

# 鄂尔多斯盆地中部奥陶系顶盐溶作用 及其储集孔隙成因

张绍平

(长庆油田勘探开发研究院)

**摘要** 盐溶作用使碳酸盐岩孔隙性增加,同时在古代碳酸岩中由于渗—潜流水对已成孔隙产生沉淀,在滞流区又可形成致密性岩性遮挡。石盐结晶发生在沉积期,是被溶蚀的沉积易溶母质。盐溶孔的大量发育形成于后表生成岩期。天然气产量和岩石的物性取决于盐溶孔的开启程度。充填程度差异在区域上可导致储层孔隙空间的差异性和非均质性,正是由于岩石的这一自身“亏空”和“补偿”形成了区域上成岩圈闭或岩性遮挡。

**关键词** 鄂尔多斯盆地 盐溶作用 盐溶孔 开启程度 成岩致密带

**作者简介** 张绍平 男 39岁 工程师 石油及天然气地质

本文盐溶作用是指石盐的溶解作用。由盐溶作用形成的溶蚀孔隙称之为盐溶孔。由石盐溶解产生的盐溶孔在碳酸岩中普遍发育。然而如鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组盐溶型储集层分布之广属国内外罕见。现今发现的盐溶孔型储集层分布面积达3万余 $\text{km}^2$ ,实际分布面积可能比现今发现的面积还要大。

前人在本区曾做过大量工作,但迄今没有提出过这套储层孔隙成因与石盐的溶解作用有关的观点。储集孔隙中的原始组分已被溶蚀去,孔隙形态多种多样,给研究者们带来了识别上的困难。

有人曾用“石膏砂”、“石膏结核”等观点作过推测性解释,但没有找到令人信服的依据。大致有如下观点:①“石膏砂”说;②“结核”说;③“后期淋溶”说;④“鸟眼”说等。但这些解释都存在问题。

经过大量岩心观察、薄片鉴定、阴极发光、扫描电镜、电子探针分析等表明,鄂尔多斯盆地中部马家沟组气层中之孔洞与石盐的溶蚀有关。溶蚀孔洞的原始组分是石盐( $\text{NaCl}$ )。石盐是碳酸盐岩常见矿物之一,又极易溶解(溶解度为 $264\text{g}/20^\circ\text{C}\cdot\text{hour}$ ),并受不同地质因素影响。研究区如图1所示,面积约3万 $\text{km}^2$ 。

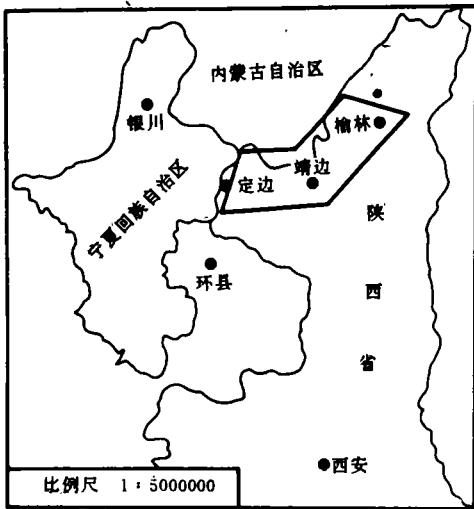


图1 研究区示意图

Fig. 1 Map of the study area

## 1 岩石学特征

马家沟组为一套碳酸盐岩建造, 顶部与石炭系底泥晶灰岩呈角度不整合接触, 厚度一般 400m 左右。马家沟组分为六个层段, 马<sub>六</sub>段已被剥蚀, 极少有保留, 马<sub>五</sub>段顶部亦残缺不全。马<sub>五</sub>段分为 10 个小层, 其中马<sub>五1</sub>~马<sub>五4</sub>是目前勘探的主要目的层。

盐溶孔发育在浅灰色粉晶白云岩中, 孔径 0.1~50mm。该白云岩之白云石晶粒细小, 一般 0.05~0.1mm。盐溶孔隙多见圆状或椭圆状, 其次为等边立方孔或不等边近立方孔。有时可见到“似鸟眼”孔或两个孔隙相连的“亚铃形”孔。当多个孔隙串通时, 形成“糖葫芦”状或“葫芦瓢”状。它平行层理分布, 水平延展, 在几千平方公里范围内层位稳定, 可以对比。镜下溶孔平均密度为 4.8~26.0 个/cm<sup>2</sup>, 含量一般为 5~30% 不等。该类孔隙富集于马<sub>五1</sub>和 马<sub>五4</sub>两个层段, 其它层段亦有见及。

