

方继瑶,陈洪德,史云鹤,等.鄂尔多斯盆地宜川—黄龙地区马家沟组古岩溶储层特征及形成机理[J].地球科学与环境学报,2019,41(1):83-95.

FANG Ji-yao, CHEN Hong-de, SHI Yun-he, et al. Characteristics and Forming Mechanism of Palaeokarst Reservoir of Majiagou Formation in Yichuan-Huanglong Area of Ordos Basin, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2019, 41(1): 83-95.

## 鄂尔多斯盆地宜川—黄龙地区马家沟组 古岩溶储层特征及形成机理

方继瑶<sup>1,2</sup>, 陈洪德<sup>1</sup>, 史云鹤<sup>3</sup>, 李磊<sup>3</sup>, 邓翔<sup>2</sup>, 苏中堂<sup>1\*</sup>

(1. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 页岩气评价与开采四川省重点实验室, 四川 成都 610091; 3. 中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安 710018)

**摘要:**鄂尔多斯盆地宜川—黄龙地区具备良好勘探潜力,研究其储层主控因素及形成机理对黄龙气田勘探工作具有重要指导意义。以岩芯观察、铸体薄片鉴定、阴极发光及地球化学测试分析为基础,结合钻井、测井资料,研究宜川—黄龙地区马家沟组古岩溶储层基础特征、储层主控因素及形成机理。结果表明:研究区主要发育含膏粉晶云岩、粉晶砂屑云岩及粉—细晶云岩;石膏铸模孔、晶间孔(溶孔)、溶孔及溶缝是最主要的储集空间;储层孔隙度以0.1%~5.0%为主,渗透率以 $(0.002 \sim 0.100) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 为主,具有低孔低渗—特低孔特低渗特点;有利储层分布受多种地质作用共同影响,含硬石膏结核云坪、白云岩坪及颗粒滩是优质储层发育的物质基础,储层平面分布受控于古岩溶地貌,而垂向分布受控于岩溶旋回,有利储层分布于表生期岩溶垂直渗流带,晚成岩期次生灰化及3期不同组合类型充填作用使有效孔隙锐减,是该区储层物性较差的直接原因。

**关键词:**古岩溶;储层;主控因素;岩溶地貌;多期充填;次生灰化;形成机理;鄂尔多斯盆地

**中图分类号:**P618.13;TE122 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-6561(2019)01-0083-13

## Characteristics and Forming Mechanism of Palaeokarst Reservoir of Majiagou Formation in Yichuan-Huanglong Area of Ordos Basin, China

FANG Ji-yao<sup>1,2</sup>, CHEN Hong-de<sup>1</sup>, SHI Yun-he<sup>3</sup>, LI Lei<sup>3</sup>, DENG Xiang<sup>2</sup>, SU Zhong-tang<sup>1\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. Sichuan Province Key Laboratory of Shale Gas Evaluation and Exploitation, Chengdu 610091, Sichuan, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an 710018, Shaanxi, China)

**Abstract:** The Yichuan-Huanglong area in Ordos Basin has favorable prospect for exploration, which is of great significance for the exploration of Huanglong gasfield to study the main controlling factors and forming mechanism of reservoir. Based on the core observation, casting thin section identification, cathodoluminescence (CL) and geochemical test analysis, combined with the drilling and logging data, the basic characteristics, main controlling factors and forming mechanism of palaeokarst reservoirs of Majiagou Formation in Yichuan-Huanglong area were

收稿日期:2018-09-18;修回日期:2018-11-23 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家自然科学基金项目(41602107);油气藏地质及工程国家重点实验室开放基金项目(PLC20180307)

作者简介:方继瑶(1993-),女,四川旺苍人,成都理工大学理学硕士研究生, E-mail: 297113114@qq.com.

\* 通讯作者:苏中堂(1981-),男,甘肃靖远人,副教授,理学博士,博士后, E-mail: xiongwei3279@sina.com.

studied. The results show that the powder crystal gypsodolomite, powder crystal dolomene and powder-aplitic crystal dolomite mainly develop in the area; the gypsum mold pore, intergranular hole, solution pore and solution fissure are the most important reservoir spaces; the reservoir porosity is mainly from 0.1% to 5.0%, and the permeability is mainly from  $0.002 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  to  $0.100 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , with low to extra-low porosity and permeability; the distribution of favorable reservoirs is affected by various geological processes, the anhydrite-bearing concretion dolomite flat, dolomite flat and grain bank microfacies are the foundation of development of high quality reservoir, the plane distribution of reservoirs is controlled by the palaeokarst geomorphology, the vertical distribution is controlled by karst cycle, the favorable reservoirs distribute in the vertical permeating belt of the supergene, and the effective porosity is reduced by the dedolomitization in the later stage of diagenesis and three stages of different types of filling, which are the direct factor of poor physical property of reservoir in the area.

**Key words:** palaeokarst; reservoir; main controlling factor; karst landform; multi-stage filling; dedolomitization; forming mechanism; Ordos Basin

## 0 引言

鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组碳酸盐岩中赋存丰富的油气资源<sup>[1-4]</sup>,主要为古岩溶储层气藏。近些年围绕靖边气田周缘不断扩边建产,使得靖边气田成为盆地主力供气区之一,随着勘探程度深入,勘探难度增加,增产压力不断加大,急需开拓新的勘探领域。鄂尔多斯盆地东南部宜川—黄龙地区是近几年盆地古岩溶储层新发现区域,已初步建成黄龙气田。目前,鄂尔多斯盆地奥陶系古岩溶储层研究成果丰富,但多集中于储层沉积环境与岩相古地理、白云岩成因、古地貌发育特征及成藏条件<sup>[5-9]</sup>等方面,且研究区主要在盆地中部靖边气田及周缘<sup>[10-11]</sup>,而宜川—黄龙地区研究相对较少。鄂尔多斯盆地发育规模有效的海相碳酸盐岩烃源岩,具备规模天然气聚集成藏条件<sup>[12]</sup>。任军峰等研究认为,加里东期盆地整体抬升,遭受长期风化剥蚀,奥陶系马家沟组含膏白云岩经表生风化淋滤作用,发育溶孔洞型储层<sup>[13]</sup>,认为鄂尔多斯盆地东南部岩溶地貌及地层裂缝为储层形成提供了条件<sup>[14]</sup>,但没有明确的储集空间类型划分,未深入讨论各期成岩作用对整个储层发育演化的控制作用。宜川—黄龙地区储层形成机理仍不明确,影响到黄龙气田建设速度。

本文以鄂尔多斯盆地宜川—黄龙地区马家沟上组合风化壳 19 口典型井钻井资料与 240 个铸体薄片鉴定为基础,运用阴极发光、电子探针、扫描电镜等技术,结合相关地球化学实验分析,明确划分该区马家沟组古岩溶储集空间,对孔隙结构、成因等进行更深入的研究,系统分析储层主控因素,同时结合沉

