

文章编号: 1006-6616 (2014) 03-0230-13

陕北斜坡上古生界山₂—盒₈段 沉积—成岩与储层孔隙特征

王奕萱¹, 张晓东², 孙 勇¹, 安星宇³

(1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 中国河南国际合作集团有限公司, 郑州 450004;

3. 中国冶金地质总局山东局蒙古正元有限责任公司, 济南 250100)

摘 要: 鄂尔多斯盆地陕北斜坡上古生界山₂段—盒₈段发育典型的低渗致密岩性气藏, 储层物性控制着区内气藏的富集, 在致密储层中孔隙发育特征与储层沉积环境及后期成岩作用密切相关。通过沉积物粒度分析、储层孔隙特征扫描电镜观察, 探讨了研究区储层在压实成岩作用后期孔隙的破坏作用, 建立了黏土矿物转化序列。研究结果显示, 研究区山₂—盒₈段砂岩储层在压实成岩作用后对储层孔隙的破坏作用主要包括黏土矿物转化及胶结作用; 黏土矿物转化模式为“蒙脱石—伊蒙混层—伊利石”型, 后期伴有高岭石和绿泥石的伊利石化; 发育于碎屑颗粒表面的绿泥石黏土膜在降低储层原生孔隙的同时, 抑制了后期发生的硅质胶结作用, 为残余粒间孔的保存和次生溶孔的形成提供了物质基础, 绿泥石套膜的发育成为气藏勘探评价中储层优选的关键参数之一。

关键词: 陕北斜坡; 山西组; 石盒子组; 成岩作用; 孔隙特征

中图分类号: P618.130.2

文献标识码: A

鄂尔多斯盆地是中国第二大沉积盆地, 发育多套油气藏组合; 盆地内部陕北斜坡构造不发育, 但受沉积作用和后期成岩作用的影响, 发育典型的低渗致密岩性油气藏^[1~5], 其中上古生界山西组与石盒子组砂体是盆地内良好的气藏储集层, 山西组山₂段—石盒子组盒₈段储层具有低孔隙度、低渗透率、孔隙结构差、孔隙类型复杂且细小、成岩强度大、黏土矿物多以及产状复杂等特点。自20世纪80年代中后期发现上古生界山西组、石盒子组气藏是由河道砂体横向演变和储层非均质性所控制的岩性气藏以来, 储层孔隙发育特征、非均质性及优质储层勘探一直是气田勘探开发研究的重点^[6]。随着勘探程度的推进, 有利沉积相带内的优质储层勘探更被广为关注。前人从沉积相、岩相等沉积学角度对有利储层的发育做了大量研究工作^[7~11], 但对其综合性的研究还不够深入。鉴于此, 本文从沉积—成岩作用的角度, 通过分析储层的沉积物粒度及其成岩地球化学特征, 建立了研究区储层砂岩中黏土矿物转化序列, 讨论了压实成岩作用后各种成岩作用对储层孔隙的破坏及保护。

收稿日期: 2014-04-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (编号: 90814007)

作者简介: 王奕萱 (1991-), 女, 大学本科, 构造地质学专业。E-mail: dao1ruai2mi@126.com

1 区域地质背景

1.1 构造演化与沉积特征

鄂尔多斯盆地是发育在华北克拉通之上的古生代地台及台缘拗陷与中生代台内拗陷叠合的大型克拉通盆地，与兴蒙海槽和秦祁海槽的构造活动密切相关^[12]。受区域构造背景影响，盆地充填经历了早古生代陆表海、晚古生代滨海平原、中生代内陆湖盆和新生代周边断陷4个发育阶段^[12-15]。盆地可划分为西缘逆冲带、天环拗陷、伊陕斜坡、晋西挠褶带、渭北隆起、伊盟隆起6个二级构造单元，其中天环拗陷和伊陕斜坡是盆地内主要大型油气藏形成的构造单元，研究区位于伊陕斜坡中东部（见图1）。

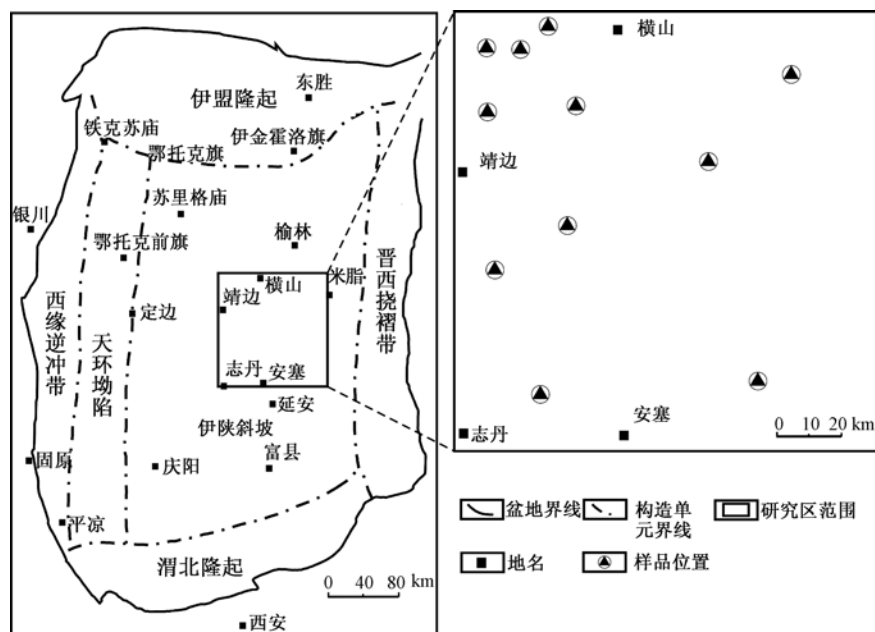


图1 鄂尔多斯盆地构造及研究区范围^[9]

Fig. 1 Tectonic map of Ordos Basin and the studied area

研究区内构造简单，地层总体呈向西倾斜的平缓单斜，倾角不足 1° ，不发育大型褶皱及断裂等构造，局部发育小型鼻状隆起^[16]。自晚古生代以来，古气候经历了晚石炭世温暖潮湿、早二叠世温热潮湿到晚二叠世干热气候的演化过程^[15]。区域古地理格局由石炭纪陆表海碳酸盐台地—碎屑堡岛—浅水三角洲复合体系沉积演变为二叠纪三角洲—河流体系沉积^[6]，二叠系沉积形成后，盆地持续沉降接受沉积，山西组最大埋深可达4800 m，成岩作用达到晚成岩作用B期。山西组自下而上可分为 山_2 及 山_1 两个段，石盒子组自下而上可分为 盒_8 — 盒_1 段，本次研究重点目的层为山西组 山_2 段、 山_1 段及石盒子组 盒_8 段。

