

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

刘 永 先

(成都理工学院)

[内容提要] 陕甘宁盆地中部气田产于奥陶系顶部古风化壳碳酸盐岩储集体中,碳酸盐岩储集空间的形成是不同期次的溶蚀作用和充填作用相互作用的结果。根据盆地发展演化阶段不同,大致可以分出四期:第一期近地表早期成岩溶蚀作用与充填作用(O_1);第二期风化壳岩溶作用及充填作用(O_2-C_1);第三期浅埋藏期溶蚀作用与充填作用(C_2);第四期深埋藏期溶蚀作用与充填作用($P-Q$)。化学充填作用形成的自生矿物主要有方解石、白云石、粘土矿物、石英、石膏等。根据充填顺序、地球化学特征等的不同,判明了自生矿物生成顺序及期次。最后论述了不同期次溶蚀作用和充填作用对储集空间形成的建设与破坏作用。

关键词 奥陶系 碳酸盐岩 溶蚀作用 充填作用 储集空间

陕甘宁盆地中部气田产于奥陶系顶部古风化壳碳酸盐岩储集体中(图1)。碳酸盐岩储集空间的形成是不同期次的溶蚀作用和充填作用相互作用的结果。溶蚀作用使孔隙产生、发展、保存起了建设作用;充填作用使孔隙减小,消亡,起了破坏作用。建设性与破坏性作用互相制约,建设与改造相互匹配而形成有效储集空间。

1 溶蚀作用期次

陕甘宁盆地中部气田下奥陶统碳酸盐岩的储集空间除了裂缝以外,主要是与多期的溶蚀作用有关。根据盆地发展演化阶段不同,大致可以分出四期:第一期近地表早期成岩溶蚀作用(O_1);第二期风化壳期的岩溶作用(O_2-C_1);第三期浅埋藏期溶蚀作用(C_2);第四期深埋藏期溶蚀作用($P-Q$)。

1.1 第一期近地表早期成岩溶蚀作用

早奥陶纪沉积物露出地表受大气水的淋滤或在大气水-海水混合带白云石化的微晶、粉晶白云岩中晶间灰泥及针状石膏被大气淡水溶蚀而形成晶间溶孔及膏模孔。它以选择性组构溶蚀为特征。由于大气水在微晶、粉晶白云岩中的循环是有限的,很易饱和,所以这期溶蚀作用是有限的。

1.2 第二期风化壳岩溶作用

早奥陶世沉积后,受加里东运动影响抬升,奥陶系碳酸盐岩遭受了风化溶蚀,在富含 CO_2 及 SO_4^{2-} 的岩溶水沿白云岩微裂缝、晶间溶孔等渗透溶蚀。溶蚀过程中有两种水流:一

