

# 冀中坳陷任丘潜山雾迷山组微生物白云岩 储层特征及演化

罗宁<sup>1</sup>, 薛辉<sup>2</sup>, 李建敏<sup>3</sup>, 张军<sup>3</sup>, 朱萍<sup>2</sup>, 汤小琪<sup>2</sup>, 韩春元<sup>2</sup>, 叶大帅<sup>2</sup>

1 中国石油华北油田公司; 2 中国石油华北油田公司勘探开发研究院;  
3 中国石油华北油田公司河北雄安华油清洁能源有限公司

**摘要** 综合利用野外露头、钻井岩心、岩石薄片、测录井及分析化验等资料,对冀中坳陷任丘潜山雾迷山组微生物白云岩储层特征及类型开展研究,总结分析优质储层形成控制因素及演化规律。结果表明:雾迷山组主要发育微生物白云岩和与微生物相关的颗粒白云岩,其中微生物白云岩包括叠层石、凝块石、层纹石和核形石白云岩,与微生物相关的颗粒白云岩主要为砂砾屑白云岩;储集空间分为孔隙、裂缝、溶洞3大类,储层整体物性较差,整体上属于孔隙缝复合型低孔低渗储层,可进一步划分为I、II、III类储层。沉积环境是储层形成与演化的基础,溶蚀作用是形成多类型储集空间的关键,构造破裂作用是形成有效储集空间的重要补充。雾迷山组微生物白云岩储层演化经历沉积-同生成孔、I期表生增孔、浅埋藏减孔、褶皱断裂改造-II期表生增孔、深埋藏减孔等5个阶段,多因素共同作用最终形成现今2%~5%的孔隙度。

**关键词** 微生物白云岩; 潜山; 储层特征; 控制因素; 储层演化; 雾迷山组; 冀中坳陷

**中图分类号**: TE122.2 **文献标识码**: A

## 0 前言

微生物岩是由微生物形成或与微生物有关的岩石,主要分布在中—新元古代、寒武纪和早奥陶世古老地层中<sup>[1-2]</sup>。国内外勘探实践证明,微生物碳酸盐岩可作为良好的储层<sup>[3]</sup>。在美国墨西哥湾地区<sup>[4]</sup>,俄罗斯东西伯利亚地区<sup>[5]</sup>,巴西桑托斯盆地<sup>[6]</sup>,中国四川盆地<sup>[7]</sup>、塔里木盆地<sup>[8]</sup>和渤海湾盆地<sup>[9]</sup>等地都发现与微生物建造相关的优质碳酸盐岩储层,并获得重大油气发现,显示出良好的勘探前景。任丘油田是我国第一个中—新元古界海相碳酸盐岩古潜山高产大油田,油气主要赋存在蓟县系雾迷山组微生物白云岩储层中。前人对雾迷山组的研究主要集中在岩性、储集空间、热储温度、成岩、构造和成藏等方面<sup>[10-15]</sup>,鲜有从微生物岩的角度分析储层特征和成因。实际上,任丘潜山雾迷山组主要发育以孔、洞、缝为储集空间的岩溶裂隙型微生物白云

岩储层<sup>[16]</sup>,优质储层的形成与微生物关系密切<sup>[17]</sup>。为进一步认识任丘潜山雾迷山组微生物白云岩储层特征及形成演化控制因素,本文以露头剖面和岩心资料为基础,通过薄片观察、同位素测试、孔渗分析、压汞实验等研究工作,探讨任丘潜山雾迷山组微生物白云岩岩石类型和储层特征,明确储层控制因素和演化规律,以为后期油气及地热资源勘探提供地质依据。

## 1 地质背景

任丘潜山构造上位于渤海湾盆地冀中坳陷中部,是在前中元古代结晶基底上发育起来的断棱型潜山,潜山沿任西大断层呈北东向展布,整体具有南低北高、西抬东倾的构造特征。潜山的形成大体经历太古代地槽及前地槽、中新元古代地台和中生代断陷盆地3个发展阶段,多期次构造运动导致基岩块断和地层翘倾<sup>[18-19]</sup>,最终形成潜山的古地貌构

收稿日期:2022-03-02; 改回日期:2022-11-08; 网络出版日期:2023-05-24

本文受中国石油勘探与生产分公司科研项目“雄安新区及周边地热资源评价及综合利用”(编号:kt2018-19-03)和中国石油天然气股份有限公司科技重大专项“华北油田持续有效稳产勘探开发关键技术研究与应用”(编号:2017E-15)共同资助

**第一作者**: 罗宁,博士,教授级高级工程师,主要从事油气勘探及地热资源综合利用。通信地址:062550 河北省任丘市建设中路1号; E-mail: jhc\_luon@petrochina.com.cn

**通信作者**: 薛辉,硕士研究生,工程师,主要从事沉积、储层地质学综合研究工作。通信地址:062550 河北省任丘市建设中路1号; E-mail: XH630445@163.com

造格局。研究区潜山受差异性剥蚀作用的影响,雾迷山组厚度向西南方向逐渐减薄(图1a)。

雾迷山组沉积时期,华北地区属于陆表海沉积环境<sup>[20]</sup>,整体为一碳酸盐台地,该时期气候温暖湿润,适合藻类、菌类等微生物生长,研究区主要发育微生物白云岩、与微生物相关的颗粒白云岩以及少量硅质、泥质白云岩(图1b)。从目前的钻井资料和

野外剖面来看,雾迷山组遭受不同程度的风化剥蚀,地层厚度变化较大(在719~3 416 m之间)。受三级海平面升降变化的影响,研究区雾迷山组经历4个沉积旋回,以此为依据,自下而上可划分为雾一段—雾四段。雾迷山组各段连续沉积,与下伏杨庄组整合接触,与上覆洪水庄组不整合接触,优质储层在雾一段至雾四段的微生物白云岩中均有发育。

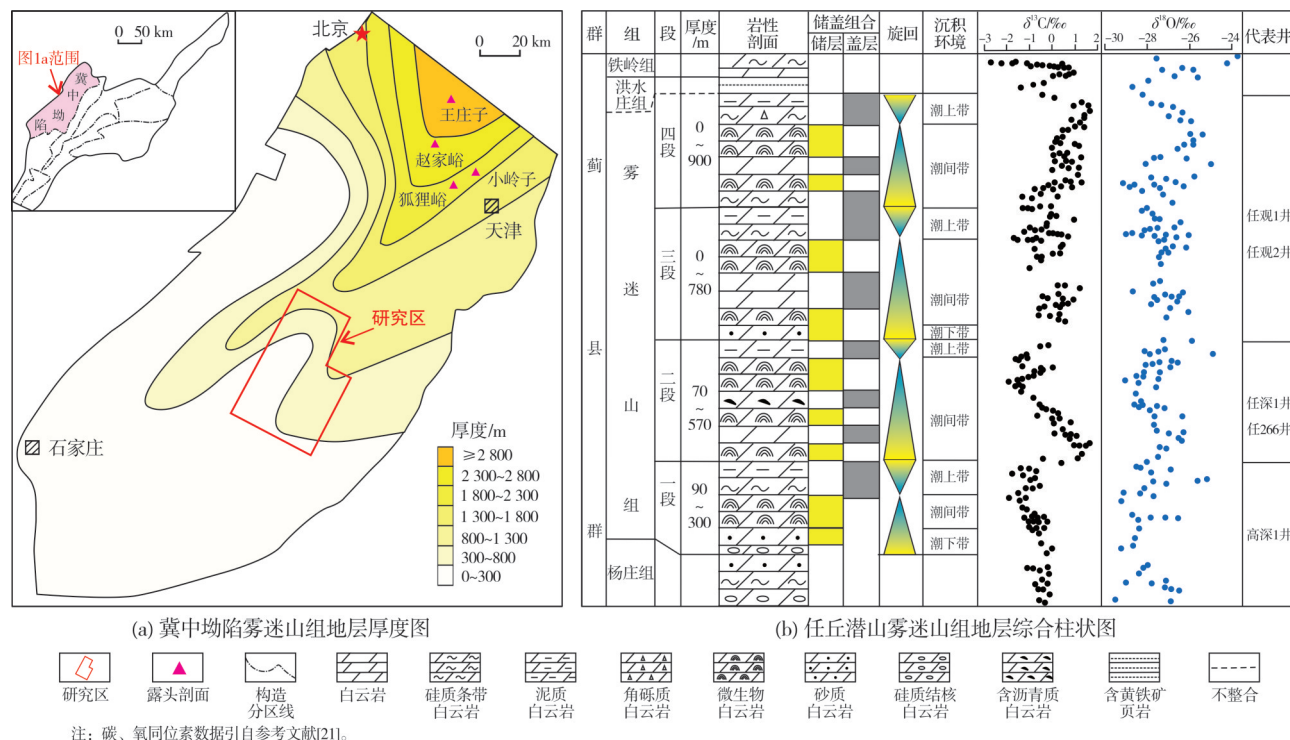


图1 冀中坳陷雾迷山组地层厚度与地层综合柱状图

Fig. 1 Thickness contour map and stratigraphic column of Wumishan Formation in Jizhong Depression