孔隙形态与其成因关系如下:

1 任意切面的圆—椭圆状孔隙, 占比例最大, 含量最高, 约为总盐溶孔隙的 60~65%。具有蚕蚀状和港湾状溶蚀边缘, 是在盐模孔基础上溶蚀扩大或再溶蚀扩大的超大孔隙。

2 等边立方孔(任意切面)和保留有 1~3 个不完全的近等边立方孔。只占孔隙总量的 15%~20%。它们保留着孔隙的原始状态, 是孔隙演化的原始模型(图版 I. 3)。

3 “橄榄形”孔和似“鸟眼”孔。只占总斑状孔隙的 1~2%。该类孔隙多与缝隙将它切割后再溶蚀有关, 由于孔隙与裂缝连通的部位常常是流体的泄水处更容易发生, 因而它常呈“眼角”状或“漏斗”状。

4 “亚铃形”孔和“葫芦瓢”状孔隙。当两个或多个石盐晶体相临又经溶蚀串通时, 常形成这类孔隙。其特征是两孔隙接触并形成“8”形。这类孔隙在岩芯常见约为总孔隙的 5~8%。

表 1 盐溶孔内物质成分电子探针、阴极发光、同位素(PDB)分析表

Table 1 Analytical data of electronic probe, cathodoluminescence and isotopes (PDB) of the composition in salt-dissolved pores

井号	层位	分析内容	电子探针分析 (mol %)													CaO MgO	MnO FeO	Cl	PDB	
			Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	BaO	MgO	SrO	MnO	SO <sub>3</sub>	FeO	K <sub>2</sub> O	总量	δ <sup>13</sup> C				δ <sup>18</sup> O	
陕 3 井	马 <sub>五3</sub>	孔洞中充填方解石	5.11	28.32	2.90	6.71	0.00	6.96	21.91	1.43	15.36	1.05	0.26	89.99	4.07	1.36	昏暗 橙红色			
陕 4 井	马 <sub>五4</sub>	孔洞白云石	0.05	50.05	0.38	0.68	0.00	4.62	0.31	0.08	0.23	4.60	0.00	103.00	1.07	0.02	蓝—红 蓝—红			
陕参 1 井	马 <sub>五1</sub>	孔洞中白云石	0.01	46.72	0.25	0.72	0.00	5.42	0.12	0.22	0.07	0.40	0.04	99.57	0.91	0.55	红色	-1.232	-6.913	
陕参 1 井	马 <sub>五1</sub>	孔洞中白云石	2.50	25.28	7.61	8.07	0.00	4.99	0.00	0.22	0.66	0.82	0.88	89.03	0.59	0.27	红色	-0.624	-7.607	
陕 10 井	马 <sub>五3</sub>	孔洞中充填硬石膏	7.16	5.11	0.76	6.73	0.00	12.96	0.17	0.09	1.90	1.82	3.01	100.00	0.39	0.05	黄光			