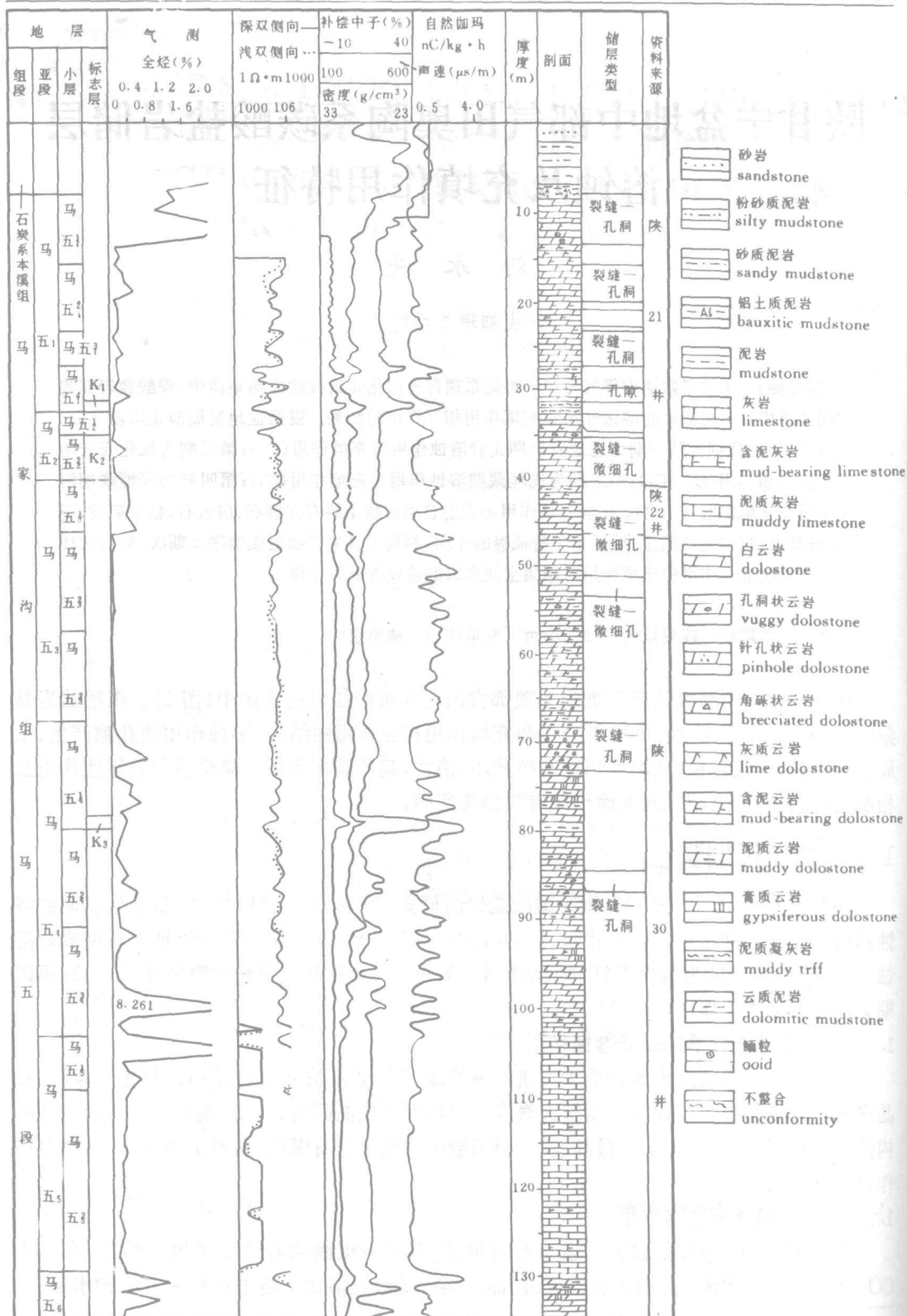


图1 鄂尔多斯盆地中部气田奥陶系风化壳气层综合柱状剖面图

Fig. 1 Generalized columnar section of the gas beds in the Ordovician weathered crust within the gas fields in the central part of the Ordos Basin

种是管状流,形成地下暗河,主要形成大的溶洞或洞穴;另一种是渗滤扩散片流,主要是沿微裂缝,特别是水平微裂缝,对成岩硬石膏结核、鸟眼构造、去云化斑点、成岩黄铁矿结核等进行选择性溶蚀,形成溶洞、溶缝,如马五₁① 储集层。岩溶作用受到古地形、沉积相带、岩性、白云岩组构、沉积构造、裂缝及地下水动力分带等因素的控制。由于岩溶水不断被排泄流失和大气水补给,岩溶水的循环是无限的,所以风化壳期岩溶水的溶蚀作用可以不断的进行。陕甘宁盆地中部气田碳酸盐岩储集空间的形成主要与风化壳期岩溶作用有关。