积背景,重点解释不同期次成岩作用对储层的改造过程,阐明宜川—黄龙地区马家沟组古岩溶储层形成机理及孔隙演化过程,为黄龙气田区天然气勘探提供基础地质资料。

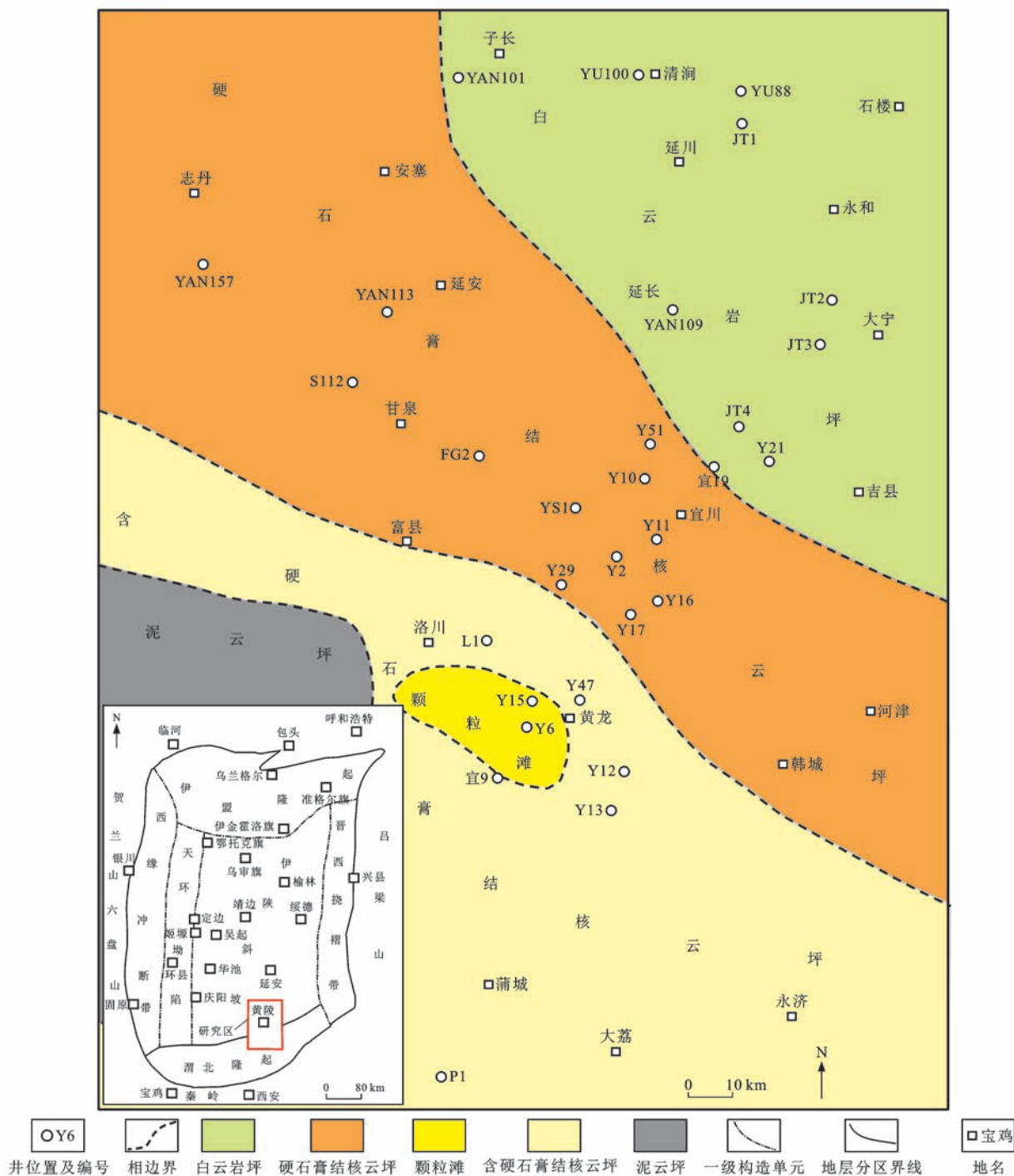
## 1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北地台西部,地跨陕、甘、宁、蒙、晋五省区,属典型叠合盆地,赋存了极丰富的碳酸盐岩油气资源<sup>[15-16]</sup>。宜川—黄龙地区位于鄂尔多斯盆地东南部,即陕西延安以南、榆林正宁以东、铜川耀县以北,山西临汾乡宁以西,面积约  $6 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。马家沟组纵向上被划分为马一~马六 6 个岩性段,其中马五段被划分为马五<sub>1</sub>~马五<sub>10</sub>亚段<sup>[17-18]</sup>。马五期继承了马四期古地理格局,但总体处于振荡性、间歇性海退末期,表现为局限潮坪相,马五<sub>1+2</sub>期受沉积环境影响,盆缘主要发育泥云坪夹含硬石膏结核云坪,沿盆内逐渐向白云岩坪过渡(图 1),其中马五段含硬石膏结核白云岩层是该区主要产层之一。马五段储层经长期裸露风化保存不全,可划分为两个含气组合,即上组合(马五<sub>1</sub>~马五<sub>4</sub>亚段)和中组合(马五<sub>5</sub>~马五<sub>10</sub>亚段)<sup>[19]</sup>。其中,上组合含硬石膏结核云坪是宜川—黄龙地区古岩溶储层的主力产层<sup>[3-4]</sup>。

## 2 储层特征

### 2.1 岩石学特征

通过鄂尔多斯盆地东南部宜川—黄龙地区探井马家沟组岩芯观察及薄片鉴定资料发现,研究区马家沟组古岩溶储层主要发育白云岩类。



图件引自文献[20],有所修改

图 1 鄂尔多斯盆地宜川—黄龙地区马五<sub>1+2</sub>期沉积微相平面图

Fig. 1 Map of Sedimentary Micro-facies of Ma<sub>5<sub>1+2</sub></sub> in Yichuan-Huanglong Area of Ordos Basin

### 2.1.1 含膏粉晶云岩

含膏粉晶云岩具粉—细晶结构,石膏体积分数为 5%~30%不等,多发育蒸发沉积环境的潮上带,镜下观察石膏常以结核状产出,也可见具平直板状、柱状或不规则状晶形石膏发育,常伴随泥质纹层产出。准同生期发生淡水淋浴作用,不稳定膏盐类易溶蚀发生去膏化,形成石膏铸模孔(膏模孔)或晶模

孔[图 2(a)、(g)]。该类岩石主要发育于马五<sub>1+2</sub><sup>2-4</sup>、马五<sub>2</sub><sup>2</sup>、马五<sub>1</sub><sup>4</sup>亚段。

### 2.1.2 粉晶砂屑云岩

粉晶砂屑云岩具砂屑或残余砂屑结构,砂屑成分为微—粉晶白云岩,局部可见均匀分布藻砂屑白云岩[图 2(b)],部分藻砂屑可见明显灰化作用。砂屑往往与生物屑伴生,如藻类、海百合、腕足等。砂



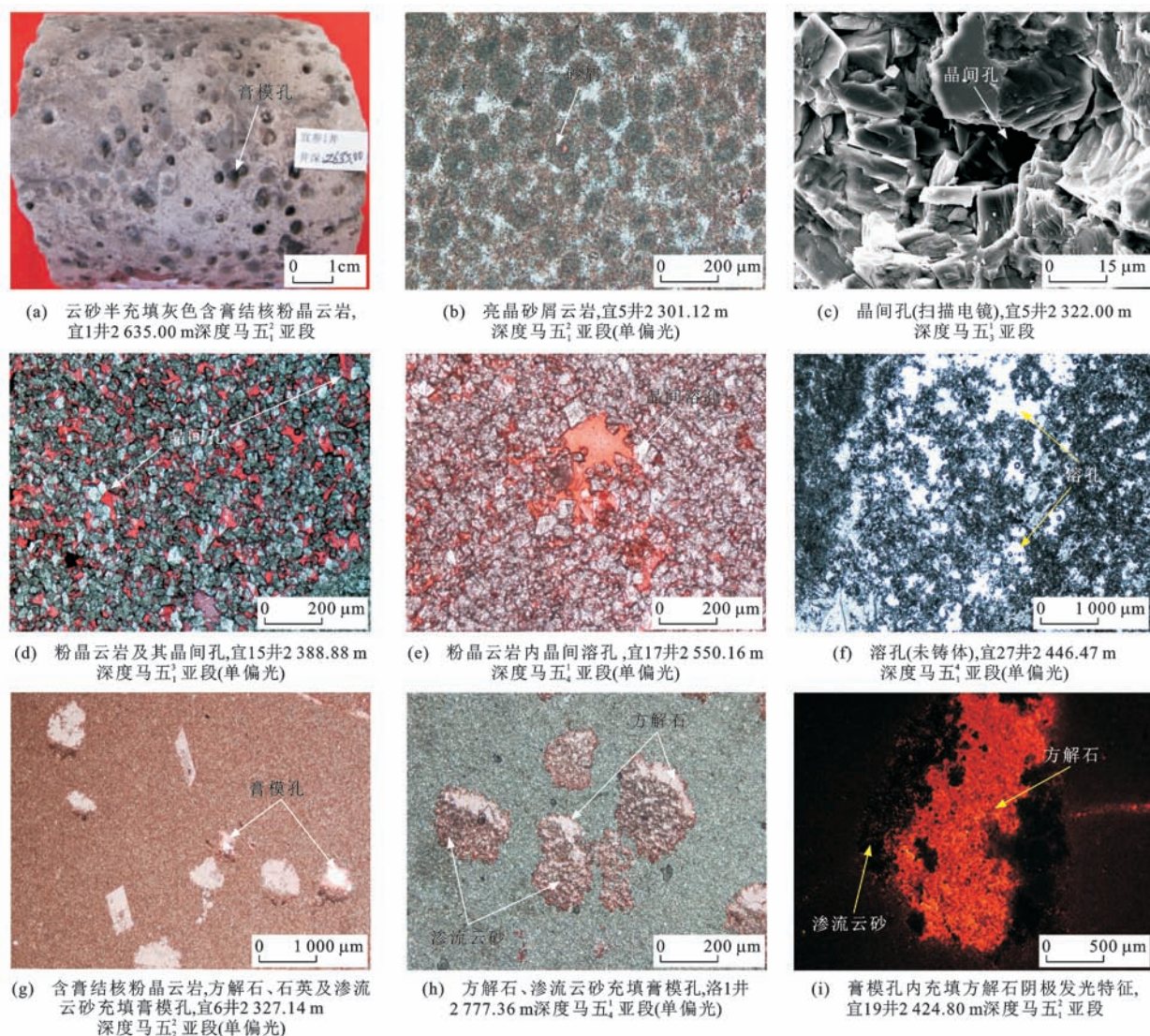


图2 马家沟组白云岩及孔隙显微特征

Fig. 2 Microscopic Characteristics of Dolomite and Pore of Majiagou Formation

屑间被两期亮晶—微亮晶胶结物充填, 早期为细粒白云石环边胶结, 晚期为中—粗粒白云石沉淀于残余砂屑间孔隙。亮晶胶结物经岩溶改造易形成粒间溶孔, 形成有效储层。该类岩石主要发育于马五<sub>1</sub>、马五<sub>2</sub>及马五<sub>4</sub>亚段。

