

文章编号: 1000-0550(2003)02-0260-06

鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组溶斑形成机理

邸领军^{1,3} 杨承运² 杨奕华³ 冀小林³ 包洪平³

1(西北大学地质学系 西安 710069) 2(北京大学地质学系 北京 100871)

3(长庆油田公司勘探开发研究院 西安 710021)

摘要 鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系马家沟组属蒸发边缘海相地层,其风化壳是中部气田的主要产气层段。该层中广泛发育毫米级、厘米级的溶斑,这些溶斑的产状、大小、成分以及溶孔内的充填物十分复杂,有的具多期充填,充填物为石膏、石英、方解石、白云石、高岭石、黄铁矿等多种矿物。溶斑中下部残留的岩石经溶蚀后的白云石晶粒形成的渗流砂示底构造十分明显。研究表明,溶斑的形成不仅具有适宜的岩相古地理环境和其复杂的生成演化史,而且与原始沉积以及不同地史阶段的岩溶作用相关。

关键词 鄂尔多斯盆地 奥陶系马家沟组 蒸发边缘海 岩溶 溶斑

第一作者简介 邸领军 男 1956年出生 高级工程师 博士研究生 石油地质及沉积岩石学

中图分类号 P588.24 5 **文献标识码** A

1 引言

岩溶的研究历史已有一个多世纪,早期的岩溶研究大多集中在如何认识各种岩溶地形、地貌学、水文学和岩溶的形成。近几十年,随着地质科学的不断进步和发展,人们才开始对岩溶的形成机理及成因进行较深入地研究,但仍有不同的观点出现,如 Hoqutte 和 Pray(1971)把岩溶等同于溶洞的发育,而 Esteban 和 Kiappa(1983)则认为岩溶是一种成岩相;1983年,任美镔等在《岩溶学概论》一书中把“岩溶作用及所产生的水文现象和地貌现象统称为岩溶”。1986年,王大纯在《水文地质学基础》一书把岩溶定义为“岩溶是指水流与可溶岩石相互作用的过程以及由此而产生的地表及地下地质现象的总和”。1987年 Choquette 和 James 在其主编的《古岩溶》一书中指出:“岩溶这一术语具有更广泛的含义,它包括所有成岩作用的特征(宏观的、微观的,地表与地下的)这些特征形成于化学溶解和伴随的碳酸盐岩层系的演化过程中。”可见,岩溶这一术语的解释和岩溶作用的研究经历了逐步演化并不断完善的过程,现今赋予它的意义既包括岩溶作用,又包括该作用的结果。因此,对照岩溶术语的内涵,在沉积岩层中凡是产生溶蚀作用的环境,就有岩溶作用的进行。这一概念的不断被理解运用,使人们才不断意识到,以前归之于大气成因的许多使人困惑不解的组构和构造,也可以在其它成岩环境中形成,于是岩溶作用的研究从传统的对象,即地表及地层不整合面以下一定深度内的岩溶或古岩溶扩大到成岩早期或深埋藏环境下

的古岩溶。新的研究内容和思路不断冲击着岩溶和古岩溶是近地表成岩作用形成的观念,诸如微岩溶、同沉积岩溶、深埋藏岩溶、热水岩溶、碎屑岩溶和生物岩溶等名词的不断涌现反映了岩溶—古岩溶研究发展的趋势和前景。在近代石油勘探中,人们发现,世界上许多大油气田其碳酸盐岩储层与蒸发边缘海相岩溶作用息息相关。为了开发这些油气田,许多国家、石油公司都投入了巨大的人力物力研究这类储层的沉积成岩规律,这无疑极大地促进了岩溶学研究的深入发展。“八五”期间,长庆油田与北京大学合作的《陕甘宁盆地中部气田马家沟组五段碳酸盐岩沉积—成岩微相研究》的国家攻关研究课题,对主力气层马五储层段中的溶斑形成机理进行了较为详细的研究。该成果不仅对碳酸盐岩地层的油气勘探有一定的理论和实践意义,而且对当今古岩溶学的研究有一定的学术参考价值。