1.3 第三期浅埋藏溶蚀作用

发生在晚石炭世含煤沼泽盆地的酸性底层水向下渗流溶蚀,形成溶缝、溶洞。这种溶蚀作用以纵向为主。

1.4 第四期深埋藏溶蚀作用

埋深度大于 3—4km 以下的地下热水或与有机质成熟脱羧基作用形成的有机酸水对碳酸盐岩的溶蚀。在深埋藏环境中,由于压力大、温度高、 P_{CO_2} 大,白云石的溶解度比方解石要大,特别在白云岩中比灰岩更有利于形成次生孔隙。马五₃ 埋藏白云岩中晶间溶孔的形成与深埋藏期溶蚀作用有关。

2 充填作用及充填自生矿物特征

不同期次的溶蚀作用同时伴生了不同期次的充填作用,包括机械沉积及化学沉积。除了风化壳期机械碎屑、铝土质、泥质物充填外,还有不同时期的化学沉积,形成不同的自生矿物,有方解石、微晶—粉晶白云石、马鞍状白云岩、高岭石、高岭石/地开石混层、伊利石、石英、萤石、黄铁矿和石膏等。根据充填顺序、相互关系及地球化学、包裹体成分等特征的不同,自生矿物生成顺序及期次划分如表 1。

2.1 方解石

为白色、乳白色、淡黄色、干净、粗晶、巨晶方解石,主要充填于膏模孔、去云化斑点、孔洞壁及裂缝中。根据方解石地球化学特征不同,明显分出两种不同的方解石(表 2、3、4、5,图 2):第一类方解石 $\delta^{13}C(PDB)$ 、 $\delta^{18}O$ 的负值小,特别 $\delta^{13}C(PDB)$ 在零附近变化, $\delta^{18}O$ 以负值为特征,Mn 含量高,反映为淡水还原环境中形成的淡水方解石,为近地表成岩早期及古风化壳期,与大气淡水混入有关形成的方解石(早期方解石);第二类方解石, $\delta^{13}C(PDB)$ 、

表 1 溶蚀作用阶段及孔隙中充填物

Table 1 Dissolution stages and interstitial material

溶蚀作用阶段	孔隙中充填物
I 近地表早期成岩溶蚀作用 (O ₁)	第一期方解石及针状膏模孔中充填方解石 早期硬石膏结核及石膏充填的鸟眼构造 成岩早期微粒黄铁矿 第一期微晶半自形白云石
II 古岩溶期岩溶作用 (O ₂ —C ₁)	机械碎屑充填物 第二期方解石(充填裂缝及溶洞中) 第二期粉晶自形白云石
III 浅埋藏期溶蚀作用 (C ₂)	高岭石 第一期微晶石英 晚期黄铁矿
IV 深埋藏期溶蚀作用 (P—Q)	高岭石/地开石混层 第二期石英 第三期白云石及马鞍状白云石 第三期块状石英 第三期方解石 晚期石膏

① 马五₁、马五₂…马五₅ 分别代表奥陶系马家沟组亚段(全文同)。

$\delta^{18}\text{O}$ 明显偏负,说明碳具有混合来源,即来自土壤大气水中 CO_2 及烃类中 C 的混合,氧来源于高温贫 ^{18}O 的深部热卤水,属于深埋藏形成的方解石(晚期方解石)。

早期方解石主要充填马五₁₋₅层中膏模孔及裂缝、溶洞中;晚期方解石主要充填在马五₆、马五₄层位裂缝及溶洞中。

表 2 早期方解石地球化学特征
Table 2 Geochemical characteristics of the early calcite

样品号	层位	Fe($\times 10^{-6}$)	Sr($\times 10^{-6}$)	Mn($\times 10^{-6}$)	$\delta^{13}\text{C(PDB)}\%$	$\delta^{18}\text{O(PDB)}\%$
陕 6—1	马五 ₂	0	282	316	-1.72	-13.15
陕 6—3(1)	马五 ₃	6.6	331	118	-1.55	-13.29
陕 37—1	马五 ₃	0	186	195	-2.09	-9.93
陕 6—4	马五 ₄	0	342	164	-0.33	4.31
陕 6—5	马五 ₄	5.9	277	97.7	-1.59	-13.08
陕 2—22	马五 ₄	0	139	108	-2.04	-7.45
	平均		259.5	166.45	-1.55	-0.76