5 溶蚀沟、溶蚀槽。长度 2cm~10cm。由“葫芦瓢”状孔隙或“亚铃”形孔隙进一步溶蚀, 即可发育厘米级溶蚀沟(槽)。它不同于成岩缝、构造隙的溶蚀作用。

孔隙形态的演化过程是由规则的立方孔向不规则的溶蚀孔、洞, 进而再向沟、槽发育的。它

不同于膏模孔。众所周知,石膏晶模发育的溶蚀孔常常呈长条状、长板状及雁尾状孔隙。

盐溶孔隙的发育经历了淡水溶蚀作用和进一步成岩改造,蚕蚀状、港湾状以及锯齿状边缘是引入淡水的通道,淡水是溶蚀矿物的“导体”。由于淡水作用使岩石发生选择性溶解,因而盐溶孔隙中有淡水矿物大量沉淀生长(图版 I.5,表1)是这一作用的必然结果。孔隙内物质成分可分为保留产物和次生充填物两类。根据井孔岩芯观察和电子探针、电镜扫描、阴极发光、薄等鉴定分析表明,所保留的原始物质为食盐(NaCl)(图3)。次生充填物质成分很复杂,最常见的有白云石(或异形白云石)和方解石,多为淡水成因,同位素(PDB)值  $\delta^{13}C$  为  $-0.624$ — $-1.232\%$ ,  $\delta^{18}O$  为  $-16.913$ — $-7.607\%$ 。此外,还有高岭石、硬石膏、萤石、硅质、天青石、黄铁矿以及一些暗色粘土质矿物等。

盐溶孔内的次生充填物在剖面上有一定规律性,即马<sub>五1</sub>—马<sub>五2</sub>,充填次生矿物以白云石和方解石为主;在马<sub>五3</sub>—马<sub>五4</sub>顶则以次生硬石膏为主。这主要是马<sub>五3</sub>—马<sub>五4</sub>有层状硬石膏岩存在所致。斑点状的硬石膏是由于硬石膏岩的溶蚀并通过水溶液再次沉淀在下层盐溶孔隙中的,它们堵塞了盐溶孔隙,并对盐溶孔起到了破坏作用。上覆硬石膏岩溶蚀后充填其下部地层中盐溶孔有以下证据:

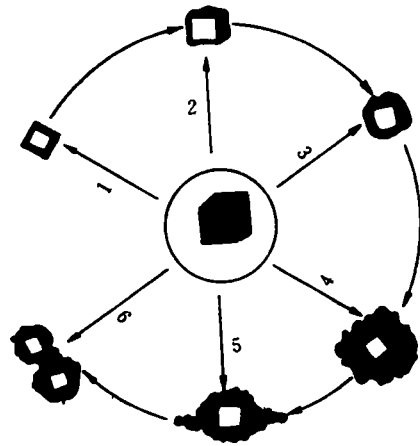


图2 盐溶孔隙发育模式图

- 1. 等边立方孔(食盐晶模孔) 2. 近等边立方孔(部分保留盐模孔) 3. 扩大了盐溶孔 4. 超大盐溶孔 5. 大肚状盐溶孔(与孔隙有关) 6. “亚铃形”或“葫芦瓢”状盐溶孔

Fig. 2 Evolution process of salt-dissolve pores

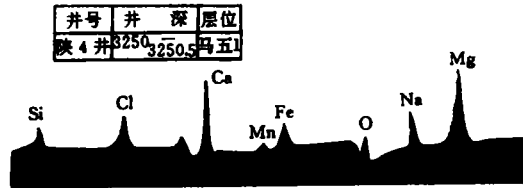


图3 干层岩芯盐模孔边缘电子探针波谱曲线图

Fig. 3 Electronic probe spectrum of the margin of salt-dissolve porers in drill hores of dry stratum

1. 含硬石膏斑的白云岩层均分布于层状硬石膏岩层之下,且层间接触。由于白云岩具有丰富的垂向裂隙和较多的成岩缝隙作为二者的通道,因此溶解物质很容易在下层孔洞中沉淀。如陕12井马<sub>五4</sub>,可以从岩芯上观察到这一现象。各井的统计数据也证明了这一普遍存在的规律(表2)。

表 2 斑点状硬石膏白云岩与层状硬石膏岩的层位关系

Table 2 Position of spotted dolomite and stratified anhydrite

井 号	斑点状硬石膏白云岩井段	层 位	层 位 关 系
陕 12 井	3697.87~3698.82m	马 <sub>五</sub> <sup>4</sup>	其上为硬石膏岩
林 2 井	3218.00~3220.00m	马 <sub>五</sub> <sup>3</sup>	其上为硬石膏岩
陕 10 井	3153.62~3154.00m	马 <sub>五</sub> <sup>3</sup>	其上为层状硬石膏岩
陕 3 井	3198.19~3205.31m	马 <sub>五</sub> <sup>4</sup>	其上为层状硬石膏岩
林 1 井	3482.11~3483.00m	马 <sub>五</sub> <sup>4</sup>	其上为层状硬石膏岩

