

文章编号: 1000-0550(2007) 06-0923-11

鄂尔多斯盆地上古生界层序格架内的成岩作用^①

李熙喆¹ 张满郎¹ 谢武仁¹ 季汉成²

(1. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院 河北廊坊 065007; 2 中国石油大学 北京 102249)

摘 要 鄂尔多斯盆地上古生界主要发育石英砂岩、岩屑砂岩、杂砂岩、“牛毛毡砂岩”、黑色石英砂岩等五种砂岩类型。这些砂岩具有成份成熟度较高、结构成熟度中—低、以正粒序为主、粒级普遍为中粗粒、储层填隙物类型多、含量变化大的特点。经历了三个重要成岩阶段: 早成岩压实期—原生孔隙大量破坏损失期, 中成岩 A 期—有机酸溶蚀—次生孔隙发育期, 中成岩 B 期—埋藏压溶再胶结成岩期。在 SQ8 主要发育压溶、高岭石溶蚀、石英次生加大等成岩作用。SQ11 主要发育硅质胶结、碳酸盐胶结成岩作用。成岩相可分为三级五类, 即 I 强压溶—石英加大相; II 压溶—碳酸盐溶蚀—高岭石交代相及溶蚀—弱杂基充填—高岭石交代相; III 强压实—粘土胶结相及强压实—碳酸盐胶结、交代相。区内储层整体为低孔低渗的致密砂岩储层, 以发育次生孔隙为主, 包括粒间溶孔、粒内溶孔和高岭石晶间孔, 原生孔隙较少保留。通过对沉积砂体展布、储层成岩相类型及储集性能的综合分析, 对有利的储层分布区带进行了预测。

关键词 岩石类型 成岩阶段 成岩相 储层预测

第一作者简介 李熙喆 男 1966 年出生 高级工程师 博士 石油地质学及沉积储层 E-mail kx69@petrochina.com.cn

中图分类号 P588.2 P539.2 文献标识码 A

晚古生代鄂尔多斯盆地始终具有南、北隆起、中部低陷的特点。至中生代, 由于燕山运动的影响, 盆地西缘发生大规模的推覆冲断, 盆地东部整体抬升形成向西倾斜的大型斜坡^[1-5]。构造抬升和古地形差异决定了盆地的可容空间分布, 进而控制砂体的类型和分布, 造就了层序地层格架内类型各异的沉积体系与沉积相, 从而导致成岩作用的分异性。鄂尔多斯盆地上古生界的构造演化决定了区内不同构造单元的升降速率、埋藏深度以及地层压力、古地温、流体性质等基本成岩因素, 进而控制了储层成岩区的分布格局和成岩演化的方向。近几年, 国内对鄂尔多斯盆地上古生界的成岩作用进行了多方面的研究, 主要是在深度域上研究埋藏成岩作用历史, 并取得了一些研究成果^[6-8]。本文尝试通过对鄂尔多斯盆地上古生界成岩作用的研究, 揭示其成岩作用与层序格架的内生关系, 为油气勘探提供理论依据。

1 层序地层格架

鄂尔多斯盆地石炭—二叠系沉积地层可划分为 5 个二级层序、19 个三级层序(本溪组 3 个、太原组 4 个、山西组 3 个、下石盒子组 4 个、上石盒子组 2 个、石千峰组 3 个), 每个三级层序又可划分为 2~3 个体

系域。其中, 山西组一盒 8 段被划分为 5 个三级层序, 即 SQ8~SQ12。主力含气层序为 SQ8(山 2)和 SQ11(盒 8 下), 其层序地层分布特点如下:

SQ8(山 2)主要岩性为灰白色中粗粒石英砂岩、灰绿色岩屑砂岩夹黑色炭质泥岩及煤层。其厚度较稳定, 主体沉积厚度 30~70 m, 除北部凸起缺失外, 全区均有分布, 主要沉积地区为盆地中北部苏里格—安塞—保德地区。沉积物不仅沉积厚度较大, 而且沉积厚度变化比较明显, 沉积物基本呈南北向分布, 受控于来自北方的沉积物源。盆地南部西峰—韩城地区 SQ8 的沉积厚度相对较薄, 沉积厚度平面分布比较稳定。