表 3 晚期方解石地球化学特征
Table 3 Geochemical characteristics of the late calcite

样品号	层位	Fe($\times 10^{-6}$)	Sr($\times 10^{-6}$)	Mn($\times 10^{-6}$)	$\delta^{13}\text{C(PDB)}\%$	$\delta^{18}\text{O(PDB)}\%$
陕 2—16(1)	马五 ₃	0	800	53.1	-5.49	-14.93
陕 2—16(2)	马五 ₃	0	1101	89.3	-6.09	-14.08
陕 2—24	马五 ₄	0	466	128	-7.50	-15.11
陕 6—2	马五 ₄	0	754	316	-7.27	-16.69
陕 37—10	马五 ₄	0	334	224	-4.16	-12.05
	平均	0	691	162.18	-6.1	-14.74

表 4 晚期方解石包裹体成分
Table 4 Inclusion compositions of the late calcite

样品号	主矿物	气相(mol%)			液相(mol%)			
		CO ₂	H ₂ S	CH ₄	CO ₂	H ₂ S	CH ₄	SO ₂
陕 6—2	晚期方解石 (充填裂缝中)	50.9	31.5	17.6	91	9		
陕 2—16	晚期方解石 (充填裂缝)				53	26	21	

(据拉曼光谱分析,西安地质矿产研究所,1992)

表 5 陕 6-2 晚期方解石包裹体测温资料

Table 5 Inclusion thermonetric data for the late calcite from the Shaan 6-2 well

序号	大小(μ)	气液比	类 型	均一温度	含盐度(NaCl%)	溶液密度(g/cm)
1	60	5	PL—v	97	6.9	1.01
2	35	5	PL—v	103	6.5	1.00
3	12	5	PL—v	91	7.3	1.02
4	10	3	PL—v	91	6.4	1.01
5	30	5	PL—v	132	6.2	0.98
6	20	5	PL—v	115	6.5	1.00
7	15	3	PL—v	91	6.3	1.01
8	17	3	PL—v	86	5.3	1.01
9	10	5	PL—v	150	53	1.01

2.2 白云石

充填于溶洞及溶缝或裂缝中,除了渗流的碎屑状白云石以外,化学沉淀的白云石至少有三期。

第一期微晶白云石,自形、半自形、菱面体,充填网状成岩收缩裂缝中,或充填于溶洞最底部,常与石膏溶解后残留有机碳伴生,有微纹层,有机碳含量可达 0.314—0.626%。由于分别取样困难,未能获得微晶白云石地球化学特征数据。

第二期粉晶自形菱面体白云石,干净明亮,充填于溶洞的下半部,位于第一期微晶白云石之上。其地球化学特征见表 6。本期粉晶白云石形成于还原环境,沉淀的溶液中有大气淡水的混入,溶液中碳、氧轻的组分增加,而使 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 偏负。

第三期细一中晶云雾状的马鞍状白云石,充填溶洞的上半部及溶缝或裂缝中,有的沉淀在第二期石英晶面上。马鞍状白云石是白云石具有歪曲晶格的异种,其变形为晶面和解理的弯曲现象,以及正交偏光下波状消光为明显的特征。因含有大量的微包裹体而呈雾状。马鞍状白云石为富钙白云石,含 CaCO_3 为 52.2—53.50mol%,有序度低,为 0.64,其地球化学特征见表 6。上述特征反映马鞍状白云石沉淀溶液中有盆地卤水溶液或碳酸盐热液的混入。马