### 2.1.3 粉—细晶云岩

粉—细晶云岩具粉—细晶晶粒结构, 晶体多为自形和半自形, 呈紧密贴合接触, 偶见他形白云石呈镶嵌状接触[图 2(c)~(e)]; 部分晶形发育较好的细晶白云石具明显雾心亮边结构, 局部他形一半自形白云石晶粒间残余灰泥, 白云石化不完全。该类储集岩常发育晶间孔(溶孔), 偶见鸟眼构造。鸟眼孔内往往被渗流砂及后期灰岩充填, 局部可见黄铁矿呈斑点状聚集分布。该类岩石主要发育于马五<sub>1</sub>、马五<sub>3</sub>、马五<sub>2</sub>及马五<sub>4</sub>亚段。

## 2.2 孔隙类型

根据岩芯观察、铸体薄片鉴定、阴极发光、扫描电镜及测井资料, 宜川—黄龙地区马家沟组主要发育膏溶孔型和晶间孔型两种储层, 膏结核溶蚀形成的铸模孔、白云石晶间孔(溶孔)以及溶蚀改造形成的孔、洞、缝储层体系为研究区主要的储集空间。

### 2.2.1 膏模孔

(1) 石膏晶体铸模孔。含膏粉晶云岩易受石膏、石盐晶体溶蚀形成放射针状、平直板状或柱状晶模孔[图 2(g)], 孔隙大小为  $0.05 \times 0.50 \sim 0.20 \times 0.50 \text{ mm}^2$ 。该类孔隙多呈孤立、层状分布于含膏云岩及去膏化云岩储集空间内, 基本全充填(呈灰化假晶), 多为无效孔隙。

(2) 石膏结核铸模孔。表生期含硬石膏结核白云岩受大气淡水改造, 膏盐结核发生溶蚀形成的铸

模孔[图 2(g)~(i)]在岩芯上常呈不规则圆形或椭圆形蜂窝状产出[图 2(a)],孔径主要为 1.5~3.5 mm,具单体孤立、群体层状分布特征。石膏结核铸模孔内不同程度地充填了渗流云砂、陆源碎屑、白云石、自生石英及多期方解石,普遍发育示顶底构造,有效储层发育于铸模孔下部充填粉晶白云石晶间及铸模孔上部未被充填的残余部分[图 2(g)、(h)],为研究区最重要的储集空间。该类铸模孔主要发育于马五<sub>1+2</sub>、马五<sub>3</sub>亚段,偶见于马五<sub>4</sub>亚段。

### 2.2.2 晶间孔(溶孔)

浅埋藏期原岩经白云岩化及重结晶作用形成,孔隙发育于具平直晶面半自形—自形的粉—细晶白云石晶间,孔径为 10~80  $\mu\text{m}$ [图 2(d)];孔隙间连通性较好,局部可见灰质胶结的晶间孔受溶蚀改造形成晶间溶孔[图 2(e)],是研究区马五段白云岩储层中较常见的孔隙类型,主要分布在马五<sub>1</sub>、马五<sub>2</sub>、马五<sub>4</sub>亚段。

### 2.2.3 溶孔(洞)

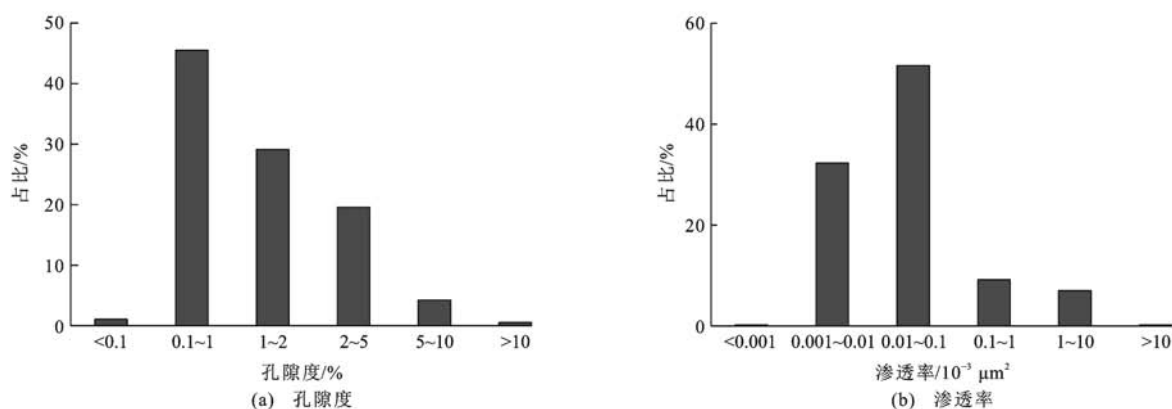
(1)组构选择性溶孔。表生期大气淡水对砂屑间

及角砾间胶结物选择性溶蚀形成的粒间溶孔,发育于粉晶砂屑云岩及岩溶角砾岩间,粒间溶孔形状不规则,砂屑间溶孔被充填,角砾间溶孔几乎被全充填,部分半充填孔隙在马五<sub>1+2</sub>、马五<sub>3</sub>亚段局部发育。

(2)组构非选择性溶孔。溶孔多呈斑点状、针状或不规则似椭圆状不均匀分布[图 2(f)],常见后期方解石或白云石半充填—充填溶孔,有效孔隙空间较少。

## 2.3 储层物性

对宜川—黄龙地区马家沟上组合 19 口钻井共 210 个样品物性数据统计得出:马家沟上组合孔隙度介于 0.03%~12.79%之间,平均孔隙度 1.82%,以 0.1%~5.0%为主(占 94.2%);马家沟上组合渗透率介于  $(0.002\sim35.852)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$  之间,平均渗透率  $1.108\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,以  $(0.002\sim0.100)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$  为主(占 83.87%)(图 3)。结合马五段岩石薄片鉴定表明,宜川—黄龙地区马家沟上组合物性整体较差,表现为特低孔特低渗储层,部分地区发现低孔低渗储层,总体呈现低孔低渗—特低孔特低渗特点。



图(a)样品数为 207 个;图(b)样品数为 210 个

图 3 储层物性直方图

Fig. 3 Histograms of Physical Property of Reservoir

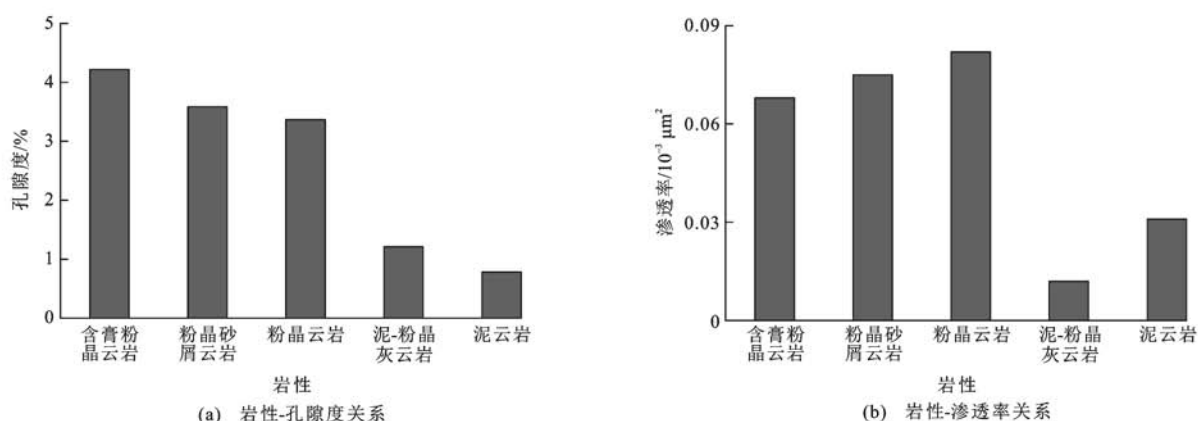
## 3 储层发育主控因素

### 3.1 沉积微相决定物质基础(相控储层)

优质储层发育建立在有利的物质基础之上,沉积相不仅决定储层物质基础,同时也控制储层的平面展布。受控于鄂尔多斯盆地整体呈海进—海退旋回沉积的特点,宜川—黄龙地区马五段主要沉积碳酸盐岩台地蒸发潮坪相<sup>[21-22]</sup>,发育含硬石膏结核云坪、白云岩坪、颗粒滩、泥云坪、云灰坪等微相(图 1)。根据岩性与物性关系(图 4)可知,含膏粉晶云岩、粉晶砂屑云岩、粉晶云岩储集物性较好,而这几类岩石的发育和分布明显受沉积微相控制。根据

