溶孔(图 2-h)等,次生孔隙包括溶孔(图 9-b, 9-c, 9-e)、粒间溶孔(图 9-f)、粒内溶孔(图 9-d)、溶洞(图 2-h)和裂缝(图 9-h, 9-i)等。

4.2 储集层主控因素分析

首先,沉积相是灯影组白云岩储集层形成的物质基础,因不同微相中的岩石类型存在差异,造成其储集层物性存在明显差异(罗冰等,2015;刘树根等,2016;宋金民等,2017; Song *et al.*, 2024; 刘凯铭等,2025)。对灯二段各微相类型孔隙度进行分析发现:丘核和丘顶微相储集层孔隙度相对最好(图 10),平均孔隙度分别为 2.68%、2.35%;砂屑滩微相储集层孔隙度次之,平均孔隙度为 1.57%;潮下云坪微相储集层物性相对最差,孔隙度仅为 0.58%。究其原因主要是各个微相均由不同岩石类型组成,其中丘核微相主要由藻叠层白云岩、藻凝块白云岩组成,上述岩石原始藻格架孔较为发育,为储集层发育奠定了良好的基础;潮下云

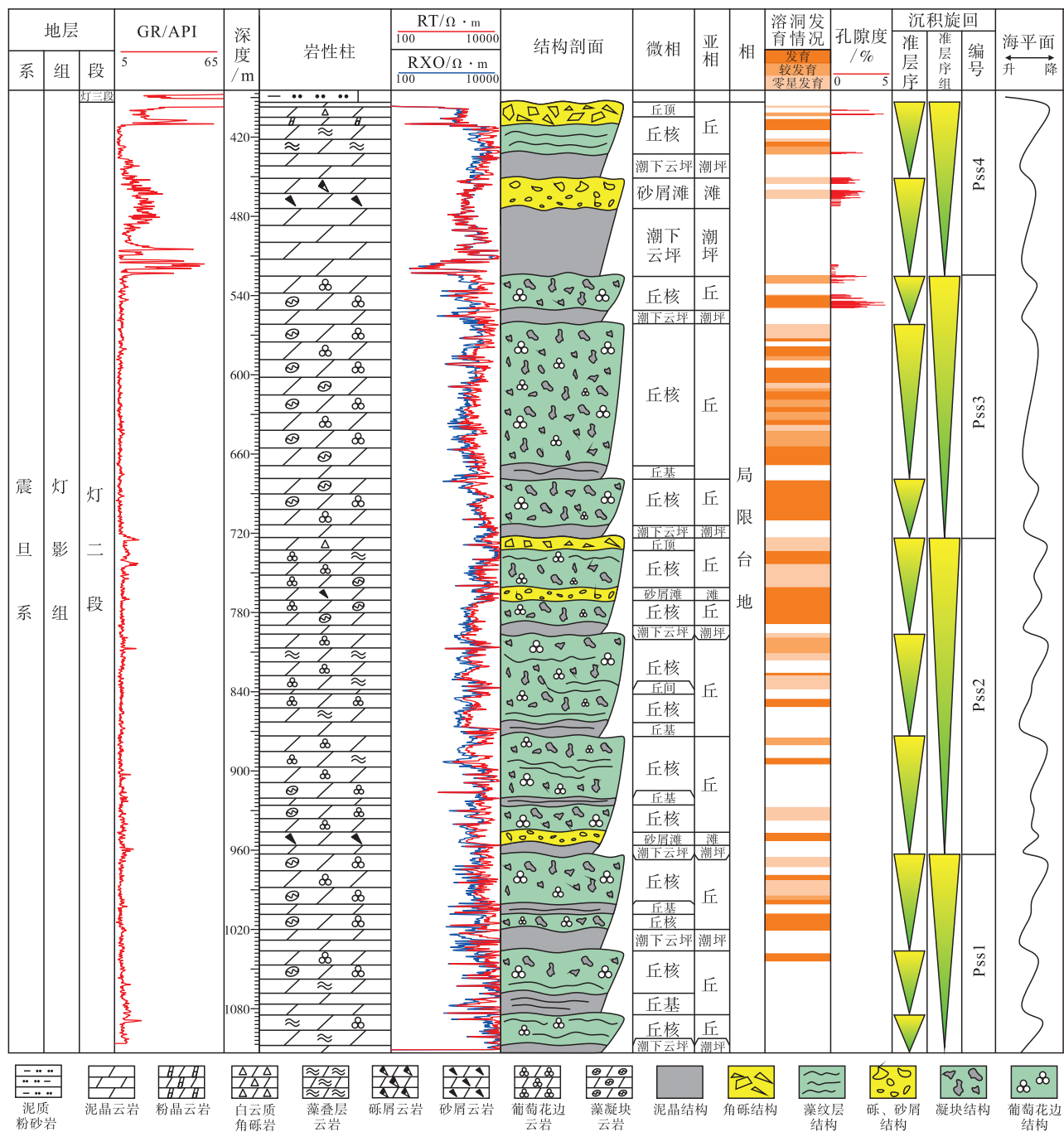


图 6 川北地区旺 1C 井灯影组二段沉积相和储集层综合柱状剖面图