## 2 白云岩储层特征

### 2.1 岩石学特征

观察冀中坳陷王庄子、赵家峪、狐狸峪、小岭子等4条雾迷山组野外剖面露头,分析任丘潜山8口取心井岩心以及500余块矿物薄片,认为研究区雾迷山组岩石类型多样,以微生物白云岩和与微生物相关的颗粒白云岩为主,约占整个雾迷山组白云岩的80.3%。

#### 2.1.1 微生物白云岩

微生物丘是微生物在生长过程中,通过不断粘结与捕获碎屑沉积物,形成的具有正地貌特征的碳酸盐建隆<sup>[22]</sup>,是微生物白云岩形成的基础。依据不同的结

构与构造,微生物白云岩可进一步划分为叠层石、凝块石、层纹石和核形石等4种类型白云岩(图2)。

**叠层石白云岩** 主要发育在潮间带—浅潮下带。研究区叠层石岩性主要为浅灰色中厚层状粉—中晶白云岩,纹层形态多样,呈连续、断续或杂乱状展布(图2a),可进一步分为层状、波状、丘状、锥状等4种形态。镜下叠层石内部纹层清晰,具亮暗相间的特点(图2b),亮纹层由粉晶白云石或少量砂级凝块组成,暗纹层由泥晶白云石组成,局部见溶蚀孔、溶蚀缝沿纹层发育。

**凝块石白云岩** 作为一种以凝块状组构为特征的微生物岩,在研究区十分发育,常与锥状或丘状叠层石白云岩共生。研究区凝块石白云岩成层性差,以厚层块状产出,发育在潮下带高能环境。



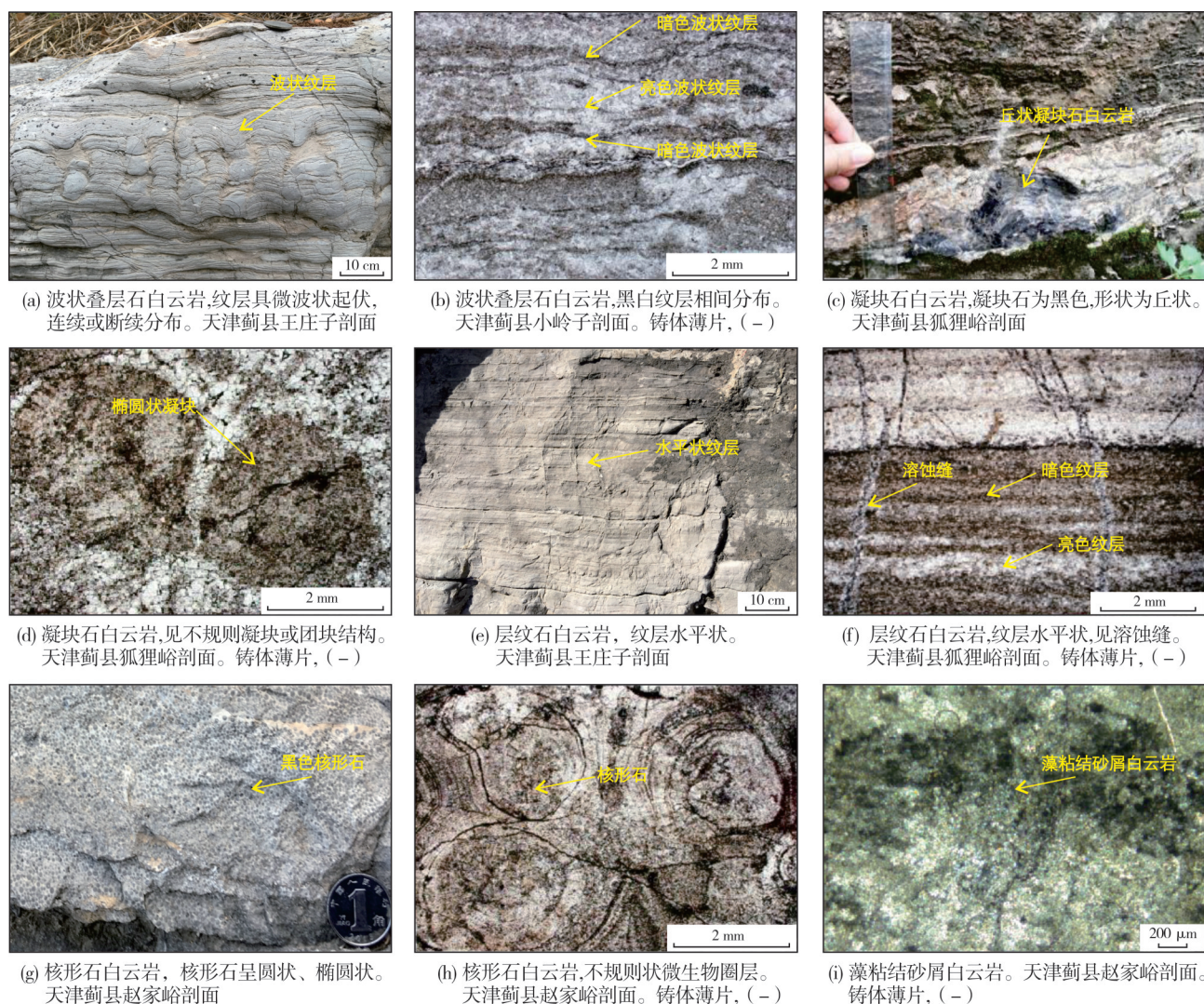


图2 冀中坳陷任丘潜山雾迷山组微生物白云岩岩石特征

Fig. 2 Petrology characteristics of microbial dolomite of Wumishan Formation in Renqiu buried hill, Jizhong Depression

岩性主要为深色中厚层一块状粉细晶白云岩,野外观察凝块石白云岩颜色较深,为灰黑色—黑色,具有定向层理和不规则团块2种结构,前者可形成定向性好、横向稳定的层状体,后者多呈穹窿状或丘状产出(图2c);镜下观察凝块形态多样,呈圆状、椭圆状(图2d)、长条状,成岩作用强烈,无论是凝块石还是凝块间胶结物,都被白云石化,表现出与砂—砾屑相似的特征。

**层纹石白云岩** 层纹石白云岩是富含有机质的一类微生物岩,内部构造与叠层石白云岩相似,但纹层比叠层石细小,常与波状、丘状叠层石白云岩共生,主要发育在水动力较弱的浅水潮间带。野外剖面观察发现层纹石多具油脂光泽,富含沥青质,岩性主要为灰色—深灰色泥—细晶白云岩,内

部纹层多呈水平状,横向上表现为连续稳定的层状分布(图2e);纵向上表现为明暗相间的纹层紧密堆叠,可形成数十厘米厚的层纹石微生物岩层。镜下观察发现层纹石纹层近水平状(图2f),由不同起伏幅度的明暗相间的纹层组成,其中暗纹层富含有机质,由粉屑、泥晶白云石构成,亮纹层由砂屑、凝块以及晶粒白云石构成,见溶蚀缝穿层发育。

**核形石白云岩** 核形石白云岩是具有同心圆状纹层构造的豆状或鲕状微生物岩,主要发育在水动力条件较强的潮间带下部环境。研究区核形石白云岩厚度较薄,岩性主要为浅色块状粉晶白云岩。剖面观察发现核形石多为黑色,横向上分布不稳定,延伸较短,延伸距离为10~30 m;纵向上表现为规则或不规则的圆状或椭圆状密集产出(图2g),



构成数米厚的块状集合体。镜下观察发现核形石单个大小不一,粒径为0.5~5 mm,多孤立存在,也有多个核形石相互粘连形成更大的复合体(图2h)。核形石白云岩同样由亮暗纹层组成,亮纹层主要为微粉晶白云石,暗纹层为富有机质的泥晶白云石,核形石具有明显的微生物同心圈层结构,中心由一个或者多个被包裹的凝块或粉—砂屑组成,核形石之间多被粉—中晶白云石充填。

### 2.1.2 与微生物相关的颗粒白云岩

与微生物相关的颗粒白云岩在冀中坳陷雾迷山组较为发育,常与微生物白云岩组合出现,共同构成微生物丘滩复合体<sup>[23]</sup>,作为研究区重要的储集体类型,主要发育在潮坪环境中水动力较强的潮下高能带。研究区颗粒白云岩中的颗粒类型多样,以砂砾屑为主,少量为鲕粒、藻团块和球粒。野外剖面观察发现颗粒白云岩呈灰白色—灰色,在新鲜面可见明显的颗粒形态,单层厚度较薄,为10~20 cm;薄片观察发现颗粒白云岩中的颗粒大小混杂,粒径为0.06~4 mm,分选性较差,磨圆度较好,多为褐色球状或椭球状,颗粒之间为点、线接触,颗粒含量在60%~90%之间,颗粒间胶结物多为泥—亮晶白云石,见不同程度的硅化。同时,由于微生物及其分泌物粘连、捕获、缠绕,形成的部分颗粒具有微生物粘结构(图2i),见溶蚀孔缝。

## 2.2 储集空间特征

岩心、薄片、测井等资料揭示研究区雾迷山组微生物白云岩储集空间类型多样。在前人划分的基础上<sup>[11,24]</sup>,本文依据储集空间的成因机理和形态特征,将雾迷山组储集空间划分为孔隙、裂缝、溶洞3大类,各类储集空间一般不孤立存在,多相互连通形成复杂的储集体。其中,孔隙类型又可划分为粒间孔、晶间(溶)孔、格架孔、粒间(内)溶孔、体腔溶孔、铸模孔;裂缝类型可划分为构造缝、溶蚀缝、缝合线。

