

长庆中部气田奥陶纪马家沟组储层成岩模式与孔隙系统*

吴亚生¹ 何顺利² 卢涛³ 达世攀³ 李跃刚³ 戴永定¹

WU YaSheng¹, HE ShunLi², LU Tao³, DA ShiPan³, LI YueGang³ and DAI YongDing¹

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2. 中国石油大学, 北京 102249

3. 长庆油田分公司勘探开发研究院, 西安 710021

1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. China University of Petroleum, Beijing 102249, China

3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Changqing Oilfield Company, Xi'an 710021, China

2006-02-31 收稿, 2006-04-16 改回.

Wu YS, He SL, Lu T, Da SP, Li YG and Dai YD. 2006. Diagenetic patterns and pore systems of the Lower Ordovician Majiagou Formation reservoirs of the central Changqing gas fields. *Acta Petrologica Sinica*, 22(8) 2171–2181

Abstract The main Ordovician reservoirs of the central Changqing gas fields include the eight beds of the M5 Member of the Early Ordovician Majiagou Formation: M5₁¹, M5₁², M5₁³, M5₁⁴, M5₂¹, M5₂², M5₃³, and M5₄¹, in descending order. Beds M5₁¹, M5₁² and M5₁³ are mainly finely-crystalline penecontemporaneous dolomites with abundant anhydrite nodules (generally 1 ~ 5mm wide) indicating upper supratidal environments. Beds M5₁⁴, M5₂¹, M5₂² are mainly laminated dolostones of upper intertidal environments. Beds M5₃³ and M5₄¹ are mainly anhydrite rock with chicken-wire structure indicating continental sabkha environments and finely-crystalline dolomites with abundant anhydrite nodules (1 ~ 5mm wide) indicating upper supratidal environments. The most important diagenetic processes undergone by the M5 Member include: (I) precipitation of gypsum nodules in interstitial pores in the tidal-flat deposits due to evaporation and the penecontemporaneous dolomitization of the original calcium carbonate deposits; (II) partial or total replacement of the gypsum/anhydrite nodules by dolomites caused by mixing of seawater and freshwater; (III) dissolution of the gypsum in nodules by meteoric water and formation of nodule-moldic pores; (IV) partial or total filling of the nodule-moldic pores by fine, early calcites; (V) partial or total filling of the remaining pores by coarse, late calcites; and (VI) filling of the remaining pores by sylvite. Processes (I), (II) and (III) improved the reservoir quality, while (IV), (V) and (VI) reduced the reservoir quality. Seven main diagenetic patterns were recognized from the M5 Member: dolomitization interstitial dissolution; dolomitization-interstitial dissolution -calcite filling; dolomitization -gypsum dissolution; dolomitization -dolomite replacement -gypsum dissolution; dolomitization-dolomite replacement-gypsum dissolution -early calcite filling; dolomitization -dolomite replacement-gypsum dissolution-early calcite filling-late calcite filling; and dolomitization-dolomite replacement-gypsum dissolution -early calcite filling -late calcite filling-sylvite filling. Dolomitization-gypsum dissolution, dolomitization -dolomite replacement-gypsum dissolution, and dolomitization interstitial dissolution accounted for formation of the main reservoirs. The main pore systems in the M5 Member include: (a) nodule-derived pores; (b) nodule-derived pores and nodule-swell fissures; (c) nodule-derived pores and intercrystalline pores; (d) gypsum crystal moldic pores; and (e) intercrystalline pores. Pore systems (a), (b) and (c) are the main types in this Member. Gypsum nodules are abundant in beds M5₁¹, M5₁², M5₁³, and M5₃³, especially M5₄¹. Diagenetic processes (I), (II) and (III) occurred in beds M5₁¹, M5₁², M5₁³, M5₁⁴, M5₂¹, M5₂², M5₃³, and M5₄¹, while (IV), (V) and (VI) mainly occurred in M5₁⁴, M5₂¹, M5₂², and M5₄¹. Consequently, beds M5₁², M5₁³, and M5₃³ constitute the main reservoirs, while M5₂¹, M5₂², and M5₄¹ have relatively poor reservoir quality.

Key words Ordos basin, Majiagou Formation, Central Changqing gas fields, Diagenesis, porosity system

* 本文为国家自然科学基金项目(编号 40472015)和长庆油田分公司项目“长庆气田靖边区下古油气藏跟踪数值模拟”的成果之一。

第一作者简介: 吴亚生, 男, 1963年生, 博士, 副研究员, 主要从事生物礁、成岩作用、牙形刺生物地层、生物集群绝灭与全球环境演化、古生态学研究, E-mail: wys@mail.igcas.ac.cn

摘要 长庆中部气田奥陶纪马家沟组马五₁¹~马五₄¹ 储层的主要成岩作用包括:(I)准同生白云石化作用;(II)白云石对小球状硬石膏结核(简称“膏球”)和板状硬石膏晶体的交代;(III)石膏的溶解;(IV)自生石英、自生粘土矿物在白云石晶间生长;(V)早期方解石的充填作用;(VI)晚期方解石的充填作用;(VII)钾石盐的充填作用;(VIII)去白云石化作用。其中造成孔隙的是(I)(II)(III),破坏孔隙的主要是(V)(VI)(VII)(VIII)。最重要的成岩作用是(I)(II)(III)。主要的成岩模式有:云化-溶蚀型、云化-溶蚀-充填型、云化-溶解型、云化-交代-溶解型、云化-交代-溶解-早充填型、云化-交代-溶解-早充填-晚充填型、云化-交代-溶解-早充填-晚充填-钾石盐充填型。其中云化-溶解型、云化-交代-溶解型以及云化-溶蚀型是形成孔隙的主要成岩方式。主要的孔隙系统类型有5种:密球型、“球+胀裂缝型”、“球+晶间溶孔型”、晶模孔型、晶间溶孔型。其中,密球型、“球+胀裂缝型”、“球+晶间溶孔型”是最主要的孔隙系统类型。长庆中部气田马五段储层的发育首先受沉积微相控制,即膏球的发育;在此基础上还受成岩方式控制。膏球发育于马五₁¹、马五₁²、马五₁³、马五₃³,尤其是马五₄¹。白云石对硬石膏球的交代作用和石膏的溶解作用广泛发育于马五₁¹、马五₁²、马五₁³、马五₄¹、马五₂¹、马五₂²、马五₃³、马五₄¹ 地层中。早期方解石、晚期方解石和钾石盐的充填作用主要发育在马五₁⁴、马五₂¹、马五₂² 和马五₄¹ 地层中,而在马五₁³、马五₁² 地层中不发育。膏球在马五₁⁴、马五₂¹、马五₂² 不发育。所以,马五₁²、马五₁³、马五₃³ 是最好的储集层段。马五₄¹、马五₁¹ 是其次的储集层段。马五₂¹、马五₂²、马五₄⁴ 是最差的储集层段。

关键词 长庆中部气田;鄂尔多斯盆地;马家沟组;成岩作用;孔隙系统

中图法分类号 618.130.21

1 引言

长庆中部气田位于鄂尔多斯盆地中部,在榆林、乌审旗、定边、延安之间,面积近1万多平方公里(图1)。鄂尔多斯盆地中部下奥陶统马家沟组自下而上划分为马一段~马六段共6段。马五段自上而下再划分为马五₁~马五₁₀共10个亚段。马五₁自上而下分为4个小层:马五₁¹、马五₁²、马五₁³、马五₁⁴。马五₂自上而下分为:马五₂¹、马五₂²。马五₃自上而下分为:马五₃¹、马五₃²、马五₃³。马五₄自上而下分为马五₄¹、马五₄²、马五₄³。其中,马五₁¹~马五₄¹是该气田的主力产层,是本次研究的重点,其典型岩性和厚度见图2。