2 区域地质背景

蒸发边缘海相储层是目前世界上许多大油气田的重要储层,是储层中一种较为特殊的类型。它基本上属于碳酸盐储层,但在沉积过程中,蒸发作用十分强烈,形成一定数量蒸发岩类矿物存在于碳酸盐之中。由于蒸发岩的易溶性,在其溶解之后便形成了储层中的储集空间。由于这一特性,使蒸发边缘海相沉积层成为世界上许多大油田的重要储层^[4]。位于中国西部的鄂尔多斯盆地中部大气田(图1)奥陶系马家沟组马五段储层沉积环境则属该类沉积。

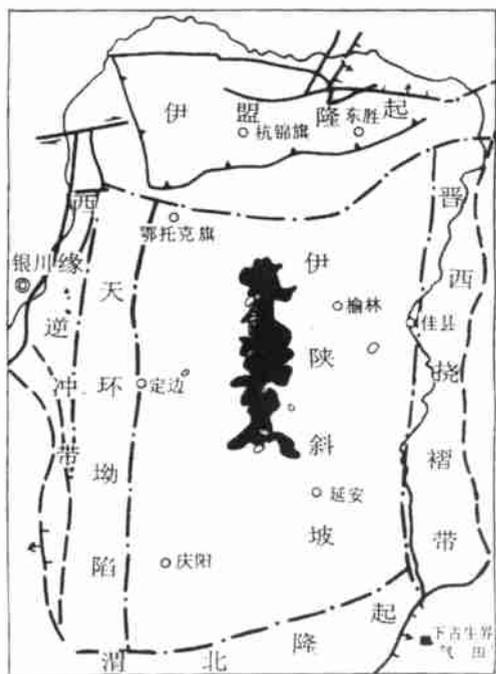
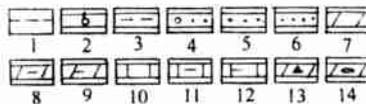
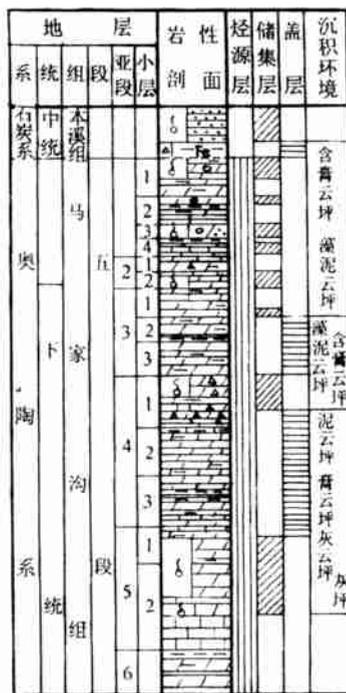


图 1 鄂尔多斯盆地中部气田位置图

Fig. 1 Location map of the Central Gas Field in Ordos Basin

鄂尔多斯盆地早奥陶世马家沟期地壳的频繁脉动式的升降运动,纵向上呈现了三次较大的海进—海退旋回,每期旋回都形成一套向上变浅的层序,三次旋回大体可分为六个岩性段。中部气田产层发育在马家沟组五段(马五3),该段由碳酸盐岩与蒸发岩组成,属蒸发潮坪沉积。按岩性组合划分,可将马五段溶蚀孔洞的发育段划分为十个韵律层。每个韵律层基本由含藻云岩—含膏云岩—云质硬石膏岩等三个韵律层序列构成(图2)。这种多旋回沉积特点,形成了旋回发育的层间岩溶,并孕育了风化壳储层空间的雏形。

中奥陶世末,加里东运动使盆地整体抬升并经历了长达 1.5 亿年的风化剥蚀,该期碳酸盐岩的表生岩溶作用十分强烈,在先期形成了微裂缝、溶孔、粒间溶孔和晶间溶孔的基础上溶蚀扩大,在岩层中形成毫米级、厘米级以至更大的溶孔、溶洞,构成了一个面积巨大,厚度 40~70 m 的风化壳储层空间。在古风化壳中的溶孔,它们往往由石膏结核和石膏集合体溶蚀的膏模孔组成。有趣的是这些溶孔、溶洞都被其它矿物多次充填、交代,形成了不同成分,不同颜色的斑点,即所谓的溶斑或膏斑。(图3)这些溶斑的产状,大小、成份以及充填物十分复杂,有的具多期充填的特点,充填物有石膏、石英、方解石、白云石、高岭石、黄铁矿等多种矿物,更为典型的是溶斑的下半部残留的岩石经溶蚀后的白云石晶粒具明显的示底构造,溶斑的上半部一



