

(长庆石油勘探开发研究院, 甘肃庆阳 745101)

俞惠隆*

(江汉石油学院, 湖北沙市 434102)

鄂尔多斯盆地中部下奥陶统马家沟组天然气储集层, 实际是一种潮坪膏盐岩与碳酸盐岩共生的萨布哈类型, 大气淡水淋滤标志显著, 可分为4种储集岩, 受控于沉积和成岩环境。溶孔层与致密层的叠加配置, 构成了马家沟组多个含气层段。

关键词 天然气 储层 成岩作用 淡水淋滤 下奥陶统 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 黄月明 男 49岁 工程师 石油地质与岩矿鉴定

自80年代晚期以来, 长庆石油勘探局在鄂尔多斯盆地地下奥陶统马家沟组, 相继钻出了一批无阻流量高产稳产气井, 形势喜人, 前景光明。本文着重讨论该盆地中部马家沟组顶部古风化壳碳酸盐岩天然气储集岩的成岩作用, 以及它们与储层孔隙结构间的相互关系。

一、地质概况

鄂尔多斯盆地中部下奥陶统从下而上由冶里组、亮甲山组、下马家沟组、上马家沟组、峰峰组构成。在早奥陶世马家沟期, 产生了由潮上带与潮间带向海一侧推进的海滨潮坪(萨布哈)沉积** 其范围相当于滨外水体与干旱的大陆沉积区之间。这种环境有利于沉积和成岩作用^[1], 而成岩作用中最主要的首推准同生白云石化、早期成岩阶段的钙质硫酸盐或石盐的置换交代作用^[2]。由于本区早奥陶世末至中石炭世一直处于隆起成陆和遭受风化剥蚀, 因此, 马家沟组既出现了明显的早期成岩作用, 同时又出现了萨布哈化学岩所特有的盐(岩)溶及大气淡水渗滤溶蚀作用。

马家沟组的海滨萨布哈沉积微相(表1)及其沉积层序由上而下为: 岩盐、膏盐岩、石膏岩、白云石化硬石膏岩、纹层藻席白云岩、藻屑或鲕粒白云岩(图版Ⅱ-3)、砾屑鲕粒白云岩、石膏假晶或膏模藻屑白云岩(图版Ⅰ-3)、石盐假晶白云岩(图版Ⅳ-8)和次生石灰岩组成的蒸发岩系列, 局部夹薄层状沉凝灰岩。常见的沉积构造有波痕、叠层石、纹层藻席、硬石膏结核、镶嵌结构的原生硬石膏团块和扭曲层理、生物钻孔和生物扰动、鸟眼构造、V字形干裂等, 此外还有变形构造、蜂窝状溶蚀孔洞、溶斑(图版Ⅰ-1, 2), 岩溶角砾(图版Ⅰ-8)。

收稿日期: 1991-10-15 改回日期: 1992-05-13

* 黄月明、俞惠隆执笔

** 俞惠隆. 鄂尔多斯盆地中东地区早奥陶世萨布哈层序. 1991.

本区最重要的天然气储层有 O_1m_3 和 O_1m_5 两层。前者是具溶蚀孔洞、溶斑和石膏假晶的粉细晶白云岩,厚 5—7 m; 后者是具完整萨布哈旋回的膏盐岩、纹层藻席和块状镶嵌硬石膏粉晶白云岩(图 1), 亦发育溶蚀孔洞和各种裂隙, 厚 6—12 m 不等。