岩芯观察及薄片鉴定发现:在马五段的含硬石膏结核云坪中,不稳定膏盐类易受表生淡水淋浴作用溶蚀改造形成大量膏模孔,半充填的石膏结核铸模孔可成为良好的储集空间;潮坪环境沉积白云岩坪中发育少量的白云石晶间孔(溶孔),成为储集性相对较好的有效储层;砂屑间溶孔及粒间溶孔型储层主要发育于黄龙地区颗粒滩中。有利于储层发育的沉积微相主要为含硬石膏结核云坪、白云岩坪及颗粒滩,原始沉积微相则决定了储层的分布和发育程度,从孔隙演化角度来看,膏模孔溶蚀是研究区储层形成最关键的成岩作用,从侧面说明沉积微相是优质储层的物质基础。





井数为 19 口;薄片数为 240 个

图 4 岩性-物性关系直方图

Fig. 4 Histograms of Lithology-physical Property

### 3.2 岩溶作用控制储层分布

#### 3.2.1 储层发育平面上受控于古岩溶地貌

鄂尔多斯盆地宜川—黄龙地区马五段为岩溶型储层,区内古沟槽较发育,将储层分割以致连续性较差(图 5),但同时增大了水动力活动空间,岩溶作用强烈。风化壳古岩溶的储层物性与岩溶古地貌有着不可分割的联系<sup>[23]</sup>。宜川—黄龙地区大部分处于盆地内相对低洼的岩溶斜坡地貌单元,更有利于储层发育。事实上,即使同在岩溶斜坡内,不同的次级地貌单元岩溶储层发育特征亦有所差别。通过对残存地区古地貌复刻来研究地貌差异,发现微地貌转换部位(岩溶斜坡台缘)易形成活跃水流,有利于形成溶孔型储层,因此,岩溶微地貌转换部位是有利于优质储层发育的区域<sup>[24-25]</sup>。盆地东南部整体处于岩溶高地向岩溶斜坡过渡区域,有利于岩溶流体的运移。研究区古地貌较盆地中部岩溶高地相对低洼,表生期岩溶作用整体弱于靖边潜台区,而充填程度则显著高于后者,储层发育整体受岩溶地貌控制。研究区位于相对有利的古地形(地貌)-岩溶缓丘至岩溶阶地较高部位,局部层段可发育半充填膏结核溶孔型有效储层等。

#### 3.2.2 储层发育垂向上受控于岩溶旋回

表生期岩溶作用分布对研究区储层形成具明显控制作用,具体表现为在垂向上受控于岩溶旋回。宜川—黄龙地区岩溶作用垂向上可划分出 4 期岩溶旋回(图 6),每期岩溶旋回均包含垂直渗流带和水平径流带。大气淡水沿受加里东期构造抬升形成的裂缝、裂隙等垂直向下渗流溶蚀形成垂直渗流带,在垂向上发育不同尺度的溶孔、洞、缝系统,该带基岩保存完整,受破坏小,有利于优质储层的保护;而水平径流带处于地下水活跃带,层间岩溶作用普遍发

育,该带主要发育泥云岩、白云岩、垮塌角砾岩和短距离搬运的岩溶角砾岩,基岩破坏严重,孔隙充填物相对致密,不易形成储层。从岩溶发育序列及旋回来看,垂直渗流带主要发育在马五<sub>1</sub>亚段、马五<sub>3</sub>亚段底部、马五<sub>2</sub>亚段中上部及马五<sub>2</sub>亚段,岩溶底板不同地方不一致,主要为马五<sub>2</sub>~马五<sub>5</sub>亚段,表现为层状石膏的保留或未被溶蚀的泥晶灰岩。从岩溶垂向特征分析来看,有利储层应主要分布在垂直渗流带所在层位。

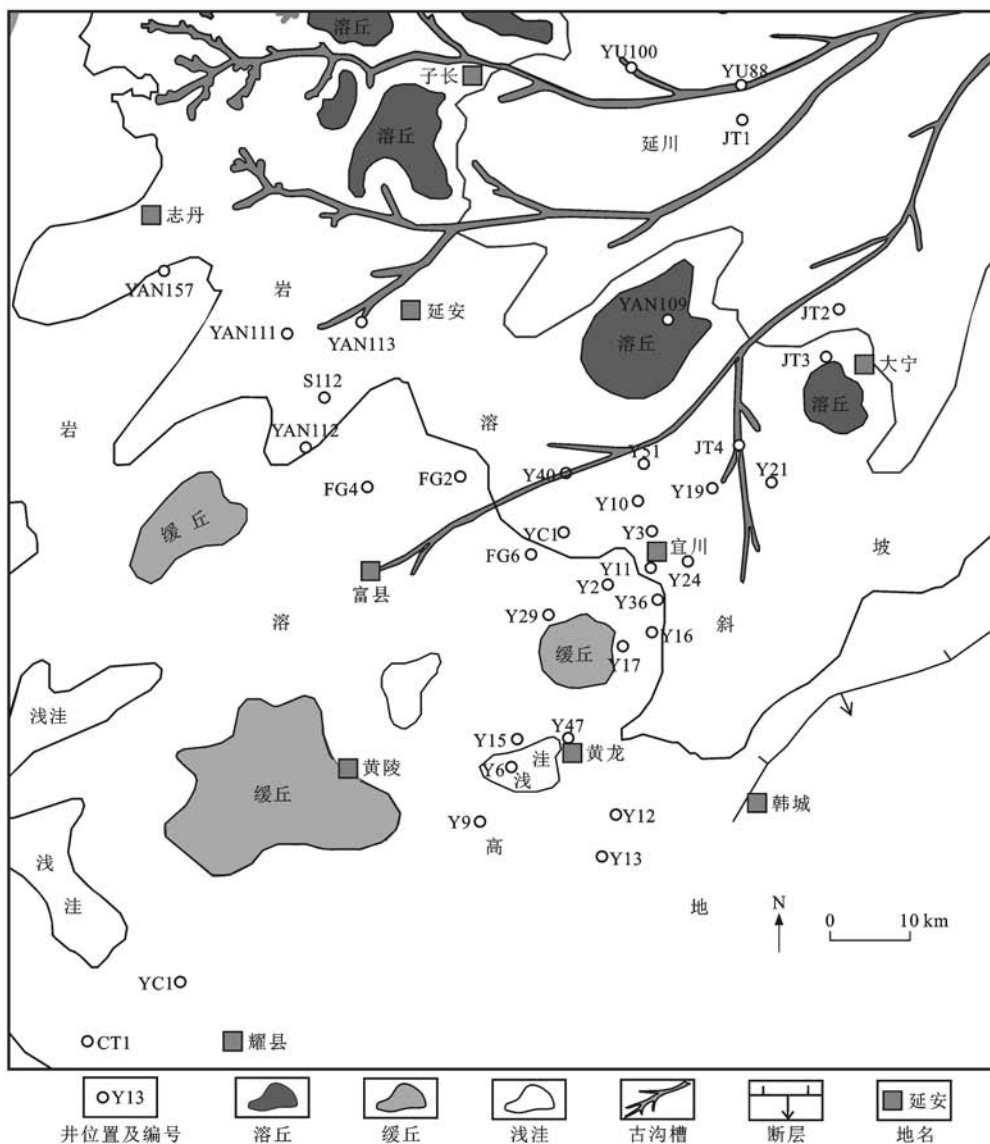
### 3.3 多期充填降低储层质量

#### 3.3.1 充填类型及期次

通过对鄂尔多斯盆地宜川—黄龙地区马家沟上组合显微特征观察,研究区储层存在多类型(6 类)、多期次(3 期)的充填过程,致使储层相对致密,储层质量降低<sup>[26-27]</sup>。第一期充填发生在表生期,准同生期的石膏被溶蚀后,局部充填渗流云砂、石膏或者少量淡水方解石[图 7(a)];在浅埋藏期,地层压释水排出,在孔隙内沉淀出自生石英、高岭石等[图 7(c)],局部形成少量方解石,这些产物充填于孔隙内,形成第二期充填,孔隙空间再次减少;深埋藏期,在上覆地层大量排烃阶段,富 Ca 流体交代晚表生期次生灰岩,并沉淀大量白色嵌晶状及粗晶方解石于膏模孔残余孔隙[图 7(b)、(d)],这次大面积充填基本使原有孔隙系统遭受最严重破坏,孔隙几乎被全充填,孔隙急剧减少。

#### 3.3.2 充填物成因

通过 C、O 同位素[图 8(a)],Fe、Mn 微量元素[图 8(b)],阴极发光图像[图 2(i)、7(f)]及包裹体测温实验数据,进一步探究研究区马家沟组充填物成因及充填机理。地球化学数据散点图表明膏模孔内充填渗流云砂 Fe、Mn 含量与基岩白云石较