2. 阴极发光下,厚层硬石膏岩多具不规则溶蚀状,发光为极深的蓝光~暗黄光,含有较高锶(Sr)元素。裂隙中充填的硬石膏和孔、洞中之硬石膏发光近似,为极昏暗的褐色光,这说明不同成因的硬石膏发光性有明显差异。

盐溶孔在硬石膏和其它次生矿物未沉淀前就已经形成了,即便是纵横交错的构造缝隙也没有切割硬石膏斑点。

## 2 盐溶作用与盐溶孔隙成因

笔者在本文中命名的盐溶孔隙仅仅指狭义的石盐(NaCl)的溶蚀作用形成的孔隙。盐溶孔的成因涉及到石盐的形成问题。F·J佩蒂庄(1982)指出:“盐类矿物主要是由于卤水的浓缩作用而形成的”。刘宝君(1981)指出:“所有的盐类沉积物都是由卤水蒸发作用形成的,卤水的最终来源是海水。海水的可溶固体按重量计为3.5%,其中五分之四是石盐。海水只要减少到原始体积的十分之一,NaCl就开始结晶析出。”可见石盐的形成是很容易的,原始沉积物处于海水浸泡阶段,海水的进一步浓缩就会产生石盐结晶。研究区有白云岩中之石盐的形成,在原始沉积物中就已经开始了。因为:1)石盐晶模孔顶、底有弯曲的泥质纹层将其包绕,且在两个盐模之间被切割,泥质纹层常为微米级;2)同层位发现有大量生物挠动构造、生物钻孔、藻纹层,叠层石等沉积组构;3)在角砾状粉晶云岩之角砾内发现有等边立方孔存在;4)没有发现斑点被成岩缝切割的现象。要寻找和获得被保留的残溶石盐晶体便可为盐溶作用这一理论提供直接证据。油基泥浆取芯更有利于石盐残晶的发现。通过取芯工艺的改进,在林5井岩芯观察和实验室分析中,均发现了未被完全溶蚀的石盐残晶。电镜扫描(SEM)、能谱(EDAX)定点分析及阴极发光均证实石盐残晶存在,它们呈不规则的立方体、呈溶蚀港湾和蚕蚀状,能谱分析结果表明主要成分是Na、Cl,尽管含有少量Si、C、O、Fe等,但它们是由于其它矿物干扰所致。综合分析认为,地层中至今仍然保留有未被完全溶蚀之石盐晶体,这一发现为盐溶作用与储层成因提供了有力的直接证据。

由盆地成岩演化历史特征认为,奥陶纪马家沟期大致经历了四个成岩演化阶段(表3)。潮坪相沉积环境,蒸发作用强烈,卤水浓缩速度快,有利于盐类矿物结晶。尽管这个地区在几万平方公里的石盐形成的机理目前还不十分清楚,但是,蒸发潮坪相能够形成巨厚的石盐这已被本区临近的米脂—子洲一带相同层位的膏盐岩所证实。那里的盐岩累计厚度可达178~200m。因此,这个地区的成盐条件是具备的。

表3 中部奥陶系马家沟组成岩序次

Table 3 Forming order of the Middle Ordovician Majiagou Formation

成岩作用	成岩序次	作用结果
沉积作用 (准同生期)	原始沉积物 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ ，海水浓缩， 石盐晶出，准同生云化	(灰泥)、 $\text{NaCl}$ 沉淀，形成石盐 和少量石膏
早表成岩作用 浅埋藏成岩作用期	石盐部分溶解，石膏脱水转化 压实与上覆沉积物加厚、压实加强	少量盐溶孔生成裂纹、压实影、揉皱、 泥质纹层弯曲，大量成岩缝隙形成
后表生成岩 作用期	地层抬升 风化、剥蚀、大气淡水渗~潜流 岩溶垮塌、溶滤溶液	形成构造缝，各种通道盐溶孔大量生成。 角砾岩、淡水充填物。
深埋藏成岩 作用期	石炭系沉积物形成，脱羟基 压溶、重结晶、三次云化 油气储集空间形成油气形成并进入储层	烃类转化 埋藏白云岩化、去云化、去膏化、萤石化等 油气藏形成