许多学者对鄂尔多斯盆地中部奥陶纪储层的沉积相和成岩作用作了研究(冯增昭等,1990;黄月明,1993;马振芳,1994;刘永先,1995;马振芳和黄月明,1995;吴智勇等,1995;马永生等,1996;郑秀才,1996;郑聪斌等,1997;陈志远等,1998;彭军等,1998;Feng *et al.*, 1998;李儒峰和鲍志东,1999;郑葆英等,1999;覃建雄等,2000;Wang and Al-Aasm, 2002;侯方浩等,2003;单秀琴和胡国艺,2003;王雪莲等,2005;代金友和何顺利,2005;Cai *et al.*, 2005),取得了许多重要认识,为进一步的研究打下了基础。依然存在的问题是马五段储层是成岩作用控制的还是古风化壳控制的。我们认为,在两种作用都存在的情况下,确定谁主谁次的办法是对尽量多的岩心标本进行进一步的观察和研究,通过统计来确定谁是主要的控制因素。成岩产物空间产状和分布的研究是一个薄弱环节。本文的目标是通过大量岩心标本的观察和统计,确定主要的成岩作用类型、各种成岩产物的产状特点和空间分布、主要的孔隙系统类型,在此基础上建立该储层的成岩作用模式及其与孔隙系统类型的关系。

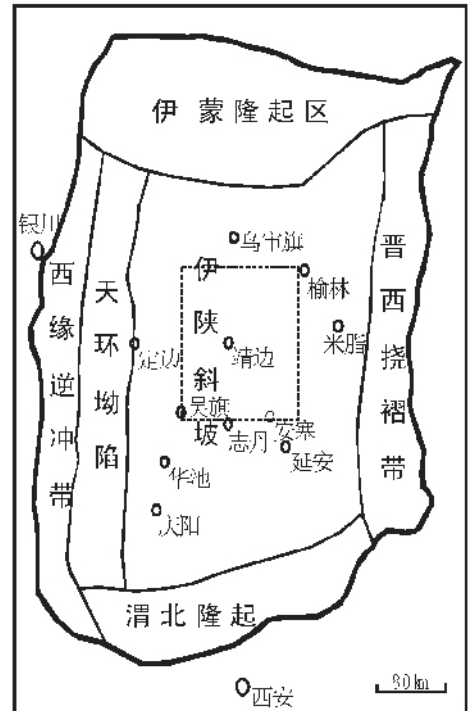


图1 鄂尔多斯盆地的范围(粗实线)和长庆中部气田的地理位置(虚线)

Fig. 1 Location of the central Changqing gas fields (dotted line) in the Ordos basin (thick black line)

根据对2万多块岩心标本的观察和统计、对110口井岩心描述资料的统计、对600多个常规薄片和铸体薄片的观察和统计,以及对22个碳氧同位素样品、16个X衍射样品、19个扫描电镜样品、14个储层物性样品的测试分析,取得如下初步认识。

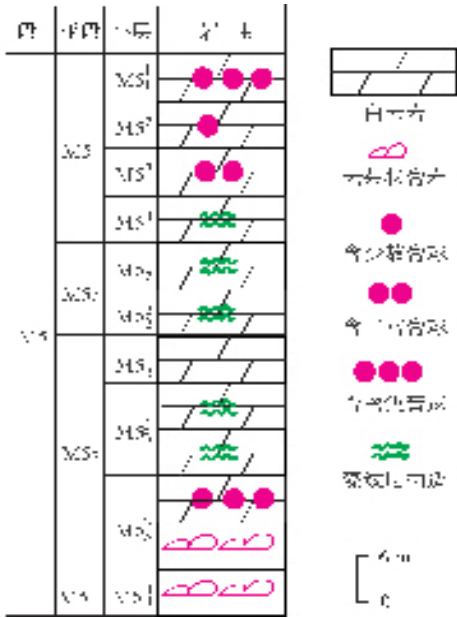


图2 长庆中部气田下奥陶统马家沟组马五段之马五₁¹至五₄¹的岩性柱状图

Fig.2 Lithology of M5₁¹ to M5₄¹ of the M5 Member of the Lower Ordovician Majiagou Formation in the Changqing gas fields

2 长庆中部气田马五段储层的沉积微相特征

根据我们对岩心的观察和对硬石膏球等特殊沉积微相标志的空间分布的统计,确定以下6种沉积微相是该储层的主要沉积微相类型:

(1)萨勃哈,相当于国外学者的“continental sabkha”(Schneider, 1975),以含鸡丝笼状硬石膏的泥粉晶白云岩或泥质泥粉晶白云岩为主。(2)潮上带上部,即 upper supratidal,以含小球状硬石膏结核(简称“膏球”)的泥粉晶白云岩或泥质泥粉晶白云岩为特征。膏球是本区最重要的一种沉积构造(图3)。膏球在本区的潮上带上部沉积微相中广泛出现。含膏球地层的厚度从几厘米到4.5米不等。膏球一般呈圆球形,也有呈水平拉长的椭圆形,直径一般1~4mm。膏球通常散布在岩石中,其丰度分为三级:密集(膏球之间的平均间距小于1mm)、丰富(膏球之间的平均间距小于3mm)、稀少(膏球之间的平均间距大于3mm)。膏球的原始成分为硬石膏。但现在岩心标本上很少看到硬石膏质的膏球:绝大多数的膏球已经遭受各种成岩作用的改造,硬石膏被交代和溶解掉,现在一般为白云石、方解石等各种成岩产物充填,很多还保留了孔隙。膏球内的孔隙是本区最重要的孔隙类型。(3)潮上带下部,即 lower supratidal,以含板状石膏晶体的泥粉晶白云岩或泥质泥粉晶白云岩沉积为特征。石膏晶体一般已遭受成岩作用改造,通常被方解石充

填。(4)潮间带上部,以具藻纹层构造的泥粉晶白云岩或泥质泥粉晶白云岩沉积为特征。(5)潮间带下部,以黑色泥质岩或泥质白云岩,或白云岩夹黑色泥质纹层的沉积为特征,碳质纹层的存在代表泥沼环境。(6)浅水潮下带,以鲕粒灰岩沉积或含浅水潮下带生物化石为特征。鲕粒灰岩一般已经白云石化。鲕粒直径一般0.2~1mm。

马五段储层的沉积微相特点与波斯湾的萨勃哈沉积(Schneider, 1975; McKenzie et al., 1980)十分相似。

根据岩心观察和统计确定,马五₄¹和马五₃³沉积时,研究区主要为萨勃哈和潮上带上部环境,普遍形成含鸡丝笼状硬石膏或膏球的碳酸盐沉积;马五₂¹、马五₂²、马五₁⁴沉积时,研究区普遍为潮间带上部及潮上带下部环境,广泛形成藻纹层沉积及含石膏晶体的藻纹层沉积;马五₁³、马五₁²、马五₁¹沉积时,研究区普遍为潮上带上部环境,普遍形成含膏球的碳酸盐沉积。

3 长庆中部气田马五段储层的主要成岩作用类型

根据对薄片和岩心的观察,结合扫描电镜、X衍射、稳定同位素、电子探针等手段的研究,确定研究区马五段储层的重要成岩作用类型如下:

3.1 准同生白云石化作用

泥粉晶白云岩是研究区马五段最普遍的岩石类型。光学显微镜和扫描电镜下都可以看到白云石主要为它形到半自形,晶体大小一般在几个μm到十几μm。根据对6个样品的测试(表1),其δ¹⁸O在-7.53‰~-7.85‰(PDB),平均-7.61‰,δ¹³C在0.55‰~1.23‰,平均为0.71‰。根据矿物结构特点、碳氧同位素组成、以及与膏球的伴生关系,确定这种白云岩是准同生期,由潮上带毛细管蒸发作用形成的(潘正菊等,1990)。准同生白云石化作用是马五段最普遍和最重要的成岩作用之一,它增加岩石的晶间孔隙,并为其后的成岩作用提供流体运移通道。

表1 长庆中部气田马五段准同生白云岩的碳氧同位素组成
Table 1 Carbon and oxygen isotopic composition of penecontemporaneous dolostone of the M5 Member in the central Changqing gas fields

井号	样品号	δ ¹³ C (误差)(‰, PDB)	δ ¹⁸ O (误差)(‰, PDB)
S23	8-36-53	0.552 (0.008)	-7.543 (0.017)
S21	8-57-128	1.231 (0.011)	-6.718 (0.017)
S23	9-55-72	0.589 (0.008)	-7.417 (0.028)
S23	8-34-53	0.663 (0.004)	-7.705 (0.011)
S49	4-33-110	0.610 (0.009)	-7.531 (0.015)
S49	4-25-110	0.565 (0.016)	-7.852 (0.062)

* 碳氧同位素数据全部在中国科学院地质与地球物理研究所稳定同位素实验室测试获得

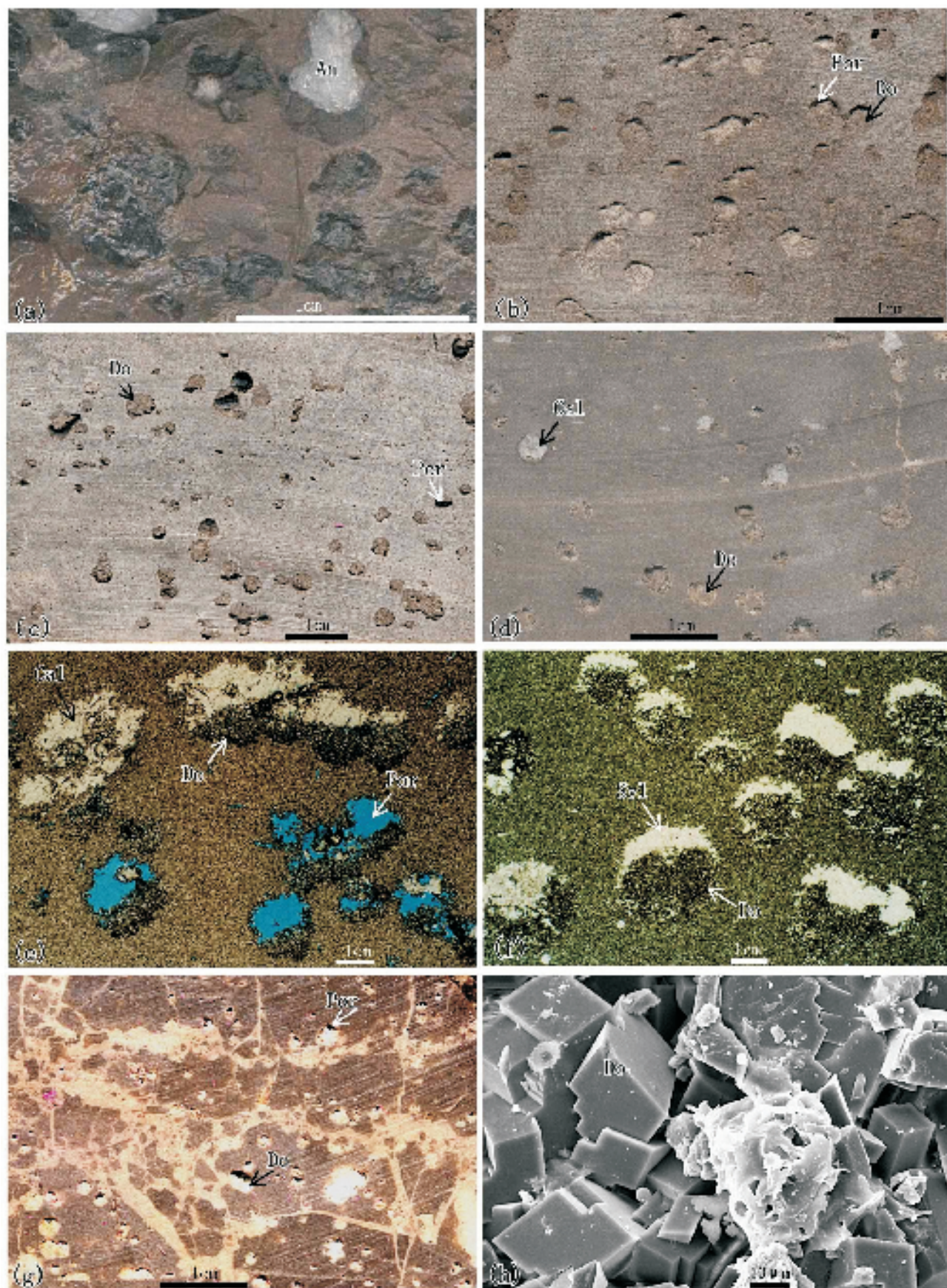


图3 长庆中部气田马五段储层中的膏球及其成岩产物

膏质一般已被交代和溶解掉,仅局部有残留(a)。膏球内一般有土黄色、疏松、自形晶(h)的白云质,它们一般占据膏球的下半(b,c,d,g)或上半(c)界面一般弧形。膏质被溶去后形成孔隙(b,c,d,e,g)或被方解石(d,e)或钾石盐(f)充填。a、b、c、d、g为岩心切面照片。e、f为薄片照片,单偏光。h为扫描电镜照片。a-陕24井,马五₃³;b-陕49井,马五₃³;c-陕49井,马五₃³;d-陕23井,马五₃³;e-陕186井,马五₁³;f-陕23井,马五₁³;g-陕186井,马五₁³;h-陕186井,马五₁³。An-硬石膏,Do-交代白云石,Cal-方解石,Por-孔隙

Fig. 3 Spherical anhydrite nodules and their derived structures with various diagenetic products in the M5 Member of the Ordovician Majiagou Formation in central Changqing gas fields.

Anhydrite in nodules has been replaced by dolomites or dissolved out, with local remains (a). Khaki, poriferous dolomites have replaced anhydrite from the lower (b, c, d, g) or upper part (c) of the nodules, constituting arc boundary. Dissolution of anhydrite formed pores (b, c, d, e, g) which can be filled by blocky calcite (d, e) or sylvite (f). Hydration of anhydrite formed fissures (g). a, b, c, d, and g are slabs of core samples, e and f thin section photomicrographs with pores impregnated with blue epoxy resin, and h SEM image. a-Well Shan-24, Bed M5₃³; b-Well Shan-49, Bed M5₃³; c-Well Shan-49, Bed M5₃³; d-Well Shan-23, Bed M5₃³; e-Well Shan-186, Bed M5₁³; f-Well Shan-23, Bed M5₁³; g-Well Shan-186, Bed M5₁³; h-Well Shan-186, Bed M5₁³. An-anhydrite, Do-dolomite, Cal-calcite, Por-pores.