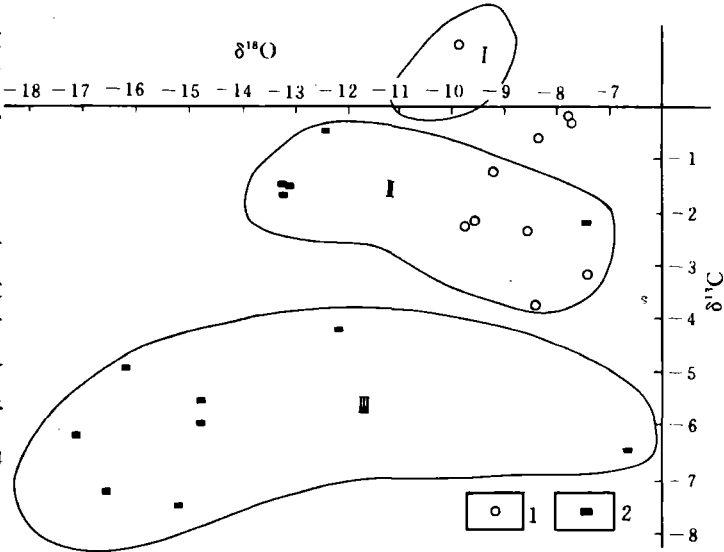


图 2 充填物白云石、方解石 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 分布图
I. 马鞍状白云石; II. 早期方解石及白云石;
III. 晚期方解石; 1. 白云石; 2. 方解石
Fig. 2 Distribution of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ for dolomite and calcite
I =saddle dolomite; II =early calcite and dolomite; III =late calcite;
1=dolomite; 2=calcite

表 6 第二期、第三期白云石地球化学特征

Table 6 Geochemical characteristics of the second- and third-stage dolomite

样品号	层 位	Fe($\times 10^{-6}$)	Sr($\times 10^{-6}$)	$\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})\text{‰}$	
第二期白云石						
陕 2—2	马五 ₁	127	694	147	-3.78	-8.38
陕 2—14	马五 ₂	—	210	92.7	-3.01	-7.73
陕 5—1	马五 ₁	110	496	146		
陕 5—6	马五 ₁	20.5	213	105	-1.22	-9.16
陕 5—8	马五 ₁	—	530	99.3	-0.56	-8.46
陕 2—23	马五 ₄	76	77.4	96.2	-0.23	-7.74
陕 6—3(2)	马五 ₃	116	154	189	-0.24	-7.94
陕 13—7	马五 ₃	232	292	162	-2.37	-9.97
陕 13—9	马五 ₃	—	151	134	-2.09	-9.63
陕 37	马五 ₃	160	145	117	-2.43	-8.52
	平 均	120.5	234.2	144.6	-1.77	-9.0
马鞍状白云石						
陕 37—1	马五 ₁	1700	1264	158	1.309	-9.93

鞍状白云石经常与油气、后生金属矿化作用以及富硫酸盐相伴生,这些组合意味着马鞍状白云石形成与埋藏硫酸盐还原作用有关。马鞍状白云石分布在储集层的油气水带附近,形成的温度 60—150℃。

2.3 石英

主要为微晶石英及块状石英,均为柱状晶体的石英充填于溶洞及溶缝或裂缝中。根据石英晶形标型特征及矿物沉淀、溶蚀的相互关系,反映石英的生成有先后次序之分。第一期石英,晶形简单,由单形六方柱 $[10\bar{1}0]$ 及菱面体 $[10\bar{1}1]$ 组成,充填溶洞壁边或第二期白云石晶洞中,或与高岭石共生;第二期石英以六方柱 $[10\bar{1}0]$ 和两个菱面体 $[10\bar{1}1]$ 及 $z[10\bar{1}1]$ 组成,石英的表面被溶蚀,有高岭石或白云石附生在石英溶蚀面上,或者以自形晶完好、柱状发育,以六方柱 $[10\bar{1}0]$ 、两个菱面体 $[10\bar{1}1]$ 、 $z[01\bar{1}1]$ 和三方双锥 $S\{11\bar{2}1\}$ 组成聚形,晶面无溶蚀现象,主要充填于裂缝中(如陕 37 井);第三期石英为无色块状石英,充填于马鞍状白云石之后,或与晚期方解石充填共生,充填于构造裂缝中,块状石英中包裹体形态多样,大小从 $<3\mu\text{m}$ 到 $35\mu\text{m}$,主要为二相的水溶液包裹体(气液比在 5%±),其次为气体包裹体和有机质包裹体,平均均一温度 124℃,最高可达 301℃。以上石英晶体形态标形特点,反映着随着成矿溶液的温度增高,石英晶体形态从简单柱状晶体到复杂锥面柱状体。