1.2 岩石学特征

研究区山西组—石盒子组储层主要为三角洲平原河道—三角洲前缘水下分流河道砂岩。镜下统计结果（见表1）表明，岩石碎屑成分主要为石英及岩屑，含少量长石。山西组 山_1 段及 山_2 段岩性总体相近，主要为灰色、灰白色中粗粒砂岩、细砂岩及少量含砾砂岩，岩屑成分主要为石英岩、千枚岩、片岩、黏土岩等；填隙物主要为云母、绿泥石、伊利石等黏土

矿物, 偶见石英颗粒充填, 其中山₁段含少量高岭石充填物; 碎屑颗粒呈磨圆—次磨圆状, 粒度一般在 0.1~0.5 mm 之间, 偶见粒度大于 2.0 mm 的岩屑砾石, 总体定名为灰黑色—灰白色中细粒含砾岩屑石英砂岩 (见图 2)。石盒子组盒₈段岩性主要为灰色、灰绿色、灰白色中粗粒砂岩、含砾粗砂岩及砾岩, 碎屑颗粒粒度自下而上逐渐变小, 岩屑成分主要为火山碎屑岩、石英岩、片岩、千枚岩、板岩、变质砂岩、云母和钙化碎屑等; 填隙物主要为云母、伊利石、高岭石等黏土矿物及泥质胶结, 偶见石英颗粒充填; 岩屑及矿物颗粒呈磨圆—次磨圆状, 粒度一般在 0.2~1.3 mm 之间, 偶见粒度大于 2.0 mm 的岩屑砾石, 总体定名为灰白色中粗粒岩屑石英砂岩 (见图 2)。

表 1 研究区储集岩碎屑成分统计表
Table 1 The statistics results of sandstone composition in the studied area

层位	样品数	石英/%	长石/%	岩屑/%	填隙物/%
盒 ₈	91	$\frac{46.4 \sim 78.3}{62}$	很少	$\frac{13.2 \sim 31.8}{18.6}$	$\frac{9.4 \sim 26.5}{19.3}$
山 ₁	63	$\frac{56 \sim 87.2}{74.7}$	少量	$\frac{8.9 \sim 29.1}{12.2}$	$\frac{10.0 \sim 28.6}{14.7}$
山 ₂	72	$\frac{68.4 \sim 89.5}{77.2}$		$\frac{3.5 \sim 20.2}{8.5}$	$\frac{5.4 \sim 17.0}{11.2}$

注: $\frac{46.4 \sim 78.3}{62}$ 意义为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$

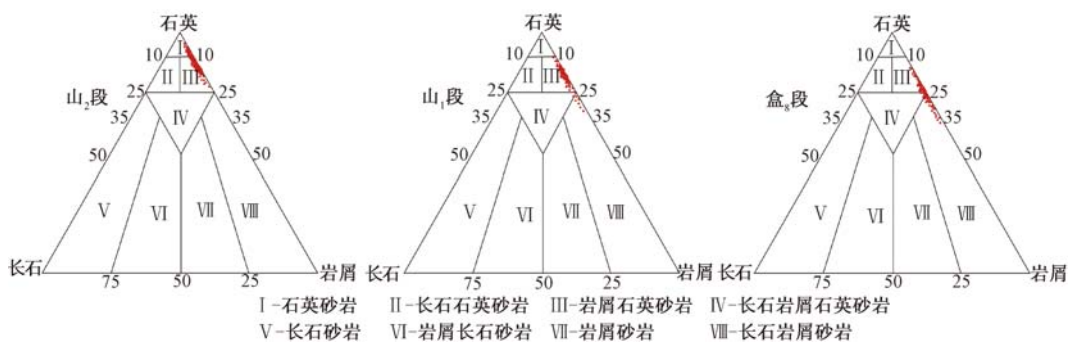


图 2 研究区山₂—盒₈ 储层岩性分类

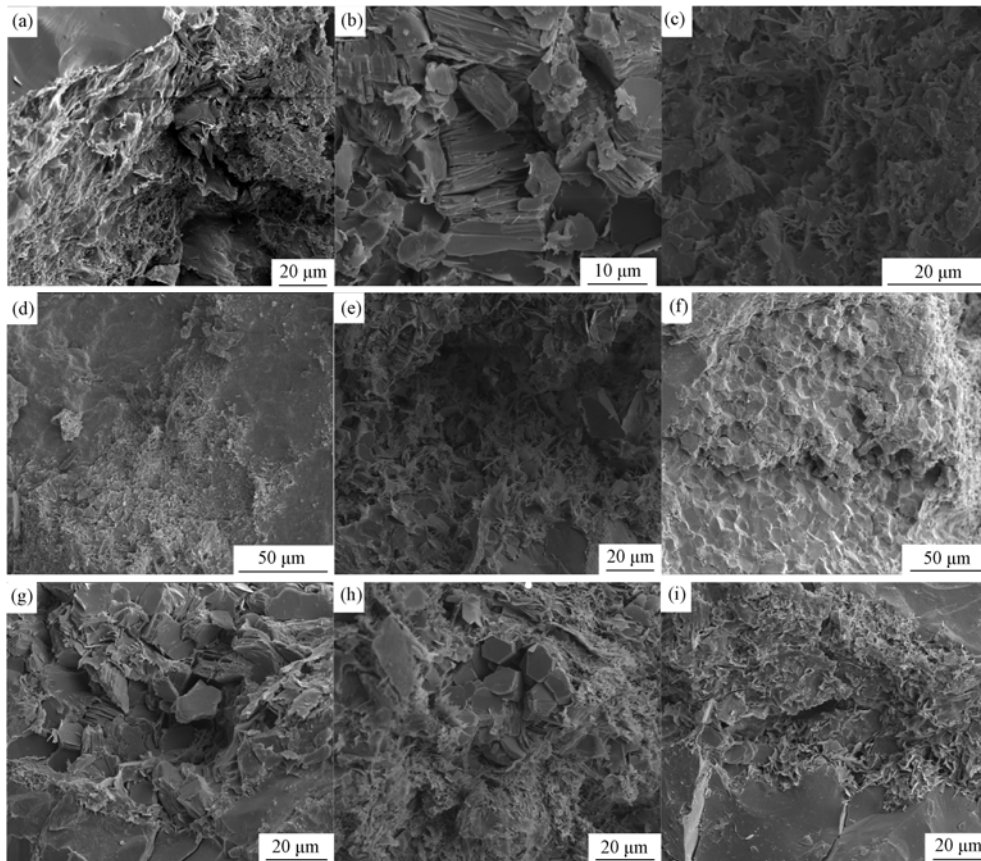
Fig. 2 The reservoir lithology classification of study area from Shan 2 to He 8