表 1 鄂尔多斯盆地中部地区马家沟组沉积微相特征

序号	沉积相	沉积构造及结构	岩性	分布层段
相 1	潮上云坪相	薄层-中层状、泥晶结构、含泥、微细波状纹理, 常见硬石膏假晶、鸟眼构造及收缩干裂等	泥晶白云岩	O_1m_2 、 O_1m_3 、 O_1m_5
相 2	潮间云坪相	薄-中层状、晶粒大小 30—40 μ m, 半自形、自形晶, 质纯、均一, 晶间孔隙发育	细粉晶白云岩	O_1m_2 、 O_1m_3 、 O_1m_5
相 3	潮间藻云坪相	薄层状、泥粉晶结构, 团粒大小不均, 形态不规则, 相互粘结藻纹层发育, 常见鸟眼、藻架孔隙, 可含硬石膏	泥晶粉晶藻团粒、藻纹层白云岩	O_1m_3 、 O_1m_5
相 4	潮上膏云坪相	薄层状, 含石膏、石盐结核, 白云石泥-粉晶结构, 具干裂, 膏盐假晶	白云质角砾岩 膏云岩	O_1m_5 上、中、 下局部分布
相 5	局限陆棚相	厚层状、块状, 结构均一, 偶见生物屑和团粒含细-粉晶白云石星散状分布	泥晶灰岩	O_1m_2 、 O_1m_3 下部、 O_1m_4
相 6	陆棚低能滩相	深灰、灰黑色中厚层状, 颗粒为团粒、砂屑、少许生物屑, 分选较差, 生物种类为介形虫、腹足、少量腕足、海百合, 纹层状构造, 具鸟眼和生物钻孔, 常见收缩纹	泥晶颗粒灰岩	O_1m_2 、 O_1m_5
相 7	潮上膏盐湖相	岩盐、盐丘、盐脉, 各种晶粒结构, 厘米-细粉晶结构。常见泥粉晶白云石和微晶硬石膏、膏岩成层分布, 一般由短轴状微晶组成, 常与白云石条带、石盐等伴生	岩盐、膏岩	O_1m_3 、 O_1m_5 中一下部

二、大气淡水淋滤标志

大气淡水淋滤成岩环境所出现的成岩作用, 主要以大气淡水渗滤和溶蚀方式促使储集岩的溶孔洞、溶斑、溶缝等次生孔隙发育。本区马家沟组顶部古风化壳天然气产层的大气淡水淋滤标志, 常见有以下 12 种。

1. 溶蚀结构 典型的次生溶蚀孔有晶间溶孔(图版 I-1)、膏模孔(图版 I-2)、藻屑粒内溶孔(图版 I-3)、由石盐或石膏结核溶解而成的毫米级球状溶蚀孔(图版 I-4)、溶蚀缝及顺缝分布的串珠状溶孔(图版 I-4)与溶蚀缝合线(图版 I-6)。此外, 还发育岩溶角砾、岩溶垮塌角砾(图版 I-8)、被充填的溶洞或溶斑示顶底构造(图版 I-5)等组构。

2. 石盐假晶 去盐化作用是大气淡水淋滤和溶解作用最敏感的形式。石盐晶体通常被淡水方解石或淡水白云石交代, 并保留其立方体石盐铸形(图版 I-8), 往往顺着灰黑色纹层藻席分布。局部形成石盐铸模孔。

3. 石膏假晶 天然气储集层中, 石膏假晶或膏模孔比比皆是。肉眼观察细晶-粗粉晶白云岩中的石膏假晶呈“火柴棒”状, 长轴为 5 mm。有些薄层状藻粒白云岩, 曾被人命名为麦粒状或刀刃状白云岩^[3]。其实, 这些“麦粒”、“刀刃”也是石膏经白云石化的产物(图版 I-3)。

