

## 白云岩储层中蒸发矿物的赋存形式与成因演化

——以鄂尔多斯盆地中部气田区马家沟组为例

何江<sup>1,2</sup>,赵忠军<sup>3</sup>,乔琳<sup>4</sup>,魏伟<sup>4</sup>,王雅洁<sup>4</sup>,冯春强<sup>1</sup>,陈博<sup>1</sup>,陈超<sup>1</sup>

(1. 西南石油大学 资源与环境学院,四川 成都 610500; 2. 成都理工大学 地球科学学院,四川 成都 610059;

3. 中国石油 长庆油田分公司,陕西 西安 710018; 4. 中国石油 西南油气田分公司,四川 成都 610051)

**摘要:**鄂尔多斯盆地中部气田区马家沟组马5<sup>1</sup>—马5<sup>4</sup>亚段粉晶白云岩中广泛发育毫米级、厘米级的硬石膏柱状晶和小结核等蒸发矿物,是储层发育的关键。通过详细的井下地质调查、典型岩心剖面写实、系统取样配套测试和室内对比分析等方法,首次针对硬石膏矿物的赋存形式与成因演化进行精细解剖。研究发现:硬石膏柱状晶和小结核赋存于粉晶白云岩中,其中柱状晶多呈星散状分布,而硬石膏小结核发育有中-高成核数量中核径、中-高成核数量小核径及低成核数量大核径3种典型结构。上述硬石膏矿物均为局限(内)陆棚环境准生期或早成岩浅埋藏期交代先期白云岩的产物,其数量多少取决于硬石膏开始析出时海水含盐度的高低,个体大小取决于海水中适合于硬石膏生长的含盐度持续时间的长短。不同蒸发矿物组合在成岩阶段将经历不同的改造过程。其中,含中-高成核数中核径硬石膏结核的粗粉晶白云岩中,残余溶模孔及伴生的裂碎缝极其发育,最终演化为区内最为优质的裂缝-溶孔(洞)型储层。

**关键词:**赋存形式;成因演化;蒸发矿物;白云岩储层;马家沟组;鄂尔多斯盆地

**中图分类号:**TE122.2

**文献标识码:**A

## Occurrence, genesis and evolution of evaporite minerals in dolomite reservoir: a case study of the Majiagou Formation in gas fields of the central Ordos Basin

He Jiang<sup>1,2</sup>, Zhao Zhongjun<sup>3</sup>, Qiao Lin<sup>4</sup>, Wei Wei<sup>4</sup>, Wang Yajie<sup>4</sup>, Feng Chunqiang<sup>1</sup>, Chen Bo<sup>1</sup>, Chen Chao<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environment Engineering, Southeast Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;

2. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. PetroChina Changqing

Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 4. PetroChina Southwest Oilfield Company, Chengdu, Sichuan 610051, China)

**Abstract:** Anhydrite columnar crystal and nodules of millimeter to centimeter sizes are widely developed in the crystal powder dolomite of Ma 5<sup>1</sup> - 5<sup>4</sup> (the 1<sup>st</sup> to 4<sup>th</sup> submembers of the 5<sup>th</sup> member of Majiagou Formation) in the gas fields of the central Ordos Basin, and are critical to reservoir development. The occurrence, genesis and evolution of anhydrite were finely analyzed for the first time through detailed subsurface geological survey, observation of typical core section, system sampling and testing, indoor comparative analysis, and so on. The anhydrite columnar crystals and small nodules occur in crystal powder dolomite. The columnar crystals are scattered in the dolomite, while the small nodules have three typical distribution forms, namely medium nuclear diameter in middle-high nucleation number, small nuclear diameter in middle-high nucleation number and large nuclear diameter in low nucleation number. All of the anhydrite minerals mentioned above are the products of metasomasis of early dolomite during penecontemporaneous or shallow burial periods in an restricted (inside) continental shelf environment. of the amount of anhydrite minerals depends on the seawater salinity at the beginning of anhydrite precipitation, while their sizes are controlled by the duration of seawater salinity that is suitable for the growth of anhydrite minerals. Moreover, different evaporite mineral associations may experience different process of modification. Residual moldic pores and associated cracks are highly developed in the coarse crystal powder dolomite of medium nuclear diameter in middle-high nucleation number, which finally evolved into the high quality fractured-vuggy reservoir in the area.

**Key words:** occurrence, genesis and evolution, evaporite mineral, dolomite reservoir Majiagou Formation, Ordos Basin

收稿日期:2013-07-19;修订日期:2013-08-13。

第一作者简介:何江(1981—),男,讲师、博士,油气地质。E-mail:78197878@qq.com。

基金项目:国家油气重大专项(2011ZX05001)。

世界油气藏储量约30%赋存于局限-蒸发海相环境形成的白云岩储层中,伴生的蒸发矿物溶解之后可构成重要的储、渗空间,是储层发育的关键。目前,与局限-蒸发海相沉积及伴生蒸发矿物有关的油、气田在中东、北美、西欧、西伯利亚、澳大利亚等广大地区均有发现。同时,在中国鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组、四川盆地华蓥山东、西两侧上石炭统黄龙组、新疆塔里木盆地丘里塔格群、四川盆地地下-中三叠统嘉陵江组及雷口坡组以及震旦系灯影组中也广泛分布。

20世纪60年代以来,国外对地质历史时期局限-蒸发海相地层及伴生蒸发矿物的研究取得了一系列进展,初步建立了相应的基础理论体系;Kendal<sup>[1]</sup>发现许多古代蒸发岩是在封闭、超咸的水盆的水下沉积的,如美国德克萨斯州和新墨西哥州的二叠系卡斯提尔组储层、加拿大西部中泥盆统的马斯克格组和温尼伯戈西斯组储层。Given和Wilkinson<sup>[2]</sup>对整个地质历史时期蒸发海相的地层和蒸发矿物的分布规律有精辟的分析;Loucks和Anderson<sup>[3]</sup>,Amthor和Friedman<sup>[4]</sup>对德克萨斯州下奥陶统和中泥盆统局限-蒸发海相地层的研究,发现了受硬石膏和石盐控制的堤礁储层。近年来,国内相关研究主要集中于鄂尔多斯盆地马家沟组<sup>[5-14]</sup>,普遍认为“特定环境沉积的含硬石膏柱状晶和小结核的粉晶白云岩是储层发育的物质基础,而表生成岩期和埋藏成岩期形成的次生孔、缝、洞及构造裂隙的发育与保存好坏程度是能否形成良好储层的关键”。“硬石膏柱状晶和小结核溶解度远比白云岩高,伴随其溶解和释压,形成大量的裂碎缝及溶孔,构成主要的孔隙网络”,取得了大量重要认识,但针对储层发育的关键因素“蒸发矿物-硬石膏柱状晶和小结核”尚无精细解剖的实例。