### 2.2.1 孔隙

孔隙是研究区最为主要的储集空间类型,可分为原生和次生两大类。原生孔隙主要包括残余粒间孔、晶间孔和格架孔(图3a),研究区原生孔隙一般较少,主要发育在颗粒白云岩和凝块石白云岩中,多呈孤立状,形态规则,连通性较差,孔径细小,在0.01~0.2 mm之间。次生孔隙主要包括晶间(溶)孔(图3b)、微生物体腔溶孔(图3c)、微生物组构铸模孔(图3d)、微生物组构超大溶孔等。研究区次生孔隙分布相对广泛,主要发育在叠层石白云岩和凝块石白云岩中,孔径较大,通常为0.1~1.5 mm,形状不规则,呈溶蚀港湾状,连通性较好,常与溶蚀缝组合发育。

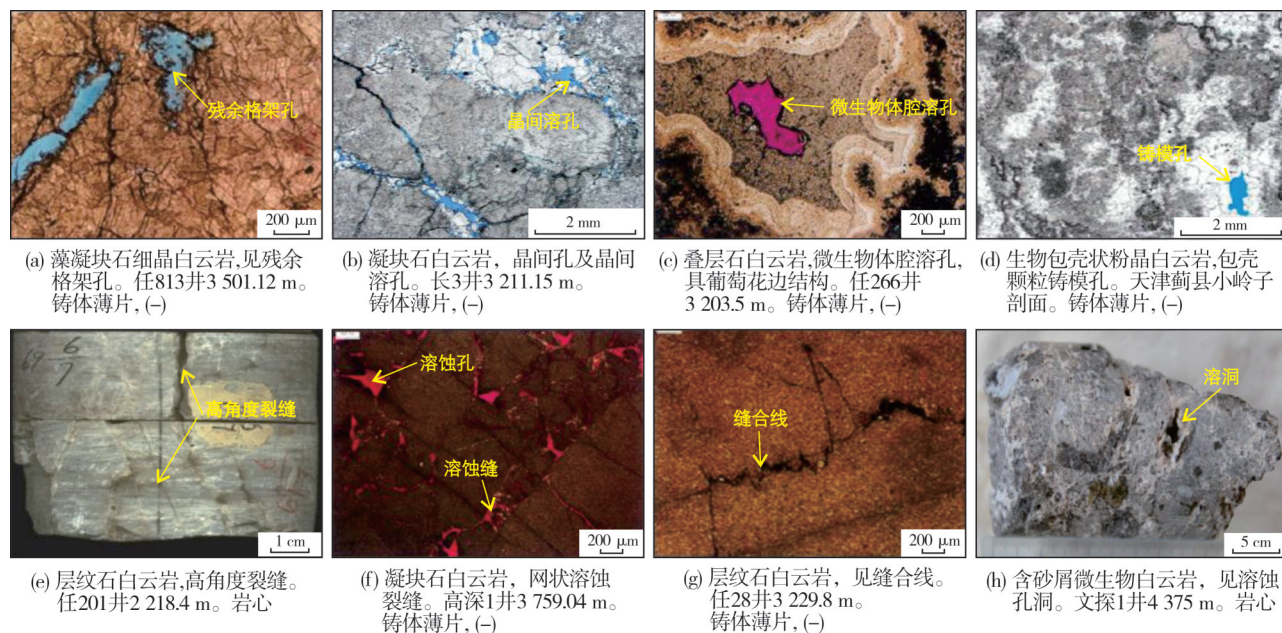


图3 冀中坳陷任丘潜山雾迷山组微生物白云岩储集空间类型

Fig. 3 Reservoir space types of microbial dolomite of Wumishan Formation in Renqiu buried hill, Jizhong Depression



## 2.2.2 裂缝

研究区裂缝主要包括构造缝、溶蚀缝和少量缝合线。构造缝在雾迷山组微生物白云岩中普遍发育,野外露头观察发现裂缝多呈北西—南东走向,分布较为规则,常见两组或两组以上不同产状的裂缝相互切割、限制,形成网状缝。观察研究区5口取心井92.8 m的岩心,发现构造缝以高角度缝一直立缝为主(图3e),低角度和水平的裂缝发育较少,裂缝倾角为 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ ,裂缝面整体平直,见擦痕和阶步现象,单条裂缝延伸距离一般小于20 cm;镜下观察发现裂缝的宽度较小,多为小缝(0.1~1.0 mm)或者微缝( $<0.1$  mm),常被白云石、方解石、硅质、燧石等半充填—充填。溶蚀缝是成岩流体沿早期裂缝溶蚀改造而形成,裂缝形态不规则,呈蛇曲状、树枝状、网格状,可将各类孔隙、溶洞连接起来(图3f)。研究区缝合线发育程度较高,缝宽0.05~0.10 mm,缝面不规则,呈齿状,起伏幅度从毫米级到厘米级不等(图3g),其间多被泥质、油质或沥青质等充填,对储层物性改善有限。

## 2.2.3 溶洞

溶洞作为研究区一种常见的储集空间类型,主要是由早期残余孔缝经后期溶蚀作用改造扩溶形成<sup>[25]</sup>。溶洞在野外剖面 and 岩心上广泛发育,大小不等,直径为1~5 cm,蜂窝状或沿裂缝呈串珠状发育(图3h),形态为圆形或椭圆形。作为多期溶蚀作用的产物,溶洞集中分布在雾迷山组顶部的叠层石白云岩、凝块石白云岩和微生物粘结的颗粒白云岩中,似层状稳定分布,充填程度低,连通性好。

## 2.3 储层物性特征

统计任丘潜山雾迷山组微生物白云岩235块小直径岩样物性数据,发现孔隙度变化范围较大(图4a),平均为3.55%,集中分布在0.5%~3%之间,约占样品总数的63.75%;渗透率集中分布范围为 $(0.01\sim 5)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,平均为 $0.89\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,有56.47%的样品渗透率小于 $1\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ (图4b)。由孔—渗交会图(图4c)可见,微生物白云岩储层孔渗相关性差,具分区性特点:A区呈现低孔、高渗特点,孔渗不存在正相关性,具裂缝渗流特征<sup>[26]</sup>,属于裂缝型储层;B区孔渗正相关性明显,渗透率随孔隙度增大而增大,说明孔隙发育,属于孔隙型储层;C区具有高孔、低渗特征,为孤立的溶洞发育区,属于溶洞型储

层。总体上,任丘潜山雾迷山组微生物白云岩储层物性较差,孔渗关系复杂,储集空间类型多样,属于孔洞缝复合型低孔低渗储层。同时,在相对致密背景下发育部分孔渗性较高的储层。

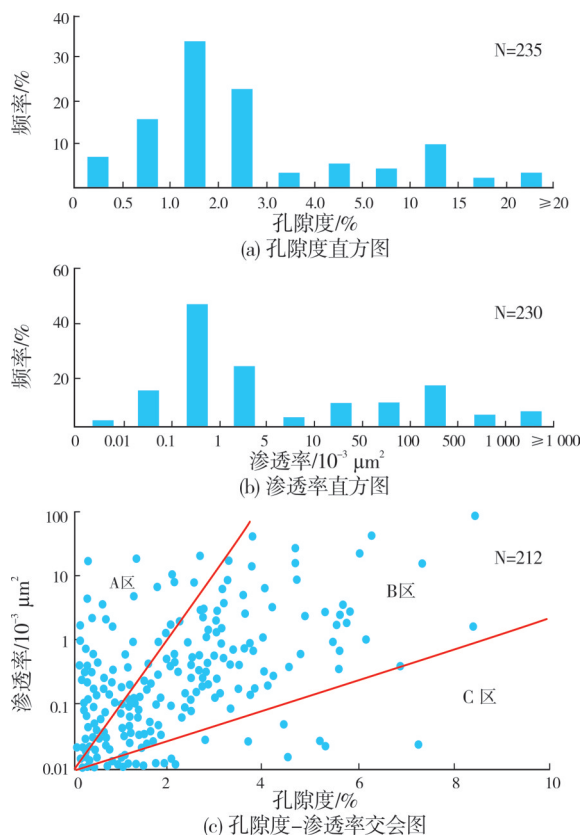


图4 冀中坳陷任丘潜山雾迷山组微生物白云岩储层孔渗特征

Fig. 4 Porosity and permeability characteristics of microbial dolomite reservoir of Wumishan Formation in Renqiu buried hill, Jizhong Depression

## 2.4 储层分类评价

依据压汞、相渗及物性测试数据将研究区微生物白云岩储层划分为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类(表1)。

**Ⅰ类储层** 该类储层发育较少,岩性主要为凝块石、核形石、锥状叠层石白云岩,溶蚀孔洞缝发育。孔隙度在3.0%~9.8%之间,平均孔隙度为3.96%,渗透率在 $(10\sim 200)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 之间,平均渗透率为 $35.64\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,缝洞面孔率大于1.73%,属于中孔中渗储层。此类储层排驱压力低,一般小于0.1 MPa,饱和度中值压力低,小于0.5 MPa(图5a),以大孔喉为主,少量为中孔喉,平均喉道直径大于 $1.30\mu\text{m}$ ,且大于 $1\mu\text{m}$ 的宽喉道控制60%以上的孔隙体积(图5b),储渗性能较好。