- 1. 不整合面; 2. 气层; 3. 泥岩; 4. 砾状砂岩; 5. 中砂岩;
- 6. 细砂岩; 7. 白云岩; 8. 泥质白云岩; 9. 含泥白云岩; 10. 灰岩;
- 11. 泥质灰岩; 12. 含泥白云岩; 13. 角砾白云岩; 14. 孔洞白云岩

图 2 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组地层
Fig. 2 Stratum of Ordovician Majiagou Formation in the east-central part of Ordos Basin

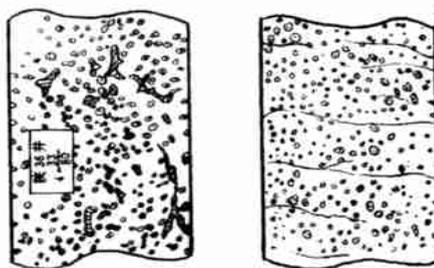


图 3 陕 36 井马五储层段岩芯溶斑素描

Fig. 3 Charcoal drawing of M5 reservoir cores from Well Shan36

般为非铁方解石充填。若溶斑中充填方解石所占空间过大,将直接影响储层的孔隙度。反之则好。勘探开发实践证明,溶孔中的矿物成分与充填程度是影响产气层好坏的重要因素。

3 岩溶储层岩石学特征

奥陶系马家沟组第五段是中部气田的主力气层,其沉积物主要为一套局限台地和蒸发台地碳酸岩沉积的系列产物。主要岩性为各种不同结构的准同生泥微

晶白云岩,其突出的特征是岩类结构相对单调,结晶普遍微细、单层薄、生物匮乏,仅含低级的隐藻类遗迹。由于微环境的差异,隐藻类形成藻球粒、藻斑点、藻纹层等不同的沉积结构构造。因而部分地形成了纹层状藻白云岩、棉毯状藻云岩、以及藻球粒白云岩等。无论是颗粒组分,还是基质部分,白云石均为泥微晶结构。这些岩类中普遍含有石膏、硬石膏、石盐、萤石等蒸发矿物,这些伴生矿物或为单晶,或为结核状集合体。其大小不等,介于 $10^2 \mu\text{m} \sim 10\text{mm}$ 之间,石膏、硬石膏单晶呈针状、板状,集合体为圆形、椭圆形结核。正是这些蒸发易溶矿物的存在,也就为各种不同溶斑的形成奠定了物质基础。除此而外,岩石中常见 V 形干裂、收缩缝、鸟眼、渗滤沙以及示顶底等标志性沉积构造(图版 I - 1)。这些典型的结构构造以及矿物组合特征充分展示了潮间—潮上局限台地和蒸发台地沉积物的基本特征。

在以泥微晶白云岩为基调的相序系列中常见夹有特大风暴期的白云质风暴岩(即泥微晶砂砾屑白云岩)和沉积期后的岩溶角砾岩(次生角砾白云岩),岩溶角砾岩多由膏盐类矿物溶解坍塌等作用形成,部分是在风暴砂砾岩的基础上改造而来的。

也正因为岩石具有这种特殊的结构构造,由此也造就了这套白云岩特殊的储集空间,在沉积期后的淡水溶蚀、潮解作用下,膏、盐类等易溶矿物大量溶解形成顺层或者随机分布的膏、盐模孔、结核状溶孔等。在地表岩溶阶段这些组物性溶孔进一步溶蚀扩大,形成非组构性溶蚀孔洞,进而改变了岩石的孔隙性,形成中部气田工业性储层。

4 溶斑的分布及特征

显微镜下观察,溶斑的形态、产状、大小、充填物总体上有相近之处,但在剖面上不同的小层中又各具特色,根据充填物的种类和层次可将溶斑归纳为三种类型:即复杂充填—溶蚀型、简单充填—溶蚀型及无层次的混积型。复杂充填溶蚀型是溶斑经过反复溶蚀、多期充填,多种介质反复交替,形成多种矿物充填具有明显的分期性特征。这类溶斑是原生石膏经大气淡水溶蚀淋滤后有最早期的渗流水条件下形成的泥粉晶白云石充填,随后又在潜流介质中相继形成膏质、硅质、铁质、钙质的沉积充填。之后,又在适当的渗流条件下膏质被溶,由此而形成层段清晰、连通性良好的膏模孔隙(图版 I - 2)。