笔者以鄂尔多斯盆地中部气田区马家沟组马5<sup>1</sup>—马5<sup>4</sup>亚段为研究主体,在岩心精细观察、描述的基础上,针对不同岩石类型进行系统取样,同一样品栓作铸体薄片、压汞、孔隙度、渗透率测试,以地质背景和水化学条件为主线,解剖了硬石膏柱状晶和小结核的赋存形式、成因及演化规律,并分析其油气地质意义。

## 1 地质背景

古生代奥陶纪,鄂尔多斯盆地因西侧贺兰裂谷拉张作用引起的裂谷肩翘升及其均衡作用,形成一隆(中央古隆起)一坳(陕北古坳陷)的古地貌特征(图1)<sup>[15-17]</sup>,马5段沉积期,因气候趋于干热,蒸发量大于大气降水量,海水不断浓缩,导致盆地内整体海平面降低,循环性差,海水含盐度不断升高,整体发育为局限或半局限内陆棚环境,进入超盐度蒸发盐沉淀和

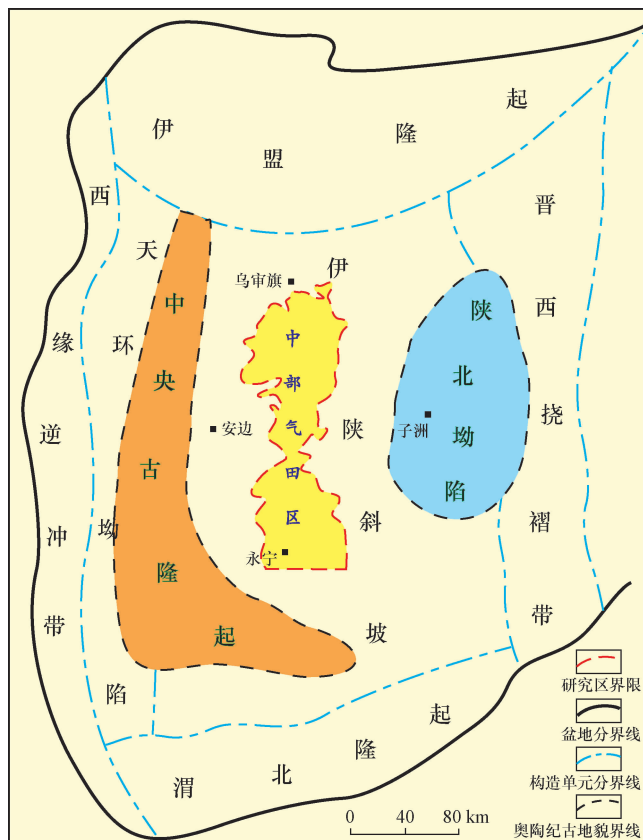


图1 鄂尔多斯盆地中部气田区位置

Fig. 1 Location of the gas fields in the central Ordos Basin

高密度梯度的发育阶段,东部陕北古坳陷中石膏层和石盐的厚度可达数百米<sup>[18]</sup>。此时,中部气田区位于内陆棚陕北古坳陷盆地向中央古隆起四周缓缓向上倾斜的较开阔坪地,主要处于浅水和较浅水环境,大面积呈现出宽缓的盆缘含硬石膏的白石岩坪与盆缘硬石膏白云岩坪相带,沉积了微-粉晶白云岩、含硬石膏柱状晶和小结核白云岩、含硬石膏质粉晶白云岩等组合。

中奥陶世末,因晚加里东运动整体抬升,后经历了130余百万年的沉积间断,盆地主体缺失晚奥陶世至早石炭世的沉积,导致马家沟组顶部遭受不同程度的风化剥蚀。古岩溶作用主要发生在含硬石膏柱状晶和小结核的粉晶白云岩中,因硬石膏的溶解度远比白云石高,其基岩粉晶白云岩亦多孔。伴随硬石膏柱状晶和小结核的溶解和释压,形成形式多样的溶模孔及伴生的裂缝,并与成互层或夹层的粗粉晶白云岩一起形成早期的,也是主要的孔隙网络,奠定了储层发育的基础<sup>[19]</sup>。

## 2 硬石膏柱状晶和小结核赋存形式

目的层位中广泛发育的毫米级、厘米级的硬石膏柱状晶和小结核溶模孔,其产状、大小及含量变化多端。

据大量的岩心及薄片观察发现,硬石膏结核溶模



孔呈不规则的小球状赋存于粉晶白云岩中,主要存在以下 3 种典型分布形式。① I 型中 - 高成核数量中核径,发育于薄 - 中层含硬石膏结核溶模孔的粉晶白云岩中(图 2a),溶模孔含量高,达 15% ~ 25%,并常含少量硬石膏柱状晶。核径一般为 2 ~ 3 mm 左右,这是最常见的型式。与不含或少含结核的粉晶白云岩常呈递变和互层关系。基岩中白云石晶体较粗,一般为 0.03 ~ 0.04 mm,个别可大于 0.05 mm 达到粗粉晶级,常含 1% ~ 2% 或更多的晶间隙。② II 型中 - 高成核数量小核径,发育于薄层状含小核径硬石膏结核溶模孔的粉晶白云岩中(图 2b),溶模孔含量中等,5% ~ 10% 左右,很少有硬石膏柱状晶伴生,核径仅 1 mm 左右。从结核个数来讲,可能与 I 型式白云岩中的个数不相上下,但因核径小,因而在岩石中的含量较少。含结核层向上、下过渡为不含硬石膏结核的细粉晶、甚至微晶白云岩。基岩中的白云石晶径较细,一般为 0.01 ~ 0.03 mm,有的在显微镜低倍镜头下几乎成微

晶级。③ III 型 - 低成核数量大核径,分布于薄层状含大核径硬石膏结核的粉晶白云岩中(图 2c),剖面上硬石膏结核核径和数量成正粒序或逆粒序分布。因而由下向上结核量为 10% ~ 0,或 0 ~ 10% 左右,核径可大于 5 mm,由于结核核径大,因而结核数量较少。基岩中白云石晶径较细,仅 0.01 ~ 0.03 mm 左右。

硬石膏柱状晶主要在细粉晶白云岩中呈星散状赋存,含量一般不超过 5%,但亦见个别层内硬石膏晶体成纹层状产出,纹层内含量可达 20% ~ 30%,而且晶体长度亦较大,有的长径可达 2 ~ 3 mm(图 2d)。硬石膏柱状晶为斜方晶系,由于 *a* 轴和 *c* 轴在基本晶胞中的长度几乎相等,因之沿 *a* 轴的切面几乎为正方形。硬石膏晶可以为板柱状,也可以沿 *b* 轴方向生长成细长柱状。