Fig. 6 Comprehensive column of sedimentary facies and reservoir characteristics of the Member 2 of Dengying Formation in Well Wang-1C, northern Sichuan Basin

坪微相主要由泥晶白云岩组成,原始晶间微孔较为发育,但在埋藏阶段因遭受强烈压实作用而变得致密,加之次生溶蚀孔少见,因此储集层物性较差。

其次, 高频层序对储集层发育具有明显的控制作用。旺 1C 井灯二段可划分为 4 个准层序组和 11 个准层序, 根据实测孔隙度并结合岩心和薄片观察

发现,一般在准层序组和准层序顶部孔隙度相对较高,藻格架孔和次生溶蚀孔洞较为发育,表明四级和五级高频层序对微生物丘滩储集层孔洞的发育具有明显的控制作用(图 6)。

最后,灯影组在埋藏成岩阶段经历了复杂成岩改造,主要包括压实作用、压溶作用、胶结作用和

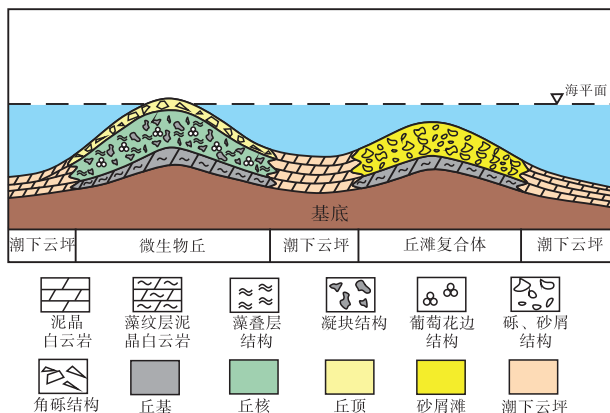


图 7 川北地区旺 1C 井灯影组二段局限台地沉积相模式

Fig. 7 Sedimentary model of restricted platform facies of the Member 2 of Dengying Formation in Well Wang-1C, northern Sichuan Basin