2 成岩地球化学特征

沉积作用奠定砂岩中碎屑矿物成分及岩石结构的基础, 成岩作用是砂岩碎屑矿物成分和孔隙结构发生改变的主要过程。在成岩作用过程中, 随着压实作用的发生及终结, 发生了黏土矿物转化、胶结作用等一系列晚期成岩作用, 形成多种自生矿物及胶结物, 使压缩后的孔隙大量减少, 同时导致储层渗透率急剧降低^[17]。

2.1 黏土矿物转化

山₂—盒₈ 段储集岩中的黏土矿物以毛发状伊利石、玫瑰花状绿泥石、伊蒙混层黏土为主, 石盒子组下部含少量手风琴状高岭石 (见图 3a—3c)。黏土矿物 X 衍射分析统计结果显示, 随储层埋深变化, 各黏土矿物的相对含量呈规律性变化 (见表 2, 图 4)。



a—盒₈, 2734.53 m, 玫瑰花状绿泥石充填粒间孔; b—盒₈, 2737.99 m, 手风琴状高岭石及自生长石严重破坏孔隙; c—盒₈, 2737.99 m, 伊利石呈搭桥状部分堵塞孔隙; d—盒₈, 2755.51 m, 绿泥石向伊利石转化严重堵塞孔隙; e—盒₈, 2756.15 m, 高岭石向伊利石转化堵塞孔隙; f—盒₈, 2737.99 m, 致密的微晶方解石胶结; g—盒₈, 2756.15 m, 早期手风琴状高岭石充填, 后期晶/粒间孔均被绿泥充填; h—盒₈, 2737.99 m, 六方板状高岭石充填毛发状伊利石的孔隙; i—盒₈, 2737.99 m, 绿泥石膜阻止石英自生加大, 孔喉连通性较好

图3 黏土矿物与碳酸盐胶结物特征扫描电镜

Fig. 3 Scanning electron microscopy for clay mineral and carbonate cementation

在埋深较浅 (1700 ~ 2200 m) 的储层中, 随埋深加大, 伊蒙混层含量先降后增, 伊利石含量不断增高, 表明在约 1700 m, 蒙脱石已向伊蒙混层黏土转化; 此阶段高岭石含量低, 绿泥石含量较高, 且以绿泥石黏土膜的形式大量充填于颗粒边缘。反映出三角洲环境下沉积的砂岩因富含云母等矿物而具有充足的 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} , 为成岩早期绿泥石的大量沉淀提供了物质基础。由浅至深, 伊利石的含量变化规律与伊蒙混层、绿泥石的含量变化呈较好的负相关性 (见图 4), 并在约 3500 m 出现一个迅速增高带, 即随埋深程度增大, 伊利石不断增加, 绿泥石与伊蒙混层相对减少。高岭石含量在初期与伊蒙混层相对含量的变化规律基本一致, 虽在中后期显示出异常 (见图 4c), 但总体仍呈下降趋势。这表明研究区山₂—盒₈段储层砂岩中黏土矿物转化模式为“蒙脱石—伊蒙混层—伊利石”型, 后期伴有高岭石和绿泥石的伊利石化 (见图 3d, 3e)。

表 2 山₂—盒₈ 段储层黏土矿物 X 衍射分析结果

Table 2 The X-ray diffraction of clay mineral of reservoir from Shan 2 to He 8

样号	井深/m	层位	伊蒙混层/%	伊利石/%	高岭石/%	绿泥石/%	混层比/%
W25-1	3792.03	山 ₂	20.9	37.9	27.7	13.5	15.0
W23-5	3627.15	盒 ₈	10.0	27.0	30.0	33.0	25.0
W23-2	3736.14	盒 ₈	21.1	38.5	28.6	11.8	15.0
W23-21	3754.50	盒 ₈	22.1	67.7	6.3	3.9	15.0
W23-23	3755.70	盒 ₈	25.6	67.4	4.7	2.3	15.0
W23-26	3773.00	盒 ₈	9.9	86.5	1.7	1.9	15.0
W23-30	3774.57	盒 ₈	10.6	82.2	2.1	5.1	10.0
W23-33	3776.77	盒 ₈	12.4	77.5	5.5	4.6	10.0
W23-34	3777.97	盒 ₈	14.7	79.1	3.1	3.1	10.0
Wy1-1	1971.48	盒 ₈	19.2	43.4	14.4	23.0	15.0
Wy1-4	1974.85	盒 ₈	23.7	26.4	10.8	39.1	15.0
Wy1-6	2048.47	山 ₂	25.8	64.5	7.5	2.2	10.0
Wy1-11	2082.45	山 ₁	5.4	92.2	1.5	0.9	10.0
Wy-25	2738.08	盒 ₈	27.9	37.7	15.0	19.4	20.0
Yt1-1	2245.27	盒 ₈	28.0	20.1	5.6	46.4	30.0
Su1-1	2181.50	盒 ₈	26.2	69.2	2.1	2.5	15.0
Su1-2	2182.50	盒 ₈	30.9	66.3	1.4	1.4	15.0
Su1-4	2185.81	盒 ₈	27.7	70.0	1.6	0.7	15.0
Su1-6	2263.90	山 ₂	11.3	85.0	3.1	0.7	15.0
G1-1	1723.20	盒 ₈	28.6	50.0	12.4	9.1	25.0
G1-6	1728.40	盒 ₈	25.0	29.6	3.5	42.0	25.0
W1-4	2635.90	盒 ₈	42.0	9.0	49.0	—	25.0
W1-15	2702.10	山 ₁	25.0	8.0	43.0	24.0	15.0
W21-6	2977.85	山 ₂	30.0	17.0	30.0	23.0	30.0
W21-20	2913.28	盒 ₈	34.0	38.0	13.0	15.0	25.0
W21-10	3021.75	盒 ₈	16.0	32.0	33.0	19.0	15.0
W15-9	3348.50	盒 ₈	35.0	3.0	38.0	24.0	35.0
W15-13	3449.50	山 ₂	7.0	44.0	49.0	—	10.0
W15-20	3094.60	山 ₂	33.0	17.0	35.0	15.0	10.0
W15-6	3119.86	盒 ₈	8.0	51.0	18.0	23.0	23.0

注：“—”表示未测试该项数据。

2.2 胶结作用

胶结作用是沉积物压实后导致储层物性变差的最主要原因^[18~19]，研究区山₂—盒₈ 段储层在成岩作用后期发育多种类型的胶结作用。9 口井共 25 个深度段的岩样扫描电镜分析结果显示，研究区山₂—盒₈ 段储层以早期硅质胶结及晚期的碳酸盐胶结为主（见图 3f），其中碳酸盐胶结物主要为方解石及铁方解石，其次为菱铁矿、铁白云石，局部可见白云石。统计数据表明，碳酸盐胶结物含量变化较大，为 0.5%~10.0%，随着成岩作用的不断深化趋于稳定，在 2800 m 后略有降低，推测有部分碳酸盐胶结物参与次生溶蚀作用。