上述不同赋存形式的硬石膏柱状晶和小结核溶模孔绝大多数均经历了细粉晶白云石、石英、方解石等矿物多期复杂的,但又不同程度的充填和交代 - 充填,剩余的溶模孔隙量为 0 ~ 75%(图 2e,f)。

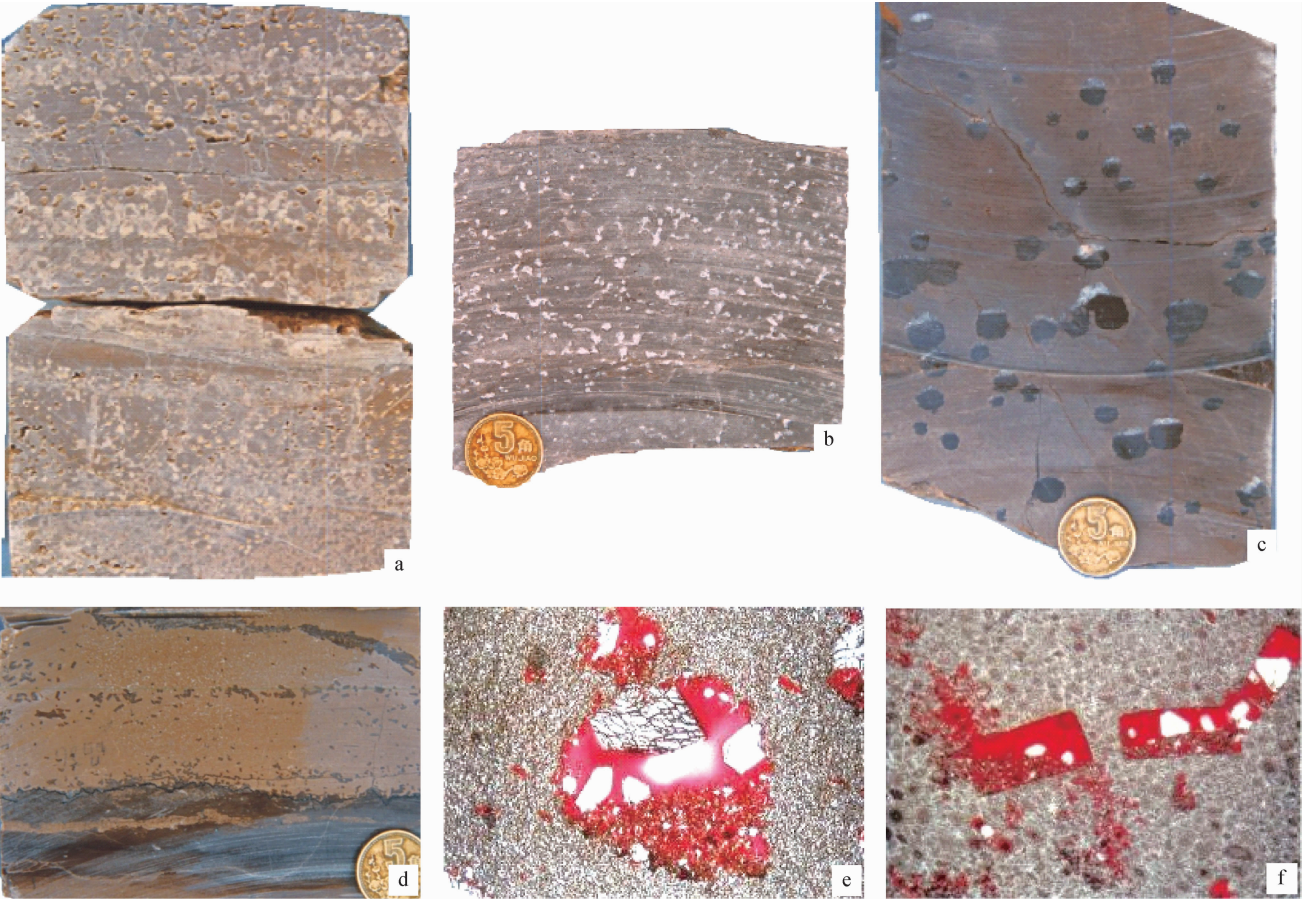


图 2 鄂尔多斯盆地中部气田区硬石膏柱状晶和小结核典型赋存形式

Fig. 2 Occurrences of anhydrite columnar crystal and nodules in the gas fields of the central Ordos Basin

a. 含硬石膏结核粉晶白云岩与粉晶白云岩成不等厚的薄互层(或纹层),榆 38 井,马 5<sup>1(3)</sup>, 3 191.30 m; b. 含硬石膏结核的细粉晶白云岩中结核溶模孔已完全被方解石交代 - 充填,隐约可见纵向的方解石细脉,陕 250 井,马 5<sup>1(4)</sup>, 3 577.10 m; c. 硬石膏结核具正粒序构造,结核溶模孔上部被方解石充填,显示“假示底”构造,莲 3 井、马 5<sup>4</sup>, 3 944.20 m; d. 细粉晶白云岩中含纹层状、星散状的硬石膏柱状晶,陕 221 井,马 5<sup>2(2)</sup>, 3322.70m; e. 硬石膏结核溶模孔被细粉晶亮晶白云石、石英、方解石半充填,单偏光,铸体片,城川 1 井,马 5<sup>3(3)</sup>, 2 636.21 m; f. 呈板状的硬石膏柱状晶溶模孔,被细粉晶亮晶白云石、石英半充填,单偏光,铸体片, G42 - 8 井,马 5<sup>1(2)</sup>, 3 674.06 m



3 硬石膏柱状晶和小结核成因及演化

3.1 硬石膏柱状晶和小结核成因

国内外众多学者对区内白云岩的成因机理做了深入研究,取得了大量共识。目前主流观点认为区内泥微晶白云岩为准同生白云岩化,晶粒白云岩为埋藏白云岩化,但局部仍然存在热液白云岩化<sup>[20-24]</sup>。通过对工区 87 口井岩心的宏观观察,426 个铸体薄片的微观分析表明,硬石膏柱状晶和小结核均为局限(内)陆棚环境中交代先期白云岩的产物,既可以在准同生期,随海水继续浓缩对沉积界面及附近白云质沉积物发生交代,亦可以于早成岩浅埋藏期由浓缩的隙间水交代半固结甚至固结的白云岩,证据如下。