3.2 白云石对膏球和板状硬石膏晶体的交代作用

岩心观察表明,膏球普遍被土黄色、疏松的白云石交代(图3)。电镜下看,这种白云石是自形的(图3h),晶体比膏球围岩的泥晶白云石稍大,晶间孔隙十分发育。有的学者认为这种白云石是沉积成因的碎屑白云石(邱领军等,2003)。但我们大量的岩心观察表明这种白云石或占据膏球的下半部(图3b、e、f、g)或占据膏球的上半部(图3c)或占据膏球的边缘而留下膏球的核心仍然为膏质。就此产状而言,这种白云石不可能是机械沉积成因的,而是交代成因的。在地表条件下,淡水的加入可以发生碳酸盐矿物对石膏的交代。在地下,在细菌的参与下,可以发生碳酸盐矿物对石膏的交代。

根据我们对4个标本的测试(表2),这种白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 在 $-10.99\text{‰} \sim -10.22\text{‰}$ (PDB)之间,平均 -10.69‰ ; $\delta^{13}\text{C}$ 在 $-6.50\text{‰} \sim -2.22\text{‰}$ (PDB),平均 -3.51‰ 。与膏球的围岩泥晶白云岩相比,交代膏球的白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 明显较低,而且 $\delta^{13}\text{C}$ 也低得多。这表明:(1)这种白云石与围岩具有不同的成因;(2)这种白云石的形成应晚于膏球的围岩泥晶白云岩。马振芳等(1995)认为这种白云石是加里东风化期形成的“淡水白云石”。由于这种白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 明显减小,特别是 $\delta^{13}\text{C}$ 减小到负值,我们认为其成因可能与混合水有关,即是在浅埋阶段,大气淡水与高盐卤水混合后形成的 Mg^{2+} 饱和溶液交代硬石膏球形成的白云石。

表2 长庆中部气田马五段交代膏球的白云石的碳氧同位素组成
Table 2 Carbon and oxygen isotopic composition of dolomites in gypsum nodules in the M5 Member in the central Changqing gas fields

井号	样品号	$\delta^{13}\text{C}$ (误差)(‰, PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (误差)(‰, PDB)
S23	8-36-53	-6.495 (0.008)	-10.989 (0.023)
S49	4-25-110	-2.218 (0.017)	-10.224 (0.043)
S23	8-34-53	-2.278 (0.021)	-10.628 (0.067)
S49	4-33-110	-3.032 (0.012)	-10.911 (0.026)

* 碳氧同位素数据全部在中国科学院地质与地球物理研究所稳定同位素实验室测试获得

3.3 石膏的溶解作用

石膏溶于水。当温度在 $0 \sim 40^\circ\text{C}$ 时,石膏在每100克水中的溶解度为 $0.18 \sim 0.21$ 克(杭州大学化学系分析化学教研室,1979)。所以,当有大量水流过石膏时,石膏会逐渐被溶解掉。当温度低于 42°C ,并且在有水的条件下,膏球中的硬石膏会水化为石膏(曲懿华等,1979)。硬石膏水化时,体积会增加30%。体积的膨胀会使围岩产生裂缝(图3g)。岩心观察见到大量的这种成因的细而弯曲的裂缝,它们连接相邻的膏球。这种裂缝作为流体运移的通道,使一些成岩作用更易进行。

在发生白云石交代作用之后,溶解作用最终使膏球内的剩余石膏溶去。在绝大多数井中,马五段膏球中的石膏都已经被交代和溶解掉,只有少数井的马五₃³和马五₄¹尚有一些膏球中的硬石膏未被交代或溶解。流体不仅使石膏溶解,也对交代膏球的白云石发生溶蚀。扫描电镜下可以看到这种白云石晶体往往有阶状的溶蚀面(图3h)。

3.4 自生石英、自生粘土矿物在自生白云石晶间的生长

扫描电镜下可见,有少数锥柱状的自生石英出现在白云石交代和石膏溶解后形成的膏球模孔中。自生粘土矿物主要是丝缕状的伊蒙混层矿物(图3h,中央)或伊利石,它们在膏球模孔内交代成因的白云石的晶体表面附着或搭桥生长,但一般数量很少,分布局限。偶尔可以见到交代膏球的白云石晶体之间有书页状的自生高岭石。

3.5 早期方解石充填作用

早期方解石黑色,晶体较小(细晶到粗晶)。它们充填于膏球溶解后形成的膏球模孔(图3e)、交代膏球的白云石再遭溶蚀形成的白云石晶间孔、以及板状石膏晶体溶解后形成的晶模孔中,使水化溶解、溶蚀阶段形成的孔隙遭到不同程度的破坏。

3.6 晚期方解石充填作用

晚期方解石白色,晶体较大(中晶-巨晶),一般充填在早期方解石充填后的剩余孔隙中。当这二期的方解石同时出

现在一个膏球模孔或晶模孔中时,早期黑色方解石在下或在外缘,晚期白色方解石在上或在内。

根据我们的测试(表3),晚期白色方解石的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-12.65\text{‰} \sim -12.93\text{‰}$ (PDB), $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-23.74 \sim -4.19\text{‰}$ (PDB),明显低于交代膏球的白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 。前人的测试表明这类方解石有高Sr、高Mg、低Mn的特点。与大气水循环有关的成岩作用将使碳酸盐岩的Sr含量减少,Mn含量增加(Weizer, 1983)。现代喀斯特地区溶洞内的方解石沉淀物的 $\delta^{18}\text{O}$ 在 $-2.74 \sim -10.65\text{‰}$ (PDB), $\delta^{13}\text{C}$ 在 $-0.17 \sim -9.48\text{‰}$ (PDB)(王英华等, 1993)。微量元素的特点排除了这期方解石在成因上与大气水的关联。Girard(1998)报道了具有烃和流体包裹体(均一温度为 $90 \sim 110^\circ\text{C}$)的高温深埋成因的方解石胶结物的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均在 -15‰ (PDB), $\delta^{13}\text{C}$ 平均在 -12‰ (PDB)。据此认为这种方解石是深埋成岩环境成因的。在深埋成岩阶段,由于有机质或烃类参与同位素分馏,造成了碳同位素的高负值。前人对膏球中方解石的气液包裹体的研究得出均一温度为 $94.5 \sim 163.9^\circ\text{C}$,支持深埋成因的解释。前人的热史研究认为马家沟组烃源岩进入成熟门限的时间在三叠系延长组沉积期(叶加仁等, 1997)。晚期方解石的形成应该大致在这个时间。

表3 长庆中部气田马五段膏球内晚期方解石充填物的碳氧同位素组成

Table 3 Carbon and oxygen isotopic composition of late calcite fillings in gypsum nodules in the M5 Member of the central Changqing gas fields

井号	样品号	$\delta^{13}\text{C}$ (误差)(‰, PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (误差)(‰, PDB)
S23	5-56-77	-4.194(0.008)	-14.930(0.024)
S23	8-36-53	-23.743(0.005)	-12.646(0.018)

* 碳氧同位素数据全部在中国科学院地质与地球物理研究所稳定同位素实验室测试获得

3.7 钾石盐的充填作用

薄片观察表明,钾石盐充填于膏球模孔中被方解石充填之后的剩余孔隙中(图3f),或充填在裂缝中。本区马五段地层中局部含有石盐沉积,故马五段地层中充填膏球孔隙和裂隙的钾石盐,可能是深埋成岩阶段地层中的钾石盐发生溶解、迁移和再沉淀形成的。