3 沉积—成岩与储层孔隙特征

研究区山₂—盒₈ 储层砂岩中孔隙度与沉积物粒径、黏土矿物、碳酸盐胶结物的垂向变

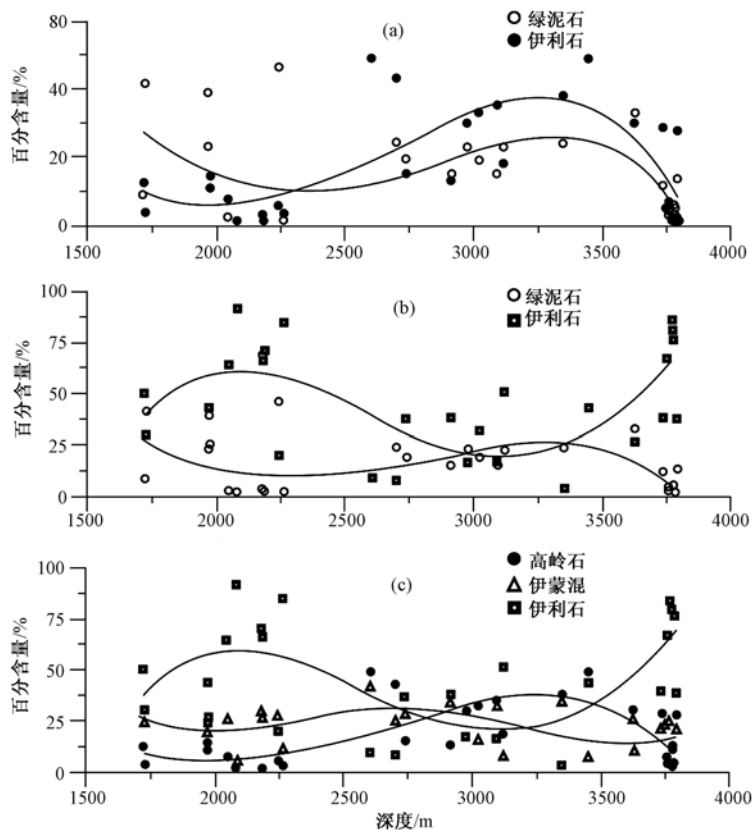


图4 黏土矿物随埋深的变化趋势

Fig. 4 The tendency of clay mineral with the buried depth

化特征（见表3，图5）表明储层物性及其时空配置关系控制着孔隙度的发育程度^[20]。

3.1 碎屑粒径与孔隙度

沉积相与水动力条件不仅控制砂体展布特征，也影响储层岩石的原始组分和结构，并由此决定了砂岩的原始孔隙特征。储层储集性能的优劣取决于孔隙度的大小及孔隙之间的连通关系^[17,21]。

在碎屑岩储集层中，组成砂岩的陆源碎屑颗粒大小及分选直接决定了粒间孔隙的大小及组合方式。粒度分析 C 值与孔隙度相关性^[17]及最大粒径与孔隙度相关性（见图6）分析结果显示，研究区山₂—盒₈段砂岩的粒度参数 C 值及最大粒径均与砂岩孔隙度存在明显的正相关性， r 值分别为0.729和0.506。粒度分析 C 值主要分布在0.65~0.80 mm之间，孔隙度集中于8%~12%之间。

3.2 黏土矿物与储层孔隙度

储层内填隙物含量的增加，会导致砂岩孔隙度降低。研究区山₂—盒₈段黏土矿物对其储层孔隙度兼具破坏和保护作用。孔隙式充填的自生黏土矿物常占据有效孔隙空间，降低储集层物性；但发育在矿物颗粒表面的粘土薄膜可以保护残余粒间孔，从而抑制黏土矿物转化对储层孔隙的破坏作用^[19]。

3.2.1 黏土矿物充填及孔隙破坏作用

研究区山₂—盒₈段储层砂岩中总黏土矿物含量与孔隙度呈较好的负相关性， r 为0.544

表 3 山₂段一盒₈段储层中胶结物含量

Table 3 The content of cementation of reservoir from Shan 2 to He 8

样品号	层位	深度/m	孔隙度/%	碳酸盐含量/%	含盐量/(g·L ⁻¹)
W153-1	山 ₁	2054.7	0.9	1.54	1002.4
W153-2	山 ₂	2085.6	7.6	1.24	452.7
W178	盒 ₈	2180.4	4.2	—	—
W178-1	盒 ₈	2181.5	5.9	2.93	—
W178-2	盒 ₈	2182.5	5.7	—	—
W178-3	盒 ₈	2185.8	7.6	2.47	—
W178-4	山 ₁	2264.8	5.2	1.05	420.3
G214-1	盒 ₈	1720.0	6.3	0.94	455.1
G214-2	盒 ₈	1723.2	7.8	2.23	245.9
W103-1	山 ₁	2657.4	0.3	1.47	23.4
W103-2	山 ₁	2658.5	1.2	2.87	24.1
W103-3	山 ₁	2660.1	2.2	9.99	24.8
W106-1	山 ₁	2847.8	2.6	3.25	345.5
W106-2	山 ₁	2849.4	3.3	2.98	425.6
W106-3	盒 ₈	2914.8	7.0	6.10	736.8
W221-1	山 ₂	2994.8	2.3	0.75	—
W221-2	山 ₂	2996.3	5.3	1.25	185.9
W221-3	山 ₂	2997.5	6.5	4.88	1769.7
W101-1	盒 ₈	3094.6	6.9	3.20	697.3
W101-2	盒 ₈	3124.6	4.2	0.94	75.3
W101-3	盒 ₈	3125.5	5.1	1.56	481.2
W101-4	盒 ₈	3119.9	6.0	3.41	269.8
W156-1	盒 ₈	3348.5	6.2	2.10	585.4
W156-2	盒 ₈	3402.4	5.4	3.51	401.7
W156-3	山 ₂	3449.5	7.4	3.00	431.9
W223-1	盒 ₈	3627.2	4.8	2.54	915.9
W223-2	盒 ₈	3755.7	3.0	2.70	84.7
W223-3	盒 ₈	3736.1	4.7	3.07	223.3
W223-4	山 ₂	3792.0	4.8	2.79	125.6

注：“—”表示未测定该项数据。

(见图 7a)。区内黏土矿物自形程度高,矿物形态结构差异较大,可以相互补漏充填残余孔隙形成致密胶结(见图 3g)。随埋藏程度的加深,伊蒙混层、绿泥石、高岭石发生不同程度的伊利石化(图 3d, 3e)并呈孔隙桥状充填,加剧了成岩后期有效孔隙的丧失。