SQ11(盒 8 下)以一套河流相碎屑沉积为主, 主要岩性为浅灰色含砾粗砂岩, 灰白色中粗粒石英砂岩及岩屑质石英砂岩, 夹灰绿色泥岩。SQ11 地层沉积厚度 30~60 m, 其沉积物主体呈朵叶状分布在盆地的中部及东西部, 沉积和沉降中心位于盆地中央的靖边地区。

2 储层岩石学特征

2.1 岩石类型

研究区主要发育五种特征明显的砂岩类型。①

①国家十五科技攻关项目资助

收稿日期: 2007-02-07 收修稿日期: 2007-06-06

石英砂岩: 主要分布于 SQ8、SQ11 粗粒河道及分流河道中, 为灰白色、白色, 质纯, 中粗粒为主, 部分为巨砂级, 石英含量高达 90% 以上, 发育少量硅质岩屑。②岩屑砂岩: 分布于各个层序的河道中上部及河口坝中, 并与石英砂岩交替出现, 构成最主要的砂岩类型。岩屑砂岩以灰绿色、浅绿色为主, 中粗砂至细砂级, 岩屑含量 40% 左右, 发育两类岩屑, 一类为硅质岩屑, 有燧石、变质石英岩、脉石英等, 另一类为浅变质的泥质岩屑, 有板岩、千枚岩等, 前者部分可演变成油气储

层, 后者不利于形成储层。③杂砂岩: 主要分布于各个层序的决口扇中, 在三角洲前缘水下分流河道、河口坝中也有分布, 杂基含量高, 压实致密。④牛毛毡砂岩: 主要分布于山西组河道及三角洲前缘, 中粒以及中—细粒级, 黑、白云母沿层面富集, 云母含量一般 7% ~ 8%, 最高达 10% ~ 15%。这类砂岩之下一般发育煤层或炭质泥岩。⑤黑色石英砂岩: 主要分布于山西组, 与煤层及炭质泥岩层交互, 黑色为主, 压溶作用强, 石英含量高, 中—细粒级为主 (表 1)。

表 1 五种岩石类型及分布特征

Table 1 Characteristics and distribution of five rock types

类型	颜色	粒度	沉积相带	分布层位
石英砂岩	白色、灰白色	中粗砂、巨砂	河道、河口坝	SQ8、SQ11
岩屑砂岩	(浅)灰绿色、浅灰色	中细砂	河口坝、河道	SQ8~SQ12
杂砂岩	灰色、浅灰绿色	中细砂	决口扇	SQ9~SQ12
牛毛毡砂岩	灰色、灰黑色	中砂	河口坝、河道	SQ8~SQ10
黑色石英砂岩	黑色	中粗砂	河道	SQ8

2.2 岩石特征

研究区碎屑颗粒富石英和岩屑, 贫长石, 填隙物类型多, 以高岭石和伊利石为主。据薄片粒度分析, 砂岩的粒度普遍偏粗, 多为中粗粒, 粒度多在 0.25~1 mm (图 1)。SQ11 (盒 8 下) 砂岩的粒度略高于 SQ8 (山 2)。SQ8 砂岩总体分选较差, 结构成熟度较低。SQ11 砂岩碎屑形态一般呈次圆—次棱角状, 分选较差, 标准偏差多数在 1~2 之间, 反映出河流搬运距离短, 沉积物快速堆积的特点。其中在不同体系域中其岩石的粒度, 分选也不同, 低位体系域主要岩石类型为石英砂岩, 分选好, 粒度粗; 高位及水侵体系域岩石类型多为泥质砂岩, 岩屑含量高, 分选差、粒度偏细。