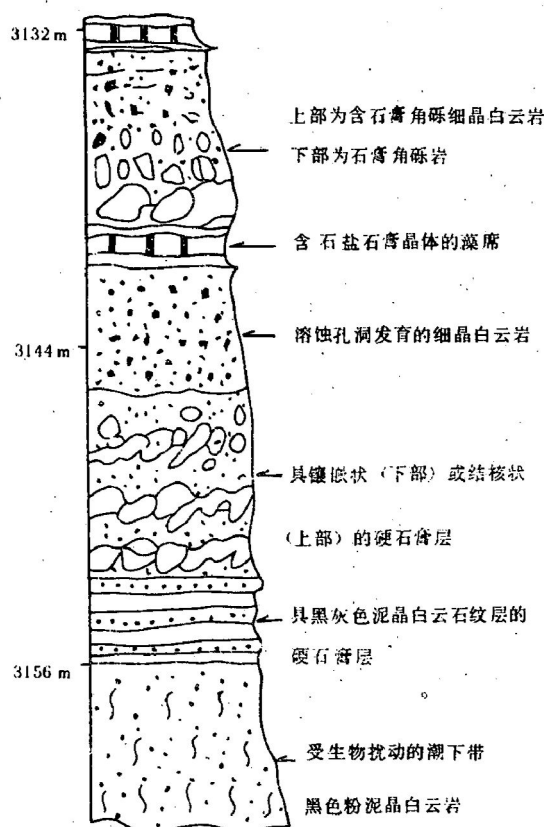


图1 陕3井马家沟组第五段4亚段
(O₁m₄) 沉积层序素描

4. 淡水白云石 这种白云石常呈洁净明亮、自形等粒、较高的有序度区别于卤水白云石。它们常以充填物形式充填在溶孔、溶洞、溶缝中,并与自生石英或高岭石伴生(图版Ⅱ-5,4)。经均一法包体测温,淡水白云石形成温度界于46—80℃之间。

5. 去白云石化 去白云石化作用通常以方解石交代白云石的形式出现,有时也出现硬石膏或隐晶质玉髓交代白云石的现象。前一种形式表现为方解石呈菱面体白云石假象,或者呈它形的方解石溶蚀斑晶(图版Ⅱ-6)。方解石交代白云石或硬石膏,交代白云石有人用淡水淋溶作用来解释^[2]。

6. 高岭石化 高岭石在潜流带中一般为准稳定矿物^[4]。它们常充填在溶孔、溶洞、溶缝中,与自生石英、淡水白云石共生(图版Ⅱ-6,Ⅱ-8)。这种高岭石晶体呈假六方板状(图版Ⅱ-7),晶粒大小为10—15 μm。有些天然气储集层段,发现沥青质浸染高岭石的现象。

7. 硅化 一般情况下,硅化往往发育于潜流成岩环境。因为SiO₂矿物是在偏酸性的水介质条件下才趋于呈稳定状态^[5],并晶出三方柱状自形石英,且与自形白云石共生(图版Ⅱ-4)。在部分

溶孔或溶洞中可见平行连生的晶簇状或者呈叶片状玉髓。玉髓的负光性常认为是大气淡水淋滤成因的证据之一^[6]。

8. 水平溶孔层 在天然气储层中,常发育略具水平排列的溶孔、溶洞的细晶-粉晶白云岩孔隙层,其厚度数厘米至数米不等,最厚的可达12 m。其中的溶孔、溶洞常呈圆球状或椭球状(图版Ⅱ-1,2),孔径2—5 mm,半充填或全充填,充填物多为淡水白云石、自生石英、高岭石和淡水方解石(图版Ⅱ-5,6),有时环绕孔壁有一圈沥青质。水平溶孔层的面孔率一般为7%—8%,有时高达13%。这些具标型特征的水平溶孔层,显然是纹层状藻席白云岩中的藻粒、球粒或鲕粒经淡水淋滤和溶解作用造成的。

9. 渗流豆粒 渗流豆粒一般分布于岩(盐)溶角砾岩或垮塌角砾岩的填隙物中。结构类型有偏心圆状、海绵状、隐粒胶状等。豆粒成分可以是石英砂、碳酸盐砂或亮晶方解石集合体,也可以是粉砂级的方解石或泥质物。豆粒大小多数为2—3 mm,部分<0.03 mm(图版Ⅱ-7)。有些暗色的渗流豆粒及与其伴生的粘土泥质中已经获得上覆石炭系的孢粉化石*。

10. 自然硫 沉积岩中出现自然硫,一般认为是硫酸盐矿物被硫酸盐菌还原而形成的一种次生矿物^[7]。它的出现标志着淡水氧化环境的结束,并向偏碱性埋藏还原环境转化^[8]。因此,

* 据蔡友贤鉴定资料

通常把自然硫存在的深度，看作是大气淡水渗流氧化环境的底界面。

11. $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta^{13}\text{C}$ 负值增大 分别对天然气储集岩中的溶孔、溶洞充填物（淡水白云石和淡水方解石）进行了碳和氧同位素测定。据 27 个样品测定资料作出图 2。由图 2 可知， $\delta^{13}\text{C}$ 最大负值为 -11.4‰ PDB ； $\delta^{18}\text{O}$ 最大负值为 -13.2‰ PDB 。可以认为， $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 负值的明显增大，是由于大气降水的加入及生物细菌作用造成的^[9,10]。