1) 在林 5 井马 5<sup>4(1)</sup>、陕 12 井马 5<sup>3(2)</sup> 和马 5<sup>4(1)</sup>、陕 106 井马 5<sup>2(1)</sup> 及陕 193 井、陕 175 井马 5<sup>4(1)</sup> 小层均见到保存完好的硬石膏结核,结核中由若干个硬石膏晶体成向心花瓣状生长,达二级鲜艳的干涉色,内部均含有分散的交代基岩后的细粉晶白云石包裹体(图 3a)。此外,显微镜下赋存硬石膏结核的白云岩毫无例外的为粉晶白云岩,在微(泥)晶白云岩中很少见到,可见

硬石膏结核是细粉晶白云岩沉积后交代析出。

2) 多口井岩心中均发育呈不等厚薄互层的高能沉积竹叶状白云岩与低能沉积细粉晶白云岩,两种岩心中均含组构一致的硬石膏结核(图 3b)。硬石膏结核既可交代于竹叶片内,亦可交代在竹叶片间的粉晶屑白云石填隙物内,更可见同一结核跨越于竹叶片和填隙物两者之间交代。竹叶状白云岩是白云岩沉积后,准同生半固结状态下遭受高能环境影响破碎、搬运和再沉积的产物,如果说硬石膏结核与白云岩是同时形成的,那么受高能环境影响,硬石膏结核也会遭受一定程度的破坏,更不可能出现在白云石粉晶屑填隙物内。因之硬石膏结核是竹叶状白云岩及与之成互层的粉晶白云岩形成后,海水继续浓缩至硬石膏结晶的区间交代而成的。

3) 亮晶砂屑、粉晶屑白云岩、亮晶生物(屑)白云岩、亮晶鲕粒白云岩中的硬石膏柱状晶和小结核溶模孔,或被方解石再充填的溶模孔中残留下上述白云岩的部分组构。这些白云岩经早成岩亮晶胶结作用并已基本固结成岩,以后被硬石膏柱状晶和小结核交代(图 3c,d)。最具代表性的是陕 251 井马 5<sup>4(1)</sup> 段亮晶细鲕粒白云岩中硬石膏结核的交代现象,鲕粒沉积后被亮晶白云石环边胶结,仍残余约 15% 的原生粒间孔(图 3e 左)。此后,硬石膏结核分散沉淀在原粒间残

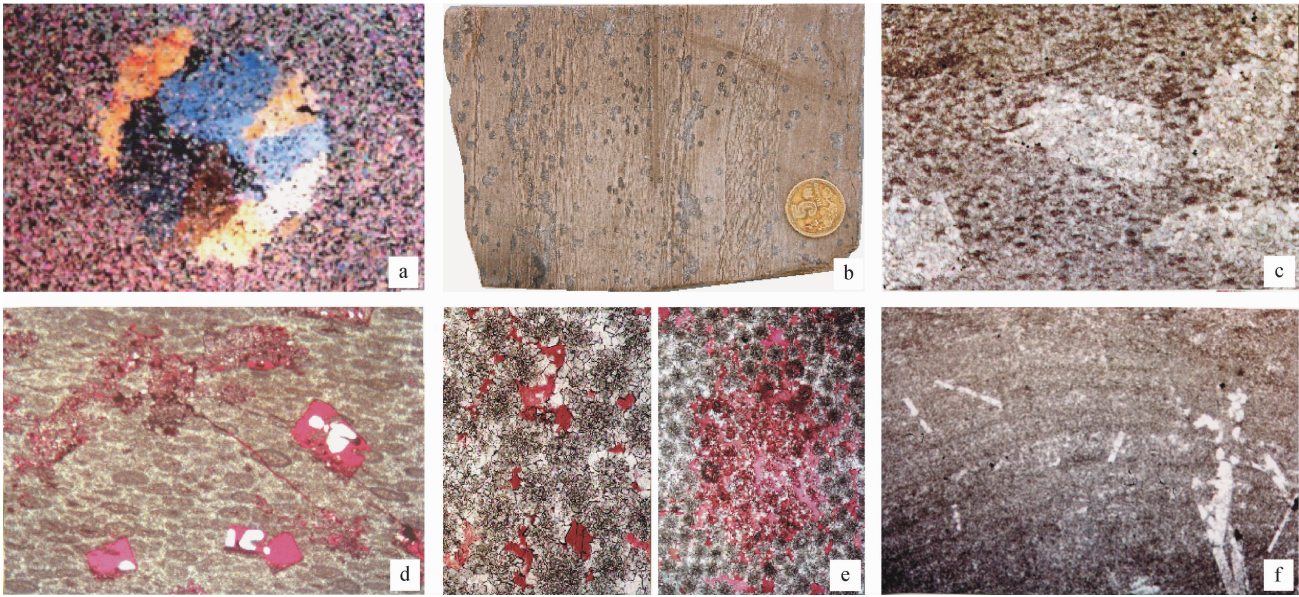


图 3 鄂尔多斯盆地中部气田区硬石膏柱状晶及小结核交代白云岩

Fig. 3 Metasomatic dolomite with anhydrite columnar crystal and nodules in the gas field of the central Ordos Basin

a. 粉晶白云岩中交代的硬石膏结核,结核由若干个硬石膏晶体从中心向外镶嵌生长,内有交代残余的粉晶白云石及幻影,正交光,铸体片,陕 12 井,马 5<sup>4(1)</sup>,3 331.66 m;b. 竹叶状白云岩,下部与粉晶白云岩薄互层之间具明显的冲刷构造,相同组构的硬石膏结核交代于两种岩性内,陕 223 井,马 5<sup>4(1)</sup>,3 410.60 m;c. 浅埋藏期硬石膏板柱状晶交代入亮晶砂、粉屑白云岩中,并包裹了原岩的组构,溶模孔已被方解石充填,方解石内包裹有原亮晶砂、粉屑白云岩的残余,单偏光,铸体片,莲 4 井,马 5<sup>4(2)</sup>,3 923.13 m;d. 浅埋藏期硬石膏板柱状晶交代入亮晶介形虫白云岩中,板柱状晶中包裹了原岩的组构,溶模孔被方解石充填,单偏光,染色片,G42-8 井,马 5<sup>1(2)</sup>,3 674.07 m;e(左). 细粒亮晶鲕粒白云岩,15%残余粒间孔隙埋藏期被连晶方解石充填,单偏光,染色片,陕 251 井,马 5<sup>1(4)</sup>,3 123.48 m;e(右). 浅埋藏期交代入亮晶鲕粒白云岩的硬石膏结核,单偏光,染色片,陕 251 井,马 5<sup>1(4)</sup>,3 123.48 m;f. 硬石膏柱状晶交代并切割叠层石的藻纹层构造,单偏光,铸体片,陕 175 井,马 5<sup>2(2)</sup>,3 151.90 m