表1 冀中坳陷任丘潜山雾迷山组微生物白云岩储层分类

Table 1 Classification of microbial dolomite reservoir of Wumishan Formation in Renqiu buried hill, Jizhong Depression

类别	岩石类型	岩心物性		孔隙结构参数				喉道类型	含油级别
		平均孔隙度/%	平均渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	饱和度中值压力/MPa	汞饱和度/%	平均分选系数	平均喉道直径/ $\mu\text{m}$		
I类	凝块石白云岩、核形石白云岩、锥状叠层石白云岩	3.96	35.64	<0.5	>80	3.96	>1.30	短宽喉道或裂缝型	含油、油斑
II类	微层状凝块石白云岩、波状叠层石白云岩、砂砾屑白云岩	2.54	15.42	0.5~10	50~80	1.82	0.40	网格状喉道或微裂缝型	油斑、油迹
III类	层纹石白云岩、含泥(硅)质微生物白云岩	1.80	<1	>10	<50	0.54	0.14	弯曲细长喉道或无喉道连通	油迹、无

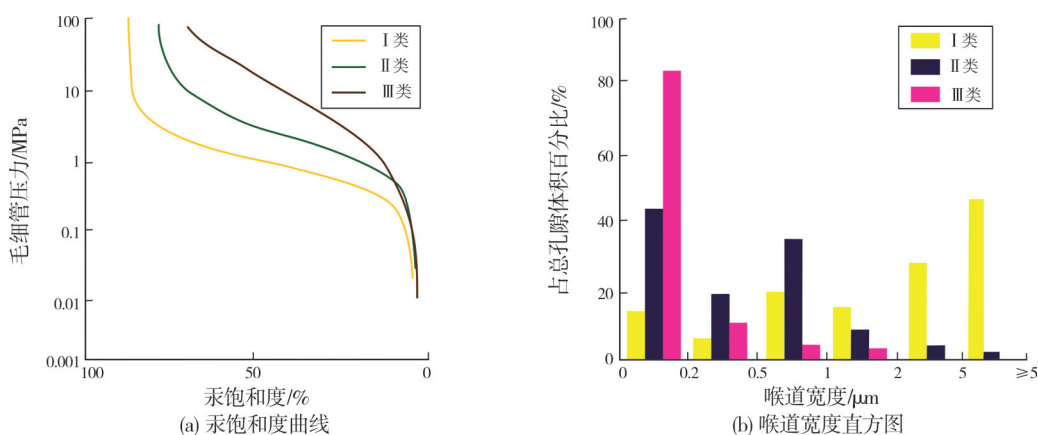


图5 冀中坳陷任丘潜山雾迷山组微生物白云岩储层孔隙结构特征

Fig. 5 Pore structure characteristic of microbial dolomite of Wumishan Formation in Renqiu buried hill, Jizhong Depression

**II类储层** 该类储层在全区发育广泛,岩性主要为微层状凝块石、波状叠层石、砂砾屑白云岩。储层物性稍差,见溶蚀孔隙和少量裂缝,孔隙度在2.0%~3.0%之间,平均孔隙度为2.54%,平均渗透率为 $15.42 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,缝洞面孔率1.08%,为低孔低渗储层。储层排驱压力平均为0.5 MPa,饱和度中值压力在0.5~10 MPa之间,平均为2 MPa(图5a),以中细孔喉为主,喉道中值半径在0.2~1  $\mu\text{m}$ 之间,平均为0.40  $\mu\text{m}$ ,大于1  $\mu\text{m}$ 的宽喉道控制的孔隙体积仅为19.34%(图5b),储渗性能较差。

**III类储层** 该类储层岩性以层纹石白云岩和含泥质、硅质微生物白云岩为主,岩性致密,为泥粉晶结构。孔隙和裂缝均不发育,储层物性差,平均孔隙度为1.80%,平均渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,缝洞面孔率为0.52%,为特低孔、特低渗储层。储层排驱压力高,大于1 MPa,饱和度中值压力高,达10 MPa以上(图5a),80%以上的孔隙体积受小于0.2  $\mu\text{m}$ 喉

道控制(图5b),平均喉道直径为0.14  $\mu\text{m}$ ,主要为小孔喉,基本不具备储油能力。

### 3 储层发育主控因素

#### 3.1 沉积环境

沉积环境通过控制不同沉积相带从而控制微生物碳酸盐岩的岩石类型与孔隙发育特征。研究区雾迷山组有利储层发育在水动力较强的潮下带高能环境中,具有强而稳定的水动力条件,可以淘洗大量的灰泥沉积物,留下各种粗的生物(碎屑)颗粒,从而发育团块、凝块、砂屑等高能型的核形石、凝块石以及少量锥状叠层石白云岩(图6)。高能环境下形成的丘滩体,易暴露遭受大气淡水的溶蚀改造,故孔洞发育,储层物性和孔隙结构较好,多发育I类储层。潮间带下部属中—高能环境,在研究区主要发育波状和丘状叠层石白云岩,发育各种原生粒间(溶)孔、生物格架孔和体腔孔,



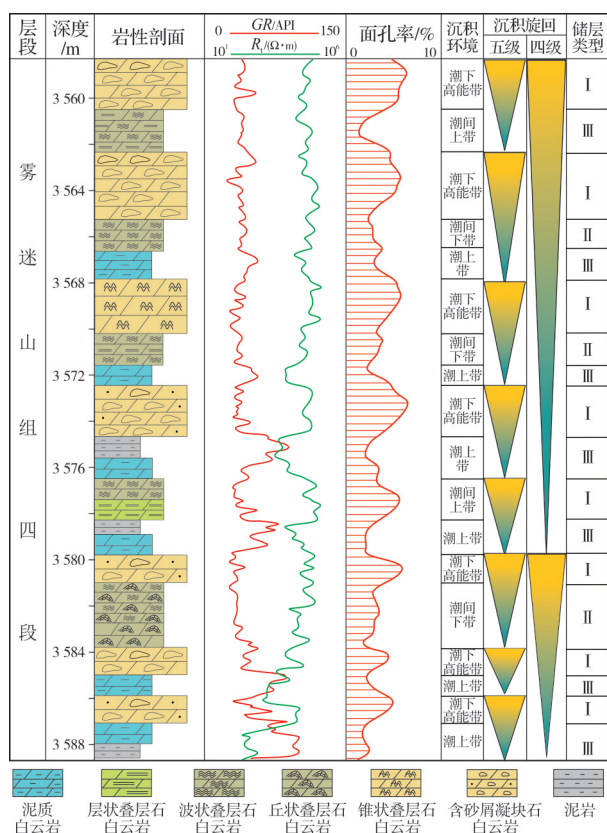


图6 冀中坳陷任丘潜山任203井雾迷山组四段微生物丘滩复合体沉积旋回特征

Fig. 6 Sedimentary cycles of microbial mound-shoal complex of the 4th member of Wumishan Formation in Well Ren-203 of Renqiu buried hill, Jizhong Depression

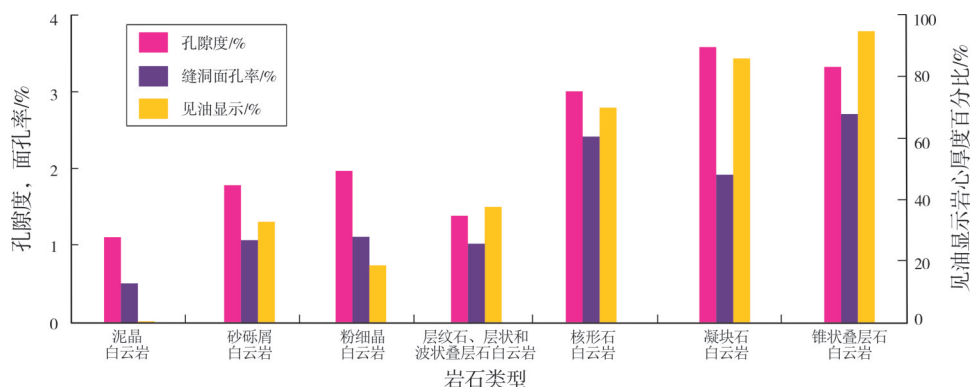


图7 冀中坳陷任丘潜山任7井区雾迷山组微生物结构与储层物性、含油性关系

Fig. 7 Relationship between microbial structure and physical properties, oil saturation of Wumishan Formation in Well Ren-7 area of Renqiu buried hill, Jizhong Depression

### 3.2 溶蚀作用

溶蚀作用对微生物白云岩优质储层的形成至关重要<sup>[28]</sup>。观察岩心、薄片、野外露头发现,研究区雾迷山组微生物白云岩溶蚀孔洞发育,具多期次岩溶改造的特点,综合分析认为主要经历(准)同生