混积型溶斑与复杂充填型类似,只是析出的成岩矿物如钙质、硅质、云质等不具明显的期次性。在剖面小层上三类溶斑的分布具有如下规律:

马五 1 既风化壳的顶部的层段,溶斑主要为多层次的复杂充填—溶蚀型,形态比较多样,有圆形、矩形或不规则形态,大小 $0.5 \sim 5 \text{mm}$,其间依次充填泥粉晶白云石、方解石、淡水白云石,有的还充填有石英、高岭石等。除了上述本层物质外,溶斑中尚见上覆石炭系的碎屑石英和粘土(图版 I - 3, 4, 6)。

马五 1 的溶斑是无层次混积型的残余和半充填溶斑近圆型或不规则状,常见有裂隙连通显然是在原有的形态基础上溶蚀扩大的结果,其间有柱状石英、中、粗晶方解石等,或半充填,或全充填。成岩矿物无序排列,期次不明显,晶体互相镶嵌。该类溶斑个体较小通常为 $0.5 \sim 1.5 \text{mm}$ 。有时与围岩的界线不很清楚,有人将其谓之“假斑”。

马五 1 的溶斑是三类溶斑的组合,既有复杂充填型,又有混积型,还有单一充填型。由于裂隙发育连通并在原有溶斑的基础上扩大溶蚀,而成为中部气田的主力气层。

最特征的简单充填—溶蚀型溶斑存在于马五 4 段,即岩溶层段的中下部,斑径粗大通常在 $2 \sim 6 \text{mm}$,以圆形、椭圆形为主,其充填物因上覆地层岩性的不同而异。如上覆地层底部为膏盐层,溶斑全被膏质充填;若为白云岩、灰岩,斑内一定为单一的白云石或方解石,溶孔因孔隙填满,而失去储集能力(图版 I - 5)。

综上所述,溶斑矿物的复杂与简单与其所处的成岩环境密切相关,位于岩溶顶部的溶斑普遍经历了复杂的成岩史,成岩环境相对开放,成岩介质的交替排泻迅速,因而,其成岩矿物种类也比较复杂。

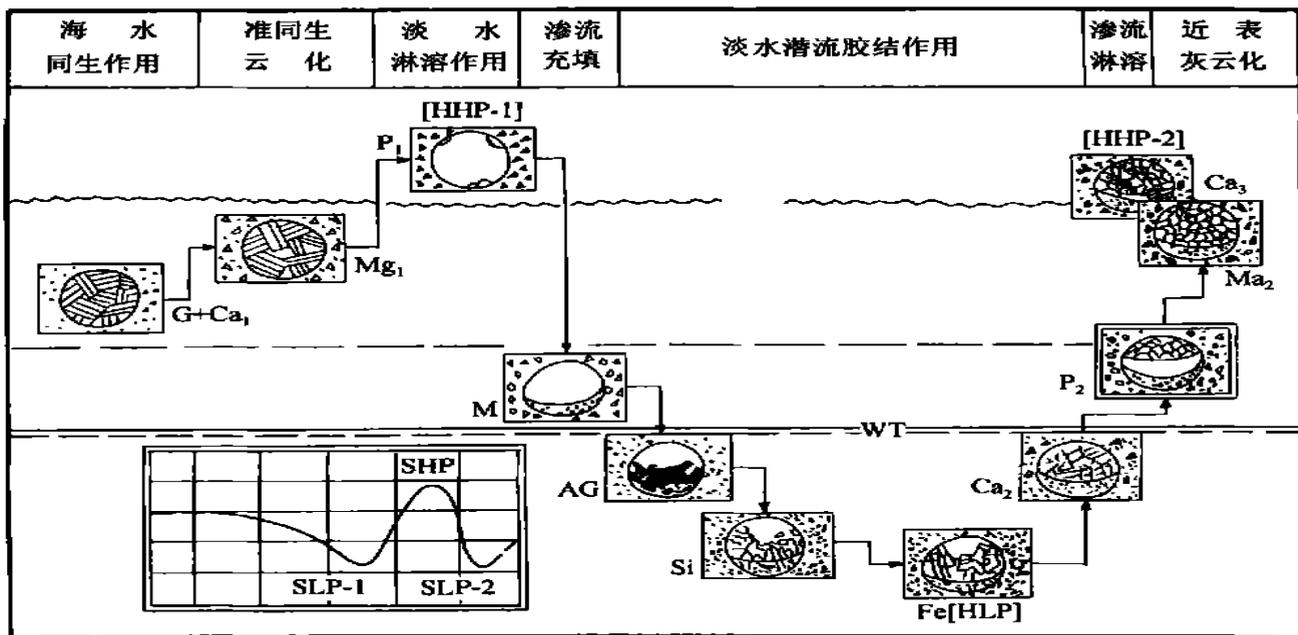
研究表明,近海盐沼(岸缘萨勃哈)是特征的沉积—成岩环境。它处在海陆交界和过渡地带,既有海水涨潮的周期性的补给,又有强烈蒸发作用造成的泵吸回流,同时,陆地水系所驱动的重力作用,大陆降雨带来的淡水稀释,都使这一地区孔隙水的性质及其成因变得较为复杂。强烈的蒸发作用使孔隙水中的石膏达到饱和,而在泻湖所产出的文石质软泥中沉淀出石膏硬石膏。这种结核状硫酸盐块体的产出使孔隙水中 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 比值巨增,而利于白云石的生成。这样,准同生的白云岩或交代生成的文石泥,或直接沉淀于隙间,形成了含结核的泥粉晶白云岩。因此可以认为,成为重要储集空间的溶斑,是原生的膏质结核经过复杂的成岩作用后形成的,而位于岩溶地层的中下部,成岩环境相对闭塞,成岩流体基本上属于地层水且循环不畅,外来离子较少,溶蚀充填物质仅限于层内物质的聚散,因而溶斑中的充填物也只限与上覆邻层物质的溶解和沉淀。