余孔隙中,同时交代掉部分鲕粒和早期的亮晶白云岩,并将未交代部份包裹在结核内,结核边缘因鲕粒及残余粒间孔的存在而成花边状。由于白云石溶解度远小于硬石膏,因此硬石膏结核溶解后,残余下原被包裹于其内的交代残余的鲕粒和亮晶白云石。埋藏期,硬石膏结核中的溶模孔与周边亮晶鲕粒白云岩中的粒间残余孔隙,一并被连晶方解石充填、胶结(图3e右)。细粒且大小均匀的鲕粒是在相对湿热、水体稍深、动荡的正常海水中形成的沉积物,浅埋藏期潮湿的气候,在鲕粒间发育大气淡水(为主)的粉晶亮晶方解石环边胶结物,残余15%~20%的粒间孔,随着气候转为干旱,早期沉积物白云石化。继后气候较快的转为干旱,海水快速浓缩,处于浅埋藏经早期胶结的鲕粒白云岩残余粒间孔尚来不及被第二世代胶结物充填满以前,发生硬石膏结核的交代作用。后期,结核中硬石膏溶解后,溶孔与周边鲕粒间残余粒间孔一并被连晶方解石充填。从上述看出,这些亮晶颗粒白云岩中硬石膏柱状晶和小结核是浅埋藏早成岩期由浓缩的粒间水中析出和交代的产物。

4) 硬石膏柱状晶交代叠层石白云岩也与之印证,并切割藻纹层(图3f)。藻叠层石初始沉积为方解石质,经准同生白云石化使之成为叠层石白云岩,然后

才有硬石膏柱状晶交代并切割藻层纹。

3.2 硬石膏柱状晶和小结核演化规律

正常循环海水含盐度为3.5%,海水中Mg/Ca比大致为3:1,海水对方解石和白云石都是饱和的。方解石可以被生物汲取组成骨壳或以灰泥形式沉淀出来,但白云石却不能。但当气候炎热、海水浓缩,Mg<sup>2+</sup>的活度增强,可以与CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>结合组成单分子层,并交代早先形成的方解石<sup>[25-26]</sup>。当海水浓缩到原体积的19%以下,含盐度从3.5%增大到15%~17%,海水密度达到1.1 g/cm<sup>3</sup>时硬石膏开始析出;海水浓缩到原体积的7%,含盐度达到26%,密度为1.2 g/cm<sup>3</sup>时,石盐开始析出。硬石膏的沉淀区带是浓缩后的残留海水仅为原海水体积的7%~19%,含盐度为17%~26%,密度为1.1~1.2 g/cm<sup>3</sup>(图4)。

如果海水含盐度仅仅略为突破硬石膏析出的门限值,在已沉积的粉晶白云岩表层中形成星散的硬石膏结晶中心,海水中析出的少量CaSO<sub>4</sub>围绕结晶中心缓慢沉淀,形成细小的硬石膏柱状晶星散地交代于先期沉淀出的白云岩中。如果海水含盐度间歇性地有所升高,硬石膏结晶中心有所增加,硬石膏柱状晶成纹层状沉淀出来,而且晶体亦较前种情况要大些。当海水含

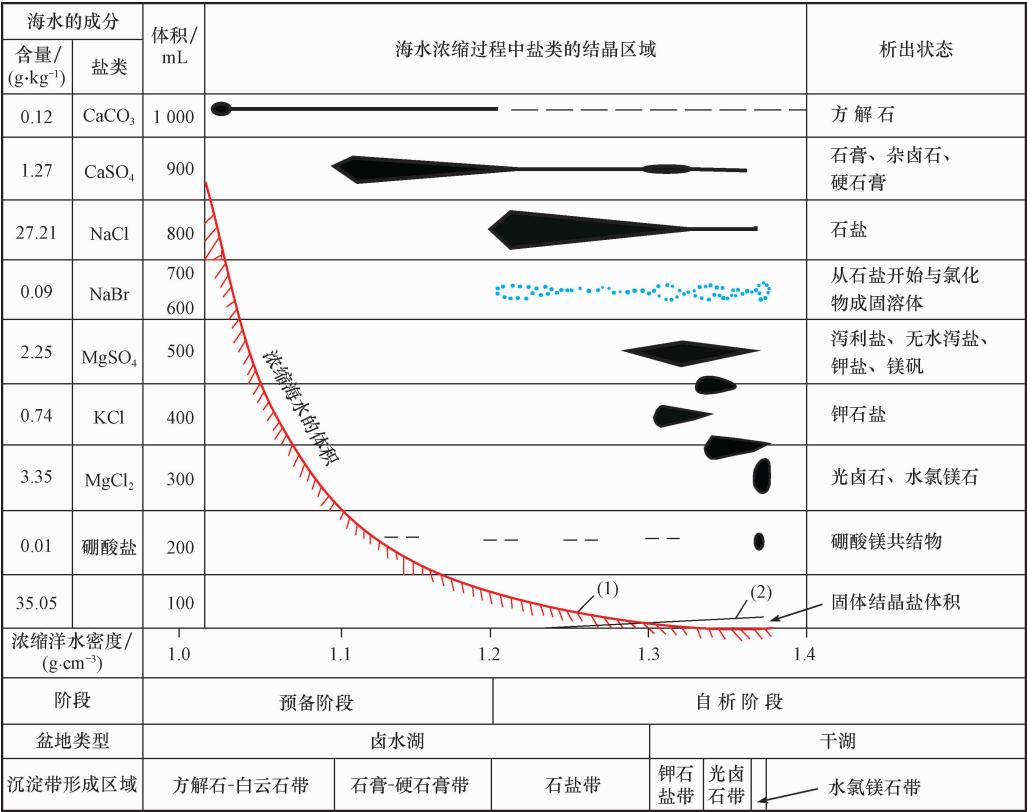


图4 鄂尔多斯盆地中部气田区海水浓缩过程中主要可溶组分析出顺序和析出固相盐体积变化

Fig. 4 Precipitation order of soluble components and the volume change of the precipitated solid during sea water evaporation in the gas fields of the central Ordos Basin

(1)海水浓缩时的体积变化曲线;(2)所析出固相盐类体积的变化(据冯增昭,1993,修改)



盐度提高,析出的  $\text{CaSO}_4$  相对较多,速度较快,在原已沉积的粉晶白云岩表层中发育较多的硬石膏成核中心,并依此形成硬石膏结核,或先有少量硬石膏柱状晶,后有小结核析出。每个小结核由若干个硬石膏晶体环绕成核中心向外生长,由于生长速度基本一致,形成内部由若干个硬石膏晶体嵌合,外围圆形的硬石膏结核并交代于先期沉积的白云岩中。溶液中矿物质(淀)出的成核数量和结晶速度、晶体大小取决于溶液中溶质的浓度和结晶时的温度,两者是相辅相成的。