12. 微量元素含量偏低 分别对马家沟组主要含气层段进行 Ti、Li、Ba、Sr、Mn、Ni、Co、Pb、V、Zn、U、Th、B 等 13 种微量元素 X 光-荧光光谱测定，总含量仅为 180ppm，而不含气的致密层段一般大于 300ppm，有的高达 2800 ppm。其中变化最显著的有 U、V、Ba 和 Ti 4 种微量元素（图 3）。此外，主要含气层段的轻稀土与重稀土元素含量的比值明显变小，Th/U 和 Ca/La 高比值的出现，均能说明本区马家沟组顶部古风壳天然气碳酸盐岩储层，经历了长时间、强烈的表生成岩作用以至风化成壤作用。

上述列举的 12 种淡水淋滤标志，足

以证明表生成岩环境是本区天然气储层最主要的成岩背景。但由于储集层的古地理、古水文、岩石类型以及古构造破裂成缝作用特点的不相同，表生带淡水淋溶作用的类型及强度可以出现明显的差异。如裂缝发育部位，往往孔、洞、缝密布，甚至矿物质的溶解、充填与交代、微裂缝的发育，常表现为多期次、多阶段性。

三、储集性能及成岩序列

（一）储集岩类型

根据大气淡水淋滤、溶蚀作用的强度及孔隙结构特征，大致可将本区马家沟组顶部古风壳天然气储集层划分为溶蚀孔洞型（I）、溶蚀垮塌角砾岩化型（II）、溶蚀交代充填型（III）和致密稳定型（IV）等 4 种储集岩类型。前二种在勘探过程中为天然气显示最好的储集岩，孔隙度一般为 8%，最大可达 12%，渗透率 $0.5 \times 10^{-3} \sim 1000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，最大喉道直径 $1 \mu\text{m}$ ，进汞饱和度大于 70%。致密稳定型属非储集岩，孔隙度通常小于 1%，渗透率小于 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，进汞饱和度小于 20%（表 2，图 4）。