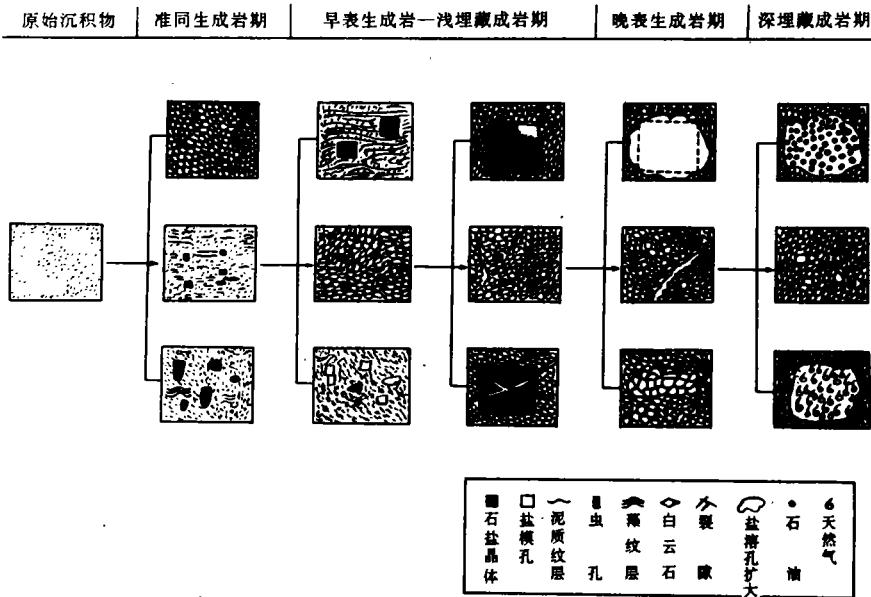


图4 盐溶孔成因解释图

Fig. 4 Explanatory modes of the formation of salt-dissolve pores

据发光分析,这套白云岩经历过三期白云岩化阶段:这三个云化阶段是准同生云化阶段;浅埋藏云化阶段;以及深埋藏云化阶段。准同生云化阶段是石盐晶体得以保存的阶段。早表生成岩期到浅埋藏成岩期是石盐在岩石中的固结和早期溶蚀阶段。最有利于盐溶环境是奥陶纪加里东构造运动使华北地台整体抬升并遭受达1.5~2亿年的风化剥蚀时期。此时大气淡水不仅使原始母质——石盐全部溶失,同时,在盐溶孔基础上对围岩进行溶蚀扩大,是孔隙发育的主要阶段。岩石出露地表,大气淡水浸蚀作用也极为强烈,渗流—潜流水浸溶本层的白云岩中之石盐,使下部层位发生盐水渗滤或盐分潮解,这一作用至今还在进行。最近钻井取心观察到,位于盐溶孔层下部的白云岩层,盐分潮解显著,具苦涩的咸味。表明了淡水作为向下渗滤的“导

体”把溶解了的盐分渗滤到下部层位, 只要白云石晶间有微小的缝隙或其它作用使岩石缝隙发育, 那么, 淡水就可以使含盐的白云岩层迅速溶解。淡水既容解石盐, 同时又把带来新生物质沉淀在孔隙充填盐溶孔。这种作用是多次性的或周期性的, 与古地理和古气候有关。

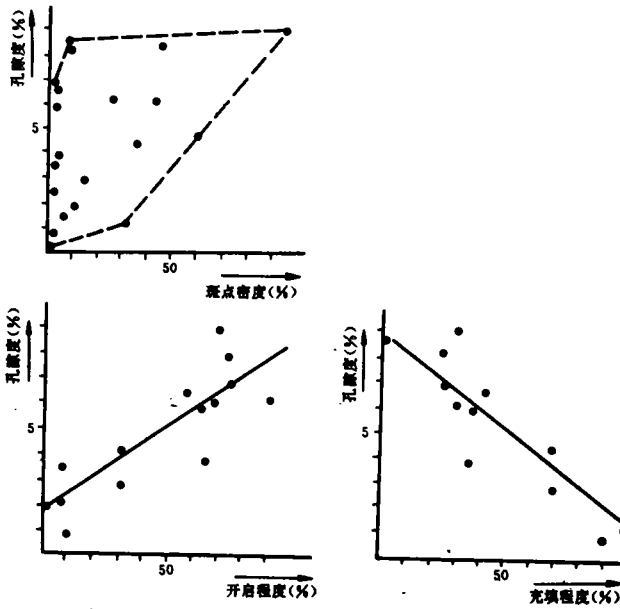


图 5 薄片斑点密度、盐溶孔开启(充填)程度与物性孔隙度关系

Fig. 5 Relations of dot density in slice and open (fill) degree of salt-dissolve pores with porosity