属于Ⅱ类储层。潮间带上部和潮上带属于低能环境,主要发育层状叠层石白云岩和泥质白云岩,生物碎屑粒度小,泥质含量较高,储层孔隙不发育,连通性较差,属于Ⅲ类储层。

沉积环境通过控制微生物结构,从而决定微生物碳酸盐岩储集空间类型和物性特征<sup>[27]</sup>。前面的分析表明,高能环境的潮下带属于有利的沉积相带,发育的Ⅰ类储层具有较粗的生物(碎屑)颗粒和相对坚硬的微生物格架,抗压能力强,十分有利于原生孔隙的保存和次生溶蚀孔洞的发育。如潮下带发育的凝块石白云岩,薄片观察见重结晶现象,形成的晶粒相对较粗,大小均匀,晶间孔和溶蚀孔隙发育,储层物性较好,平均孔隙度为3.44%;潮间带属于相对低能环境,水动力条件较弱,发育的Ⅱ类储层和Ⅲ类储层以波状叠层石、层纹石白云岩为主,富含泥质及有机质,窗格孔和粒间溶蚀孔多孤立发育,连通性较差,且多被亮晶白云石胶结充填,储层物性较差,平均孔隙度为1.87%。进一步分析发现,微生物白云岩晶粒越粗,孔隙度越大,缝洞面孔率也越高,岩心含油率也越大(图7)。如微生物白云岩中粗结构的核形石、凝块石和锥状叠层石白云岩的孔隙度较大,平均为3.1%,含油率较高,一般大于70%;而层纹石白云岩、砂砾屑白云岩孔隙度较低,一般不超过2%,含油性较差,一般小于40%。

期、表生期和埋藏期3期溶蚀作用。

(准)同生期溶蚀作用发生在沉积物沉积后不久,伴随海平面的升降,处于松散或半固结状态的微生物岩间歇性出露海面,接受大气淡水的溶蚀改造。该时期溶蚀作用形成的储集空间主要为粒内(间)溶孔、铸模孔等组构选择性溶孔。研究区雾迷

山组微生物白云岩沉积时期,海平面的频繁变化,十分有利于(准)同生期大气淡水溶蚀作用的发生。以任203井为例(图6),纵向上形成多套向上变浅的沉积旋回,结合物性数据,发现旋回顶部孔隙发育,且越靠近顶部界面,面孔率越高,这显然是(准)同生期沉积物周期性暴露溶蚀的结果。

任丘地区雾迷山组经历多期构造运动,强烈的褶皱和断块运动造成地层抬升,雾迷山组广泛暴露,遭受长期的风化剥蚀,发生表生岩溶作用。表生期大气淡水溶蚀形成的储集空间以非构造选择性溶蚀孔、洞和裂缝为主<sup>[29]</sup>。根据岩心观察,雾迷山组潜山顶面溶蚀洞发育,呈点状或串珠状(图3h),未见充填,面孔率可达15%。同时,在潜山顶面可见大量角砾支撑的岩溶角砾岩(图8a),角砾大多呈棱角一次棱角状,周围多被泥质或泥晶方解石以及白云石包裹充填,推测其形成机制为雾迷山组出露地表后,形成岩溶洞穴,洞穴周围岩层原地溶蚀垮塌、堆积、充填而形成。雾迷山组在靠近潜山顶面常见钻具放空、泥浆漏失、井径扩径等现象;地化资料显示,雾迷山组顶部微生物岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显负偏移(图1b), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值变化范围为0.706 58~0.710 28,平均为0.703 50,明显高出同时期的海水,说明有大气淡水溶蚀作用的存在。以上特征综合说明雾迷

山组曾遭受表生岩溶作用,特别是在雾迷山组顶部,统计距离潜山顶面150 m范围内的储层物性,发现平均孔隙度和渗透率分别可达4.35%和 $45.73 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。而距离潜山顶面大于150 m的地层,储层孔隙度多小于2%,渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。可见,表生岩溶作用极大地改善了微生物白云岩的储集物性,是潜山顶面形成优质储层的关键,也是潜山储层纵向差异性分布的主要因素。

埋藏期溶蚀作用发生在晚成岩阶段,对中深层微生物碳酸盐岩储层的形成至关重要。研究区微生物白云岩在经历同生期和表生期岩溶作用产生大量储渗空间后,进入埋藏阶段。在相对封闭、半封闭的环境中,随着埋藏深度的增加,温度升高,具有较高有机质含量的微生物岩会形成有机酸、 $\text{CO}_2$ 等酸性腐蚀性物质,对围岩进行溶蚀而生成溶蚀孔隙。研究发现,任丘地区雾迷山组微生物白云岩主要发育热液溶蚀和有机酸溶蚀2种埋藏溶蚀作用,有几点依据:①岩心上可以见到大小不等、形状各异的热液角砾(图8b);②溶蚀孔洞被鞍状白云石、石英等热液矿物部分或完全充填(图8c);③非选择性溶蚀孔隙发育,孔隙大小不一,形状不规则,并且伴生沥青质充填(图8d);④溶蚀裂缝多由早期构造缝和缝合线溶蚀改造形成,切割膏质条带(图8e),说

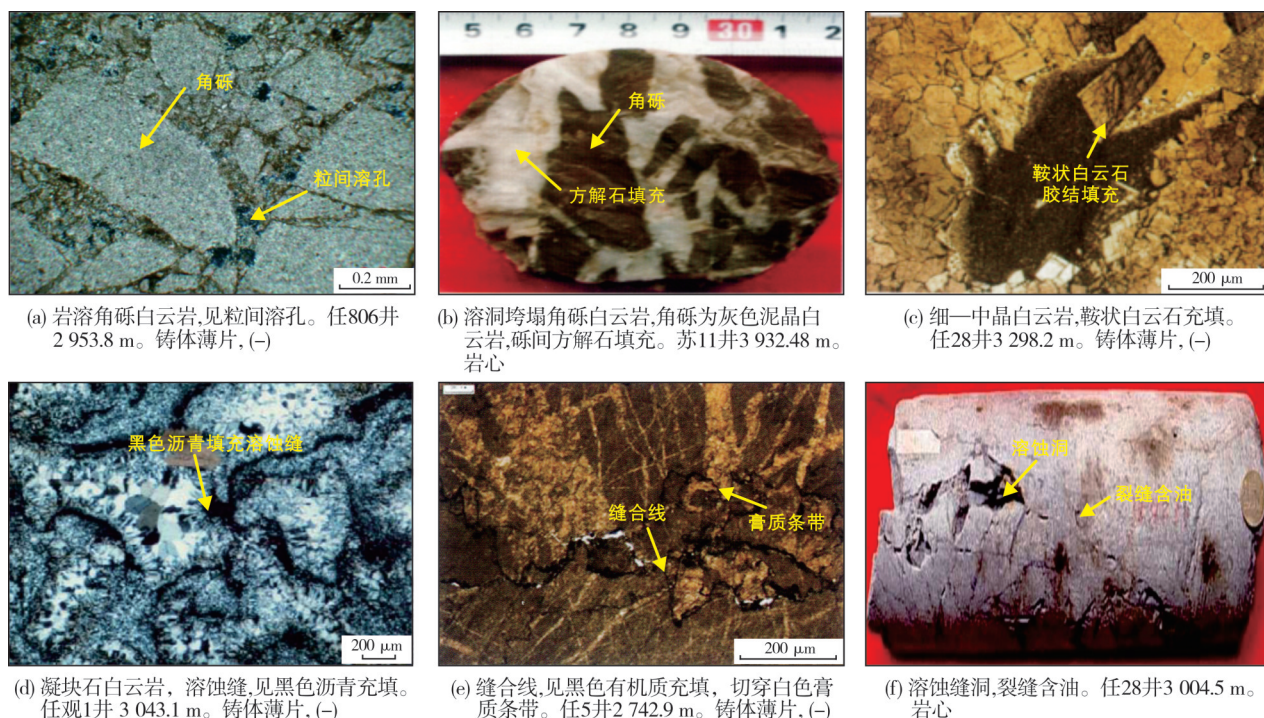


图8 冀中坳陷雾迷山组岩溶作用特征

Fig. 8 Karstification characteristics of Wumishan Formation in Jizhong Depression



明溶蚀作用发生于中—晚埋藏期,甚至是热流体影响之后;⑤缝洞中充填的方解石或鞍状白云石包裹体具有高温(均一温度以大于120℃为主)、高盐度(盐度以大于5‰为主)特征,都显著高于围岩,说明是热液溶蚀流体活动作用的结果。埋藏期溶蚀作用使雾迷山组在埋藏过程中形成了新的或扩大的储渗空间,造成埋深对储层物性的影响不大。如任观1井,潜山顶面埋深2 672 m,在2 689.8~2 689.9 m井段,成像测井图上呈黑色网状条纹(图9a),网状缝发育,该段岩心孔隙度平均为3.65%;在3 043.6~3 043.9 m井段,成像测井显示溶蚀缝洞发育,表现为黑色孤立状和网状交错(图9b),该段岩心孔隙度平均为3.83%;在3 419.6~3 419.8 m井段,距离潜山顶面740 m深处的地层中仍见溶蚀裂缝,成像测井图上显示为高角度黑色正旋波状(图9c),该段岩心孔隙度平均为3.51%。任观1井在3 400~3 581.6 m井段试油,日产油63.5 t、产水72 m<sup>3</sup>,进一步说明埋藏溶蚀作用是潜山内幕形成优质储层的重要因素。