图件引自文献[24],有所修改

图 5 奥陶系古岩溶地貌

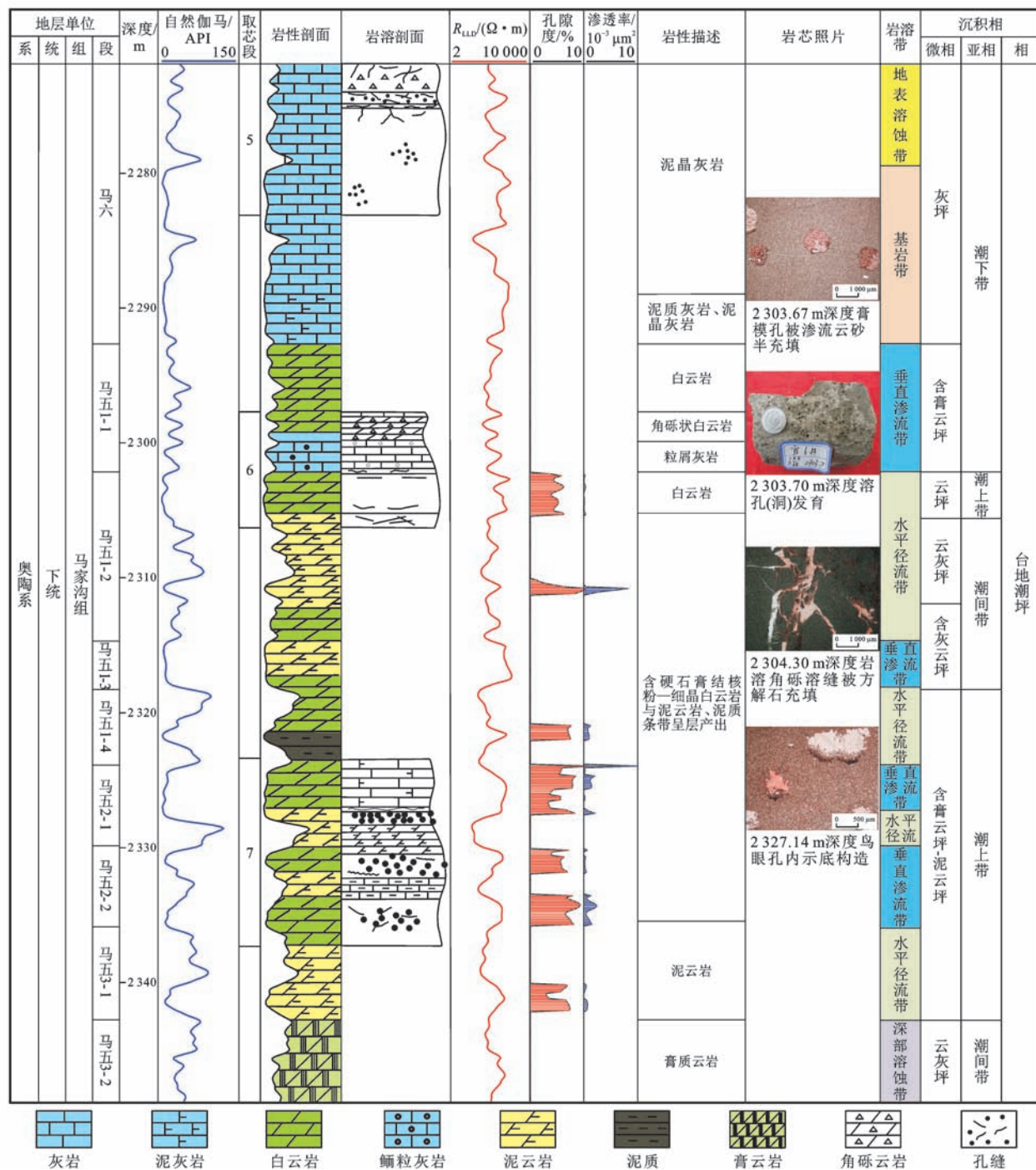
Fig. 5 Ordovician Palaeokarst Landform

为接近(图 8);阴极发光下呈暗红色或不发光,与基岩白云石一致(图 7)。以上特征表明,充填渗流云砂与基岩白云石同源,由原岩受淡水淋溶溶解破碎成粉砂级云质颗粒,随流体迁移滞留在早期膏模孔内。相较于基岩白云石,膏模孔内充填方解石 Fe 的平均含量较低, Mn 相对较高,可能为大气淡水产物。相较于中奥陶世海水( $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-2.0\text{‰} \sim -0.5\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$  值为  $-6.6\text{‰} \sim -4.0\text{‰}$ )<sup>[28]</sup>,基岩白云石及渗流云砂  $\delta^{13}\text{C}$  值与同期海水较一致,说明基岩白云石及渗流云砂为准同生期产物,膏模孔内充填方解石  $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$  值较海水出现不同程度负偏移,表明方解石有大气淡水成因,也有埋藏成因。通过对 24 个包裹体样品测温得出,膏模孔充填方解石均一温

度区间为  $90\text{℃} \sim 146\text{℃}$ ,平均为  $125.6\text{℃}$ ,绝大部分集中于  $120\text{℃} \sim 146\text{℃}$  之间,其中,  $120\text{℃} \sim 130\text{℃}$  范围内居多(占 45%),表明其多形成于浅—中深埋藏阶段。阴极发光观测到部分充填方解石呈较明亮的橙红色,可能与表生期大气淡水淋溶有关。综上所述,膏模孔内充填方解石主要形成于浅—中深埋藏阶段和表生淡水淋溶阶段,晚于膏模孔充填渗流云砂。

### 3.4 次生灰化促使储层致密

加里东末期,大气淡水淋溶膏盐层形成的高  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  值成岩流体自鄂尔多斯盆地中部岩溶台地向东南部地势相对低洼处汇集<sup>[29]</sup>,同时,上覆马六段易溶的厚层灰岩遭受溶蚀后形成的富 Ca 流体



$R_{LLD}$ 为深侧向电阻率

图6 宜6井岩溶旋回次划分

Fig. 6 Division of Karst Cycle Stages of Well Yi6

沿裂缝向下渗流,促使宜川—黄龙地区马家沟上组合白云岩发生大规模次生灰化作用。

通过岩芯观察及薄片鉴定,宜川—黄龙地区马家沟组次生灰化较强烈,原岩被改造为棕红色斑块状灰岩。在这一过程中,细—中—粗晶及嵌晶状红色次生方解石取代原始具膏模孔白云岩,使原有孔隙空间锐减,岩石致密。早期次生灰化发生在中—

晚表生期,次生中—粗晶方解石交代粉—细晶白云岩,原岩保存的膏模孔、晶间孔被充填,而后期白色方解石在其基础上继续溶解、沉淀,进一步充填了残余孔隙,使宜川—黄龙地区岩溶作用上部孔隙保存的垂直渗流带致密化,对储层形成破坏作用。