5 溶斑形成的机理

泥粉晶白云岩中蚀空的浑圆状的膏斑,是构成岩溶型气藏的主要储集空间。因此,分析其形成机理和控制因素对勾勒其演化历程有其重要的理论及实际意义,一般来说,膏斑的生成是和白云石化成正向关系。在气候炎热蒸发强烈的条件下,潮坪上的某些地域,其 Mg^{2+}/Ca^{2+} 比值可能因石膏结核的生成,溶液中的 Ca^{2+} 因消耗促减而有所升高,从而大大利于白云石化的进行。

在岩相分析的基础上,归纳出复杂型溶斑形成机理的一个完整理想模式(图 4)。从中可以看出,经过海水同生作用和准同生云化作用形成的含膏结核泥粉晶白云岩,首先经历了向上变浅的暴露过程,大气淡水淋滤了易溶的膏质,形成膏模孔隙;随后的海水淹没使其又接受了未饱和渗流泥粉晶的初次填集;埋深加大,潜流带的饱和水使膏质、硅质、铁质、钙质依次淀积下来,充填或半充填了溶蚀空间。若海水的振荡使成岩区再次抬升,在潜水面以上(或其附近)渗流作用对已充填

在模孔中的膏质进行选择淋滤,再次形成一定的溶蚀孔洞。这就是目前的油气储存空间。如果成岩区抬升到近地表部位,则近地表灰云化有可能再次将溶蚀的空间堵塞。这一成岩作用过程都是同海水的往复进退密切联系的。也就是说,一次海水起伏振荡的周期,相应成岩区的两次抬升。第一次,淡水淋溶掉原生的石膏;第二次,淡水渗流溶掉了潜水充填物中的膏质,造成了气藏的可利储存空间。显然,前已述及的不同类型的溶斑是在海水振荡的条件下成岩区相对起伏升降,间隙水对石膏结核或模孔多序次充填和溶蚀的结果。因此,不同类型的溶斑同成岩区处在不同级别的间隙水作用带和它们经历的不同的成岩作用史相关联的。例如,简单型溶斑可能在其形成过程中并未经较长时间的潜流胶结作用而主要是潜水面之上的渗流带的未饱和间隙水对其施加影响。复杂充填-溶蚀型的溶斑,往往可见有三段以上的充填,即泥灰质-膏质-钙灰质(淡水方解石)。而构成孔隙的大多是膏质被溶掉的部分。这显然是潜流水和渗流水先后作用的结果。其标志是在被溶蚀掉的空隙间往往可以见到较自形的