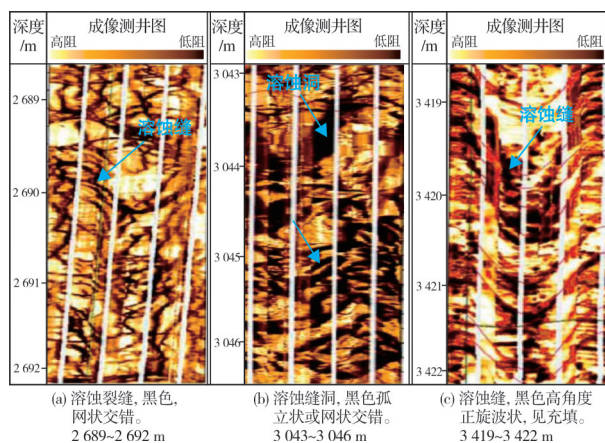


图9 冀中坳陷任丘潜山任观1井溶蚀缝洞成像测井图

Fig. 9 The imaging logging map of dissolved fracture-vugs of Well Renguan-1 in Renqiu buried hill, Jizhong Depression

### 3.3 构造破裂作用

任丘潜山经历多期构造运动,特别是印支运动及其以后的燕山运动,在雾迷山组微生物白云岩地层中产生大量的构造缝<sup>[30]</sup>。研究区构造缝组系多、密度大、纵横交错、有效性好,形成网状裂缝系统,可以直接改善微生物白云岩的储集性能,也为后期溶蚀作用和油气运移提供渗流通道。

裂缝作为有效储集空间可提高储层物性,增大渗流能力<sup>[31]</sup>。分析全直径岩心物性(图10),发现在裂缝不发育的样品中,渗透率与孔隙度具有较好的

线性关系,渗透率随孔隙度增加而增大,但渗透率普遍较小,小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;当岩心中裂缝发育时,孔渗相关性差,孔隙度略显增大,但渗透率呈数量级式增大,可达 $(10 \sim 1\,000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,说明裂缝对提高渗透率,改善储层物性具有明显作用。

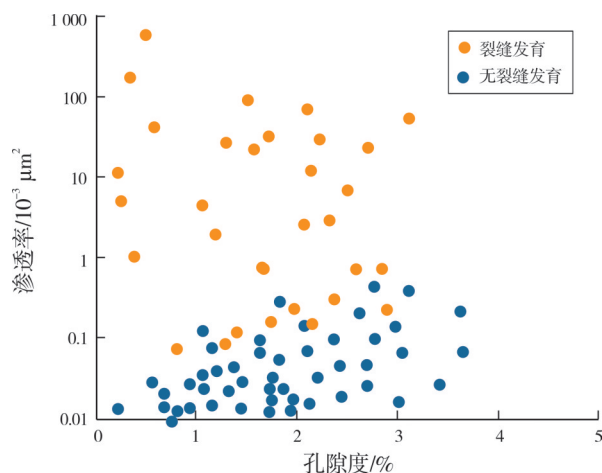


图10 冀中坳陷任丘潜山雾迷山组微生物白云岩裂缝对储层物性的影响

Fig. 10 Effect of fractures on the reservoir physical properties of microbial dolomite of Wumishan Formation in Renqiu buried hill, Jizhong Depression

裂缝沟通孔隙和溶洞,构成孔洞缝复合型输导网络,为溶蚀性流体和油气提供运移通道。燕山运动时期,任丘地区断裂活动频繁,形成的裂缝多为高角度缝或直立缝,半充填或未充填,有效性较好,与在此期间雾迷山组微生物白云岩地层经历的岩溶作用有效匹配,流体沿断裂及其伴生的裂缝下渗,产生溶蚀作用,扩大储集空间,改善储集性能。观察钻井岩心,发现裂缝面普遍含油(图8f),说明裂缝是油气良好的储集空间和运移通道。

## 4 储层演化规律

在任丘潜山雾迷山组沉积之后,研究区先后经历下古生界海相地层和新生界陆相地层沉积,其间多期次构造运动造成地层抬升、剥蚀和形变,对雾迷山组储层发育演化具重要影响<sup>[32]</sup>。在上述沉积特征和控制因素分析的基础上,可将雾迷山组微生物白云岩储层演化分为以下5个阶段(图11)。

**沉积—同生成孔阶段** 研究区在雾迷山组沉积期属于陆棚—浅海沉积环境<sup>[20]</sup>,气候温暖湿润,发育一套厚层微生物岩,晶间孔、粒间孔、窗格孔、生物体腔孔、格架孔等储集空间发育,原生孔隙可达30%~

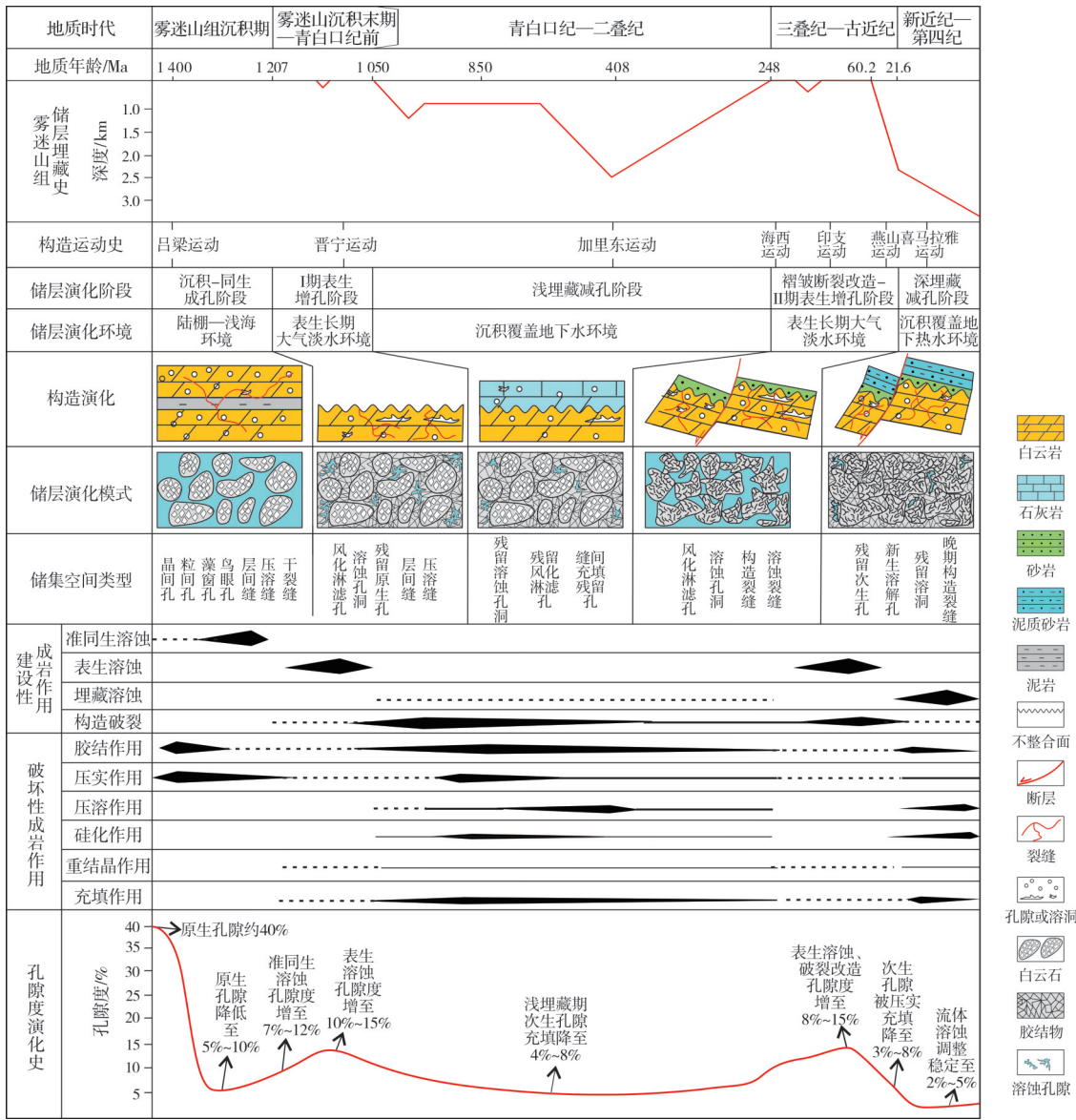


图 11 冀中坳陷任丘潜山雾迷山组微生物白云岩储层成岩—孔隙演化

Fig. 11 Diagenesis-pore evolution of microbial dolomite reservoirs of Wumishan Formation in Renqiu buried hill, Jizhong Depression

50%。随埋深增加,受机械压实、硅化作用影响,原生孔隙大幅下降,降低至5%~10%;受海平面升降变化,微生物丘滩体周期性暴露出水,发生同生溶蚀作用,形成较多的选择性溶蚀孔隙,孔隙度可增至7%~12%。

**I期表生增孔阶段** 任丘地区受晋宁运动的影响,地层抬升,雾迷山组顶部遭受风化剥蚀,可形成风化壳岩溶储层,发育大量的风化淋滤孔和溶蚀缝洞。该时期次生孔隙发育,储层孔隙度可增加到10%~15%。

**浅埋藏减孔阶段** 主要发生在加里东运动时期,其间虽有过几次升降运动,但雾迷山组整体处在寒武系—奥陶系海相碳酸盐岩地层之下,属于浅

埋藏成岩环境。在加里东运动早期,埋藏和压实作用较弱,此阶段储层孔隙度降至9%;在加里东运动后期,构造活动逐渐减弱,雾迷山组上覆地层厚度逐渐加大,受压实、胶结、充填、硅化等作用影响,微生物白云岩岩性变致密,富含硅质条带,该时期受重结晶和埋藏溶蚀作用影响可保留少量残留溶蚀孔隙,此阶段孔隙度降至4%~8%。