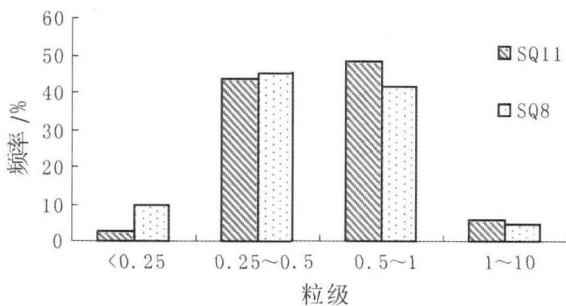


图 1 砂岩粒级分布频率图

Fig. 1 Distribution frequency of sandstone size grade

3 成岩作用类型

研究区的主要成岩作用为压实、胶结、交代及溶

蚀作用。因为本区总体为煤系沉积背景, 早成岩期地层水呈酸性, 主要发育强压实压溶作用、粘土矿物交代和石英次生加大, 其后随进一步固化成岩, 以压实、充填胶结作用为主, 随着早期地层水酸性减弱, 碳酸盐矿物沉淀下来, 形成碳酸盐胶结, 并交代颗粒、杂基及业已形成的石英加大边。后期地层水介质再次转为酸性, 碳酸盐胶结物及长石、易溶岩屑等发生溶蚀, 并可以形成高岭石胶结物^[9]。

不同层序砂岩成岩作用存在差异, 像高岭石胶结虽然在各个层位中均可见, 但以 SQ11~12、SQ8 砂体中最为常见, 其平均含量为 2% ~ 10.5% 之间, 其产状有碎屑蚀变型和孔隙沉淀型两种。碎屑蚀变型高岭石主要分布在中、东部的盒 8 上段 (SQ12) 和山 2 (SQ8) 储层中。孔隙沉淀型高岭石才是真正成岩期的胶结物, 主要分布在榆林气田的北部和西部, 以盒 7 (SQ13)、盒 8 (SQ11~12) 以及山 1 (SQ9~10) 砂体最为丰富。硅质胶结物在本区上古生界储层中普遍存在, 其含量和胶结规模也相当可观, 各层平均含量 2% ~ 6%, 部分层段达到 10% ~ 18%, 尤其是盒 8 上段 (SQ12)、山 2 段 (SQ8)、太 1 (SQ6~7)、太 2 (SQ4~5) 砂岩中的石英砂岩中, 硅质成为主要胶结物。

4 成岩演化阶段划分

4.1 成岩阶段划分

根据酸性水介质 (含煤地层) 碎屑岩早成岩、中

成岩、晚成岩阶段的主要标志, 结合成岩温度、镜煤反射率、粘土矿物组合及蚀变特征和自生矿物的分布和形成顺序, 对鄂尔多斯盆地 SQ8(山 2)及 SQ11(盒 8下)砂岩的成岩阶段进行划分(图 2 3 4), 成岩阶段多已达到中成岩 B 期, 主要有三个阶段:

4.1.1 早成岩压实期—原生孔隙大量破坏损失期

研究区沉积准同生期—埋藏早期的孔隙水主要受煤系沉积环境控制, 水介质偏酸, 早期胶结作用不明显, 压实作用是最主要的成岩方式。

4.1.2 早成岩末—中成岩 A 期—有机酸溶蚀—次生孔隙发育期

伴随埋深增加, 在地温 80~120℃时, 烃源岩干酪根进入成熟高峰期, 酸溶性组分增多, 粒间填隙物、长石、不稳定岩屑、片岩中叶绿泥石、黑云母等矿物等发生溶蚀, 形成大量次生孔隙。

4.1.3 中成岩 B 期—埋藏压溶再胶结成岩期

$R_o > 1.3\%$, 古地温 $> 130^\circ\text{C}$, 埋深 3 500~4 000 m, 中成岩 B 期的成岩矿物有含(铁)方解石、含(铁)白云石、绿泥石、加大边自生石英及自形晶柱形石英,

这些晚期成岩矿物降低了不少的孔隙度。

4.2 重点层序成岩分析

榆林气田 SQ8(山 2)和苏里格气田 SQ11(盒 8下)是上古生界重要的产气区和层段, 储层物性均好于其它地区。因此, 重点对榆林气田、苏里格气田的成岩作用进行分析。