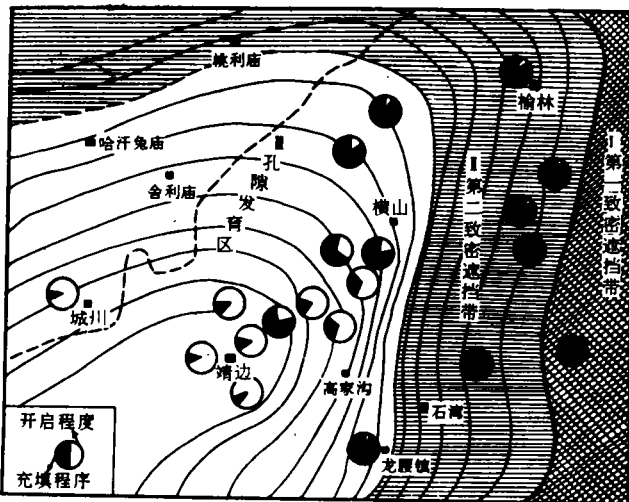


图 6 鄂尔多斯盆地中部成岩圈闭

Fig. 6 Diagenetic trap of the central Ordos Basin

正是由于原始母质——石盐奠定了溶蚀作用的物质基础,本区储层才能形成。也只有这种易溶组分被溶失,气藏形成和天然气富集才得以完善(图4、表3)。

### 3 盐溶孔充填程度与成岩遮挡带形成的探讨

鄂尔多斯盆地中部奥陶系马家沟组为一套潮坪相沉积,发育有潮坪、潮下坪及泻湖相等沉积。岩石厚度400m左右,其中马<sub>5</sub>段为200~250m。岩石中生物稀少,成层杂乱。马<sub>5</sub>段下部出现膏云岩,中、上部基本上为白云岩,间夹薄层角砾状白云岩、鲕粒白云岩、粒屑白云岩以及厚度10cm左右的凝灰岩。本部地层十分平缓,为一微向西倾斜的巨大单斜,平均倾角仅0.5°。单斜上构造发育不良,一些小型鼻状隆起的幅度很小,不能构成大的构造圈闭。

奥陶世亮甲山期末,盆地受怀远运动影响使亮甲山组地层遭受风化剥蚀,此时盆地呈西高东低的构造格局。早奥陶世马家沟期末加里东运动使华北整体抬升,本部也一起上升为陆。但盆地基本构造格局仍保持西高东低的格局。此时,大气淡水有向东活动的趋势,致使东北部盐溶孔充填量增大,西南部开启程度增高。只有在侏罗纪燕山运动期使盆地发生大的变动后,盆地东部区域性抬升,多数构造向北开口,使原来西高东低的构造格局发生了反向逆转,即东高西低。这一大的构造单元一直持续至今。尽管盆内构造活动频繁,曾有多次上升下降运动的历史,然而,在奥陶世时期始终没有构成大的构造型圈闭。

由古地貌、古构造特征认识到,由于东高西低的古地理特点,有利于油气向东北方向运移,富集区应位于东北方向的神木—榆林—米脂—子洲一带,然而,钻探结果则表明天然气富集区则位于盆地中部的西南方向。从盆地发展史和成岩作用研究可知,盐溶孔的差异性充填构成了东北方向向西南方向的遮挡条件。