**褶皱断裂改造—II期表生增孔阶段** 该阶段主要发生在海西期和印支期,主要经历早期增孔和晚期减孔2个阶段。早期强烈的挤压褶皱和逆冲推覆运动,造成研究区褶皱隆起,发育众多北西向、北东向正断层,并伴生大量构造缝。同时,构造抬升使



得上古生界遭受约 143 Ma 的风化剥蚀,雾迷山组上部地层被剥蚀殆尽,使得雾迷山组直接出露地表,接受漫长的风化剥蚀和淡水淋滤作用,形成大量的溶蚀孔、洞、缝,该时期是微生物白云岩储层孔隙度最重要的增孔阶段,孔隙度增大到 8%~15%。后期印支期的逆冲断层使得研究区发生构造反转,该区作为褶皱主体,没有接受中生界沉积,雾迷山组直接被新生界沙河街组四段—孔店组沉积覆盖,表生岩溶作用不发育,仅在断裂附近发育构造裂缝,印支期形成的与走滑断层相关的洞穴、构造高角度缝和沿缝溶蚀孔洞等储集空间多在埋藏过程中被压实充填,此阶段孔隙度下降至 3%~8% 之间。

**深埋藏减孔阶段** 主要发生在燕山期和喜马拉雅期。该时期研究区进入拗陷阶段,地层沉降,随着上覆沉积物逐渐增厚,雾迷山组埋深增加,压实、胶结和充填等破坏性成岩作用增强,次生溶蚀孔隙和裂缝被充填堵塞,此阶段孔隙度大约降至 3% 以下。在燕山末期—喜马拉雅早期,构造活动加剧,产生大量构造缝,未充填或半充填,有效性好。同时,该时期沙河街组一段下部和沙河街组三段烃源岩成熟形成的有机酸和烃类开始沿着断层或裂缝等输导通道运移到雾迷山组储层中,其中有机酸对先前形成的孔隙及缝洞进行扩溶,形成溶蚀孔、溶蚀缝,改善了储层物性,烃类充注会抑制胶结作用对储层孔隙的破坏<sup>[33]</sup>,可较好保存储层孔隙。该时期微生物白云岩储层在经历多期硅质、白云质和石英的胶结充填和构造破裂—埋藏溶蚀的叠合改造后,孔隙度最终趋于稳定,分布在 2%~5% 之间。

## 5 结 论

(1)冀中拗陷任丘潜山雾迷山组主要发育微生物白云岩和与微生物相关的颗粒白云岩,前者主要包括叠层石、凝块石、层纹石和核形石白云岩 4 类,后者主要为砂砾屑白云岩;发育孔隙、裂缝、溶洞 3 大类储集空间,孔渗分区性明显,整体属于孔洞缝复合型低孔低渗储层;发育 3 类微生物白云岩储层,不同类型储层物性差异较大。

(2)微生物白云岩优质储层的形成主要受沉积环境、溶蚀作用和构造破裂作用等多种因素控制。沉积环境是影响微生物白云岩储层形成与演化的基础因素,高能环境下形成的丘滩体是最有利的储层相带;(准)同生期、表生期和埋藏期等 3 期岩溶作用对储层的形成、调整和保存起重要控制作用,是

多类型储集空间及内幕优质储层形成的关键因素;构造破裂作用形成的裂缝是重要的储集空间和渗流通道,是优质储层形成的重要补充。

(3)任丘潜山雾迷山组微生物白云岩储层演化经历沉积—同生成孔、I 期表生增孔、浅埋藏减孔、褶皱断裂改造—II 期表生增孔、深埋藏减孔等 5 个阶段,多因素共同作用使储层孔隙最终趋于稳定,形成现今 2%~5% 之间的孔隙度。

## 参 考 文 献

- [1] 白莹,罗平,刘伟,等.微生物碳酸盐岩储层特征及主控因素:以塔里木盆地阿克苏地区下寒武统肖尔布拉克组上段为例[J].中国石油勘探,2018,23(4):95-106.  
BAI Ying, LUO Ping, LIU Wei, et al. Characteristics and main controlling factors of microbial carbonate reservoir: a case study of upper member of Lower Cambrian Xiaorbulake Formation in Akesu area, Tarim Basin[J]. China petroleum exploration, 2018, 23(4): 95-106.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] MANCINI E A, PARCELL W C, AHR W M, et al. Upper Jurassic updip stratigraphic trap and associated Smackover microbial and nearshore carbonate facies, eastern Gulf coastal plain[J]. AAPG bulletin, 2008, 92(4): 417-442.
- [5] TULL S J. The diversity of hydrocarbon habitat in Russia[J]. Petroleum geoscience, 1997, 3(4): 315-325.
- [6] MUNIZ M C, BOSENCE D. Carbonate platforms in non-marine rift system in the Early Cretaceous (pre-salt) of the Campos Basin, Brazil[C]//2012 AAPG Annual Convention and Exhibition. Long Beach, California: AAPG, 2012: 90142.
- [7] 刘树根,马永生,孙玮,等.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[J].地质学报,2008,82(3):328-337.  
LIU Shugen, MA Yongsheng, SUN Wei, et al. Studying on the differences of Sinian natural gas pools between Weiyuan gas field and Ziyang gas-brone area, Sichuan Basin[J]. Acta geologica sinica, 2008, 82(3): 328-337.
- [8] 宋金民,罗平,杨式升,等.苏盖特布拉克地区下寒武统微生物礁演化特征[J].新疆石油地质,2012,33(6):668-671.  
SONG Jinmin, LUO Ping, YANG Shisheng, et al. Evolution characteristics of microbial reef of Lower Cambrian in Sugaiteblak area, Tarim Basin[J]. Xinjiang petroleum geology, 2012, 33(6): 668-671.
- [9] 金廷福.天津蓟县雾迷山组微生物碳酸盐岩沉积与储层特征[D].成都:成都理工大学,2014:1-98.  
JIN Tingfu. Microbial carbonate rocks sedimentary and reservoir characteristics in Wumishan Jixian Tianjin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014: 1-98.