3.8 去白云石化作用

局部见到去白云石化作用使原来的白云岩变成结晶较粗的灰岩的现象。有的去白云石化灰岩保留了原始的纹层构造。去白云石化成因的灰岩物性差,因此,去白云石化作用对储层物性起破坏作用。

根据统计,就成岩产物的空间分布数量而言,这八种成岩作用中,准同生白云石化作用、白云石对膏球的交代作用、

石膏的溶解作用、早期方解石和晚期方解石的充填作用是所研究储层最主要的成岩作用,钾石盐的充填作用和自生石英以及自生粘土矿物的形成是较次要的成岩作用。

4 长庆中部气田马五段储层的成岩作用次序

根据我们对2万多块岩心以及薄片的观察,膏球内膏质与不同成岩产物之间的相互关系有如下几种:

(1)石膏/硬石膏与黄色、土状、疏松的交代白云石之间的关系有三种(图4a):(A)膏质在内,土状白云石在外(图3a);(B)膏质在上,土状白云石在下;(C)膏质在下,土状白云石在上。关系A表明,黄色土状云质从外缘开始向内交代膏球的膏质。

(2)黄色土状交代白云石与早期黑色方解石的关系有2种(图4b):(A)黑色方解石在外,黄色土状云质在内;(B)黑色方解石在上,黄色土状云质在下。据此认为,黑色方解石从外缘向内交代黄色土状疏松云质,或充填黄色土状疏松云质的晶间孔隙。

(3)黄色土状疏松云质与孔隙的关系(图4c):(A)土状云质在下(图3:b、e、f、g);(B)土状云质在上(图3:c);(C)土状云质在内。岩心观察表明,地层中普遍出现二种岩石的极薄(薄至数厘米)互层:一种是土状白云石交代膏球的上半,而其下半为孔隙;另一种是土状白云石交代膏球的下半,而其上半为孔隙。据此我们推测,土状云质是交代膏球中的膏质,而不是在膏质溶解后再充填的。

(4)当只充填膏球的一半时,黄色土状疏松云质的界面主要有3种(图4d):(A)土状云质在上,界面朝下凸(图3:e);(B)土状云质在下,界面朝下凹;(C)土状云质在下,界面朝上凸(图3:b、f、g)。这些不同的界面进一步表明土状云质是交代膏质的,而不是在膏质溶解后沉淀的,也不是作为碎屑沉积的。

(5)黑色方解石充填物与白色方解石充填物之间有3种关系(图4e):(A)白方解石在内,黑方解石在外;(B)黑方解石在下,白方解石在上;(C)黑方解石在上,白方解石在下。

关系(A)和(B)支持黑方解石形成早于白方解石的解释;关系(C)代表黑方解石交代土状云质以后,其下的膏质被溶解形成孔隙,再被白色方解石充填形成。

根据对膏球内膏质、各种成岩产物、以及孔隙之间的关系的观察,可以确定白云石对膏质的交代作用发生最早,然后是膏质的溶解作用和形成孔隙,再然后是黑色方解石在孔隙内的沉淀,再然后是白色方解石在孔隙内的沉淀,最后是钾石盐在剩余孔隙内的充填。

交代膏质的黄色土状疏松自形白云石的表面常附着有少数伊蒙混层自生粘土矿物(图3:h,中部)。一般认为,伊蒙混层自生粘土矿物形成于埋深较小的早成岩期。所以,可以认为交代膏质的白云石形成时期较早。

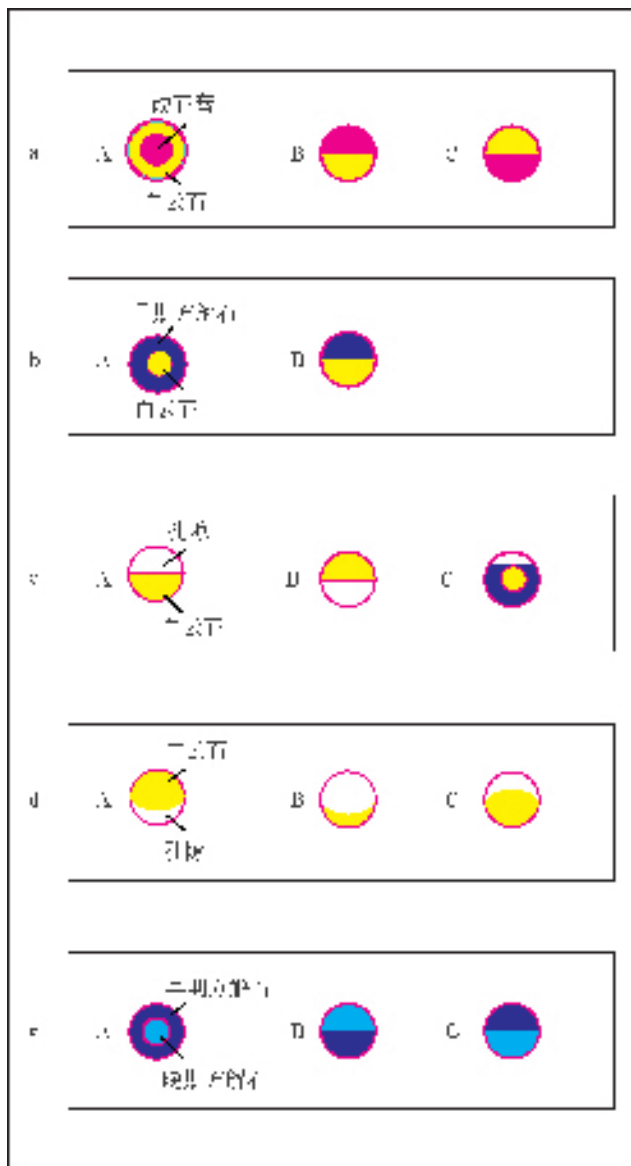


图4 长庆中部气田马五段膏球内不同成岩产物之间的关系

a-膏质与交代白云石的关系；b-黑色早期方解石与交代白云石之间的关系；c-交代白云石与孔隙之间的关系；d-交代白云石与孔隙之间的界面；e-黑方解石与白方解石之间的关系。

Fig. 4 Relationship between various diagenetic products in gypsum nodules in the M5 Member in central Changqing gas fields. a-anhydrite and replacement dolomites；b-early calcites and replacement dolomites；c-replacement dolomites and pores；d-boundaries between pores and replacement dolomites；e-early calcites and late calcites.