### 3.5 储层形成机理

鄂尔多斯盆地奥陶系沉积后,受加里东构造运



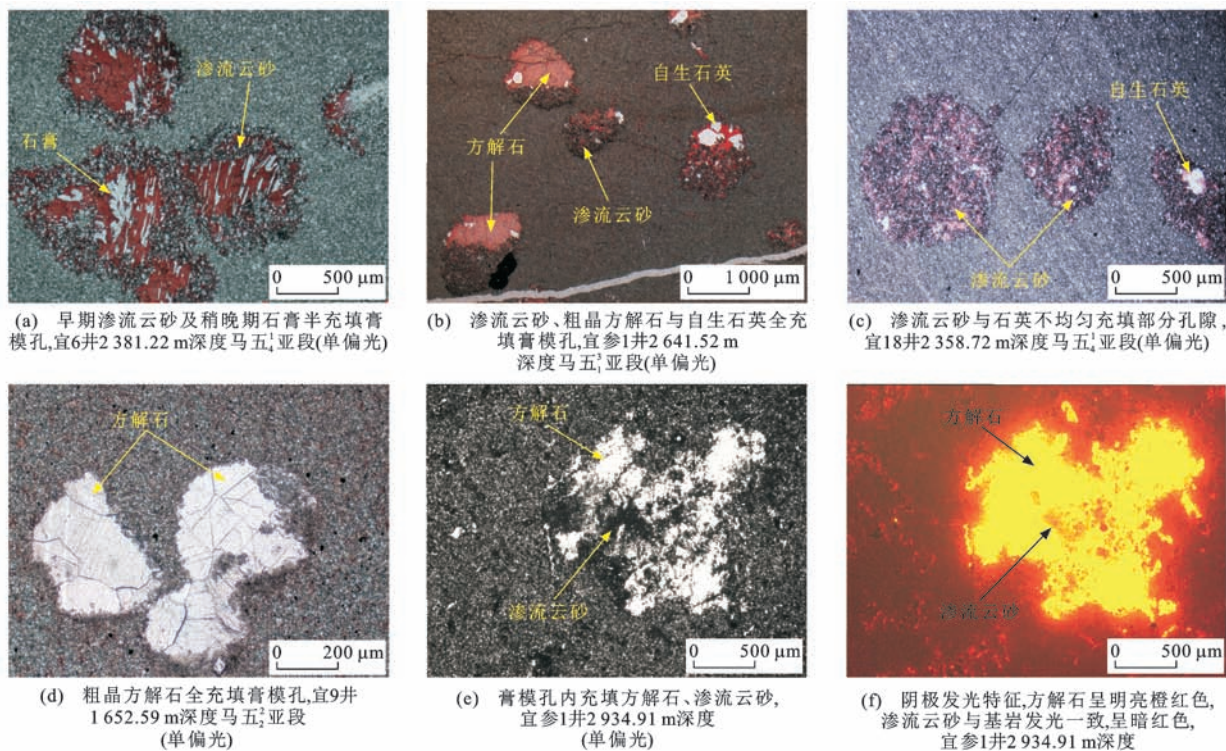
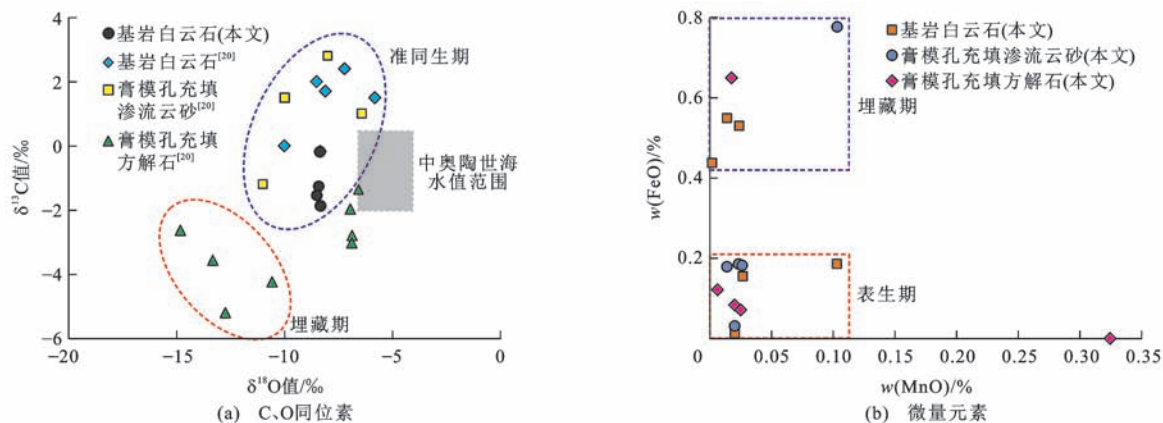


图7 膏模孔充填物特征

Fig. 7 Characteristics of Fillings of Gypsum Moldic Pore



$w(\cdot)$  为化合物含量

图8 基岩及膏模孔充填物地球化学数据散点图

Fig. 8 Geochemical Scatter Diagrams of Bedrock and Fillings of Gypsum Moldic Pore

动影响,经历短暂埋藏后抬升,至石炭系再次埋藏,马家沟组经历长期裸露风化剥蚀,盆地大部分地区缺失马六段地层。宜川—黄龙地区处于岩溶斜坡-岩溶残丘古地貌,岩溶作用较强,马家沟组地层经多期表生岩溶作用改造,形成了具明显旋回性的复杂孔、洞、缝储层体系<sup>[30]</sup>,伴随着多期充填及次生灰化长时期共同作用,互相叠加,从而演化成现今古岩溶储层。

马五期处于振荡性海退末期,发育蒸发潮坪相,由于蒸发作用较强,上组合地层以膏云岩及含膏白

云岩为主。准同生期相对海平面间歇性下降使地层短暂暴露,宜川—黄龙地区马家沟组膏云岩中部分石膏结核被溶解,形成少量膏模孔和晶模孔。表生裸露期,大气淡水淋浴对膏溶孔型储层再次进行岩溶改造,原始膏模孔被溶蚀扩大,绝大部分石膏被溶解,在垂直渗流带形成垮塌角砾岩以及各种溶孔、洞、缝储集空间,这是该区储层形成最重要的成岩作用。第一期充填作用伴随着早表生期岩溶作用同时进行,流体向古地貌低洼处运移,由少量渗流云砂、陆源碎屑物、淡水方解石沉淀于部分孔隙内形成。

中一晚表生期,盆地中部台地及周边地势较高区域膏盐层经大气淡水淋浴溶蚀形成的高  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  值岩溶流体向下游盆地东南部汇集;同时,盆地中部马六段厚层灰岩溶蚀形成的富  $\text{Ca}$  流体向宜川—黄龙一带渗流,研究区发生早期规模性次生灰化作用,这一过程中,细—粗晶红色次生方解石交代具膏模孔白云岩,使岩石致密化,原岩孔隙度急剧降低。浅埋藏期,地层压释水排出,在孔隙内沉淀出自生石英、高岭石等,局部形成少量方解石,这些产物充填于经岩溶改造后的溶孔内,形成第二期充填,进一步

降低了储层物性。中—深埋藏期,埋深增大,温压升高,上覆煤系地层热演化进入排烃阶段,这一阶段温度、压力升高后,高  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  值的孔隙介质在局部孔、洞内析出大量白色嵌晶状方解石,形成第三期充填,这次大面积充填基本使得原有孔隙系统遭受最严重破坏,孔隙急剧减少。同时,上覆煤系地层富含有机酸压释水向下渗透,残存孔隙空间被溶蚀扩大,形成了一些最终保存的晶间孔、晶间溶孔和未被完全充填的膏模孔,成为研究区白云岩储层的有效储集空间。储层演化过程如图 9、10 所示。

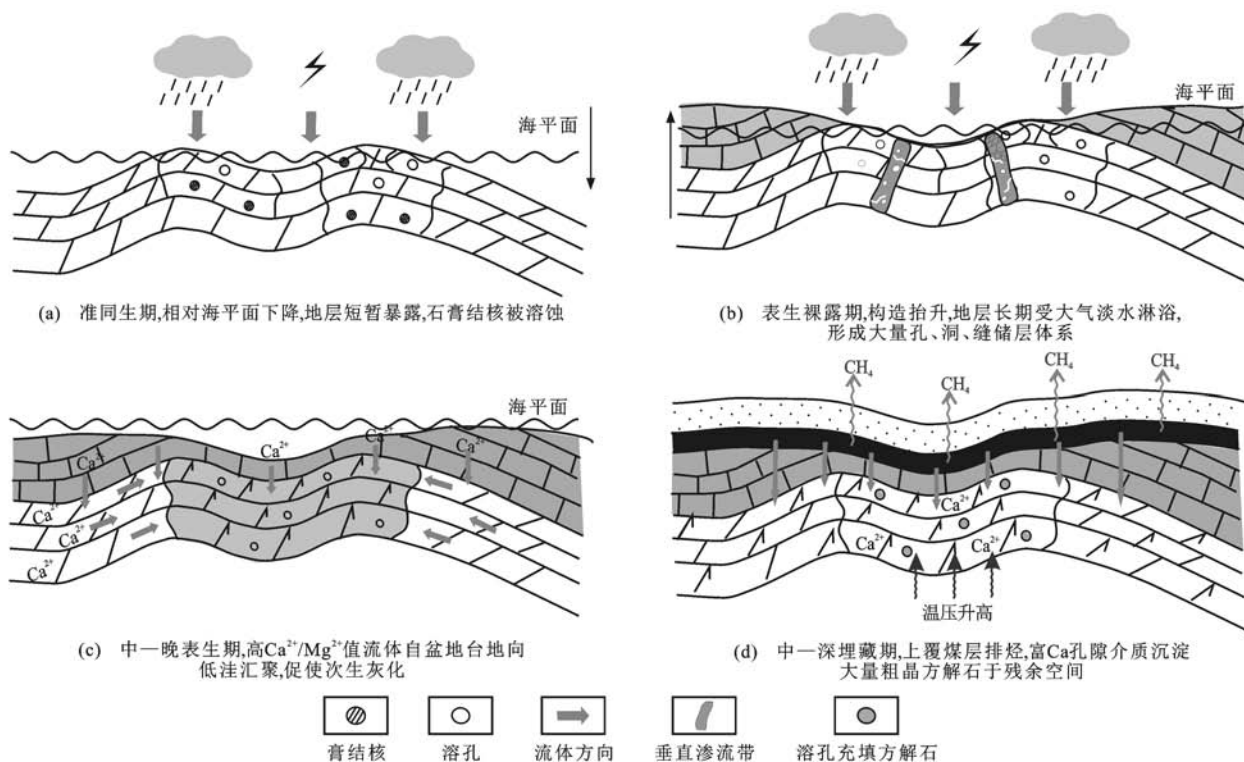


图 9 储层成岩演化示意图

Fig. 9 Sketch Map of Diagenetic Evolution of Reservoir

## 4 结 语

(1) 鄂尔多斯盆地宜川—黄龙地区马家沟组主要发育含膏粉晶云岩、粉晶砂屑云岩及粉—细晶云岩;膏模孔和晶间孔(溶孔)及溶孔、洞、缝系统是主要的储集空间。

(2) 储层物性具低孔低渗—特低孔特低渗特征,孔隙度以  $0.1\% \sim 5.0\%$  为主,平均为  $1.82\%$ ;渗透率以  $(0.002 \sim 0.100) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  为主,平均为  $1.108 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