奥陶纪末盆地西高东低,表生大气淡水对岩石的溶蚀产物可以向东北部运送并汇集,使神木—榆林—米脂一带的盐溶孔发生强烈地致密性充填。充填的趋势由西南向东北方向逐渐增大(图5、6)。在东北部神木—清涧一带,盐溶孔充填程度为100%。是构成成岩圈闭的第一遮挡带。向西南米脂—子洲一带充填程度为85~90%,构成第二致密遮挡带。之后向西南的天然气富集区,开启程度增大,可达45~70%。古水文资料认为,大气淡水对地层的浸蚀、溶解作用在碳酸盐岩地区十分强烈,大气淡水既能使岩石溶解,又能产生化学沉淀,使已成的孔隙空间遭受破坏。正是由于这一溶解—沉淀,再溶解—再沉淀作用构成了本区东北方向向西南方向的岩性遮挡。这一岩石本身的“亏空”和“补偿”作用正是鄂尔多斯盆地中部奥陶系顶天然气富集有利条件。

本文在编写过程中曾得到北京大学王英华教授、西安地质学院叶俭副教授、北京大学杨承运副教授、长庆油田主任地质师郭忠铭的指导,笔者在此深表谢意!

### 参 考 文 献

- 刘宝君,1980.7,沉积岩石学,北京:地质出版社,257—266页。  
F·J·佩蒂庄,1981,沉积岩,北京:石油出版社,497—514页。  
张绍平、顿铁军,1989,阴极发光显微镜在岩矿鉴定方面的应用,西安地质学院学报,11卷1期。  
王英华、张绍平、潘荣胜,1990,阴极发光技术在地质学中的应用,北京:地质出版社。  
H·布拉特等,1978,沉积岩成因,北京:科学出版社。  
罗宾·马瑟斯特,1977,碳酸盐岩沉积物及其成岩作用,北京:科学出版社。

# Salt-dissolution and the Pore Genesis of the Reservoir on Top of Ordovician in the Central Ordos Basin

Zhang Shaoping

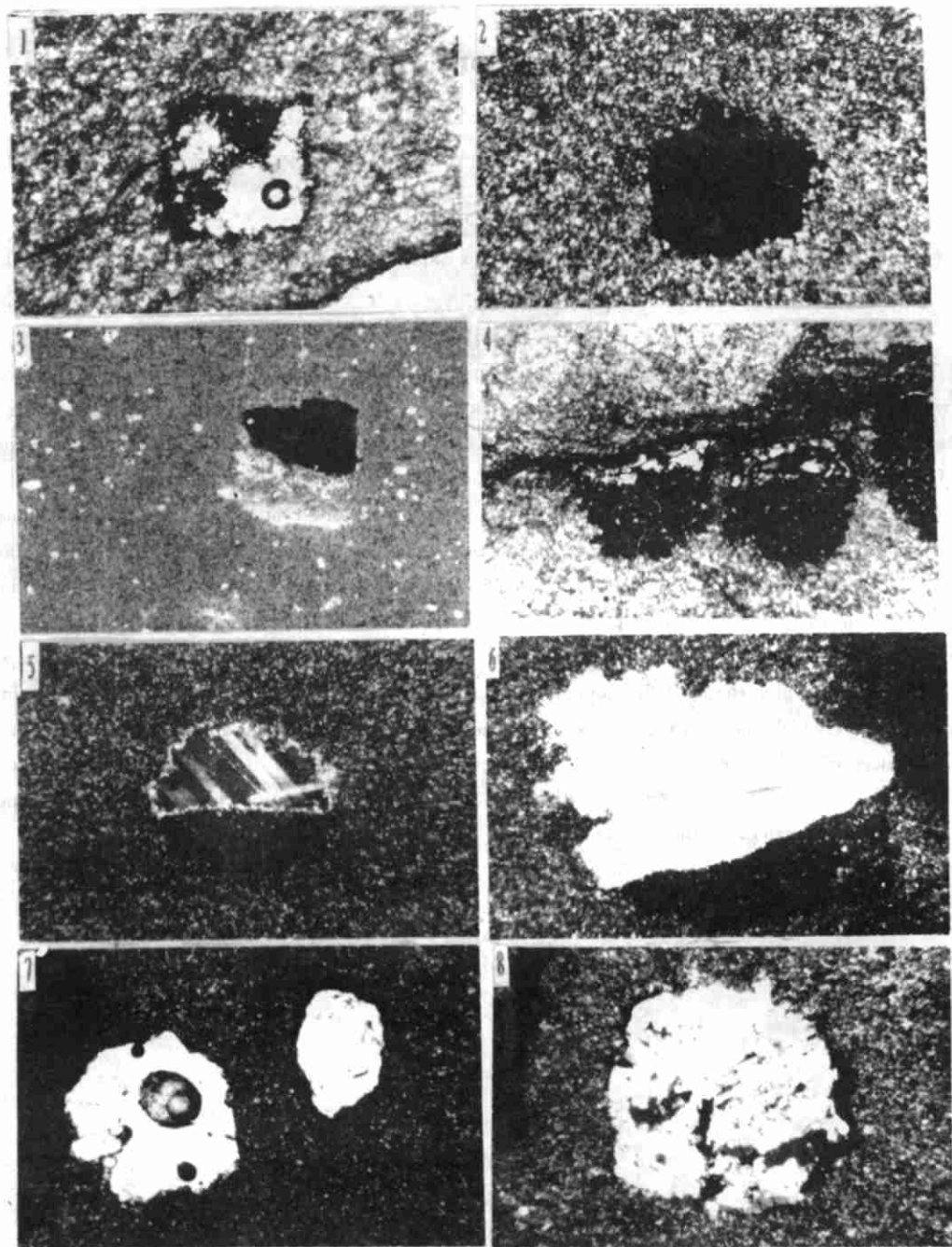
(Changqing Institute of Oil-field Exploration and Development)