根据我们的测试，马五段的膏球围岩泥粉晶白云岩的 $\delta^{18}O$ 平均为 -7.61% (PDB)。夏天在阿布扎比的萨勃哈地面，特别是在多孔的、黑色藻丛下面，温度可以达到 $60^\circ C$ 或 $60^\circ C$ 以上 (Bathurst, 1971)。假定研究区马五段膏球围岩发生白云石化的温度也是 $60^\circ C$ ，则可求得流体的 $\delta^{18}O$ 。已知

充填膏球的黄色土状疏松云质的 $\delta^{18}O$ 平均为 -10.69% (PDB)，假定交代膏球的白云石化流体与膏球围岩白云石化的流体具有相似的 $\delta^{18}O$ ，则可计算出交代膏球的白云石的形成温度约为 $80.7^\circ C$ ，这是碎屑岩早成岩 B 期的成岩环境温度。该阶段的粘土矿物应该是伊蒙混层，这与电镜下看到的实际情况一致。

综合分析，马五段储层的成岩作用发生次序为：硬石膏球形成 - 白云石交代硬石膏 (约 $80^\circ C$) - 硬石膏水化溶解形成孔隙 - 早期黑色方解石充填 - 晚期白色方解石充填 ($94.5 \sim 163.9^\circ C$ ；三叠纪) - 钾石盐充填 (图 5)。

5 长庆中部气田马五段储层的成岩模式

成岩模式是具有一定空间分布的主要成岩作用的序列，是对一定地层内的成岩作用和成岩史的规律性总结。在上述研究的基础上，我们确定研究区马五段的成岩作用可归结为如下几种成岩模式：

5.1 云化-溶蚀型

这类岩石的成岩作用主要是准同生白云石化作用和白云岩晶间孔隙的溶蚀扩大作用 (图 6a)。

5.2 云化-溶蚀-充填型

这类岩石的成岩作用主要是准同生白云石化作用、白云岩晶间孔隙的溶蚀扩大作用以及方解石对晶间孔隙的充填作用 (图 6b)。

5.3 云化-溶解型

此类岩石发生的成岩作用依次有：(1) 准同生白云石化作用 (2) 石膏晶体在白云岩晶间孔隙中生长 (3) 石膏晶体溶解，形成石膏晶模孔 (图 6c)。

5.4 云化-交代-溶解型

这类岩石的成岩作用包括：(1) 准同生白云石化作用，使原来的碳酸钙沉积物变成白云岩；(2) 地势变高后，石膏晶体在白云岩晶间孔隙中生长，如地势再增高，可形成小球状硬石膏结核；(3) 后来，膏球周围的高镁流体由外向内交代膏球，形成土状云质，流体还在膏球围岩的缝隙中形成自形的白云石；(4) 再后来，膏球中未被交代的剩余膏质被溶解去，形成大量孔隙 (图 6d)。

5.5 云化-交代-溶解-早充填型

这种岩石除了发生云化-交代-溶解型成岩模式的所有作用外，还发生早期黑色方解石在膏球模孔中的充填作用 (图 6e)。

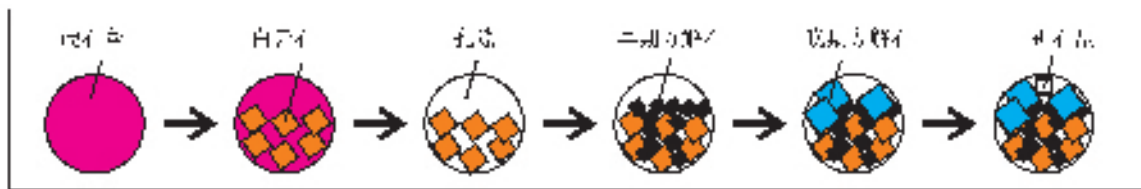


图5 长庆中部气田马五段储层的成岩作用发生顺序。

Fig. 5 Timing sequence of diagenetic processes in the M5 Member of the Majiagou Formation in central Changqing gas fields.

表4 长庆中部气田马五段储层一些样品的孔隙系统类型与物性数据*

Table 4 Permeability and porosity of different pore system types in some samples from the Majiagou Formation of the Majiagou Formation in central Changqing gas fields

井号	样品号	孔隙系统类型	有无方解石充填	渗透率 (md)	孔隙度 (%)
21	3-194-138	晶模孔型	无方解石充填	14.9	12.9
23	5-77-30	密球型	无方解石充填	7.04	10.2
126	1-41-17	密球型	无方解石充填	6.69	10.8
23	8-53-36-2	球 + 胀裂缝型	晚期方解石半充填。有少数微缝	6.38	11.9
23	5-77-17	球 + 胀裂缝型	少数胀裂缝半充填	4.25	8.5
128	3-68-29	密球型	无方解石充填	3.51	8.3
Y3	7-52-13	晶间溶孔型	无方解石充填	2.38	7.4
186	3-92-82	密球 + 胀裂缝型	胀裂缝发育, 多充填	1.59	9.3
186	3-92-83	密球 + 胀裂缝型	胀裂缝发育, 被疏松白云石充填	2.057	9.6
186	3-92-85	密球型	有方解石充填	0.667	8.7
186	3-92-85	密球型	有方解石充填	0.476	10.1
23	8-53-36-1	丰球	有晚期方解石充填	0.346	10.8
186	3-92-8	无球	粗晶灰岩, 无膏球孔隙	0.323	2.2
L5	6-24-21	晶间溶孔型	晶间溶孔被方解石充填	0.046	1.9

* 物性数据全部由中国石油勘探开发研究院采收率所岩心分析实验室测试

5.6 云化-交代-溶解-早充填-晚充填型

这种岩石除了发生云化-交代-溶解-早充填型成岩模式的所有作用外, 还发生晚期白色方解石在膏球模孔中的充填作用(图 6f)。

5.7 云化-交代-溶解-早充填-晚充填-钾石盐充填型

这种岩石在发生白方解石充填作用之后, 还发生钾石盐在剩余膏球模孔中的充填作用(图 6g)。

6 长庆中部气田马五段储层的孔隙系统类型与物性

决定储层物性的因素是孔隙和裂缝。在马五段储层中, 孔隙和裂缝可以相互结合成网络状的流体运移通道, 称孔隙

系统。薄片和电镜观察表明, 马五段储层的孔隙系统主要有如下几种:

6.1 密球型

岩石中本来有密集的小球状硬石膏结核(图 3:e)。发生白云石交代硬石膏和硬石膏水化溶解作用后, 留下很疏松的白云石。由于溶蚀作用, 白云石之间的晶间孔隙很发育。由于这种富含孔隙的球很密集, 相互之间往往连通, 因而岩石的渗透率较高, 可达 7.04 毫达西, 孔隙度可达 10.2%。

6.2 “球 + 胀裂缝”型

这种岩石本来也有丰富的小球状硬石膏结核。后来发生白云质交代膏质和膏质水化溶解作用。溶解作用使膏球中的白云质具有发育的晶间孔隙; 硬石膏水化时的胀裂作用则形成弯曲交叉的网状裂缝, 它们连通相邻的膏球孔隙(图 3:g)。