4.2.1 榆林气田 SQ8(山 2)成岩作用研究

SQ8(山 2)为一套含煤碎屑岩地层, 榆林气田由北向南处在曲流河—三角洲平原—三角洲前缘沉积相带中。该层序主要岩石类型是岩屑质石英砂岩, 杂基和软岩屑含量相对较高, 颗粒分选、磨圆相对较差, 因此压实作用较发育。石英次生加大只在少量的石英砂岩中存在。大量杂基蚀变为高岭石, 充填孔隙, 自生高岭石较少。溶蚀作用不甚发育, 只在石英砂岩中部分杂基和胶结物被溶, 形成少量溶蚀孔。三角洲砂岩中的填隙物在溶蚀过程中形成的富 Ca^{2+} 地层水沿上倾方向进入该区地层中, 发育一些含铁方解石胶结作用; 泥质组分在成岩转化过程中析出大量 Ca^{2+} , 在砂泥接触面附近形成大量碳酸盐胶结物。

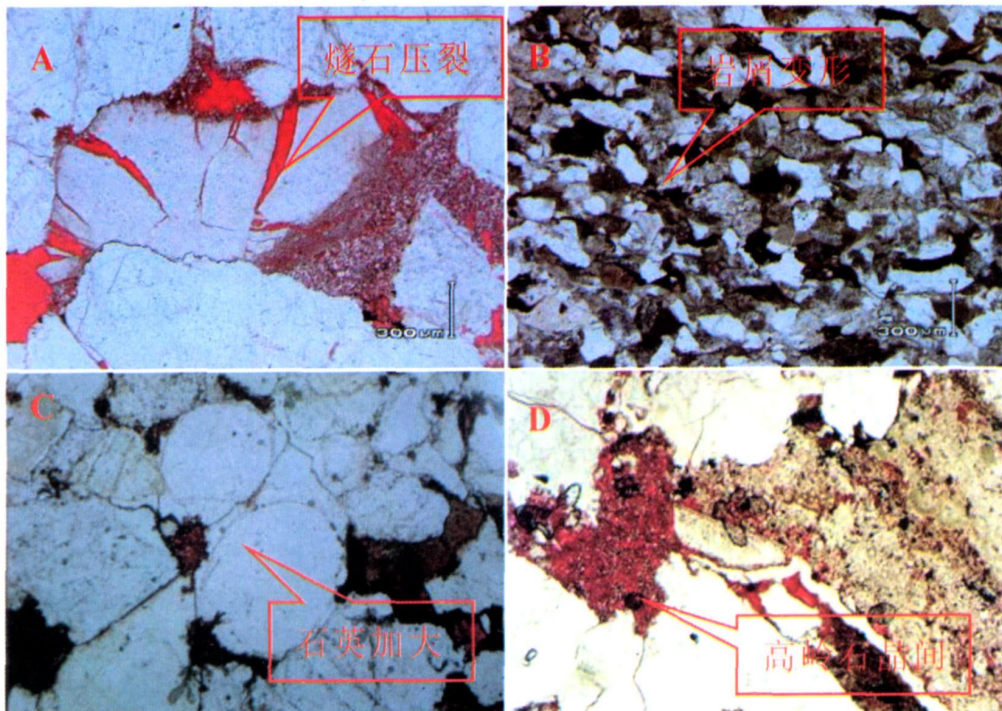


图 2 鄂尔多斯盆地山 2 及盒 8 成岩作用

A: 榆 37 2884.5 m SQ8 燧石压裂 B: 神 18 2131.9 m SQ9 压实作用软岩屑强烈变形

C: 苏 16 3345.8 m SQ11 石英加大 D: 陕 118 2899.8 m SQ8 高岭石晶间孔

Fig 2 The diagenesis of Shan 2 and He 8 in Ordos Basin

A: Yu 37 2884.5 m SQ8 flint fractures B: Shen 18 2131.9 m SQ9 intense deformation of soft debris under compaction C: Su 16 3345.8 m