## Abstract

The salt-dissolution refers to halite mineral dissolution in the carbonate reservoir rock of the Ordos basin, which is the main factor to form secondary pores (here called as salt-dissolved pore). Reservoir rocks containing salt-dissolved pore are widely distributed on top of Majiagou Formation of Ordovician in the central Ordos basin, and occupied an area of more than 30,000 km<sup>2</sup>.

On the bases of a large number of data obtained from core observation, thin section determination, cathodo luminescence, SEM, electron probe and so on, it can be seen that the gas-bearing bed of Majiagou Formation closely related to salt-dissolution. The gas output and rock's physical properties depend on the opening extent of the salt-dissolved pore. The salt-dissolution caused an increase of porosity in carbonate reservoir, and at the same time, the fluid deposition in the previous porosity through leading-phreatic water. In water stagnant region the tight lithologic barrier can be formed. Halite cry-stallization took place in sedimentary period, which was easily-dissolved substance in carbonate rock. And abundant salt-dissolved pores were produced in epidiagenesis. The regional difference of pore filling lead to the difference and anisotropise of pore space in carbonate reservoir rock. It was the "loss" and "compensation" of rock itself that formed the regional diagenetic trap or lithologic barrier.





1. 纹层状粉晶云岩中之石盐晶模孔, 白云石半充填。陕参1井, 3463.2m。+,  $\times 12.5$ 。 2. 粉晶云岩中之溶孔由淋滤扩大作用使盐模孔扩溶呈近圆状, 而保留不完全的平直边缘。陕参1井, 井深3455.05m。+,  $\times 12.5$ 。 3. 粉晶云岩中之盐模孔为立方体形态, 半充填, 陕4井, 2348.76m。+,  $\times 12.5$ 。 4. 角砾状粉晶云岩。角砾中之盐溶孔被扩溶充填, 亦可见其不完全的平直边缘。陕参1井, 3455.05m。+,  $\times 12.5$ 。 5. 泥-粉晶云岩。盐模扩溶后略具齿状, 充填淡水方解石、异形白云石, 林1井, 3435.73m。+,  $\times 12.5$ 。 6. 泥-粉晶云岩。云岩中之盐溶孔呈半充填, 保留了石盐晶模的部分特征。另一部分则进一步溶蚀、扩大, 呈锯齿状或港湾状。陕4井, 3250.46m。-,  $\times 12.5$ 。 7. 泥-粉晶云岩。岩溶孔中的自生石英。陕4井, 3250.46m。-,  $\times 12.5$ 。 8. 纹层状粉晶云岩。粉晶云岩中具石盐晶模的硬石膏斑点。黑色部分为暗色有机质薄膜。陕10井, 3153.62m。-,  $\times 12.5$ 。