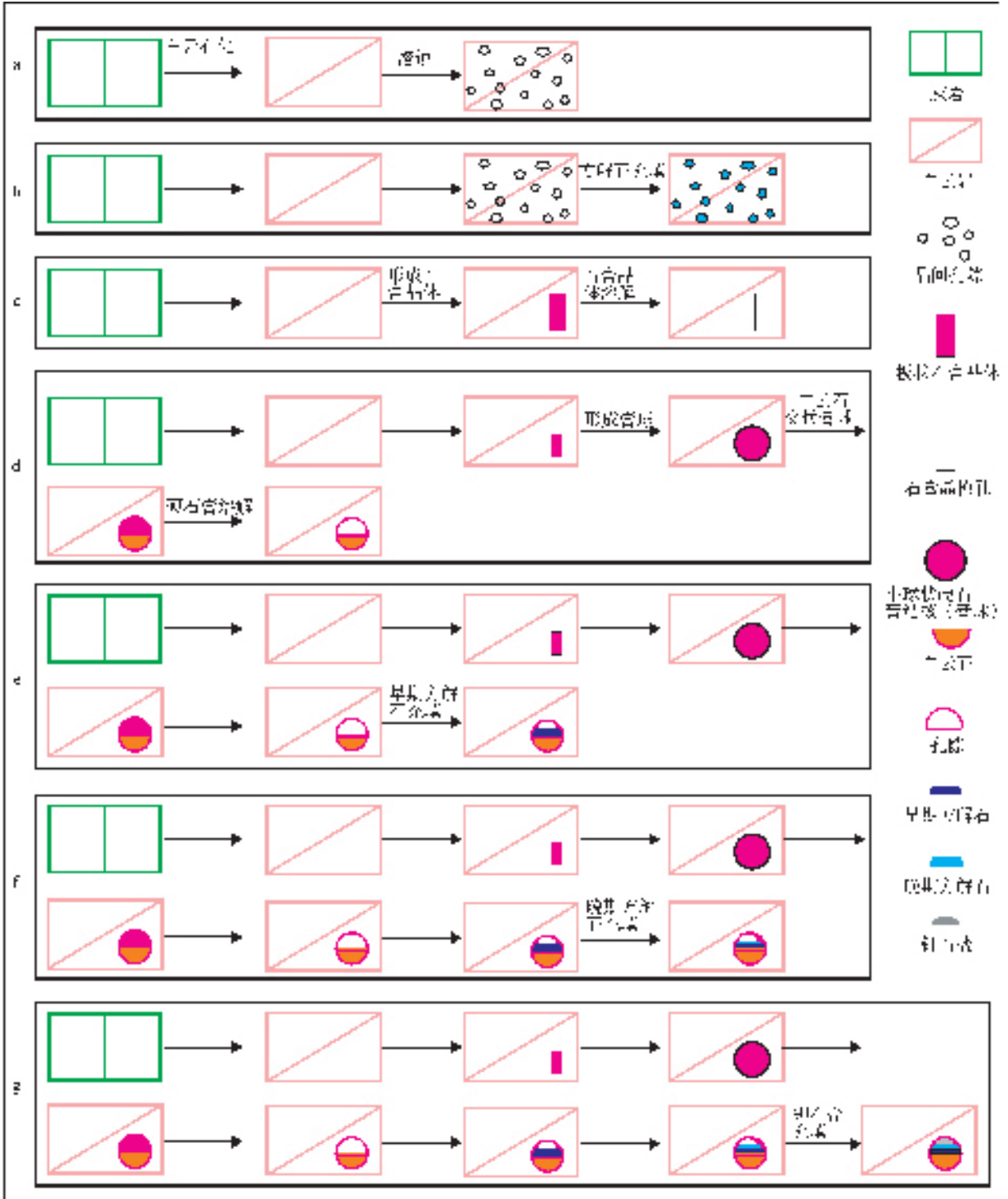


图6 长庆中部气田马五段储层的成岩模式。

a-云化-溶蚀型；b-云化-溶蚀-充填型；c-云化-溶解型；d-云化-交代-溶解型；e-云化-交代-溶解-早充填型；f-云化-交代-溶解-早充填-晚充填型；g-云化-交代-溶解-早充填-晚充填-钾石盐充填型

Fig.6 Diagenetic patterns in the M5 Member in central Changqing gas fields.

a-dolomitization -interstitial dissolution ; b-dolomitization-interstitial dissolution-calcite filling ; c-dolomitization - gypsum dissolution ;(d) dolomitization-dolomite replacement-gypsum dissolution ;e-dolomitization -dolomite replacement -gypsum dissolution -early calcite filling f-dolomitization-dolomite replacement-gypsum dissolution-early calcite filling-late calcite filling ;g-dolomitization-dolomite replacement-gypsum dissolution-early calcite filling-late calcite filling-sylvite filling

这些缝或充填或半充填或未充填。当缝半充填或未充填时, 能够提高岩石的渗透率和孔隙度。这种岩石的渗透率可达 4.25 毫达西, 孔隙度可达 8.5%。

6.3 “球+围岩晶间溶孔”型

这种岩石原本有丰富到密集的小球状硬石膏结核。经过白云石交代、膏质溶解、白云石溶蚀后, 形成高孔隙的球。围岩则有发育的晶间溶孔系统, 它们与球是相通的。

膏球模孔不是孤立存在的, 也不可能孤立存在。它的形成说明膏球的围岩中有流体运移的通道。准同生白云石化使岩石具有一定的晶间孔隙, 而流体的运移和溶蚀使晶间孔隙得以扩大。

大量岩心和薄片观察表明, 这种膏球孔隙和围岩晶间溶孔组成的孔隙系统是本区的主要孔隙系统类型之一。

6.4 晶模孔型

这种岩石原来具有密集的板状石膏晶体。后来石膏晶体被溶解掉, 形成晶模孔。围岩为准同生白云岩, 发生晶间溶蚀。本区某些层位发育这种孔隙系统, 构成良好储层。其物性较好, 渗透率可达 14.9 毫达西, 孔隙度可达 12.9%。

6.5 晶间溶孔型

有的层位的白云岩尽管没有膏球, 但晶间溶孔发育, 因而有较好的物性。测得一个晶间孔发育的细晶白云岩标本的渗透率为 2.38 毫达西, 孔隙度为 7.7%。

表 4 列出了一些不同孔隙系统类型标本的物性测试数据。由表 4 看出, 密球型、晶模孔型、球+胀裂缝型(未填满的)孔隙系统都具有较好的物性。方解石充填会显著破坏岩石的物性。

7 成岩模式与孔隙系统发育之间的关系

显然, 云化-溶蚀型、云化-溶解型、云化-交代-溶解型成岩方式利于孔隙发育, 而其余几种成岩方式由于有充填作用, 因而不利于孔隙发育。云化-溶蚀型成岩方式形成晶间孔型孔隙系统。云化-溶解型、云化-交代-溶解型成岩方式下形成晶模孔型、密球型、球+围岩晶间孔型、球+胀裂缝型孔隙系统。我们的统计研究表明, 本区分布最广的是密球型、球+胀裂缝型孔隙系统, 其次是球+围岩晶间溶孔型、晶间溶孔型、晶模孔型孔隙系统。

根据我们的统计, 云化-溶蚀型、云化-溶解型、云化-交代-溶解型成岩方式广泛发生于马五₁²、马五₁³、马五₃³ 储层中。而云化-溶蚀-充填型、云化-交代-溶解-早充填型、云化-交代-溶解-早充填-晚充填型、云化-交代-溶解-早充填-晚充填-钾石盐充填型成岩方式主要发生在马五₂¹、马五₂² 以及马五₄¹、马五₄⁴ 地层中。

马五段储层的发育首先受沉积微相控制: 有膏球发育的地层具有发育成良好储层的基础。我们的研究表明, 本区膏球主要发育在马五₁¹、马五₁²、马五₁³、马五₃³、马五₄¹, 而在马五₁⁴、马五₂¹、马五₂² 中不发育。马五段储层的发育还受成岩方式控制: 白云石对膏球的交代和膏质的溶解作用提高储层物性; 但只有方解石和钾石盐充填作用不发育的地层才是好的储层。我们的研究表明, 白云石对膏球的交代和膏质的溶解作用普遍发生, 但方解石和钾石盐充填作用在马五₁²、马五₁³、马五₃³ 中不发育。所以, 马五₁²、马五₁³、马五₃³ 是研究区最好的储集层段, 马五₄¹、马五₁¹ 是其次的储集层段; 马五₂¹、马五₂²、马五₁⁴ 是最差的储集层段(表 5)。

表 5 长庆中部气田马五段膏球和重要成岩作用的分布

Table 5 Distribution of anhydrite nodules and important diagenetic processes in the M5 Member of the Majiagou Formation in central Changqing gas fields