SQ11 quartz overgrowth D: Shan 118 2899.8 m SQ8 kaolinite intercrystal pore

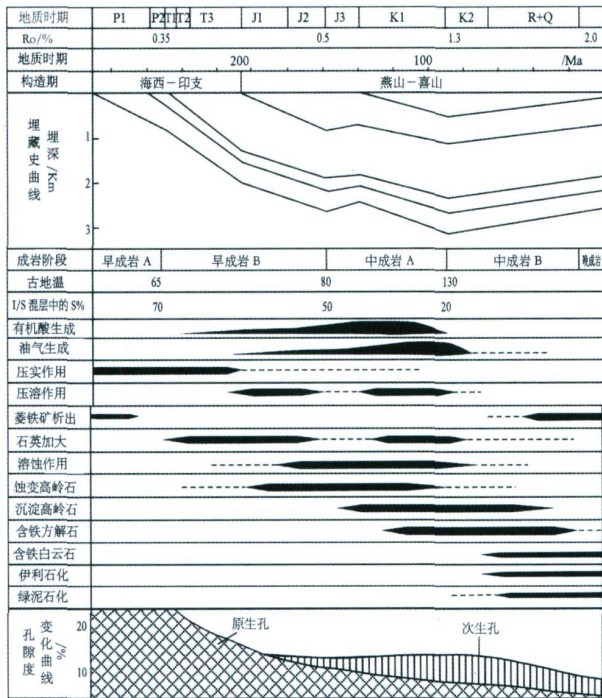


图 3 SQ8(山 2)储层孔隙演化模式
Fig 3 Pore evolution model of SQ8

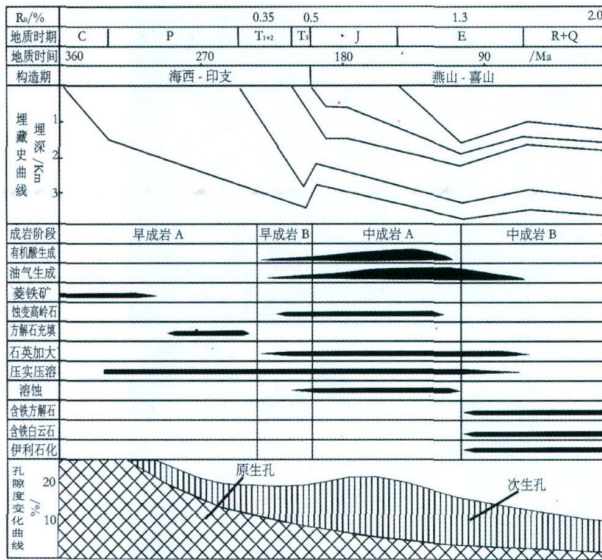


图 4 SQ11(盒 8下)储层孔隙演化模式
Fig 4 Pore evolution model of SQ11

4.2.2 苏里格气田 SQ11(盒 8下)成岩作用研究

在苏里格地区 SQ11(盒 8下)储层中,中、细砂岩中大量千枚岩、泥板岩等塑性岩屑在压实作用下发生形变,呈假杂基充填孔隙,形成以微孔为特征的致密储层,严重影响了储层的孔、渗性。同时硅质胶结物是本区储层普遍存在的自生胶结物,含量一般为 5%

~ 10%, 最高可达 10% ~ 18%, 随岩性不同差别较大,尤其在杂基含量低的石英砂岩和纯石英砂岩中,硅质成为主要胶结物,形成加大镶嵌致密结构。本区从早成岩阶段到晚成岩阶段均有碳酸盐胶结物形成,而且晚期碳酸盐的沉淀作用形成于石英次生加大以及溶蚀作用之后。铁方解石除了作为胶结物出现外,大量的铁方解石作为交代作用的产物出现,其含量比较结物大。