图中代号: G(石膏); Ca_1 (钙质灰泥); Mg_1 (准同生白云岩); P_1 (大气淡水淋溶孔隙); M(渗流泥粉晶灰云质); AG(硬石膏); Si(硅质-玉髓或石英); Fe(铁质,主要为黄铁矿); Ca_2 (潜流中钙质淀积); P_2 (渗流淋滤孔隙); Mg_2 (淡水白云岩); Ca_3 (淡水方解石); MSW(平均海水平面); WT(潜水面); [HHP-1](地势高点-1); [HHP-2](地势高点-2); [HLP](地势低点); SHP(海水平面高点); SLP-1(海水平面低点-1); SLP-2(海水平面低点-2)

注意: SHP[HLP], SLP-1[HHP-1], SLP-2[HHP-2]是对应的。

图中的左下角小图是反映海水振荡的周期性变化的。

图 4 膏质溶斑的成因机理示意图

Fig. 4 Sketch map showing the forming mechanism

黄铁矿和石英。这些特殊在溶蚀残余型溶斑中也可见到,但它往往同微裂隙相连通,所以较原有的圆形有了较大的改变,以至面目全非,而成为扩大了的不规则形貌的溶斑。可见,同晚期成岩阶段的角砾化可以大大提高孔、渗性能一样,微裂隙可以起着不容忽视的异曲同工的作用。此外,淡水方解石(或白云石)的充填胶结作用无疑对已形成的空隙起到了充填作用,减小了孔、渗性,是不利的因素。

6 结语

(1) 蒸发边缘海环境指分布在热带、亚热带或干旱、半干旱的海域边缘,特别是那些处于封闭和半封闭状态边缘海,萨勃哈区和超盐度水体的局限边缘海区,这些海域以陆源碎屑沉积物的输入量低为特征,主要沉积物为碳酸盐—蒸发岩体系,其中碳酸盐主要为白云岩,蒸发岩主要为膏岩和盐岩。

由于石膏和盐岩的易溶性,往往形成地层中的溶蚀孔隙成为油气的储集空间。鄂尔多斯盆地中部正是由于这种宽缓而又韵律叠复的沉积相带,大面积广泛分布的蒸发潮坪环境和广阔的侵蚀岩溶地貌孕育了独具特色的中部大气田。

(2) 碳酸盐岩类油气藏的分布与沉积微相及成岩次生变化密切相关,油气的分布取决于沉积相带及其特定部位,有利的沉积相带是油气赋存的必要前提。因此,在鄂尔多斯地区开展蒸发边缘海相沉积层的研

究,搞清石膏和盐岩、溶蚀孔洞、溶斑的生成演化,对鄂尔多斯盆地下古生界岩溶古地貌中油气赋存规律及碳酸盐岩储层的研究,寻找天然气高产富集区有着十分重要的意义。

参考文献 (References)

- 1 任美镔. 岩溶学概论 [M]. 北京: 地质出版社, 1993 [Ren Meie. An Introduction to Karst [M]. Beijing Geological Publishing House, 1993]
- 2 袁道先主编, 中国岩溶学 [M]. 北京: 地质出版社, 1993 [Yuan Daoxian eds. The Karst in China [M]. Beijing Geological Publishing House, 1993]
- 3 James N P and Choquette P W 著, 胡文海等译, 古岩溶 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1992 [James N P, Choquette P W. Translated by Hu Wenhai *et al.* Paleo-karst [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992]
- 4 吕炳全. 蒸发边缘海相储层的研究 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1995. 1~ 2 [Lu Binquan. The Study of Evaporated Marginal Sea Facies Reservoir [M]. Shanghai The Publishing House of Tongji University, 1995. 1~ 2]
- 5 王大纯. 水文地质学基础 [M]. 北京: 地质出版社, 1986 [Wang Dachun. The Basis of Hydrogeology [M]. Beijing Geological Publishing House, 1986]
- 6 黄月明. 陕甘宁盆地中部气田白云岩储层特征 [J]. 天然气工业, 1993; 13(5): 31~ 34 [Huang Yueming. Dolomite reservoir characteristics of Central Gas Field in Shanganning Basin [J]. Natural Gas Industry, 1993, 13(5): 31~ 34]

Solution Spot Genetic Mechanism of Majiagou Formation in Ordovician of Ordos Basin