	马五 ₁ ¹	马五 ₁ ²	马五 ₁ ³	马五 ₃ ³	马五 ₄ ¹	马五 ₂ ¹	马五 ₂ ²	马五 ₁ ⁴	马五 ₁ ¹
膏球	发育	发育	发育	发育	不发育	不发育	不发育	发育	很发育
交代和溶解作用	发育	发育	发育	发育	发育	发育	发育	较发育	较发育
充填作用	发育	不发育	不发育	发育	发育	很发育	不发育	发育	
储层物性	较好	最好	最好	最差	最差	最差	最好	较好	

致谢 本文为《长庆气田靖边区下古油气藏跟踪数值模拟》项目成果之一, 并得到国家自然科学基金(No. 40472015)和中国科学院矿产资源研究重点实验室的支持。参加研究工作的还有王勇、王彩丽等。此研究得到闵琪、金忠臣、张明禄、吕运能、孟慕饶、顾岱鸿等的关怀和指导, 并得到史若行、谢传礼、齐恩广、孙进杰、陈琳、李中锋、王都伟、冉盈志、时爱红、彭力田、朱怡翔、龙利平、段程虎等的大力帮助, 谨此致谢。

References

- Bathurst RGC. 1971. Carbonate sediments and their diagenesis. Elsevier Publishing Company Amsterdam London New York. (中国科学院地质研究所《碳酸盐沉积物及其成岩作用》翻译组. 1977. 碳酸盐沉积物及其成岩作用. 科学出版社. 157-159)
- Cai CF, Hu GY, He H, Li J, Li JF, Wu YS. 2005. Geochemical characteristics and origin of natural gas and thermochemical sulphate reduction in Ordovician carbonates in the Ordos basin, China. Journal of Petroleum Science and Engineering 48: 209-226
- Feng ZZ, Zhang YS, Jin ZK. 1998. Type, origin, and reservoir characteristics of dolostones of the Ordovician Majiagou Group, Ordos, North China Platform. Sedimentology Geology 118: 127-140
- Girard JP. 1998. Carbonate cementation in the Middle Jurassic Oseberg reservoir sandstone, Oseberg field, Norway: a case of deep burial-high temperature poikiloprotic calcite. Spec. Publ. int. Ass. Sediment. 26: 285-307

- Mckenzie JA, Hs KJ, Schneider JF. 1980. Movement of subsurface water under the sabkha, Abu Dhabi, UAE, and its relation to evaporative dolomite genesis. In: Zenger DH, Dunham JB, Elhington RL. (eds.). Concepts and models of dolomitization. Soc. Econ. Paleontol. Mineral. Spec. Publ. 28:11-30
- Schneider JF. 1975. Recent tidal deposits, Abu Dhabi, UAE, Arabian Gulf. In: Ginsburg RN (ed.). 1975. Tidal Deposits. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 209-214
- Wang BQ, Al-Aasm IS. 2002. Karst-conotrilled diagenesis and reservoir development: example from the Ordovician main-reservoir carbonate rocks on the eastern margin of the Ordos basin, China. AAPG Bulletin 86(9):1639-1658
- Weizer J. 1983. Chemical diagenesis of carbonates: theory and application. In: Arthur MA, Anderson TF, Kaplan IR, et al, eds. Stable Isotopes in Sedimentary Geology. S E P M Short Course 10: 3-100
- 附中文参考文献**
- 陈志远, 马振芳, 张锦泉. 1998. 鄂尔多斯盆地中部奥陶系马五5亚段白云岩成因. 石油勘探与开发, 25(6):20-22
- 代金友, 何顺利. 2005. 鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系古地貌研究. 石油学报, 21(3):37-43
- 单秀琴, 胡国艺. 2003. 高嘉玉. 鄂尔多斯盆地中部奥陶系方解石脉中包裹体流体势研究. 岩石学报, 21(2):355-358
- 邱领军, 杨承运, 杨奕华, 冀小林, 包洪平. 2003. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组溶斑形成机理. 沉积学报, 21(2):260-265
- 冯增昭, 王英华, 张吉森等. 1990. 华北地台早古生代岩相古地理. 北京:地质出版社
- 杭州大学化学系分析化学教研室. 1979. 分析化学手册(第一分册). 北京:化学工业出版社
- 郝石生, 高耀斌, 黄志龙. 1996. 鄂尔多斯盆地中部大气田聚集条件及运聚平衡. 中国科学 D 辑, 26(6):488-492
- 侯方浩, 方少仙, 董兆雄, 赵敬松, 卢蜀秀, 吴诒, 陈娅娜. 2003. 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. 沉积学报, 21(1):106-112
- 黄月明. 1993. 陕甘宁盆地中部气田白云岩储层特征. 天然气工业, 13(5):31-34
- 李儒峰, 鲍志东. 1999. 鄂尔多斯盆地中部马五1亚段高分辨率层序地层格架中风化成岩模式和储层特征. 沉积学报, 17(3):390-395
- 刘永先. 1995. 陕甘宁盆地中部气田奥陶系碳酸盐岩储层溶蚀及充填作用特征. 岩相古地理, 15(5):43-51
- 马永生, 李启明, 关德师. 1996. 鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系马五1~4碳酸盐岩微相特征与储层不均质性研究. 沉积学报, 14(1):22-32
- 马振芳. 1994. 鄂尔多斯盆地中部古风化壳储层特征. 天然气地球科学, 5(6):28-36
- 马振芳, 黄月明. 1995. 陕甘宁盆地中部气田白云岩储层孔隙充填物与储集性. 石油勘探与开发, 22(3):102-106
- 潘正甫, 李菊英. 1990. 白云石化作用与中国东部白云岩地层. 中国科学院地质研究所集刊, 4:1-98
- 彭军, 田景春, 赖生华. 1998. 陕甘宁盆地中部马家沟组白云岩成因及储集性. 成都理工学院学报, 25(1):87-93
- 曲懿华, 钱自强, 韩蔚田. 1979. 盐矿物鉴定手册. 北京:地质出版社
- 覃建雄, 田景春, 杨作升. 2000. 陕甘宁盆地中部马五4~1气层成岩相与有利储集区预测. 中国海上油气(地质), 14(1):37-41
- 王雪莲, 王长陆, 陈振林, 田继军. 2005. 鄂尔多斯盆地奥陶系风化壳岩溶储层研究. 特种油气藏, 12(3):32-35
- 王英华, 周书欣, 张秀莲. 1993. 中国湖相碳酸盐岩. 中国矿业大学出版社, 1-131
- 吴智勇, 郑秀才, 张尚锋. 1995. 鄂尔多斯盆地中部马五~4_1碳酸盐岩的成岩作用. 江汉石油学院学报, 17(2):15-20
- 叶加仁, 赵鹏大, 陆明德. 1997. 鄂尔多斯盆地地下古生界热史与油气生成动力学研究. 天然气工业, 17(5):3-7
- 郑葆英, 叶俭, 祝总祺, 宋国初. 1999. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组气液包裹体研究. 西安工程学院学报, 21(3):13-16
- 郑聪斌, 王飞雁, 贾疏源. 1997. 陕甘宁盆地中部奥陶系风化壳岩溶岩及岩溶相模式. 中国岩溶, 16(4):351-360
- 郑秀才. 1996. 鄂尔多斯盆地中部马五~4亚段成岩作用及储集性能. 西安工程学院学报, 18(1):43-49