镜下分析表明,研究区主要由毛发状、鳞片状、碎片羽毛状的伊利石大量充填而严重堵塞孔隙。随着伊利石和伊蒙混层的进一步发育,残余粒间孔转变为晶间微孔,导致原生粒间孔丧失,孔隙度随之下降(见图 7b, 7c),同时卷片状、毛发状伊利石晶体多呈桥连式产出(见图 3c),较大程度地堵塞了喉道,从而降低了渗透率。沿着孔隙壁发育的绿泥石黏土膜,使喉道变得迂回曲折,在一定程度上降低其有效孔隙度及渗透率。

高岭石在成岩过程中对储层孔隙的影响作用相对复杂。成岩早期形成的手风琴状高岭石,一部分与自生长石共生严重破坏孔隙(见图 3b),另一部分呈松散堆积,对孔隙破坏程度较低,镜下可见砂岩中早期被手风琴状高岭石充填的原生孔隙后期被绿泥石充填(见图 3g)。在晚期的表生成岩作用阶段,由于大气降水的参与,导致碎屑长石溶解及高岭石沉淀^[22~23],镜下常可见长石溶孔被高岭石充填,以不具伊利石化而与早期成岩的高岭石相区分,并以六方板状产出充填毛发状伊利石的残余孔隙(见图 3h)。

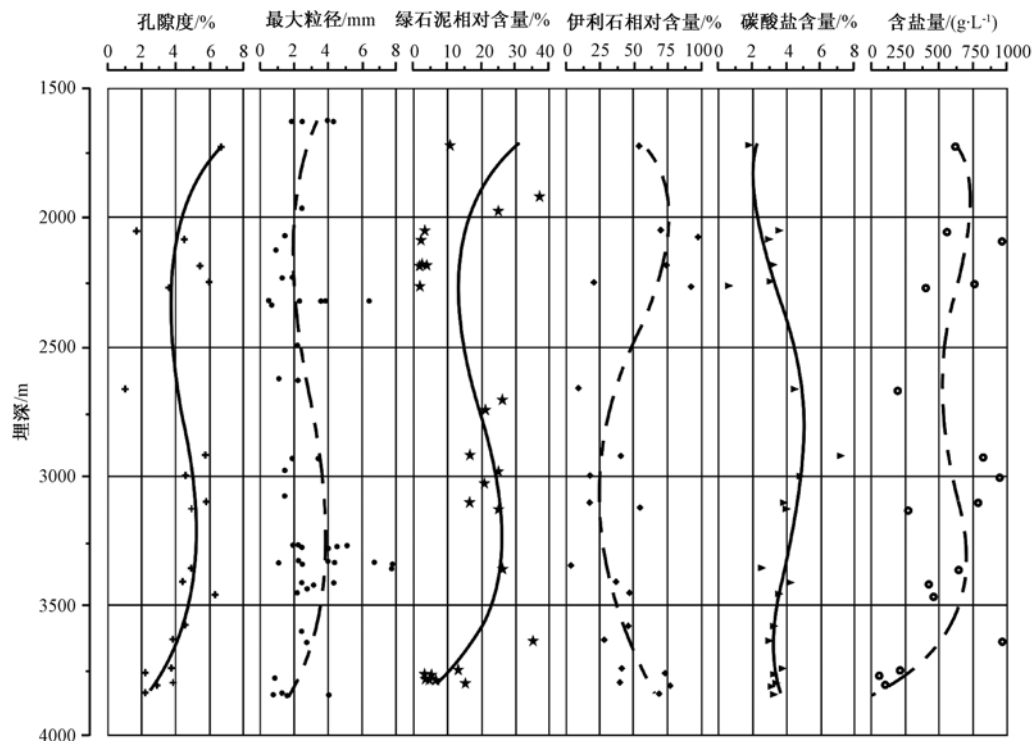


图5 山₂—盒₈储层物性的垂向变化特征

Fig. 5 The vertical characteristics of reservoir from Shan 2 to He 8 members

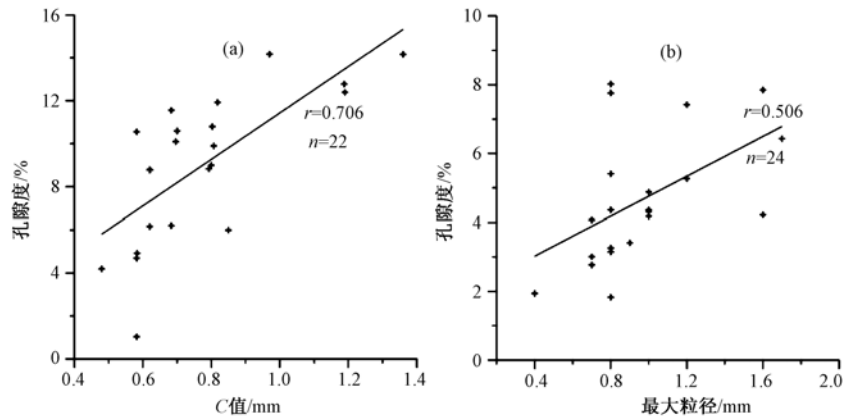


图6 储层孔隙度与粒度参数的关系

Fig. 6 The relationships between porosity and the grain size of reservoir

3.2.2 绿泥石黏土膜对孔隙的保护

前人研究表明，绿泥石黏土膜的发育在储层空隙中呈现“双刃剑”的作用，早期形成的绿泥石膜在一定程度上降低了储层储集空间，但沿着孔隙壁发育的绿泥石黏土膜可以较好地抑制后续发生的各类胶结作用^[24~26]，从而有效保存残余粒间孔，并为次生溶蚀孔隙的形成提供通道和空间。