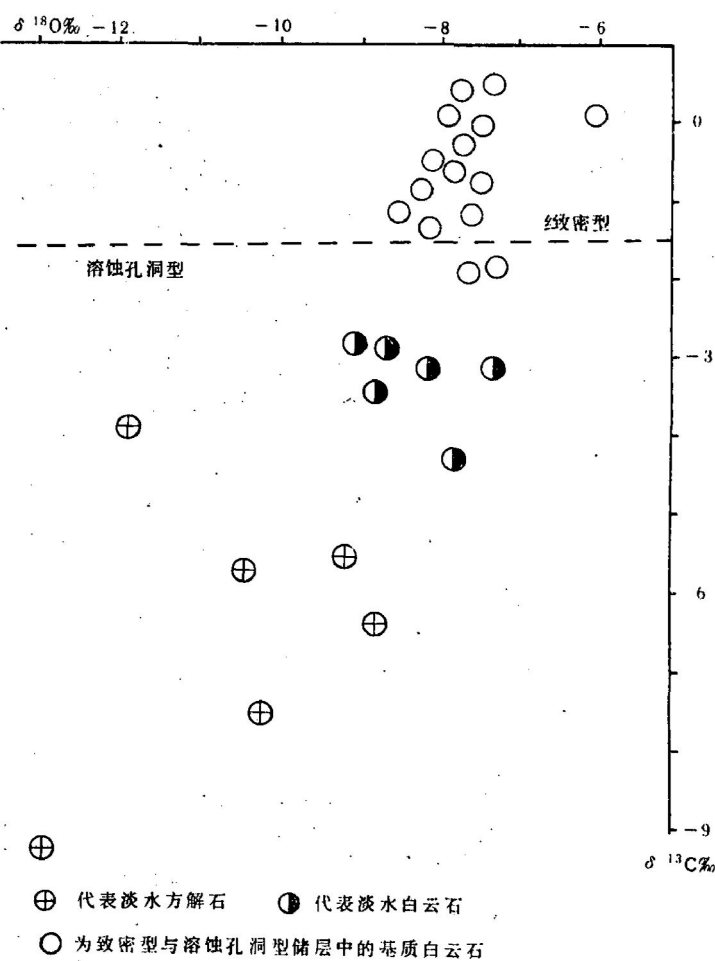


图 2 淡水方解石和淡水白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 值图解

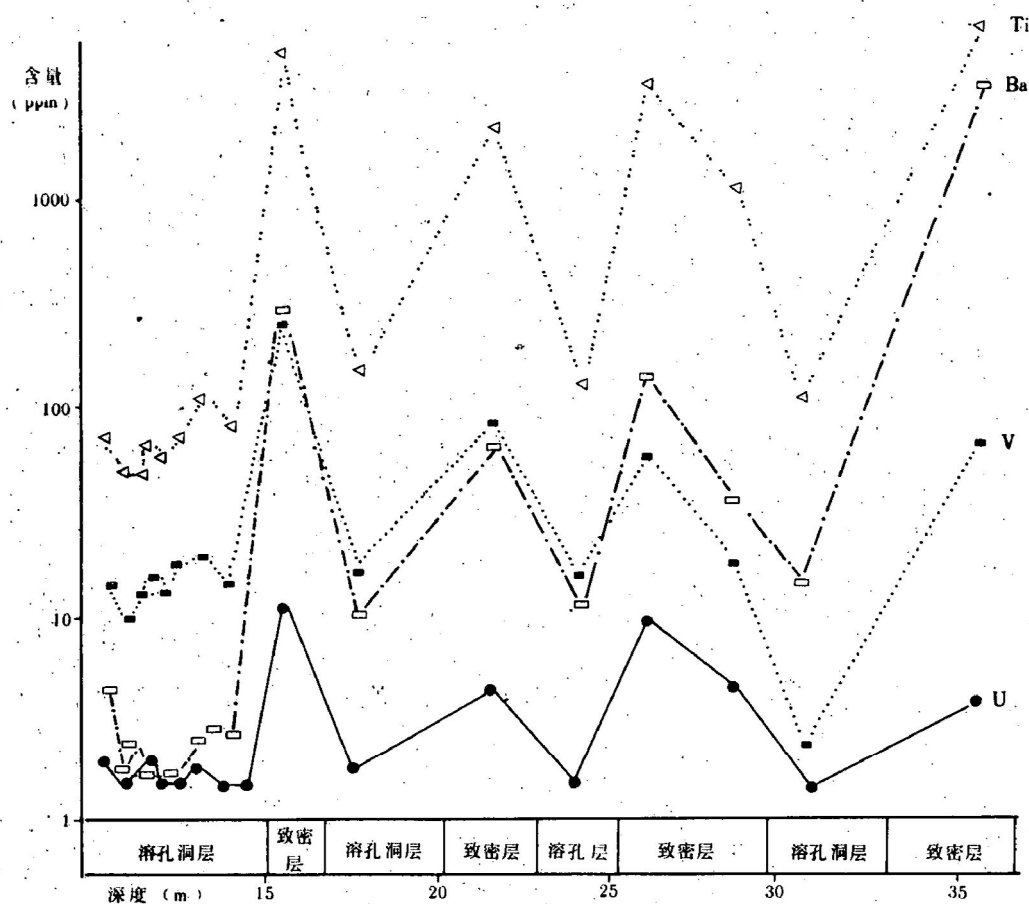


图3 马家沟组天然气储层中Ti、Ba、V、U微量元素分布特征图

表2 马家沟组天然气储集岩分类表

储层类型	溶蚀孔洞型 (I类)	溶蚀垮塌角砾 岩化型 (I类)	溶蚀交代充填型 (II类)	致密稳定型 (IV类)
岩性特征	细晶白云岩	白云质角砾岩	灰质白云岩 次生石灰岩	泥晶白云岩
面孔率 (%)	5—15	2—10	2—5	<2
孔隙度 (%)	5—12	3—6	0.5—2	≤1
渗透率 ($1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	2—1000	0.5—20	0.01—0.5	<0.05
孔隙类型	溶蚀孔洞、晶 间溶孔、溶缝	角砾间孔 溶孔	晶间孔为主	晶间微孔为主
孔隙大小 (μm)	5—3000	2—1500	2—100	<5