4.3 层序中体系域物性变化

通过对 SQ8 及 SQ11 各个体系域研究,其高位体系域是在湖平面相对上升速率不断降低时形成的,沉积物供给速率增大,所以砂岩沉积时的分选不好,导致储层压溶、高岭石充填作用明显,砂岩的类型以岩屑砂岩为主,仅在主河道方向有石英砂岩和岩屑质石英砂岩沉积。颗粒中石英含量约占 75% ~ 85%,岩屑的含量约 15% ~ 25%,主要为泥屑,而且多高岭石化。填隙物多为粘土杂基,含量稍高一些,约 5% ~ 10%;水侵体系域溶蚀较发育,低位体系域硅质胶结、溶蚀作用发育。下面以 SQ8 低位体系域的成岩作用的变化为例来进行说明。SQ8 低位体系域可分为三个准层序组,从下到上依次为 L1、L2、L3,其成岩作用不同,导致物性也发生变化(图 5)。

L1 准层序位于山 2 段底部,由于受下覆地层中泥灰岩的影响,物性相对较差。就所统计的数据来看,孔隙度主要集中在 2% ~ 6%,其中孔隙度在 2% ~ 4% 间的占总样品数的 38%,少量孔隙在 6% ~ 8% 之间,而渗透率则主要集中在 $0.01 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,大于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 占少数。L1 发育沉淀高岭石成岩相主要分布在三角洲平原分流河道砂体和研究区西南方榆 37 井附近的三角洲前缘水下分流河道砂体中。沉淀高岭石的产生与砂岩中不稳定组分的溶蚀密切相关,在砂岩中,不稳定组分溶蚀后,若孔隙结构较好,孔隙水流动性好,杂基中溶出的 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 等会被带走,仅有少量的沉淀下来,形成沉淀高岭石。

L2 准层序储层物性较好,孔隙度相差不大,主要集中在 4% ~ 8% 之间,其中孔隙度在 4% ~ 6% 之间的所占总样品的 31%,6% ~ 8% 之间的所占总样品的 27%,少量孔隙大于 8%,而渗透率则主要集中在 $0.1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,占总样品的 40%, $1 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间的渗透率占总样品的 20%,大于 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 占少数。在陕 215 附近河口坝砂体中,由于粒度较分流河道和下水分流河道砂体的粒