DI Ling-jun^{1,3} YANG Cheng-yun² YANG Yi-hua³ JI Xiao-lin³ BAO Hong-ping³

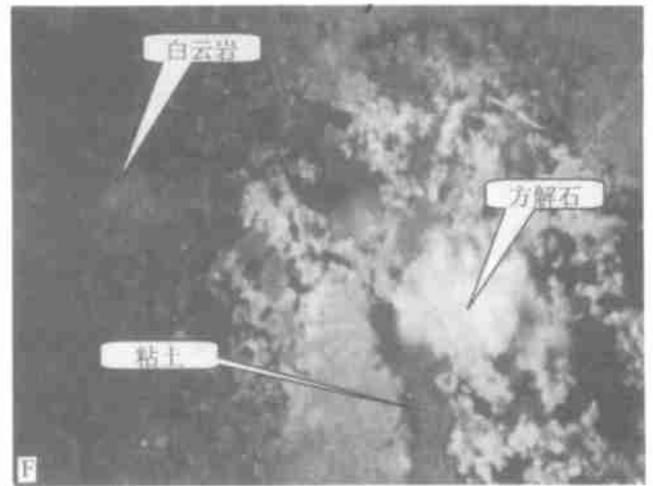
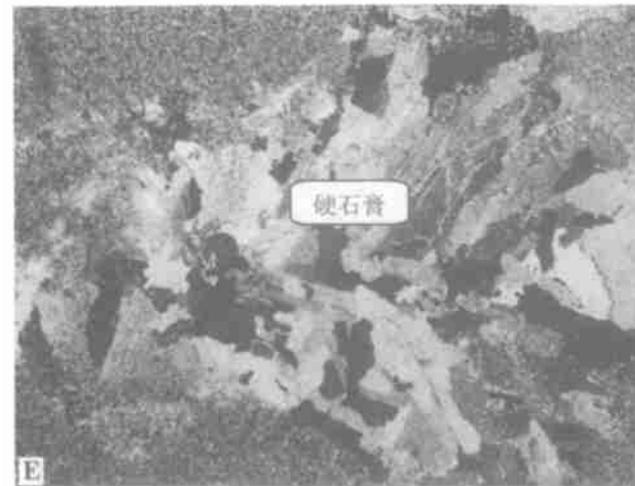
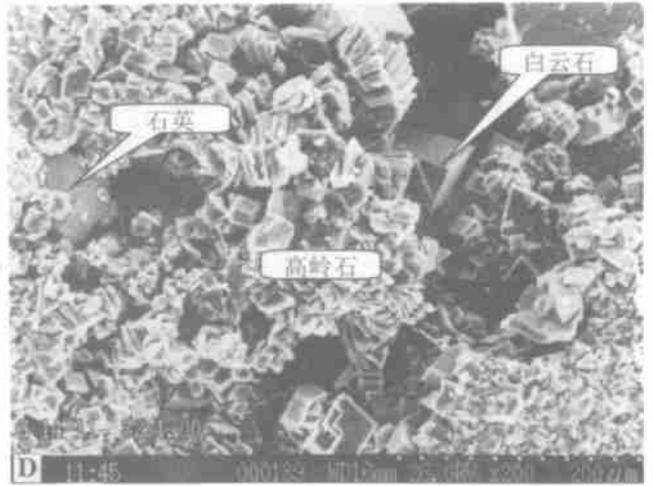
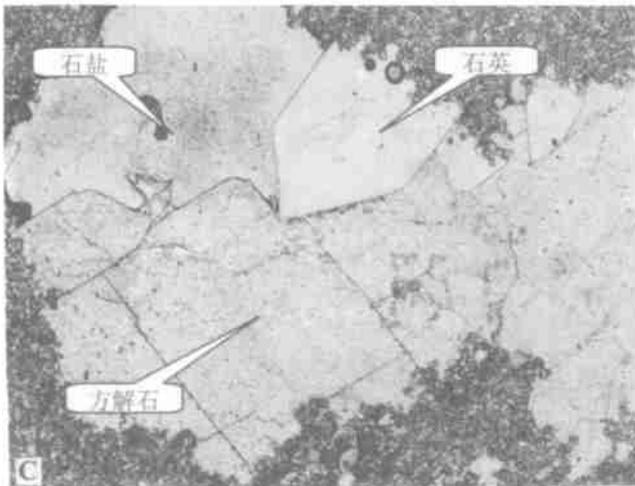
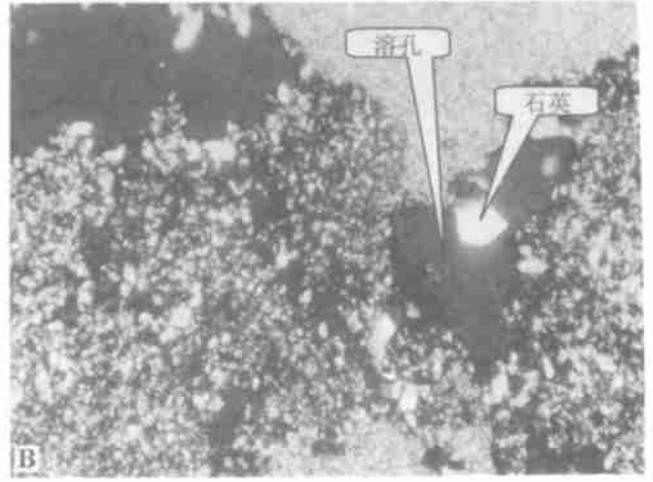
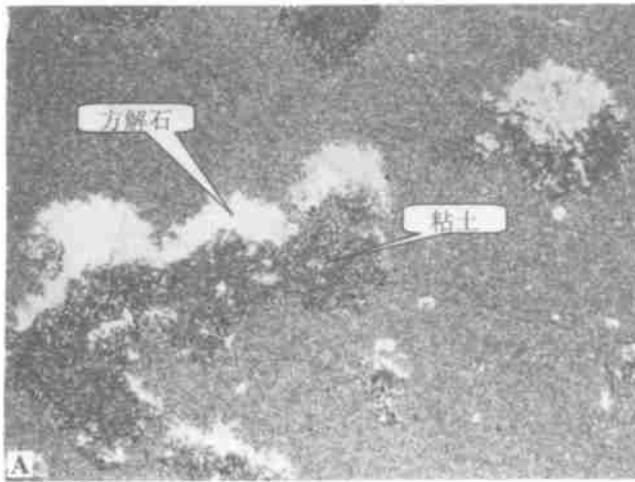
¹(Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069)