镜下观察结果显示，研究区山₂—盒₈储层中大部分绿泥石以孔隙衬边的方式呈黏土薄

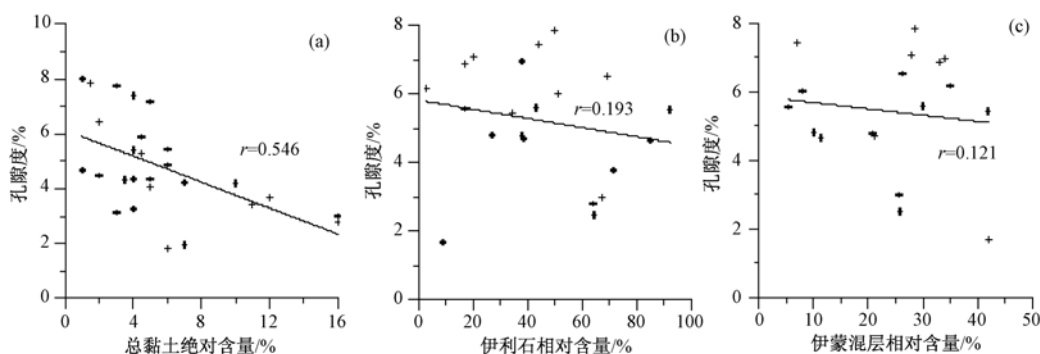


图7 储层孔隙度与粘土矿物含量的关系

Fig. 7 The relationships between reservoir porosity and clay mineral content

膜产出, 黏土薄膜分布于颗粒边缘, 硅质胶结物主要分布于粒间孔隙向中心的方向, 该胶结序列表明黏土薄膜的形成时期早于硅质胶结。大量绿泥石薄膜的发育阻止了次生石英加大的形成 (见图 3i) 以及部分粒间碳酸盐胶结物的沉淀, 使相当一部分粒间孔隙得以保存。同时, 由绿泥石含量与孔隙度间的正相关性 (见图 5, 图 8) 可知, 研究区储层砂岩中普遍发育的绿泥石衬边对孔隙的破坏作用远低于其对石英次生加大的抑制作用, 进而保存大量原生粒间孔隙, 使区内大部分具绿泥石薄膜的储层都具有较好的物性。

3.3 碳酸盐胶结对孔隙的破坏作用

研究区山₂—盒₈段主要的胶结物为碳酸盐和硅质胶结。与硅质胶结相比, 碳酸盐胶结物与孔隙度呈较明显的负相关 (见图 5, 图 9, 表 4)。当碳酸盐在胶结物中的含量小于 5% 时, 孔隙度变化较大, 通常为 2% ~ 8%; 碳酸盐含量高于 5% 时, 孔隙度随着碳酸盐含量的增高而明显降低。该区碳酸盐胶结物主要为方解石及铁方解石, 其次为菱铁矿、铁白云石, 局部可见白云石, 其中方解石胶结物常在局部造成镶嵌式致密胶结, 使未被硅质和泥质所充填的残余粒间孔隙、泥质质点间微孔隙完全丧失。铁方解石析出时间晚于方解石, 主要呈基底式胶结和孔隙式胶结。区内含铁碳酸盐胶结物多形成于晚成岩期, 大量充填在成岩晚期仅存的残余粒间孔和溶蚀粒间孔内使孔隙严重丧失, 形成该区低孔低渗的致密储集层 (见图 3i)。

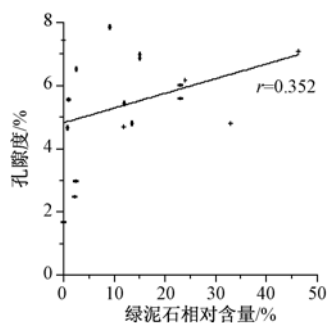


图8 绿泥石含量与储层孔隙相关性
Fig. 8 Relationship between reservoir porosity and the chlorite film

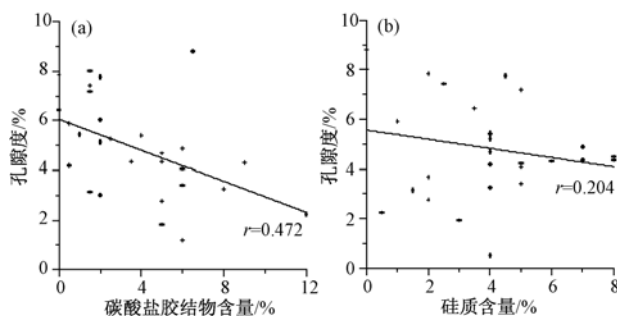


图9 储层孔隙度与胶结物的关系
Fig. 9 Relationships between porosity and the content of cementation

表 4 山₂ 段—盒₈ 段储层砂岩中胶结物、黏土矿物总含量与孔隙度的关系
Table 4 The relationship among the cementation, clay mineral and its reservoir porosity from Shan 2 to He 8

井号	层位	埋深/m	黏土矿物		硅质		碳酸盐胶结	
			总含量/%	孔隙度/%	总含量/%	孔隙度/%	总含量/%	孔隙度/%
Zs2-1	山 ₂	5073.5	4.0	5.4	4.0	5.4	3.0	5.4
Zs2-2	山 ₂	5074.6	16.0	3.0			2.0	3.0
Zs2-3	山 ₁	5075.4	16.0	2.8	2.0	2.8	5.0	2.8
Hs1-1	山 ₁	3699.6	2.0	4.5	8.0	4.5	—	—
Hs1-2	山 ₁	3699.8	1.0	4.7	4.0	4.7	5.0	4.7
L1-1	山 ₁	3468.0	—	—	—	—	2.0	6.0
L1-2	山 ₁	3469.0	12.0	3.7	2.0	3.7	—	—
L1-3	山 ₁	3469.8	6.0	5.4	4.0	5.4	1.0	5.4
L1-4	山 ₂	3470.3	5.0	7.2	5.0	7.2	1.5	7.2
Qt1	山 ₁	4265.1	3.0	3.2	1.5	3.2	1.5	3.2
Qt3-1	盒 ₈	4243.2	1.0	8.0	0	8.0	1.5	8.0
Qt3-2	盒 ₈	4244.5	—	—	—	—	2.0	5.1
Qt3-3	盒 ₈	4245.5	—	—	0.0	8.8	6.5	8.8
Qt4-1	盒 ₈	4373.8	—	—	4.0	5.2	—	—
Qt4-2	盒 ₈	4375.2	3.0	7.8	4.5	7.8	2.0	7.8
Qt4-3	盒 ₈	4376.8	4.0	7.4	2.5	7.4	1.5	7.4
Qt4-4	盒 ₈	4378.6	—	—	0.5	2.3	12.0	2.3
Lo2	山 ₁	4840.3	7.0	4.2	5.0	4.2	0.5	4.2
Lo3-1	山 ₁	4065.9	1.5	7.9	2.0	7.9	0	7.9
Lo3-2	山 ₁	4067.1	2.0	6.4	3.5	6.4	0	6.4
Lo3-3	山 ₁	4068.2	4.5	5.9	1.0	5.9	0.5	5.9
Lo3-4	山 ₁	4079.8	—	—	—	—	6.0	1.2
Lo4-1	山 ₁	4507.3	4.5	5.3			2.5	5.3
Lo4-2	山 ₁	4507.8	6.0	4.9	7.0	4.9	6.0	4.9
Lo4-3	山 ₂	4508.2	4.0	4.4	8.0	4.4	3.5	4.4
Lo4-4	山 ₂	4508.6	5.0	4.4	7.0	4.4	5.0	4.4
Lo4-5	山 ₂	4508.9	3.5	4.3	6.0	4.3	9.0	4.3
Lo4-6	山 ₁	4509.3	5.0	4.1	5.0	4.1	6.0	4.1
Lo4-7	山 ₂	4509.9	11.0	3.4	5.0	3.4	6.0	3.4
Lo4-8	山 ₂	4510.6	4.0	3.3	4.0	3.3	8.0	3.3
Qt5-1	山 ₁	4278.9	7.0	1.9	3.0	1.9	—	—
Qt5-2	山 ₁	4280.6	—	—	4.0	0.5	—	—
Qt5-3	山 ₁	4283.4	6.0	1.8	—	—	5.0	1.8