溶蚀作用等。其中，泥晶白云岩遭受了强烈压实、压溶作用，缝合线构造发育，孔隙度降低，使得储集层物性变差(图 2-d)；葡萄花边白云岩、泡沫

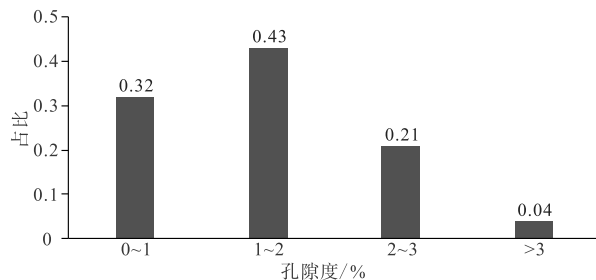
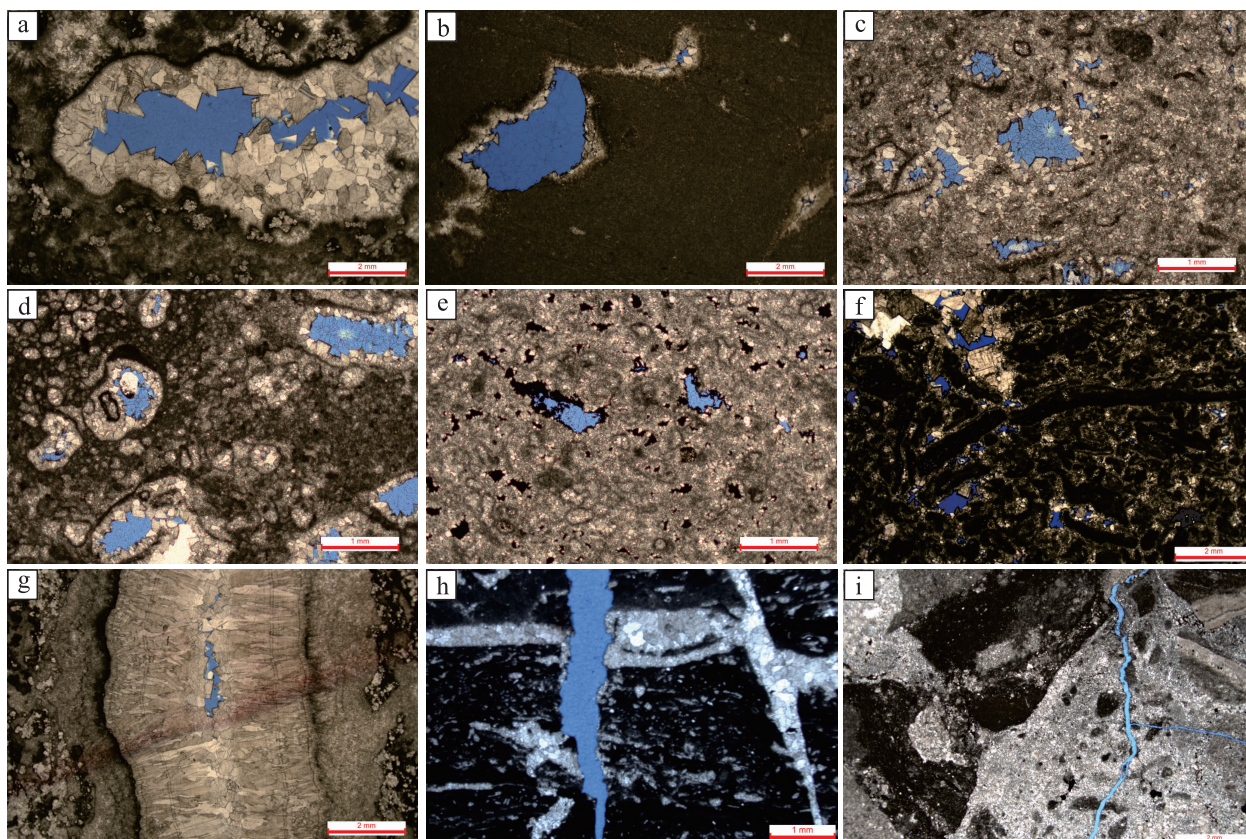


图 8 川北地区旺 1C 井灯影组二段孔隙度分布频率直方图

Fig. 8 Frequency histogram of porosity distribution of the Member 2 of Dengying Formation in Well Wang-1C, northern Sichuan Basin