(二) 成岩环境和成岩序列

本区马家沟组顶部古风化壳天然气储集层，实际上是一种潮坪膏盐岩与碳酸盐岩共生的萨布哈类型。成岩环境有：海水潜流带、海水-淡水混合带、淡水潜流带、淡水渗流带及埋藏带。成岩作用分为同生期、成岩期、表生期和埋藏成岩期四个阶段。成岩序列可归纳为：原始潮坪沉积物（灰泥、蒸发矿物、藻类、颗粒） $\xrightarrow{\text{同生期}}$ 准同生白云石化、膏盐化、泥晶化和胶结作用 $\xrightarrow{\text{成岩期}}$ 成岩早期白云石化、溶蚀、压实和胶结作用 $\xrightarrow{\text{表生期}}$ 淡水淋溶、岩（盐）溶角砾岩化、重结晶、去白云石化、去膏盐化、硅化、高岭石化 $\xrightarrow{\text{埋藏成岩期}}$ 压实与压溶、破裂成缝与充填、重结晶、溶蚀、铁白云石化（铁方解石化）、硬石膏化、黄铁矿化、进油气。

(1) 同生期的成岩作用发生于海水潜流带，由原始萨布哈沉积物经准同生白云石化、膏盐化及泥晶化作用后形成半固结状态的膏盐岩和碳酸盐岩，尔后是藻类与菌类的生长发育，形成纹层藻席。介质为氧化-还原条件。

(2) 成岩期的成岩作用主要发育于海水-淡水混合带。早期成岩作用主要是白云石化，其次是海底胶结和压实作用；晚期成岩作用主要是溶蚀作用，使石盐、石膏、文石、高镁方解石及准同生白云石相互置换交代或充填。介质为弱还原条件。

(3) 马家沟晚期，随着海平面下降，地壳抬升成陆，成岩环境步入潜流和渗流带。漫长的表生阶段，其成岩作用以大气淡水淋溶作用为主导，促使储集层形成大量溶孔、洞、缝、铸模孔和岩（盐）溶角砾结构，并伴随以硅化、高岭石化、重结晶作用、去膏盐化和去白云石化。介质为弱还原至氧化条件。

(4) 自中石炭世初期开始，马家沟组储集层又沉降于海陆过渡环境的埋藏带，进入了埋藏成岩阶段。此时此刻的成岩作用主要表现为压实与压溶作用，使表生期形成的溶孔、洞、缝和微细构造裂缝发生变形或充填堵塞，降低孔隙度。但由于埋藏成岩期介质为还原条件，温度和压力增高，促使溶蚀作用的发生，出现了第二次溶蚀孔、洞、缝。与此同时，在变形或第二次生成的溶孔洞缝中又充填了硬石膏、铁白云石、铁方解石、黄铁矿、高岭石等自生矿物（图版 I-7）。马家沟组储层中的天然气是一种混合气，且大部分是由上覆石炭一二叠纪的煤成气倒灌而来的，这与有机地球化学分析资料相吻合。同时也说明，埋藏成岩阶段是进油气和天然气聚运的主要时期。