①海水浓缩至密度大于  $1.1\text{ g/cm}^3$  后,如果气候干热,海水温度升高较快继续浓缩,会形成较大数量的硬石膏成核中心,而核径的大小取决于海水中适合于结核生长的含盐度持续时间的长短,如果温度继续升高,海水中含盐度上升,结核继续生长,将会形成数量较多,核径较大的硬石膏结核,同时基岩白云石晶径也相对较粗(Ⅰ型)。如果温度相对稳定,致使海水中含盐度不再升高或略有升高, $\text{CaSO}_4$  围绕成核中心形成小结核后,海水中  $\text{CaSO}_4$  含量降至析出浓度之下,结核停止生长,因而形成数量较多,但核径仅  $1\text{ mm}$  左右的硬石膏结核,基岩白云石晶径也较细(Ⅱ型)。

②海水浓缩至密度大于  $1.1\text{ g/cm}^3$  后,如果并非十分干热,致使海水中  $\text{CaSO}_4$  的含量提高得较慢,海水中只能形成少量成核中心, $\text{CaSO}_4$  围绕少数成核中心缓慢析出,将在先期沉积的白云岩内形成分散的、数量少,但核径较大的硬石膏结核(Ⅲ型)。

事实上还可以有各种过渡型式,岩心中亦常见不同型式的含硬石膏柱状晶和小结核粉晶白云岩以薄层、中层,甚至纹层状互相过渡或叠置。

4 硬石膏柱状晶和小结核油气地质意义

经过长期的成岩作用改造,原生的硬石膏柱状晶和小结核绝大多数受风化壳古岩溶溶蚀作用的影响发育溶解,其溶解过程分为两步,首先水化转变成单斜晶系的  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,即石膏,体积将增大  $30\%$ ,对白云质围岩增压,随后石膏溶解又对围岩释压,使得结核周

边的围岩裂碎,形成的裂碎缝极大的改善了储层。Ⅰ型硬石膏柱状晶和小结核赋存形式中小结核数量多、直径大,残余溶模孔发育,配合岩石中次生的微裂缝,常可形成较好的裂缝-溶孔(洞)型储层,也是研究区分布最广,最为优质的储层。Ⅱ型、Ⅲ型硬石膏结核及柱状晶数量较少,裂碎缝相对不发育,即便存在残余的溶模孔,也因裂碎缝不发育,连通性较差,影响了储层发育,多发育为中等或较差的溶孔型或孔隙型储层。

目的层位马  $5^1$  - 马  $5^4$  亚段中,自下而上主要有马  $5^{4(1)}$ 、马  $5^{2(2)}$ 、马  $5^{1(4)}$ 、马  $5^{1(3)}$ 、马  $5^{1(2)}$  五个主力小层(表 1),其中马  $5^{1(1)}$  厚  $4\text{ m}$  左右,岩性以Ⅰ型含硬石膏柱状晶和小结核的粉晶白云岩为主,含晶间孔隙的细-粗粉晶白云岩成前者的夹层或两者的逐渐过渡层状产出,共同组成  $2\sim3\text{ m}$  或更厚的储层段,是气田区最好的储集层(图 5)。

5 结论

1) 鄂尔多斯盆地中央气田区马  $5^1$  - 马  $5^4$  亚段中硬石膏柱状晶和小结核均赋存于粉晶白云岩中,其中硬石膏柱状晶多呈星散状存在,局部富集呈纹层状,硬石膏小结核发育中-高成核数量中核径、中-高成核数量小核径、低成核数量大核径三种典型分布形式,上述溶模孔绝大多经历了细粉晶白云石、石英、方解石等矿物不同程度的交代-充填。

2) 含硬石膏柱状晶和小结核的白云岩为水下超盐度的局限内陆棚环境沉积,互层状发育的高能沉积竹叶状白云岩与正常沉积白云岩均含组构一致的硬石膏结核、亮晶砂屑白云岩中的硬石膏柱状晶和小结核溶模孔中有白云岩的残余组构、硬石膏柱状晶交代叠层石白云岩等现象均表明:硬石膏柱状晶和小结核均为交代先期白云岩的产物,既可以在准同生期,随海水继续浓缩对沉积界面及附近白云质沉积物发生交代,亦可以于早成岩浅埋藏期由浓缩的隙间水交代半固结较好的储层马  $5^{1(2)}$  厚  $7\text{ m}$  左右,仅部分层段为Ⅰ型含硬石膏结核粉晶白云岩,但厚度也可达  $1\sim2\text{ m}$ 。而储集性能中等的马  $5^{1(4)}$ 、马  $5^{2(2)}$  和马  $5^{4(1)}$ ,Ⅰ型岩

表 1 鄂尔多斯盆地中部气田区奥陶系马家沟组马 5 段主要储层物性对比  
Table 1 Comparison of reservoir property characteristics of M5 of the Majiagou Formation  
in the gas fields of the central Ordos Basin

| 层位         | 孔隙度/% |      |      | 渗透率/( $10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$ ) |       |      | 含气饱和度/% |       |       |
|------------|-------|------|------|----------------------------------------|-------|------|---------|-------|-------|
|            | 最大值   | 最小值  | 平均值  | 最大值                                    | 最小值   | 平均值  | 最大值     | 最小值   | 平均值   |
| $5^{1(2)}$ | 8.04  | 1.06 | 3.51 | 13.33                                  | 0.006 | 2.38 | 84.73   | 7.18  | 54.44 |
| $5^{1(3)}$ | 10.39 | 0.28 | 4.31 | 13.99                                  | 0.004 | 3.16 | 93.15   | 40.14 | 66.97 |
| $5^{1(4)}$ | 13.30 | 0.50 | 2.79 | 13.27                                  | 0.005 | 1.18 | 84.35   | 29.40 | 47.68 |
| $5^{2(2)}$ | 6.52  | 0.66 | 2.59 | 10.27                                  | 0.004 | 1.00 | 73.49   | 24.24 | 44.70 |
| $5^{4(1)}$ | 10.34 | 0.10 | 4.00 | 12.81                                  | 0.009 | 2.10 | 60.15   | 22.49 | 47.39 |