²(Department of Geology, Peking University, Beijing 100871)

³(Research Institute of Oil and Gas Exploration and Development, Changqing Oil Field Xi'an 710021)

Abstract The weathering crust of Majiagou Formation in Ordovician of Changqing Gasfield in Ordos Basin is the major pay zone with the evaporated marginal sea facies. Solution spots and holes with millimeter and centimeter size are developed and its occurrence, composition and fillings in the holes are very complex. Some of them have multi-stage fillings such as gypsum, quartz, calcite, dolomite, kaolinite and pyrite, and so on. The lower part of the solution hole remains dolomite crystalline just like geopetal structure of vadose sands in the clastic rock. As shown, the solution spots are formed not only with suitable lithofacies, paleogeographic environment and complexed evolutionary genetic history, but also the karstification related to original deposit and different geologic historical stages.

Key words Ordos Basin, Ordovician Majiagou Formation, evaporative marginal marine, karst solution spot, mechanism



图版I 说明: 1. 泥晶白云岩中的膏球连晶, 沉积期后形成的示底构造, 斑内底部为泥晶白云石和粘土充填, 上部细—中晶方解石充填。S23井, 马五¹, × 25; 2. 膏盐结核被溶, 泥微晶白云石、粘土、石英半充填, 红色为孔隙, 主要残留在溶斑上部。围岩为泥微晶白云岩。S2井, 马五¹, × 40; 3. 复杂充填—溶蚀型溶斑, 斑内充填粗晶方解石、自生石英和石盐, 期次分明, 并使岩石失去储集能力。围岩为泥晶白云岩。S23井, 马五¹, × 50; 4. 电镜下的无序充填型溶斑, 斑内充填有高岭石英、白云石。G14-11井, 马五¹, × 200; 5. 简单充填—溶蚀型溶斑, 斑内被硬石膏全充填。围岩为泥晶白云岩。S21井, 马五⁴, 正交偏光, × 25; 6. 阴极发光下溶斑内的充填物, 红色为细粉晶白云岩, 黄色为方解石, 深兰色为粘土。G16-14井, 马五¹