2.4 黄铁矿

微粒状黄铁矿主要沿裂缝分布,其次充填于溶洞中。黄铁矿晶体大小、形态与矿物结晶条件和物理化学条件变化有关。早期黄铁矿主要为立方体 $\{100\}$ 与八面体 $\{111\}$ 聚形,与煤系地层中黄铁矿标型特征相同,分布于第二期白云石晶间;晚期黄铁矿以立方体 $\{100\}$ 和五角十二面体 $\{210\}$ 聚形为主,主要沿裂缝分布。早、晚期黄铁矿晶面不出现条纹,反映成核速度低,成矿环境稳定。硫同位素变化小, $\delta^{34}\text{S}$ 以正低值为特征,即 $\delta^{34}\text{S}(\text{CDT})$ 为 9.01—

10.87%, 反映硫来自有机硫, 与封闭体系中孔隙水硫酸盐的细菌还原作用或含硫有机物的沉积作用有关。

2.5 硬石膏

马五白云岩中除了准同生沉积形成的云石膏或膏云岩以外, 还有硬石膏呈针状、长柱状、结核状及脉状充填。按颜色可分为白色硬石膏及黑色硬石膏。黑色硬石膏主要含有机碳造成的, 含量达 0.115—0.131%。

现代蒸发岩与形成这些蒸发岩的海湾水硫酸盐, 几乎具有相同 $\delta^{34}\text{S}$ 。因此, 可以认为海相蒸发 $\delta^{34}\text{S}$ 代表了海水硫酸盐的硫同位素组成。准同生期纹层状膏云岩中石膏的 $\delta^{34}\text{S}$ 为 32.2—33.3‰, 与奥陶纪海洋硫酸盐的 $\delta^{34}\text{S}$ (CDT) 为 32—35‰ 相近。从成岩早期到成岩晚期白色硬石膏 $\delta^{34}\text{S}$ 从 31.2 变化到 23.75‰, $\delta^{34}\text{S}$ 值变小, 但同位素分馏不明显, 仍以重硫同位素为特征。而深埋藏黑色硬石膏, 以富 $\delta^{34}\text{S}$ 为特征, 说明烃类和亲硫细菌参与反应, 明显的产生同位素分馏, 以轻硫同位素为特征形成与有机质成熟阶段有机质分解的硫化氢氧化硫酸盐与钙离子反应有关。在深埋藏条件下石膏的溶解度是减小的, 石膏的沉淀消耗了溶液中硫酸盐, 因此, 深埋藏硬石膏存在不利于白云岩中储集空间的形成。