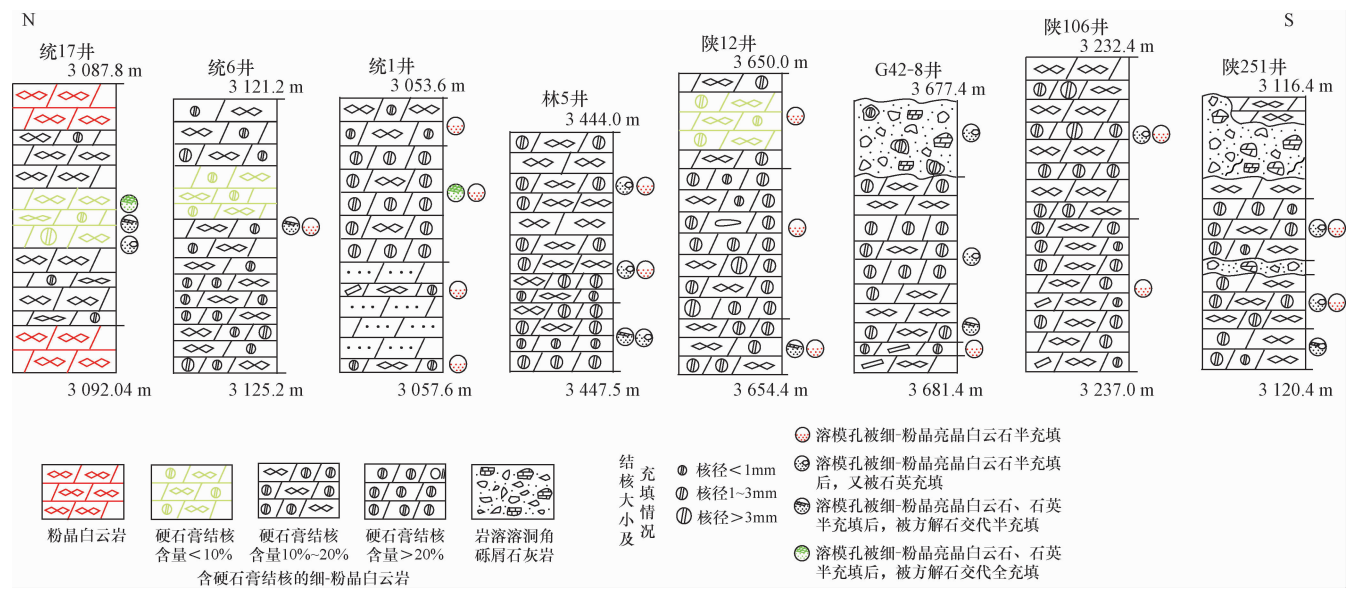


图5 鄂尔多斯盆地中部气田区统17—陕251井马5<sup>1(3)</sup>储层纵向对比

Fig.5 Vertical correlation of M5<sup>1(3)</sup> reservoir on cross-well section of Tong17-Shan251 in the gas fields of the central Ordos Basin

性在该小层所占的地层比相对较小,以Ⅱ型、Ⅲ型含硬石膏柱状晶和小结核的粉晶白云岩、细粉晶白云岩为主,储集性能中等。物性分析同样表明,马5<sup>1(3)</sup>和马5<sup>1(2)</sup>最优,马5<sup>1(4)</sup>、马5<sup>2(2)</sup>和马5<sup>4(1)</sup>次之。

3) 硬石膏柱状晶和小结核的数量多寡取决于硬石膏开始析出时海水含盐度的高低,即所能形成成核中心的多少,核径大小主要取决于海水中适合于结核生长的含盐度持续时间的长短,上述影响因素的变化形成了不同的赋存形式。此外,间歇性(交替)的海水含盐度变化,沉积出薄层或纹层含硬石膏结核粉晶白云岩和粉晶白云岩两者组成薄的过渡层,或者由两者组成间互层。

4) 经过长期的成岩作用改造,原生的硬石膏柱状晶和小结核绝大多数受风化壳古岩溶溶蚀作用的影响发育溶解,其过程使得结核周边的围岩裂碎,形成的裂碎缝极大的改善了储层。Ⅰ型硬石膏柱状晶和小结核赋存形式中小结核数量多、直径大,残余溶模孔发育,配合岩石中次生的裂碎缝,常可形成较好的裂缝-溶孔(洞)型储层,也是研究区分布最广,最为优质的储层。

致谢:本文为《鄂尔多斯盆地靖边潜台及周边储层分布与评价》项目成果之一,得到四川省天然气地质重点实验室资助及西南石油大学方少仙、侯方浩教授的细心指导与修改,并得到中国石油长庆油田分公司杨华、李安琪、付锁堂、姚径利、吴正等同志的关怀和大力支持,谨此致谢。

参 考 文 献

[1] Kendall A C. Evaporites in facies modes [J]. Geoscience, 1984, 47 (2): 259-298.  
[2] Given R K, Wilkinson B H. Perspectives: dolomite abundance and

stratigraphic age, constraints on rates and mechanisms of Phanerozoic dolomite formation [J]. Sedimentologica Petrology, 1987, 57 (3): 1068-1078.  
[3] Loucks R G, Anderson J H. Depositional facies diagenetic terranes and porosity development in lower Ordovician Ellenburger dolomite, Puckett field, west Texas [M]. New York: Springer-Verlag, 1985: 19-37.  
[4] Amthor J E, Friedman M. Dolomite-rock textures and secondary porosity development in Ellenburger Group Carbonates (Lower Ordovician) West Texas and Southeastern New Mexico [J]. Sedimentology, 1991, 38 (2): 343-362.  
[5] 何江,方少仙,侯方浩,等. 风化壳古岩溶垂向分带与储集层评价预测 [J]. 石油勘探与开发, 2013, 40 (5): 534-542.  
He Jiang, Fang Shaoxian, Hou Fanghao, et al. Vertical zonation of weathered crust ancient karst and the reservoir evaluation and prediction [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40 (5): 534-542.  
[6] 韩征,辛文杰. 准同生白云岩形成机理及其储集性——以鄂尔多斯地区下古生界主力气层白云岩为例 [J]. 地学前缘, 1995, 2 (3-4): 226-230, 247.  
Han Zheng, Xin Wenjie. Genetic mechanism and reservoir property of penecon-temporary dolostones—the example of the major pay dolostones, Lower Paleozoic, Ordos region [J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2 (3-4): 226-247.  
[7] 苏中堂,陈洪德,林良彪,等. 靖边气田北部下奥陶统马5<sub>4</sub><sup>1</sup>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 Zhongtang, Chen Hongde, Lin Liangbiao, 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.  
[8] 何江,方少仙,侯方浩,等. 鄂尔多斯盆地马家沟组岩溶型储层特征 [J]. 石油与天然气地质, 2009, 30 (03): 350-356.  
He Jiang, Fang Shaoxian, Hou Fanghao, et al. Characteristics of karst reservoirs of Majiagou Formation (Middle Ordovician) in central gasfield ar-