绵层白云岩等胶结作用强烈，使得原始粒间孔隙多被充填破坏(图 9-a, 9-g)；而多期次溶蚀作用，包括准同生期局部暴露岩溶、灯二段末期桐湾构造运动 I 幕表生期岩溶和埋藏期岩溶等，其造成微生物白云岩发生溶蚀并形成部分溶蚀孔、洞(图 9-b, 9-c)，显著改善了储集层物性。此外，构造运动形成的裂缝也对储集层形成具建设性改造作用，因



a—晶间孔，葡萄花边白云岩，593.43~593.66 m；b—溶孔，泥晶白云岩，672.25 m；c—溶蚀孔，藻砂屑白云岩，826.48~826.75 m；d—粒内溶孔，藻砂屑白云岩，425.75 m；e—溶孔，溶孔边部见沥青充填，藻凝块砂屑白云岩，445 m；f—粒间溶孔，溶孔边部见沥青充填，含砾屑藻砂屑白云岩，408.5 m；g—晶间孔，葡萄花边白云岩，592 m；h—裂缝发育，未充填，藻凝块白云岩，396.25 m；i—裂缝，砾屑白云岩，405.5 m

图 9 川北地区旺 1C 井灯影组二段储集层特征

Fig. 9 Reservoir characteristics of the Member 2 of Dengying Formation in Well Wang-1C, northern Sichuan Basin

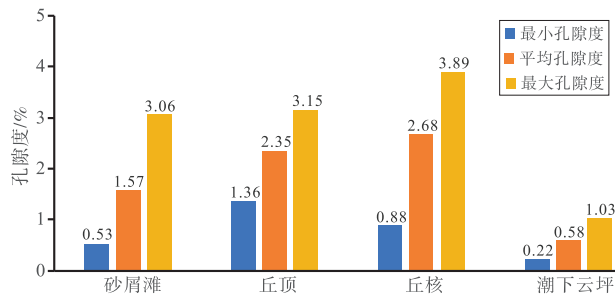


图 10 川北地区旺 1C 井灯影组二段不同微相孔隙度特征

Fig. 10 Porosity characteristics of each microfacies of the Member 2 of Dengying Formation in Well Wang-1C, northern Sichuan Basin

为除裂缝本身可以作为储集空间外，其还对溶洞等较大而孤立的储集空间具有连通—疏导作用(图 9-h, 9-i)。

5 结论

1) 川北地区旺 1C 井灯影组二段岩性以藻叠层白云岩、藻凝块白云岩、葡萄花边白云岩、泥晶白云岩和砂屑白云岩为主。

2) 旺 1C 井灯影组二段主要为一套局限台地沉积，进一步细分为微生物丘、颗粒滩、潮坪 3 种亚相。微生物丘可划分为丘基、丘核、丘顶等微相类型，与微生物丘滩相关的微相组合可分为潮下云坪—丘基—丘核、潮下云坪—砂屑滩、潮下云坪—丘基—丘核—砂屑滩等 3 类微相组合。单个微相组合序列规模较大，厚度一般在 25~50 m 之间。

3) 旺 1C 井灯影组二段储集层物性主要受微相类型、高频层序和成岩作用等因素控制，其中微生物丘核和丘顶储集层物性相对较好，其次为砂屑滩微相，潮下云坪微相储集层物性最差。

参考文献 (References)

- 邓宾, 刘树根, 姚根顺, 廖芸, 张本健, 张航, 孙玮, 吴娟, 刘文平, 吴伟, 李文正, 鲁鹏达, 王恒, 刘重江, 张智南. 2024. 四川超级含气盆地古生界大中型气田分布规律及其主控因素. 天然气工业, 44(7): 54–76. [Deng B, Liu S G, Yao G S, Liao Y, Zhang B J, Zhang H, Sun W, Wu J, Liu W P, Wu W, Li W Z, Lu P D, Wang H, Liu C J, Zhang Z N. 2024. Distribution pattern and main controlling factors of Paleozoic giant-and mediumsized gas fields of the Sichuan super gas basin in Southwest China. Natural Gas Industry, 44(7): 54–76]
- 范承蒙, 杨海林, 杨洋, 温汉捷, 樊海峰, 张洪杰, 李方会, 肖蛟龙, 周