注：“—”表示未测试该项数据

4 结论

研究区山₂—盒₈ 段砂岩储层中黏土矿物转化模式为“蒙脱石—伊蒙混层—伊利石”型，后期伴有高岭石和绿泥石的伊利石化。

储层在压实成岩作用后对储层孔隙的破坏作用主要包括黏土矿物转化及胶结作用，绿泥石黏土套膜、硅质胶结及碳酸盐岩胶结作用先后依次发生。分布于碎屑颗粒表面的绿泥石黏

土膜的发育在降低储层原生孔隙的同时,抑制了后期发生的硅质胶结作用,为残余粒间孔的保存和次生溶孔的形成提供了空间及物质基础。

研究区山₂—盒₈段砂岩储层经历了晚期成岩作用,在压实成岩作用后,孔隙发育受沉积物粒径、黏土矿物、绿泥石套膜、碳酸盐胶结物含量的综合影响,沉积物最大粒径与储层孔隙度呈正相关,绿泥石含量对储层孔隙具有保护作用,而伊利石等黏土矿物和碳酸盐胶结物对储层孔隙造成严重破坏,加剧了成岩作用后期孔隙度的降低。

致谢 文章撰写过程中得到王根厚教授、袁国礼教授及李海龙博士的悉心指导,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 何自新,付金华,席胜利,等. 苏里格大气田成藏地质特征 [J]. 石油学报, 2003, 24 (2): 6 ~ 12.
HE Zi-xin, FU Jin-hua, XI Sheng-li, et al. Geological features of reservoir formation of Sulige gas field [J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24 (2): 6 ~ 12.
- [2] 张福礼. 鄂尔多斯盆地早古生代复合的古构造体系与天然气 [J]. 地质力学学报, 2002, 8 (3): 193 ~ 200.
ZHANG Fu-li. Compound ancient tectonic system and natural gas of early Paleozoic in Ordos Basin [J]. Journal of Geomechanics, 2002, 8 (3): 193 ~ 200.
- [3] 邢振辉,程林松,周新桂,等. 鄂尔多斯盆地北部塔巴庙地区上古生界致密砂岩气藏天然裂缝形成机理浅析 [J]. 地质力学学报, 2005, 11 (1): 34 ~ 42.
XING Zhen-hui, CHENG Lin-song, ZHOU Xin-gui, et al. Mechanism of natural fracture formation in the Upper Paleozoic tight sand gas reservoirs in the Tabamiao area, north Ordos Basin [J]. Journal of Geomechanics, 2005, 11 (1): 34 ~ 42.
- [4] 武丽,施炜,董宁,等. 鄂尔多斯盆地塔巴庙区块下石盒子组砂岩储层含气性预测 [J]. 地质力学学报, 2005, 11 (3): 226 ~ 234.
WU Li, SHI Wei, DING Ning, et al. Prediction of gas potentials of sand reservoirs of the Lower Shihezi Formation in the Tabamiao area, Ordos Basin [J]. Journal of Geomechanics, 2005, 11 (3): 226 ~ 234.
- [5] 候洪斌,牟泽辉,朱宏权,等. 鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气成藏条件与勘探方向 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 126 ~ 128.
HOU Hong-bin, MU Ze-hui, ZHU Hong-quan, et al. Gas reservoir conditions and exploration direction of Upper Paleozoic in northern Erdos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press. 2004: 126 ~ 128.
- [6] 杨斌虎. 鄂尔多斯盆地北部上古生界盒₈—山₁段物源与沉积相及其对优质天然气储层的影响 [D]. 西安: 西北大学, 2009.
YANG Bin-hu. Discussion on provenance and depositional facies and their impact on prospecting natural reservoirs of He 8-Shan 1 Groups in the Upper Paleozoic, Ordos Basin [D]. Xi'an: Northwest University, 2009.
- [7] 郭英海,刘焕杰,权彪,等. 鄂尔多斯地区晚古生代沉积体系及古地理演化 [J]. 沉积学报, 1998, 16 (3): 44 ~ 51.
GUO Ying-hai, LIU Huan-jie, QUAN Biao, et al. Late Paleozoic sedimentary system and Paleogeographic evolution of Ordos area [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16 (3): 44 ~ 51.
- [8] 邢厚松,肖红平,孙粉锦,等. 鄂尔多斯盆地中东部下二叠统山西组二段沉积相 [J]. 石油实验地质, 2008, 30 (4): 345 ~ 351.
XING Hou-song, XIAO Hong-ping, SUN Fen-jin, et al. Sedimentary facies of Member 2 of Shanxi Formation of Lower Permian in the middle-eastern Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2008, 30 (4): 345 ~ 351.
- [9] 庞军刚,李文厚,郭艳琴,等. 陕北子洲地区二叠纪山西组沉积环境 [J]. 煤田地质与勘探, 2006, 34 (5): 5 ~ 8.
PANG Jun-gang, LI Wen-hou, GUO Yan-qin, et al. Sedimentary environment of Permian Shanxi Formation in Zizhou region, northern Shanxi [J]. Coal Geology and Exploration, 2006, 34 (5): 5 ~ 8.