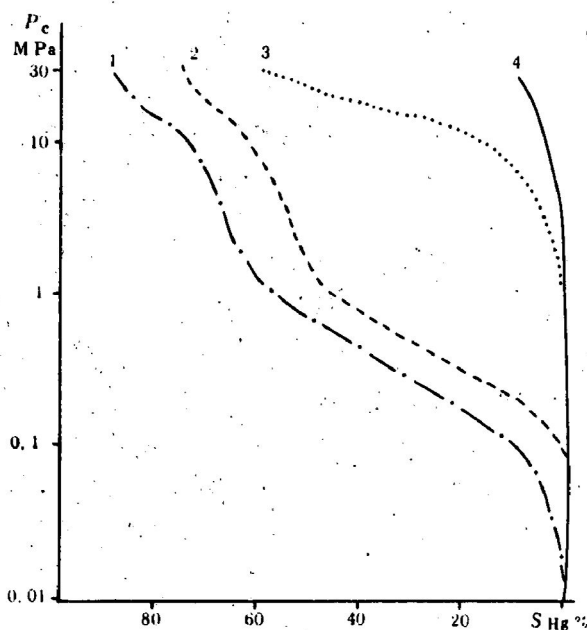


图4 马家沟组不同储集岩的毛管压力曲线

1—溶蚀孔洞型，2—溶蚀垮塌角砾岩化型

3—溶蚀交代充填型，4—致密稳定型

四、认识和结语

鄂尔多斯盆地中部下奥陶统马家沟组顶部风化壳天然气储集层的储集性能,严格地受沉积和成岩环境的控制。无论是同生阶段的准同生白云石化、膏盐化,成岩阶段的白云石化、钙质硫酸盐和石盐的置换交代作用,还是表生阶段的大气淡水淋溶作用、岩(盐)溶角砾岩化以及埋藏成岩阶段的压实与压溶、破裂成缝和强烈的溶蚀作用,均使储层的孔隙结构发生明显的变化,并出现多期次、多阶段而复杂化。同时,溶蚀孔洞层与致密稳定层的叠加配置,构成了本区多个含气层段,并有利于储集空间向好的方向演化。

在古地貌地质背景下,高部位古残丘的大气淡水淋滤和溶蚀作用,相对于低洼处要显著得多,由此而产生高孔隙层段的机率会更大些。泥质含量低、含石膏(硬石膏)和石盐、纹层藻席与晶间(粒间)溶孔洞发育的细晶-粉晶白云岩,成为天然气显示最好的储集岩,而那些泥质含量高,且又致密,孔隙性差、有效裂缝极不发育的泥粉晶白云岩,将不利于天然气的聚集和运移。

致谢:工作期间,得到裴锡古高级工程师的热情支持和帮助。承蒙教授级高级工程师贺自爱先生审阅全文,并提出了建设性的宝贵意见。谨此一并笔颂谢意。

参 考 文 献

- 1 Shearman D J, Fuller J G C M. Anhydrite diagenesis, calcitization, and organic laminites, Winnipegosis Formation, Middle Devonian, Saskatchewan. *Bull. Can. Petrol. Geol.*, 1969, 17: 496—525.
- 2 Kinsman D J J, Park R K. Algal belt and coastal Sabkha evolution, Trucial coast, Persian Gulf. In: Walther M R ed. *Interpreting stromatolites*. Amsterdam: Elsevier, 1976. 421—433.
- 3 冯增昭, 陈继新, 张吉森. 鄂尔多斯地区早古生代岩相古地理. 北京: 地质出版社, 1991. 12—23.
- 4 曾允孚, 夏文杰编. 沉积岩石学. 北京: 地质出版社, 1986. 125—142.
- 5 里丁 H G. 沉积环境和相. 周明鉴, 陈昌明等译. 北京: 科学出版社, 1985. 380—473.
- 6 冯增昭, 陈继新, 吴胜和等. 华北地台早古生代岩相古地理. 北京: 地质出版社, 1990. 15—24.
- 7 格里年科 B A, 格里年科 Л H. 硫同位素地球化学. 赵瑞译. 北京: 科学出版社, 1980. 55—150.
- 8 Toylor H P Jr. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problem of hydrothermal alteration and ore deposition. In: Barnes H L ed. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. New York: Wiley-Interscience, 1979. 244—248.
- 9 王宝清, 俞惠隆, 林克湘. 湖北宜昌地区下奥陶统碳酸盐岩成岩作用. *石油与天然气地质*, 1991, 12 (3): 300—307.
- 10 俞惠隆. 徐家山碳酸盐地层中层控矿床的矿质来源与矿液性质. *地球化学*, 1987, (2): 167—175.

RESERVOIR CHARACTERISTICS OF MAJIAGOU FORMATION IN CENTRAL ORDOS BASIN

Huang Yueming Yang Yihua Bao Hongping

(Chongqing Institute of Petroleum Exploration and Development, Qingyang, Gansu)

Yu Huilong

(Jiangnan College of Petroleum, Shashi, Hubei)

Abstract

The gas reservoirs of the Majiagou Formation, Lower Ordovician in central Ordos Basin could be divided into four types that are actually a kind of sabkha composed of gypsum-salt on tidal flat associated with carbonate rocks with clear leaching marks of atmospheric water.