(3) 有利储层分布受多种地质作用共同影响:含硬石膏结核云坪、白云岩坪及颗粒滩是优质储层发育的物质基础;储层平面分布受控于古岩溶地

貌,垂向分布受控于岩溶旋回,表生期垂直渗流带有利于孔隙的保存;多期岩溶作用有利于研究区储层发育,晚成岩期次生灰化及 3 期不同组合类型充填作用大大降低孔隙度,尤其埋藏期大面积嵌晶状方解石充填孔隙,储层破坏严重,是该区储层物性较差的直接原因。

## 参考文献:

## References:

- [1] 金之钧,蔡立国. 中国海相油气勘探前景、主要问题与对策[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 722-730.  
JIN Zhi-jun, CAI Li-guo. Exploration Prospects, Problems and Strategies of Marine Oil and Gas in China [J]. Oil and Gas Geology, 2006, 27(6): 722-730.



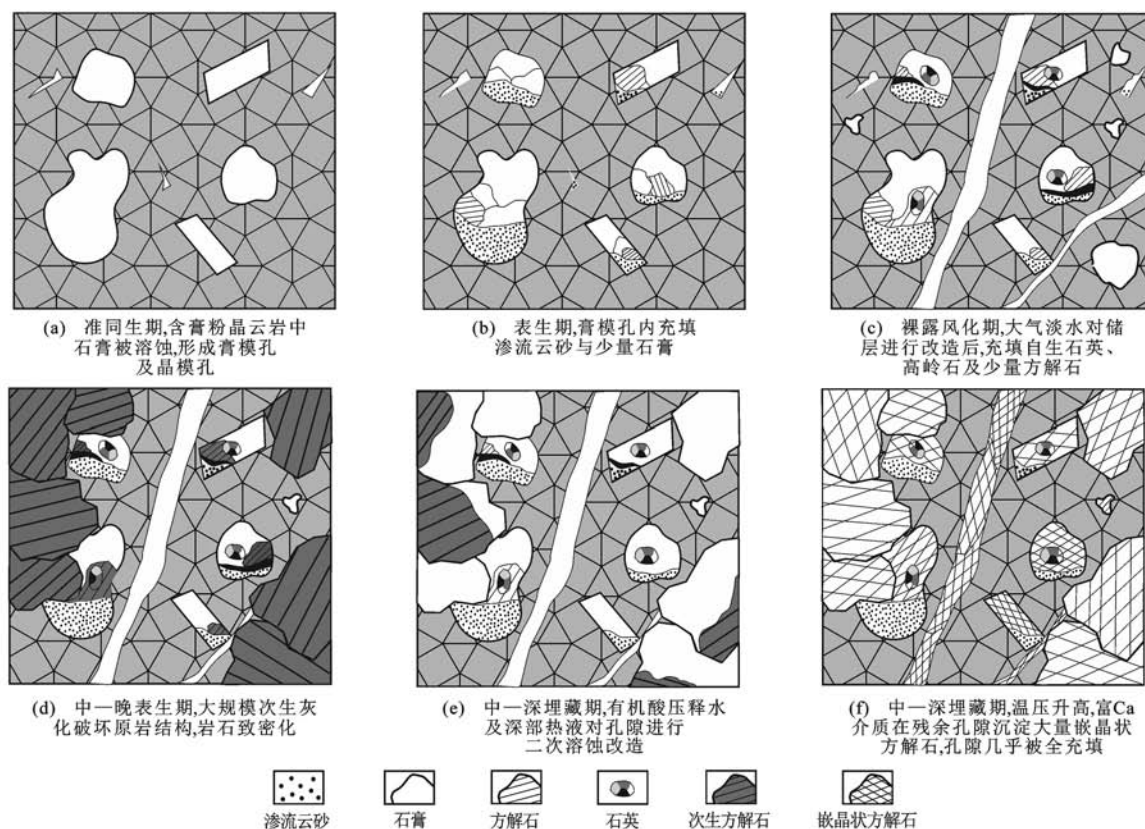


图10 储层孔隙演化示意图

Fig. 10 Sketch Map of Pore Evolution of Reservoir

- [2] 史基安,邵毅,张顺存,等. 鄂尔多斯盆地东部地区奥陶系马家沟组沉积环境与岩相古地理研究[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(3): 316-324.
- SHI Ji-an, SHAO Yi, ZHANG Shun-cun, et al. Lithofacies Paleogeography and Sedimentary Environment in Ordovician Majiagou Formation, Eastern Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(3): 316-324.
- [3] 席胜利,李振宏,王欣,等. 鄂尔多斯盆地奥陶系储层展布及勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(3): 405-411.
- XI Sheng-li, LI Zhen-hong, WANG Xin, et al. Distribution and Exploration Potential of Ordovician Reservoir in Ordos Basin [J]. Oil and Gas Geology, 2006, 27(3): 405-411.
- [4] 杨华,付金华,魏新善,等. 鄂尔多斯盆地奥陶系海相碳酸盐岩天然气勘探领域[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 733-740.
- YANG Hua, FU Jin-hua, WEI Xin-shan, et al. Natural Gas Exploration Domains in Ordovician Marine Carbonates, Ordos Basin [J]. Acta Petroli Sinica, 2011, 32(5): 733-740.
- [5] 包洪平,张云峰,王前平,等. 鄂尔多斯盆地马5亚段沉积微相分布及演化[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(5): 16-21.

- BAO Hong-ping, ZHANG Yun-feng, WANG Qian-ping, et al. Distribution and Evolution of Sedimentary Microfacies of Submember 5 of Majiagou Formation in the Ordos Basin [J]. Coal Geology and Exploration, 2016, 44(5): 16-21.
- [6] 包洪平,杨帆,白海峰,等. 细分小层岩相古地理编图的沉积学研究及油气勘探意义:以鄂尔多斯地区中东部奥陶系马家沟组马五段为例[J]. 岩石学报, 2017, 33(4): 1094-1106.
- BAO Hong-ping, YANG Fan, BAI Hai-feng, et al. Sedimentology Study on Sub-member Lithofacies Paleogeography Mapping and Its Petroleum Exploration Significance: Taking Ma5 Member of Lower Ordovician Majiagou Formation in Central-eastern Ordos Basin for Example [J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(4): 1094-1106.
- [7] 苏中堂,陈洪德,徐粉燕,等. 鄂尔多斯盆地马家沟组白云岩成因及其储集性能[J]. 海相油气地质, 2013, 18(2): 15-22.
- SU Zhong-tang, CHEN Hong-de, XU Fen-yan, et al. Genesis and Reservoir Property of Lower Ordovician Majiagou Dolostones in Ordos Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2013, 18(2): 15-22.
- [8] 任军峰,杨文敬,丁雪峰,等. 鄂尔多斯盆地马家沟组