- 煜. 2024. 湖北三峡地区黄陵隆起北缘灯影组微生物碳酸盐岩类型及古环境演化. 古地理学报, 26(5): 1256–1270. [Fan C M, Yang H L, Yang Y, Wen H J, Fan H F, Zhang H J, Li F H, Xiao J L, Zhou Y. 2024. Calcimicrolith types and paleoenvironment evolution of the Sinian Dengying Formation in northern margin of Huangling Uplift, Three Gorges of Hubei Province. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 26(5): 1256–1270]
- 郝毅, 周进高, 陈旭, 潘立银, 胡圆圆, 胡安平. 2015. 四川盆地灯影组“葡萄花边”状白云岩成因及地质意义. 海相油气地质, 20(4): 57–64. [Hao Y, Zhou J G, Chen X, Pan L Y, Hu Y Y, Hu A P. 2015. Genesis and geological significance of Upper Sinian Dengying dolostone with grape-lace shaped cement, Sichuan Basin. Marine Origin Petroleum Geology, 20(4): 57–64]
- 李启桂, 李克胜, 周卓铸, 燕继红, 唐欢阳. 2013. 四川盆地桐湾不整合面古地貌特征与岩溶分布预测. 石油与天然气地质, 34(4): 516–521. [Li Q G, Li K S, Zhou Z Z, Yan J H, Tang H Y. 2013. Palaeogeomorphology and karst distribution of tongwan unconformity in Sichuan Basin. Oil & Gas Geology, 34(4): 516–521]
- 刘静江, 李伟, 张宝民, 周慧, 袁晓红, 单秀琴, 张静, 邓胜徽, 谷志东, 樊茹, 王拥军, 李鑫. 2015. 上扬子地区震旦纪沉积古地理. 古地理学报, 17(6): 735–753. [Liu J J, Li W, Zhang B M, Zhou H, Yuan X H, Shan X Q, Zhang J, Deng S H, Gu Z D, Fan R, Wang Y J, Li X. 2015. Sedimentary palaeogeography of the Sinian in Upper Yangtze Region. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 17(6): 735–753]
- 刘凯铭, 王兴志, 韦明洋, 李阳, 陈旺, 王文之, 李勇, 马奎. 2025. 四川盆地蓬莱地区灯影组四段超深层白云岩储集层特征及主控因素. 古地理学报, 27(1): 109–125. [Liu K M, Wang X Z, Wei M Y, Li Y, Chen W, Wang W Z, Li Y, Ma K. 2025. Reservoir characteristics and main controlling factors of ultra-deep dolomite in the 4th Member of Sinian Dengying Formation in Penglai area, Sichuan Basin. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 27(1): 109–125]
- 刘树根, 宋金民, 罗平, QING Hairuo, 林彤, 孙玮, 李智武, 王浩, 彭瀚霖, 余永强, 龙翼, 万元博. 2016. 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. 成都理工大学学报(自然科学版), 43(2): 129–152. [Liu S G, Song J M, Luo P, Qing H R, Lin T, Sun W, Li Z W, Wang H, Peng H L, Yu Y Q, Long Y, Wan Y B. 2016. Characteristics of microbial carbonate reservoir and its hydrocarbon exploring outlook in the Sichuan Basin, China. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 43(2): 129–152]
- 鲁鹏达, 李泽奇, 田腾振, 吴娟, 孙玮, 乔占峰, 王永生, 刘树根, 邓宾. 2023. 四川盆地震旦系灯影组二段葡萄—花边结构成因及其对储层控制作用. 地学前缘, 30(6): 14–31. [Lu P D, Li Z Q, Tian T Z, Wu J, Sun W, Qiao Z F, Wang Y S, Liu S G, Deng B. 2023. The botryoidal-lace texture and its role in dolomite reservoir control in the 2nd member, Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin. Earth Science Frontiers, 30(6): 14–31]
- 罗冰, 杨跃明, 罗文军, 文龙, 王文之, 陈康. 2015. 川中古隆起灯影组