- ea, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2009, 30(3): 350–356.
- [9] 覃建雄, 曾允孚, 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地东部下奥陶统白云岩成因及储集特征[J]. *石油与天然气地质*, 1994, 15(4): 275–282.
- Qin Jianxiong, Zeng Yunfu, Yang Junjie. Origin of Lower Ordovician dolomitite in eastern Ordos Basin and its reservoir properties[J]. *Oil & Gas Geology*, 1994, 15(4): 275–282.
- [10] 覃建雄, 曾允孚. 鄂尔多斯盆地东部下奥陶统碳酸盐岩成岩后生变化及孔隙演化[J]. *石油勘探与开发*, 1993, 20(3): 91–103.
- Qin Jianxiong, Zeng Yunfu. Diagenesis and porosity evolution of the Lower Ordovician carbonate rocks in the eastern Ordos basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1993, 20(3): 91–103.
- [11] 吴亚生, 何顺利, 卢涛, 等. 长庆中部气田奥陶纪马家沟组储层成岩模式与孔隙系统[J]. *岩石学报*, 2006, 22(8): 2171–2181.
- Wu Yasheng, He Shunli, Lu Tao, et al. Diagenetic patterns and pore systems of the Lower Ordovician Changqing gas fields[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(8): 2171–2181.
- [12] 邸领军, 杨承运, 杨奕华, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组溶斑形成机理[J]. *沉积学报*, 2003, 21(2): 260–264.
- Di Lingjun, Yang Chengyun, Yang Yihua, et al. Solution spot genetic mechanism of Majiagou Formation in Ordovician of Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(2): 260–264.
- [13] 李儒峰, 鲍志东. 鄂尔多斯盆地中部马<sub>5</sub>亚段高分辨率层序地层格架中风化成岩模式和储层特征[J]. *沉积学报*, 1999, 17(3): 390–395.
- Li Rufeng, Bao Zhidong. Diagenesis model and reservoir characteristics within high resolution sequence stratigraphic framework in the Mawu-I submember in Ordos Basin, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(3): 390–395.
- [14] 马永生, 李启明, 关德师, 等. 鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系马<sub>5</sub><sup>1</sup>碳酸盐岩微相特征与储层不均质性研究[J]. *沉积学报*, 1996, 14(1): 22–32.
- Ma Yongsheng, Li Qiming, Guan Deshi, et al. Carbonate microfacies characteristics and reservoir heterogeneity of the Ordovician weathering crust( $O_1ma_5^{1-4}$ ) of the Zhongbu Gasfield, Ordos Basin, Northwest China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1996, 14(1): 22–32.
- [15] 何江, 方少仙, 沈昭国, 等. 鄂尔多斯盆地中部前石炭纪岩溶古地貌恢复[J]. *海相油气地质*, 2007, 12(1): 19–30.
- He Jiang, Fang Shaoxian, Shen Zhaoguo, et al. Restoration of Pre-Carboniferous palaeokarst landform in central Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2007, 12(1): 19–30.
- [16] 代金友, 何顺利. 鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系古地貌研究[J]. *石油学报*, 2005, 21(3): 37–43.
- Dai Jinyou, He Shunli. Ordovician paleokarst landform of central gasfield in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 21(3): 37–43.
- [17] 何江, 付永雷, 沈桂川, 等. 低渗砂岩储层岩石学特征与应力敏感性耦合关系[J]. *石油与天然气地质*, 2012, 33(6): 924–931.
- He Jiang, Fu Yonglei, Shen Guichuan, et al. Coupling relations between the petrologic characteristics and stress-sensitiveness in low-permeability sandstone reservoirs: an example from the lower 8th member of the Lower Shihezi Formation in Sulige-Jier area, Ordos Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2012, 33(6): 924–931.
- [18] 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 Fanghao, Fang Shaoxian, Dong Zhaoxiong, 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.
- [19] 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<sub>5</sub><sup>5</sup>–马<sub>5</sub><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 Shaoxian, He Jiang, Hou Fanghao, et al. Reservoirs pore space types and evolution in  $M_5^5$  to  $M_5^1$  submembers of Majiagou Formation of Middle Ordovician in central gasfield area of Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(10): 2425–2441.
- [20] 陈志远, 马振芳, 张锦泉, 等. 鄂尔多斯盆地中部奥陶系马<sub>5</sub>亚段白云岩成因[J]. *石油勘探与开发*, 1998, 25(6): 20–22.
- Chen Zhiyuan, Ma Zhenfang, Zhang Jinqian, et al. Genesis of the dolomite in Ma<sub>5</sub> subinterval Ordovician in central Ordos basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1998, 25(6): 20–22.
- [21] 苏中堂, 陈洪德, 徐粉燕, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组白云岩地球化学特征及白云岩化机制分析[J]. *岩石学报*, 2011, 27(8): 2230–2238.
- Su Zhongtang, Chen Hongde, Xu Fenyan, et al. Geochemistry and dolomitization mechanism of Majiagou dolomites in Ordovician, Ordos Basin, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(8): 2230–2238.
- [22] 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<sub>5</sub>段白云岩的地球化学特征[J]. *地球学报*, 2011, 32(6): 681–690.
- Zhao Weiwei, Wang Baoqing. Geochemical Characteristics of Dolomite from 5th Member of the Ordovician Majiagou Formation in Sulige Area, Ordos Basin [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2011, 32(6): 681–690.
- [23] 席胜利, 郑聪斌, 李振宏. 鄂尔多斯盆地西缘奥陶系地球化学特征及其沉积环境意义[J]. *古地理学报*, 2004, 6(2): 196–206.
- Xi Shengli, Zheng Congbin, Li Zhenhong. Geochemical characteristics and its sedimentary environment significance of the Ordovician in the western margin of Ordos Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(2): 196–206.
- [24] 赵俊兴, 陈洪德, 张锦泉, 等. 鄂尔多斯盆地中部马<sub>5</sub>段白云岩成因机理研究[J]. *石油学报*, 2005, 26(5): 38–47.
- Zhao Junxing, Chen Hongde, Zhang Jinqian, et al. Genesis of dolomite in the fifth member of Majiagou Formation in the middle Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(5): 38–47.
- [25] Bathursl R G C. Carbonate sediments and their diagenetic[M]. New York: Elsevier Publishing Company, 1971: 145–156.
- [26] Guard I P. Carbonate cementation in the Middle Jurassic Oseberg reservoir sandstone, Oseberg field, Norway: a case of deep burial high temperature poikilotopic calcite [J]. *Sedimentary*, 1998, 26(4): 285–307.