- [10] 叶黎明, 齐天俊, 彭海燕. 鄂尔多斯盆地东部山西组海相沉积环境分析 [J]. 沉积学报, 2008, 26 (2): 202~210.
YE Li-ming, QI Tian-jun, PENG Hai-yan. Depositional environment analysis of Shanxi Formation in eastern Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26 (2): 202~210.
- [11] 张以明, 李胜利, 李民, 等. 湖盆洼槽区沉积充填模式与演化规律——以饶阳凹陷马西洼陷沙河街组为例 [J]. 地质力学学报, 2012, 18 (4): 379~388.
ZHANG Yi-ming, LI Sheng-li, LI Min, et al. Depositional filling model and evolution of the sag in lacustrine basin: A case study from Shanjie Formation in Maxi sag, Raoyang depression [J]. Journal of Geomechanics, 2012, 18 (4): 379~388.
- [12] 陈全红, 李文厚, 胡孝林, 等. 鄂尔多斯盆地晚古生代沉积岩源区构造背景及物源分析 [J]. 地质学报, 2012, 86 (7): 1150~1162.
CHEN Quan-hong, LI Wen-hou, HU Xiao-lin, et al. Tectonic setting and provenance analysis of Late Paleozoic sedimentary rocks in the Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86 (7): 1150~1162.
- [13] 陈全红, 李文厚, 刘昊伟, 等. 鄂尔多斯盆地上石炭统一二叠统砂岩物源分析 [J]. 古地理学报, 2009, 11 (6): 629~640.
CHEN Quan-hong, LI Wen-hou, LIU Hao-wei, et al. Provenance analysis of sandstone of the Upper Carboniferous to Middle Permian in Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11 (6): 629~640.
- [14] 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
YANG Jun-jie. Tectonic evolution and oil-gas reservoirs distribution in Ordos Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.
- [15] 张晓莉. 鄂尔多斯盆地中部上古生界沉积相演化 [J]. 地球科学与环境学报, 2005, 27 (3): 26~29.
ZHANG Xiao-li. Sedimentary facies evolution of Upper Paleozoic formation in Ordos Basin [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2005, 27 (3): 26~29.
- [16] 徐波, 孙卫, 宴宁平, 等. 鄂尔多斯盆地靖边气田沟槽与裂缝的配置关系对天然气富集程度的影响 [J]. 现代地质, 2009, 23 (2): 299~304.
XU Bo, SUN Wei, YAN Ning-ping, et al. The influence on natural gas' s enrichment from configuration of ancient valleys and fractures in Jingbian gas field, Ordos Basin [J]. Geoscience, 2009, 23 (2): 299~304.
- [17] 罗静兰, 张晓莉, 张翔, 等. 成岩作用对河流—三角洲相砂岩储层物性演化的影响: 以延长油区上三叠统延长组长₂砂岩为例 [J]. 沉积学报, 2001, 19 (4): 543~547.
LUO Jing-lan, ZHANG Xiao-li, ZHANG Yun-xiang, et al. The diagenetic impact on reservoir-quality evolution of fluvial-deltaic sandstones: Taking an example from the Upper Triassic sandstones of Chang 2 Formation in the Yanchang oil field [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19 (4): 543~547.
- [18] 罗静兰, 刘小洪, 林潼, 等. 成岩作用与油气侵位对鄂尔多斯盆地延长组砂岩储层物性的影响 [J]. 地质学报, 2006, 80 (5): 664~673.
LUO Jing-lan, LIU Xiao-hong, LIN Tong, et al. Impact of diagenesis and hydrocarbon emplacement on sandstone reservoir quality of the Yanchang Formation (Upper Triassic) in the Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80 (5): 664~673.
- [19] 黄思静, 黄培培, 王庆东, 等. 胶结作用在深埋藏砂岩孔隙保存中的意义 [J]. 岩性油气藏, 2007, 19 (3): 7~13.
HUANG Si-jing, HUANG Pei-pei, WANG Qing-dong, et al. The significance of cementation in porosity preservation in deep-buried sandstones [J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19 (3): 7~13.
- [20] 王世虎, 焦养泉, 吴立群, 等. 鄂尔多斯盆地西北部延长组中下部古物源与沉积体空间配置 [J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2007, 32 (2): 201~208.
WANG Shi-hu, JIAO Yang-quan, WU Li-qun, et al. Spatial combination of paleoprovenance and depositional lobe of mid-lower Yanchang Formation in the northwest of Ordos Basin [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2007, 32 (2): 201~208.
- [21] 郑荣才, 耿威, 周刚, 等. 鄂尔多斯盆地白豹地区长₆砂岩成岩作用与成岩相研究 [J]. 岩性油气藏, 2007, 19 (2): 1~8.

- ZHENG Rong-cai, GENG Wei, ZHOU Gang, et al. Diagenesis and diagenetic facies of Chang 6 sandstone of Yanchang Formation in Baibao area, Ordos Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2007, 19 (2): 1~8.
- [22] 王琪, 史基安, 薛莲花, 等. 碎屑储集岩成岩演化过程中流体-岩石相互作用特征 [J]. *沉积学报*, 1999, 17 (4): 584~590.
- WANG Qi, SHI Ji-an, XUE Lian-hua, et al. Characteristics of fluid-rock interaction in clastic reservoir controlled by evolution of diagenetic environment [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17 (4): 584~590.
- [23] Giles M R, Boer R B. Origin and significance of redistributional secondary porosity [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1990, (6): 378~397.
- [24] Heald M T, Larease R E. Influence of coatings on quartz cementation [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1974, 44 (4): 1269~1274.
- [25] Dison S A, Summers D M, Surdam R C. Diagenesis and preservation of porosity in Norphlet Formation (Upper Jurassic), southern Alabama [J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73 (6): 707~728.
- [26] 李宏, 王芙蓉, 戴世立, 等. 绿泥石膜对储层孔隙度的影响——以鄂尔多斯盆地 M 油田延长组 2 段为例 [J]. *岩性油气藏*, 2008, 20 (4): 71~74.
- LI Hong, WANG Fu-rong, DAI Shi-li, et al. Influence of chlorite film on reservoir porosity: A case study from the second member of Yanchang formation in Ordos Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2008, 20 (4): 71~74.

THE POROSITY CHARACTERISTICS OF SEDIMENTARY AND DIAGENETIC ENVIRONMENT FOR SHAN-2 MEMBER TO HE-8 MEMBER AT THE UPPER PALEOZOIC IN NORTHERN SHAANXI SLOPE

WANG Yi-xuan¹, ZHANG Xiao-dong², SUN Yong¹, AN-Xing-yu³

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. China Henan International Cooperation Group Co., Ltd, Zhengzhou 450004, China;

3. Shandong Bureau of China Metallurgical Geology Bureau, Jinan 250100, China)

Abstract: The typical low permeability lithological reservoir is the main reservoir which has been developed from Shan-2 member to He-8 member at the upper Paleozoic in Northern Shaanxi slope, Ordos Basin. The reservoir properties dominate the enrichment of oils and gas. The merits of tight reservoir porosity are associated with their sedimentary and diagenetic environment. In this paper, the influence of the late-diagenetic on reservoir porosity was discussed according to the sedimentary particle size analysis and scanning electron microscopy observation. From the result of this study, we can draw the conclusion that the chief destructions of reservoir-quality which is in the transform sequence of “Montmorillonite-Andreattite-Illite” are the cementation and the evolution of clay cementation. Furthermore, the clay membrane of chlorite which is developed in the surface of clastic particles can protect the reservoir porosity from the late-cementation while block the primary porosity. Therefore the clay membrane of chlorite can be one of the criteria to judge the reservoir-quality in gas reservoir exploration.

Key words: Northern Shaanxi Slope; Shanxi Formation; Shihezi Formation; diagenetic; porosity