- 储层发育控制因素及展布. 石油学报, 36(4): 416–426. [Luo B, Yang Y M, Luo W J, Wen L, Wang W Z, Chen K. 2015. Controlling factors and distribution of reservoir development in Dengying Formation of paleo-uplift in central Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 36(4): 416–426]
- 彭瀚霖, 马奎, 张玺华, 文龙, 王云龙, 田兴旺, 李勇, 杨岱林, 钟佳倚, 孙奕婷, 任纪博, 豆霜. 2021. 四川盆地埃迪卡拉晚期层序地层特征和沉积演化. 沉积学报, 39(6): 1440–1450. [Peng H L, Ma K, Zhang B H, Wen L, Wang Y F, Tian X W, Li Y, Yang D L, Zhong J Y, Sun Y T, Ren J B, Dou S. 2021. Sequence stratigraphic characteristics and sedimentary evolution model of the late Ediacaran in the Sichuan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(6): 1440–1450]
- 任佳鑫, 宋金民, 刘树根, 赵容容, 罗忠, 李智武, 金鑫, 马行陟, 李柯然, 叶玥豪, 丁一, 李文皓, 赵玲丽, 田立洲. 2023. 四川盆地灯影组二段微生物丘滩体结构类型与沉积模式. 石油学报, 44(2): 312–328. [Ren J X, Song J M, Liu S G, Zhao R R, Luo Z, Li Z W, Jin X, Ma X Z, Li K R, Ye Y H, Ding Y, Li W H, Zhao L L, Tian L Z. 2023. Framework and sedimentary model of microbial mound-bank complex in Member 2 of Dengying Formation, Sichuan Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 44(2): 312–328]
- 宋金民, 刘树根, 李智武, 罗平, 杨迪, 孙玮, 彭瀚霖, 余永强. 2017. 四川盆地上震旦统灯影组微生物碳酸盐岩储层特征与主控因素. 石油与天然气地质, 38(4): 741–752. [Song J M, Liu S G, Li Z W, Luo P, Yang D, Sun W, Peng H L, Yu Y Q. 2017. Characteristics and controlling factors of microbial carbonate reservoirs in the Upper Sinian Dengying Formation in the Sichuan Basin, China. *Oil & Gas Geology*, 38(4): 741–752]
- 文龙, 罗冰, 钟原, 马奎, 严威, 张玺华, 李勇, 彭瀚霖, 李堃宇, 周红飞. 2021. 四川盆地灯影期沉积特征及槽-台体系成因模式. 成都理工大学学报(自然科学版), 48(5): 513–524, 590. [Wen L, Luo B, Zhong Y, Ma K, Yan W, Zhang X H, Li Y, Peng H L, Li K Y, Zhou H F. 2021. Sedimentary characteristics and genetic model of trough-platform system during the Dengying period in Sichuan Basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 48(5): 513–524, 590]
- 汪泽成, 姜华, 陈志勇, 刘静江, 马奎, 李文正, 谢武仁, 江青春, 翟秀芬, 石书缘, 李琦. 2020. 中上扬子地区晚震旦世构造古地理及油气地质意义. 石油勘探与开发, 47(5): 884–897. [Wang Z C, Jiang H, Chen Z Y, Liu J J, Ma K, Li W Z, Xie W R, Jiang Q C, Zhai X F, Shi S Y, Li Q. 2020. Tectonic paleogeography of Late Sinian and its significances for petroleum exploration in the middle–Upper Yangtze region, South China. *Petroleum Exploration and Development*, 47(5): 884–897]
- 魏国齐, 沈平, 杨威, 张健, 焦贵浩, 谢武仁, 谢增业. 2013. 四川盆地震旦系大气田形成条件与勘探远景区. 石油勘探与开发, 40(2): 129–138. [Wei G Q, Shen P, Yang W, Zhang J, Jiao G H, Xie W R, Xie Z Y. 2013. Formation conditions and exploration prospects of Sinian large gas fields, Sichuan Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 40(2): 129–138]