- 白云岩储层特征及成因机理[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2016, 43(3): 274-281.
- REN Jun-feng, YANG Wen-jing, DING Xue-feng, et al. Discussion on Characteristics and Origin of Majiagou Formation Dolomite Reservoir in Ordos Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 2016, 43(3): 274-281.
- [9] 郑定业, 姜福杰, 刘铁树, 等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴地区天然气成因类型及气源分析[J]. 地球科学与环境学报, 2018, 40(2): 203-214.
- ZHENG Ding-ye, JIANG Fu-jie, LIU Tie-shu, et al. Genetic Types and Sources of Natural Gas in Linxing Area, the Eastern Margin of Ordos Basin, China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(2): 203-214.
- [10] 苏中堂, 陈洪德, 林良彪, 等. 靖边气田北部下奥陶统马五<sub>1</sub>段古岩溶储层特征及其控制因素[J]. 矿物岩石, 2011, 31(1): 89-96.
- SU Zhong-tang, CHEN Hong-de, LIN Liang-biao, et al. Characteristics and Control Factors of Palaeokarst Reservoir of the Majiagou Formation of Lower Ordovician in Northern Jingbian Gas Field of Ordos Basin [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2011, 31(1): 89-96.
- [11] 李凤杰, 杜凌春, 赵俊兴, 等. 鄂尔多斯盆地苏东地区马家沟组五段 5 亚段白云岩成因[J]. 石油学报, 2016, 37(3): 328-338.
- LI Feng-jie, DU Ling-chun, ZHAO Jun-xing, et al. Dolomite Genesis in Member Ma5<sub>5</sub> of Majiagou Formation, Sudong Area, Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(3): 328-338.
- [12] 李伟, 涂建琪, 张静, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组自源型天然气聚集与潜力分析[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(4): 521-530.
- LI Wei, TU Jian-qi, ZHANG Jing, et al. Accumulation and Potential Analysis of Self-sourced Natural Gas in the Ordovician Majiagou Formation of Ordos Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(4): 521-530.
- [13] 任军峰, 包洪平, 孙六一, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系风化壳岩溶储层孔洞充填特征及机理[J]. 海相油气地质, 2012, 17(2): 63-69.
- REN Jun-feng, BAO Hong-ping, SUN Liu-yi, et al. Characteristics and Mechanism of Pore-space Filling of Ordovician Weathering Crust Karst Reservoirs in Ordos Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2012, 17(2): 63-69.
- [14] 田亚, 杜治利, 刘宝宪, 等. 鄂尔多斯盆地东南部宜川—黄龙地区奥陶系风化壳储层发育特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017, 47(6): 1620-1630.
- TIAN Ya, DU Zhi-li, LIU Bao-xian, et al. Characteristics of Ordovician Weathering Crust Reservoir in Yichuan-Huanglong Area, Southeastern Ordos Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47(6): 1620-1630.
- [15] 苏中堂, 陈洪德, 赵俊兴, 等. 鄂尔多斯盆地靖边北部奥陶系马五 4-1 段成岩作用特征[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2008, 35(2): 194-200.
- SU Zhong-tang, CHEN Hong-de, ZHAO Jun-xing, et al. The Diagenesis Character in Member 5-4-1 of Ordovician Majiagou Formation and Petroleum Geology Significance in the North of Jingbian Gasfield, Ordos Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition), 2008, 35(2): 194-200.
- [16] 杨帅, 陈安清, 陈洪德, 等. 鄂尔多斯盆地东部马家沟组含钾蒸发岩系沉积机制及保存条件[J]. 中国地质, 2016, 43(6): 2192-2201.
- YANG Shuai, CHEN An-qing, CHEN Hong-de, et al. The Sedimentation Mechanism and Preservation Condition of the Potassium Evaporate Series in the Majiagou Formation, East of Ordos Basin [J]. Geology in China, 2016, 43(6): 2192-2201.
- [17] 王琪, 许勇, 刘新社, 等. 岩溶背景下的优质天然气储层形成机理及主控因素: 以鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组马五<sub>1</sub>储层为例[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(12): 2103-2114.
- WANG Qi, XU Yong, LIU Xin-she, et al. Forming Mechanism and Main Controlling Factors on the High-quality Gas Reservoirs Restricted by Paleokarst Background: A Case from Ordovician M5<sub>1</sub> Carbonate, Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(12): 2103-2114.
- [18] 李国欣, 赵太平, 石玉江, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组碳酸盐岩储层成岩相测井识别评价[J]. 石油学报, 2018, 39(10): 1141-1154.
- LI Guo-xin, ZHAO Tai-ping, SHI Yu-jiang, et al. Diagenetic Facies Logging Recognition and Evaluation of Carbonate Reservoirs in Majiagou Formation, Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(10): 1141-1154.
- [19] 付金华, 吴兴宁, 孙六一, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组中组合岩相古地理新认识及油气勘探意义[J]. 天然气工业, 2017, 37(3): 9-16.
- FU Jin-hua, WU Xing-ning, SUN Liu-yi, et al. New Understandings of the Lithofacies Paleogeography of

- the Middle Assemblage of Majiagou Formation in the Ordos Basin and Its Exploration Significance[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(3): 9-16.
- [20] 董岩,王少依,柏淑英,等. 鄂尔多斯盆地宜川—黄龙地区奥陶系风化壳储层特征及主控因素研究[J]. *海相油气地质*, 2017, 22(3): 37-46.
- DONG Yan, WANG Shao-yi, BAI Shu-ying, et al. Characteristics and Controlling Factors of Ordovician Weathering Crust Reservoir in Yichuan-Huanglong Area, Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2017, 22(3): 37-46.
- [21] 侯方浩,方少仙,董兆雄,等. 鄂尔多斯盆地中奥陶统马家沟组沉积环境与岩相发育特征[J]. *沉积学报*, 2003, 21(1): 106-112.
- HOU Fang-hao, FANG Shao-xian, DONG Zhao-xiong, et al. The Developmental Characters of Sedimentary Environments and Lithofacies of Middle Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(1): 106-112.
- [22] 王国亭,程立华,孟德伟,等. 鄂尔多斯盆地东部奥陶系古岩溶型碳酸盐岩致密储层特征、形成机理与天然气富集潜力[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(4): 685-695.
- WANG Guo-ting, CHENG Li-hua, MENG De-wei, et al. Characterization and Formation of the Ordovician Tight Paleokarst Carbonates in the Eastern Ordos Basin and Its Gas Accumulation[J]. *Oil and Gas Geology*, 2018, 39(4): 685-695.
- [23] 王建民,王佳媛. 古岩溶地貌与古岩溶储层岩溶效应分析:以鄂尔多斯盆地东部奥陶系风化壳为例[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(8): 1388-1398.
- WANG Jian-min, WANG Jia-yuan. The Karst Effect on the Palaeokarst Geomorphology and Palaeokarst Reservoir: A Case Study of the Ordovician Weathering Crust, Eastern Ordos Basin, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(8): 1388-1398.
- [24] 夏日元,唐建生,邹胜章,等. 碳酸盐岩油气田古岩溶研究及其在油气勘探开发中的应用[J]. *地球学报*, 2006, 27(5): 503-509.
- XIA Ri-yuan, TANG Jian-sheng, ZOU Sheng-zhang, et al. Palaeokarst Research of the Carbonate Oil-gas Field and Its Application to Oil-gas Exploration and Development[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2006, 27(5): 503-509.
- [25] 张添锦,王云. 鄂尔多斯盆地岩溶古地貌恢复与天然气富集关系:以高桥地区奥陶系马家沟组马五段为例[J]. *西北地质*, 2017, 50(2): 207-213.
- ZHANG Tian-jin, WANG Yun. The Relationship Between Karst Palaeogeomorphology Recovery and Gas Enrichment in Ordos Basin: Example from Mawu Section of Ordovician Majiagou Formation in Gaoqiao Area[J]. *Northwestern Geology*, 2017, 50(2): 207-213.
- [26] 张军涛,金晓辉,李淑筠,等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马五段孔隙充填物类型与成因[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(5): 684-690.
- ZHANG Jun-tao, JIN Xiao-hui, LI Shu-jun, et al. Types and Origin of Pore-fillings from the 5th Member of the Ordovician Majiagou Formation in Ordos Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 2016, 37(5): 684-690.
- [27] 方少仙,何江,侯方浩,等. 鄂尔多斯盆地中部气田区中奥陶统马家沟组马五<sup>5</sup>—马五<sup>1</sup>亚段储层孔隙类型和演化[J]. *岩石学报*, 2009, 25(10): 2425-2441.
- FANG Shao-xian, HE Jiang, HOU Fang-hao, et al. Reservoirs Pore Space Types and Evolution in M<sub>5</sub><sup>5</sup> to M<sub>5</sub><sup>1</sup> Submembers of Majiagou Formation of Middle Ordovician in Central Gasfield Area of Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(10): 2425-2441.
- [28] 赵卫卫,王宝清. 鄂尔多斯盆地苏里格地区奥陶系马家沟组马五段白云岩的地球化学特征[J]. *地球学报*, 2011, 32(6): 681-690.
- ZHAO Wei-wei, WANG Bao-qing. Geochemical Characteristics of Dolomite from 5<sup>th</sup> Member of the Ordovician Majiagou Formation in Sulige Area, Ordos Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2011, 32(6): 681-690.
- [29] 刘宝宪,王红伟,马占荣,等. 鄂尔多斯盆地东南部宜川—黄龙地区马五段白云岩次生灰化作用特征与成因分析[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(5): 789-795.
- LIU Bao-xian, WANG Hong-wei, MA Zhan-rong, et al. Secondary Limestone Action on Ma<sub>5</sub> Member Dolomites in Yichuan-Huanglong Region of Southeastern Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(5): 789-795.
- [30] 苏中堂,柳娜,杨文敬,等. 鄂尔多斯盆地奥陶系表生期岩溶类型、发育模式及储层特征[J]. *中国岩溶*, 2015, 34(2): 109-114.
- SU Zhong-tang, LIU Na, YANG Wen-jing, et al. Types and Models of Supergene Karst of Ordovician and Reservoir Characteristics in Ordos Basin[J]. *Carologica Sinica*, 2015, 34(2): 109-114.