2.6 粘土矿物

储集空间中充填的粘土矿物主要为高岭石、高岭石/地开石混层、地开石及伊利石。伊利石为近地表成岩早期或风化期机械沉积和化学沉积的伊利石或蒙脱石转变而来。高岭石的形成与浅埋藏晚期石炭世煤系地层沉积时底部含 Al_2O_3 的酸性底层水向下淋滤有关, 主要沉淀在溶缝、溶洞和被第二期白云石充填后的剩余空隙内, 一般都位于溶洞的上部。在深埋藏期随着埋深增大, 温度增高(大约 110—160℃), 高岭石转变为高岭石/地开石混层及地开石。在扫描电镜照片中地开石呈六角厚板状或六角柱状。在碳酸盐岩酸不溶物的 X-衍射图上 3.79 Å (±)、3.95 Å 衍射线是地开石存在依据。在衍射图上 7.16 Å (001)、3.58 Å (002) 等 00L 型的衍射线特强而 hkl 的衍射线弱(因 00L 类型的衍射线是高岭石和地开石共有的衍射线, 相叠加结果衍射线特强)。个别出现有 3.79 Å、2.34 Å 单斜二层结构地开石(2M 型)和 4.12 Å、2.57 Å 三斜一层结构的高岭石(IMC 型)的衍射线。说明该区高岭石族矿物中以高岭石/地开石混层存在为主。根据陕 2 井、陕 17 井、陕 8 井碳酸盐岩酸不溶物 X-衍射分析及孔隙充填物电镜扫描分析, 高岭石、高岭石/地开石混层、地开石主要分布于马五₁ 层位中, 陕 2 井可延深到马五₃ 层位中(图 3), 距加里东期古侵蚀面深 30—40m, 在更深地层中就消失, 所以高岭石、地开石纵向分布深度, 就可代表古风化作用下限和古风化现存厚度的标志。

2.7 萤石

充填于溶洞中的白云石晶间及裂缝中, 与晚期方解石伴生。萤石中含有水溶液和有机包裹体。

3 溶蚀作用与充填作用对储集空间的影响

马家沟组五段白云岩储集层中除了微裂缝、溶蚀垮塌角砾岩等形成储集空间外, 主要是与以微裂缝勾通的几个毫米大小孔洞(溶洞)为主。其孔洞特点为: 孔洞的形状以圆形及扁椭圆形为主, 少量不规则状, 多数孔洞与微裂缝勾通; 孔洞的长轴直径以几个毫米为主, 平均 1.31—4.96mm, 孔洞大小垂向分布上有上小下大的特点, 孔洞密集成层分布, 同一小层内孔洞的大小分布显示有右偏正态分布特点, 个别为多峰态出现。根据孔洞的扁平率(长轴: 短

轴)统计,上部孔洞扁平率小于1,占3.4%,近1的占48.8%,而大于1占47.3%,即近一半的孔洞为圆形,另一半为平行层面呈扁椭圆形。但下部孔洞扁平率小于1占11.3%,近于1占36%,而大于1占53.8%,即上部孔洞近于圆形,下部孔洞以平行层面呈扁椭圆为主,并上小下大。说明,孔洞的形成是在地壳缓慢抬升、岩水淋滤溶蚀过程中形成,且受沉积构造和沉积构造的控制,原来为硬石膏结核、鸟眼构造、去云化斑点、成岩黄铁矿等在风化壳期受富含 CO_2 的大气水淋滤溶蚀形成溶洞。

风化壳期岩溶作用形成的溶洞在形成的过程中及盆地埋藏过程中,溶洞被充填、减小,甚至填死。据4口井(陕2井、陕37、陕13、陕17井)马五₁溶洞层充填程度不完全统计,未充填溶洞(孔)占

12—13%,平均20%;半充填溶洞占11—60%,平均28%;其中被充填1/3的溶孔占5—19%,平均12%,被充填2/3的溶孔占12—19%,平均15%,被全充填占4—71%,平均24%。主要充填的期次可分出3期:第一期风化壳期,伴随着岩溶溶蚀作用同时产生充填,首先硬石膏溶解后残留有机碳及微晶白云石、碎屑状白云石及粘土矿物充填于溶洞底部,然后被淡水白云石、方解石及铁白云石充填;第二期充填发生在浅埋藏期,以高岭石为主,其次为黄铁矿、微晶石英;第三期充填发生于深埋藏,主要为马鞍状白云石、晚期方解石、第二、三期石英。因此,溶洞被充填主要发生风化壳期及浅埋藏期,这二期充填物使次生孔隙减少一半,有的甚至达到2/3,或全充填,对马家沟组白云岩储集空间起了主要破坏作用。但深埋藏期高岭石向地开石转化对孔隙也起了建设作用,据Bish and Vov Dreele(1988)和Joslvg and drits(1986)精确确定了高岭石和地开石分子体积,分别为 $99.35\text{cm}^3/\text{mol}$ 和 $98.58\text{cm}^3/\text{mol}$,地开石比高岭石小 $0.77\text{cm}^3/\text{mol}$ 。因而高岭石向地开石转化过程是一个总体积的缩小过程,1mol的高岭石转化成地开石,绝对体积缩小 $0.77\text{cm}^3/\text{mol}$,转化后将有多余空间出现,形成地开石晶间孔隙。