- 姚根顺, 郝毅, 周进高, 蒋伟雄, 文龙, 倪超, 潘立银, 张建勇. 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. [Yao G S, Hao Y, Zhou J G, Jiang W X, Wen L, Ni C, Pan L Y, Zhang J Y. 2014. Formation and evolution of reservoir spaces in the Sinian Dengying Fm of the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 34(3): 31–37]
- 张云峰, 唐雨, 唐洪明, 孙尧斌, 屈海洲, 王振宇, 刘冬玺. 2022. 川西北杨坝剖面埃迪卡拉系灯影组核形石组构特征. 沉积学报, 40(5): 1302–1312. [Zhang Y F, Tang Y, Tang H M, Sun Y B, Qu H Z, Wang Z Y, Liu D X. 2022. Fabric characteristics of oncoids from Yangba section, Ediacaran Dengying Formation, northwestern Sichuan. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(5): 1302–1312]
- 赵文智, 王小芳, 王鑫, 王坤, 沈安江. 2022. 四川盆地震旦系灯影组地层厘定与岩相古地理特征. 古地理论, 24(5): 852–870. [Zhao W Z, Wang X F, Wang X, Wang K, Shen A J. 2022. Stratigraphic sequence re-determination and lithofacies palaeogeographical characteristics of the Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 24(5): 852–870]
- 周进高, 张建勇, 邓红婴, 陈娅娜, 郝毅, 李文正, 谷明峰, 罗宪婴. 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. [Zhou J G, Zhang J Y, Deng H Y, Chen Y N, Hao Y, Li W Z, Gu M F, Luo X Y. 2017. Lithofacies paleogeography and sedimentary model of Sinian Dengying Fm in the Sichuan Basin. *Natural Gas Industry*, 37(1): 24–31]
- 邹才能, 杜金虎, 徐春春, 汪泽成, 张宝民, 魏国齐, 王铜山, 姚根顺, 邓胜徽, 刘静江, 周慧, 徐安娜, 杨智, 姜华, 谷志东. 2014. 四川盆地震旦系一寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现. 石油勘探与开发, 41(3): 278–293. [Zou C N, Du J H, Xu C C, Wang Z C, Zhang B M, Wei G Q, Wang T S, Yao G S, Deng S H, Liu J J, Zhou H, Xu A N, Yang Z, Jiang H, Gu Z D. 2014. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development*, 41(3): 278–293]
- Song J M, Jin X, Luo Z, Liu S G, Liu S B, Ma X Z, Li Z W, Lu X S, Zhao L L, Li K R, Ren J X, Tian L Z, Deng H S. 2024. Depositional model of the Member Deng-2 marginal microbial mound-bank complex of the Dengying Formation in the southwestern Sichuan Basin, SW China; implications for the Ediacaran microbial mound construction and hydrocarbon exploration. *Petroleum Science*, 21(2): 806–822.
- Xia Q Y, Guo Z H, Zhang F, Zhang L, Xu R, Wang X, Li W Z, Shi S Y, Yan H J, Liu Y Y. 2025. Sedimentary architecture of the microbial mound-shoal complex: a case study of the Ediacaran Dengying Formation, Sichuan Basin, China. *Frontiers in Earth Science*, 12: 1429584.

(责任编辑 张西娟)