- [10] 隋少强,王延欣,李海泉,等.河北雄安新区蓟县系雾迷山组沉积特征分析[J].矿产勘查,2020,11(8):1563-1571.  
SUI Shaoqiang, WANG Yanxin, LI Haiquan, et al. Analysis of sedimentary characteristics of the Wumishan Formation in Jixian System, Xiong'an New Area[J]. Mineral exploration, 2020, 11(8): 1563-1571.
- [11] 费宝生,汪建红.中国海相油气田勘探实例之三 渤海湾盆地任丘古潜山大油田的发现与勘探[J].海相油气地质,2005,10(3):43-50.  
FEI Baosheng, WANG Jianhong. Cases of discovery and exploration of marine fields in China (part 3): Renqiu buried-hill oil-field, Bohaiwan Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2005, 10(3): 43-50.
- [12] 王贵玲,高俊,张保建,等.雄安新区高阳低凸起区雾迷山组热储特征与高产能地热井参数研究[J].地质学报,2020,94(7):1970-1980.  
WANG Guiling, GAO Jun, ZHANG Baojian, et al. Study on the thermal storage characteristics of the Wumishan Formation and huge capacity geothermal well parameters in the Gaoyang low uplift area of Xiong'an New Area[J]. Acta geologica sinica, 2020, 94(7): 1970-1980.
- [13] 余家仁,陶洪兴.任丘油田碳酸盐岩储层演化[J].石油勘探与开发,1984,11(6):1-9.  
YU Jiaren, TAO Hongxing. Evolution of the carbonate reservoir rocks in Renqiu Oilfield[J]. Petroleum exploration and development, 1984, 11(6): 1-9.
- [14] 陈国达,费宝生.任丘潜山油田的基本地质特征及其形成的大地构造背景[J].石油实验地质,1983,5(4):241-249.  
CHEN Guoda, FEI Baosheng. Typical features and geotectonic background of the formation of the Renqiu buried-hill oilfield [J]. Petroleum geology & experiment, 1983, 5(4): 241-249.
- [15] 田世峰,高长海,查明.渤海湾盆地冀中坳陷潜山内幕油气成藏特征[J].石油实验地质,2012,34(3):272-276.  
TIAN Shifeng, GAO Changhai, CHA Ming. Reservoir-forming characteristics of inner buried hills in Jizhong Depression, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum geology & experiment, 2012, 34(3): 272-276.
- [16] 唐博宁,朱传庆,邱楠生,等.雄安新区雾迷山组岩溶裂隙发育特征[J].地质学报,2020,94(7):2002-2012.  
TANG Boning, ZHU Chuanqing, QIU Nansheng, et al. Characteristics of the karst thermal reservoir in the Wumishan Formation in the Xiong'an New Area [J]. Acta geologica sinica, 2020, 94(7): 2002-2012.
- [17] 余家仁,雷怀玉,刘趁花.试论海相碳酸盐岩储层发育的影响因素:以任丘油田雾迷山组为例[J].海相油气地质,1998,3(1):39-48.  
YU Jiaren, LEI Huaiyu, LIU Chenhua. A Discussion of factors influencing marine carbonate rock reservoir development: a case study of Wumishan Formation of Renqiu Oilfield [J]. Marine origin petroleum geology, 1998, 3(1): 39-48.
- [18] 吴伟涛,高先志,李理,等.渤海湾盆地大型潜山油气藏形成的有利因素[J].特种油气藏,2015,22(2):22-26.  
WU Weitao, GAO Xianzhi, LI Li, et al. Favorable conditions formed in large-scale buried-hill reservoir in Bohai Bay Basin [J]. Special oil & gas reservoirs, 2015, 22(2): 22-26.
- [19] 高先志,吴伟涛,卢学军,等.冀中坳陷潜山内幕油气藏的多  
样性与成藏控制因素[J].中国石油大学学报(自然科学版),2011,35(3):31-35.  
GAO Xianzhi, WU Weitao, LU Xuejun, et al. Multiplicity of hydrocarbon reservoir and accumulation controlling factors within buried hills in Jizhong Depression [J]. Journal of China University of Petroleum (edition of natural science), 2011, 35(3): 31-35.
- [20] 旷红伟,彭楠,罗顺社,等.燕山中东部凌源地区雾迷山组MT构造的发现、地质特征和研究意义[J].自然科学进展,2009,19(12):1308-1318.  
KUANG Hongwei, PENG Nan, LUO Shunshe, et al. Discovery of MT structure and its geological features and studying significance in the eastern Yanshan in Lingyuan, Liaoning Province [J]. Progress in natural science, 2009, 19(12): 1308-1318.
- [21] 郭华.华北北缘中元古界蓟县群沉积学及碳硫循环[D].武汉:中国地质大学,2013.  
GUO Hua. Sedimentology, carbon and sulfur cycles in the Mesoproterozoic Jixian Group on the northern margin of North China [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013.
- [22] 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.
- [23] 陈娅娜,沈安江,潘立银,等.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[J].石油勘探与开发,2017,44(5):704-715.  
CHEN Yana, SHEN Anjiang, PAN Liyin, et al. Features, origin and distribution of microbial dolomite reservoirs: a case study of 4th Member of Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum exploration and development, 2017, 44(5): 704-715.
- [24] 余家仁,潘祖荫.任丘油田雾迷山组碳酸盐岩储层与非储层划分标准[J].石油与天然气地质,1986,7(1):68-74.  
YU Jiaren, PAN Zuyin. Division criterion between carbonate reservoir and non-reservoir in the Wumishan Formation of Renqiu Oilfield [J]. Oil & gas geology, 1986, 7(1): 68-74.
- [25] 石书缘,刘伟,黄擎宇,等.塔里木盆地北部震旦系齐格布拉克组白云岩储层特征及成因[J].天然气地球科学,2017,28(8):1226-1234.  
SHI Shuyuan, LIU Wei, HUANG Qingyu, et al. Dolostone reservoir characteristic and its formation mechanism in Qigebulake Formation, Sinian, north Tarim Basin [J]. Natural gas geoscience, 2017, 28(8): 1226-1234.
- [26] 唐洪,吴斌,张婷,等.川东北铁山—龙会地区长兴组礁滩相储层特征及主控因素[J].现代地质,2013,27(3):644-652.  
TANG Hong, WU Bin, ZHANG Ting, et al. Reef-beach reservoir features of Changxing Formation and its controlling factors in Tieshan-Longhui of northeastern Sichuan [J]. Geoscience, 2013, 27(3): 644-652.
- [27] 白莹,罗平,王石,等.台缘微生物礁结构特点及储集层主控因素:以塔里木盆地阿克苏地区下寒武统肖尔布拉克组为例[J].石油勘探与开发,2017,44(3):349-358.  
BAI Ying, LUO Ping, WANG Shi, et al. Structure characteristics and major controlling factors of platform margin microbial reef reservoirs: a case study of Xiaerbulak Formation, Lower Cambri-



- an, Aksu area, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum exploration and development, 2017, 44(3): 349–358.
- [28] 宋金民, 刘树根, 李智武, 等. 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[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 741–752.
- SONG Jinmin, LIU Shugen, LI Zhiwu, et al. Characteristics and controlling factors of microbial carbonate reservoirs in the Upper Sinian Dengying Formation in the Sichuan Basin, China [J]. Oil & gas geology, 2017, 38(4): 741–752.
- [29] 沈安江, 赵文智, 胡安平, 等. 海相碳酸盐岩储集层发育主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5): 545–554.
- SHEN Anjiang, ZHAO Wenzhi, HU Anping, et al. Major factors controlling the development of marine carbonate reservoirs [J]. Petroleum exploration and development, 2015, 42(5): 545–554.
- [30] 余家仁. 任丘古潜山碳酸盐岩储集层缝洞孔分布规律的探讨[J]. 石油勘探与开发, 1987, 14(3): 52–61.
- YU Jiaren. A discussion on the distribution pattern of fissures, vugs and pores in Renqiu buried hill carbonate reservoir [J]. Petroleum exploration and development, 1987, 14(3): 52–61.
- [31] 吴孔友, 王雨洁, 张瑾琳, 等. 冀中拗陷前第三系岩溶发育规律及其控制因素[J]. 海相油气地质, 2010, 15(4): 14–22.
- WU Kongyou, WANG Yujie, ZHANG Jinlin, et al. Development rule and controlling factors of pre-tertiary karst in Jizhong Depression, Bohaiwan Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2010, 15(4): 14–22.
- [32] 何治亮, 张军涛, 丁茜, 等. 深层-超深层优质碳酸盐岩储层形成控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(4): 633–644, 763.
- HE Zhiliang, ZHANG Juntao, DING Qian, et al. Factors controlling the formation of high-quality deep to ultra-deep carbonate reservoirs [J]. Oil & gas geology, 2017, 38(4): 633–644, 763.
- [33] 金凤鸣, 张凯逊, 王权, 等. 断陷盆地深层优质碎屑岩储集层发育机理: 以渤海湾盆地饶阳凹陷为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(2): 247–256.
- JIN Fengming, ZHANG Kaixun, WANG Quan, et al. Formation mechanisms of good-quality elastic reservoirs in deep formations in rifted basins: a case study of Raoyang Sag in Bohai Bay Basin, East China [J]. Petroleum exploration and development, 2018, 45(2): 247–256.

编辑:黄革萍

## Characteristics and evolution of microbial dolomite reservoir of Wumishan Formation in Renqiu buried hill, Jizhong Depression

LUO Ning, XUE Hui, LI Jianmin, ZHANG Jun, ZHU Ping,  
TANG Xiaoqi, HAN Chunyuan, YE Dashuai

**Abstract:** There are abundant oil and gas resources and geothermal resources in microbial dolomite reservoirs of Wumishan Formation in Renqiu buried hill, Jizhong Depression, but the characteristics and main controlling factors of the high-quality reservoirs are not clear, which constrained the exploration and development process. Based on the outcrop, drilling core, petrographic thin section, logging data and experimental analysis data, the characteristics as well as types of microbial dolomite reservoirs in Wumishan Formation are investigated, and the controlling factors and evolution of high quality reservoirs are generalized. The reservoirs in Wumishan Formation dominated by microbial dolomite, which associated with the microbial mound and shoal. The microbial dolomites consists of stromatolite dolomite, thrombolite dolomite, laminite dolomite, oncolite dolomite, while the microbial related granular dolomites are mainly dolarenite and dolorudite. The storage space of microbial dolomite can be divided into three types(pores, fractures, vugs), and the reservoirs overall have poor physical properties with average porosity of 3.55% and average permeability of  $0.89 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , which belongs to the pore-vug-fracture composite type with the characteristics of low porosity and low permeability. The microbial dolomite reservoir can be divided into type I, type II, and type III, different types of reservoirs have big differences in lithology and physical property. Depositional environment are the basis of reservoir formation and evolution, which controls the facies distribution and the porosity development. Dissolution are the key to the formation of multiple types of reservoir space, which determine the modification and distribution of the reservoirs. Tectonic disruption is an important complement to form effective storage space, for the structural fractures generated by tectonic disruption are constructive for the reservoir properties in increasing the reservoir physical property and the seepage ability. Analysis shows that the evolution of the microbial dolomite reservoirs of Wumishan Formation in the study area can be mainly divided into five stages: sedimentation-penecontemporaneous pore formation stage, phase I supergene pore increasement stage, shallow burial pore reduction stage, fold and fault transformation phase II supergene pore increasement stage, deep burial pore reduction stage. The combined effects of multiple factors ultimately formed a porosity of 2% to 5% today.

**Key words:** microbial dolomite; buried hill; reservoir characteristics; controlling factor; reservoir evolution; Wumishan Formation; Jizhong Depression

**LUO Ning**, First author: PhD, Professoriate Senior Engineer, mainly engaged in oil and gas exploration and comprehensive utilization of geothermal energy resources. Add: No. 1 Jianshe Middle Rd., Renqiu, Hebei 062550, China

**XUE Hui**, Corresponding author: MSc, Engineer, mainly engaged in sedimentology and reservoir geology. Add: No. 1 Jianshe Middle Rd., Renqiu, Hebei 062550, China