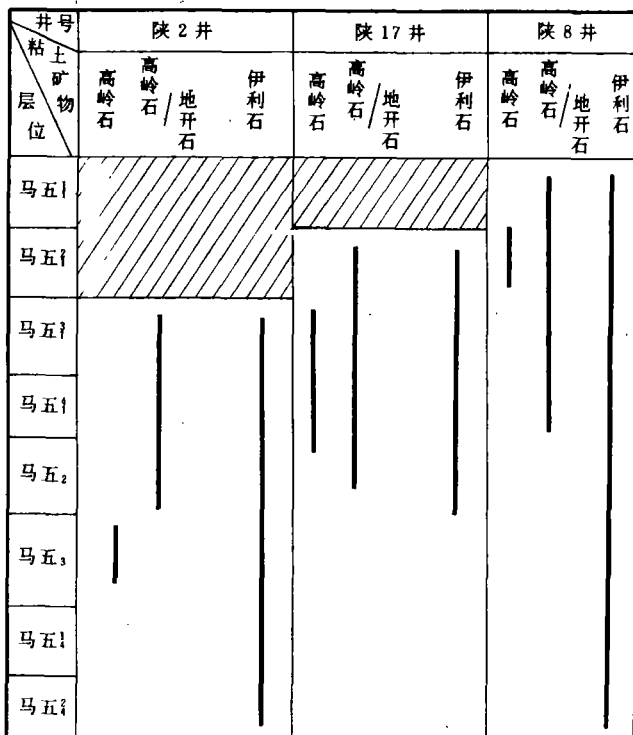


图3 粘土矿物纵向分布图

Fig. 3 Longitudinal distribution of the clay minerals

主要参考文献

- 张锦泉等,1992,鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组古岩溶天然气储层,成都地质学院学报,№4
张锦泉等,1993,鄂尔多斯盆地奥陶系沉积、古岩溶及储集特征,成都科技大学出版社

黄思静等, 1994, 陕甘宁盆地奥陶系储层中的地开石及其意义, 天然气工业, Vol14, No6.

James, N. P. and Choquette, P. W., 1988. Paleokarst, Springer-Verlag.

Tucker, M. E., 1990. Carbonate Diagenesis, Blackwell Scientific Publication.

DISSOLUTION AND INFILLING OF THE ORDOVICIAN CARBONATE ROCK RESERVOIRS IN THE GAS FIELDS IN THE CENTRAL PART OF THE SHAANXI-GANSU-NINGXIA BASIN

Liu Yongxian

Chengdu Institute of Technology

ABSTRACT

The gas fields in the central part of the Shaanxi-Gansu-Ningxia Basin occur in the carbonate rock reservoirs in the weathered crust on the top of the Ordovician strata. The storage spaces of the carbonate rocks resulted from the interaction of multistage dissolution and infilling, which may be divided into four stages on the basis of the development and evolution. (1) The near-surface early diagenetic dissolution and infilling (O_1); (2) the dissolution and infilling of the weathered crust (O_2-C_1); (3) the shallow burial dissolution and infilling (C_2), and (4) deep burial dissolution and infilling ($P-Q$). The formation orders and stages of the chemically precipitated authigenic minerals such as calcite, dolomite, clay minerals, quartz and gypsum have been distinguished in terms of the study of their infilling orders and geochemical properties. Finally, the present paper has dealt with the constructive and destructive effects of dissolution and infilling in different stages on the formation of the storage spaces.

Key words: Ordovician, carbonate rock, dissolution, infilling, storage space