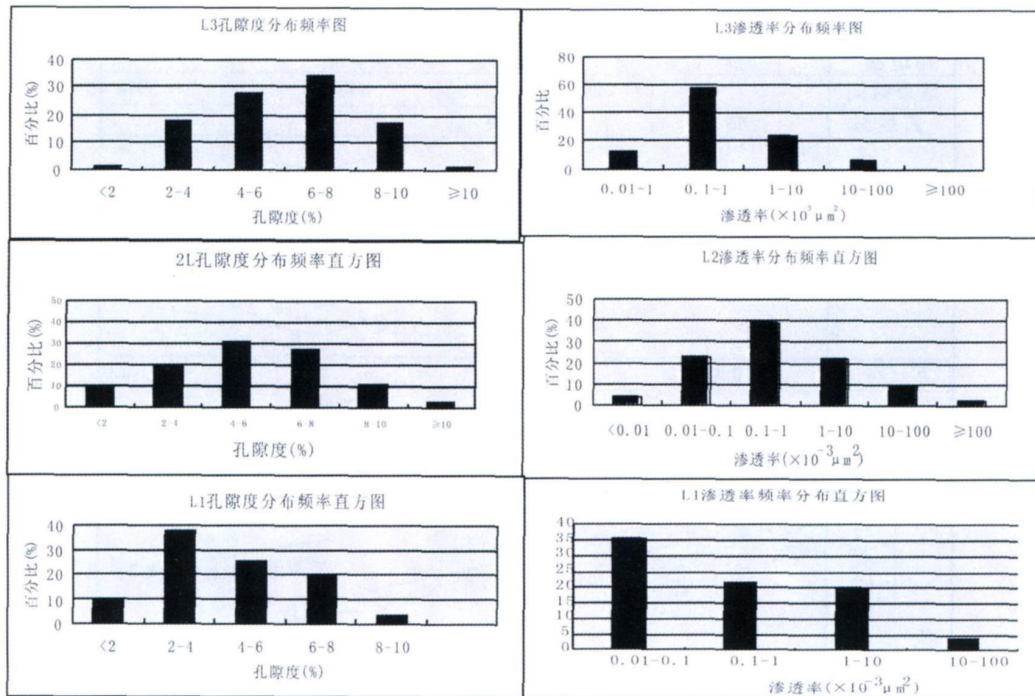


图 5 SQ8低位体系域三个准层序物性直方图

Fig 5 Petrophysical property histogram of three parasequences in SQ8-LST

度细,而且也受到东部物源的影响,物性相对较差,孔隙度主要集中在 4% ~ 6% 之间,而渗透率主要集中在 $0.1 \times 10^{-3} \sim 2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间。

L3 准层序储层物性最好,孔隙度主要集中在 4% ~ 10% 之间,其中孔隙度在 6% ~ 8% 之间的占总样品 33%, 8% ~ 10% 之间的占总样品 18%, 渗透率主要集中在 $0.1 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 其中渗透率在 $0.1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间的占总样品的 58%, $1 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间的占 22%。L3 准层序储层物性主要是因为该层序组靠近湖泛面,湖水频繁淘洗,导致砂岩中杂基含量较少,石英、长石含量高,同时受烃源岩排烃影响,岩石溶蚀作用较强烈,储层物性较好。L3 发育石英次生加大相,在本区分布广泛,其展布及强度主要受岩石岩性的影响,故在三角洲相成熟度较高的砂体中较发育。

4.4 定量化孔隙演化模式

在研究过程中,通过薄片观察、物性资料的统计,并结合前人的资料,对碎屑岩的孔隙演化进行了定量化的处理,得到了很好的结果。据 Beard 和 Weyl (1973) 的原始孔隙度计算方法,原始孔隙度 = $20.91 + 22.90/\text{分选系数}$ 。对 SQ8(山 2) 代表型储集砂岩计算的原始孔隙度为 29% ~ 36%, 并对榆林地区 SQ8(山 2) 纯石英砂岩、岩屑质石英砂岩和岩屑砂岩

的孔隙演化史进行定量分析(图 6)。

研究区纯石英砂岩初始孔隙度采用 34%, 目前的孔隙度为 8.3%, 纯石英砂岩在埋藏早期因碎屑组成长石、岩屑含量很少,压实作用减少的孔隙度较少,为 17.3%; 早成岩 B 期,由于纯石英砂岩中石英含量较高,早期压溶作用发育,强烈石英加大使孔隙度减少 5.9%, 故石英砂岩埋深达到 1900 m 时的孔隙度约为 10.8%; 进入中成岩 A 期后,纯石英砂岩中石英胶结物含量约为 3.5%, 加上 2% 左右的自生高岭石,由于胶结物作用损失的孔隙度为 5.5%, 而在此期间杂基、假杂基的溶蚀作用造成的纯孔隙增加有 4.5%, 因此,当砂岩埋深大于 3000 m 脱离酸性介质条件时,孔隙度为 9.8%; 中成岩 B 期碳酸盐胶结物的含量较少,(含铁)方解石、(含铁)白云石胶结物沉淀占据了 1.5% 的孔隙空间,使纯石英砂岩目前孔隙度约为 8.3%。

岩屑质石英砂岩与纯石英砂岩的演化模式相似。据统计本区岩屑砂岩最终孔隙度平均为 5.8% (其中包括高岭石重结晶形成的晶间孔隙), 岩屑砂岩在未压实前的初始孔隙度较少,为 30%。早成岩期抗压能力较弱,早期压实作用使孔隙度减少了 21.9%, 即岩屑砂岩在埋藏深达到 1900 m 时的孔隙约为 8.1%。进入中成岩 A 期,埋藏在 2500 ~ 3000 m 时,

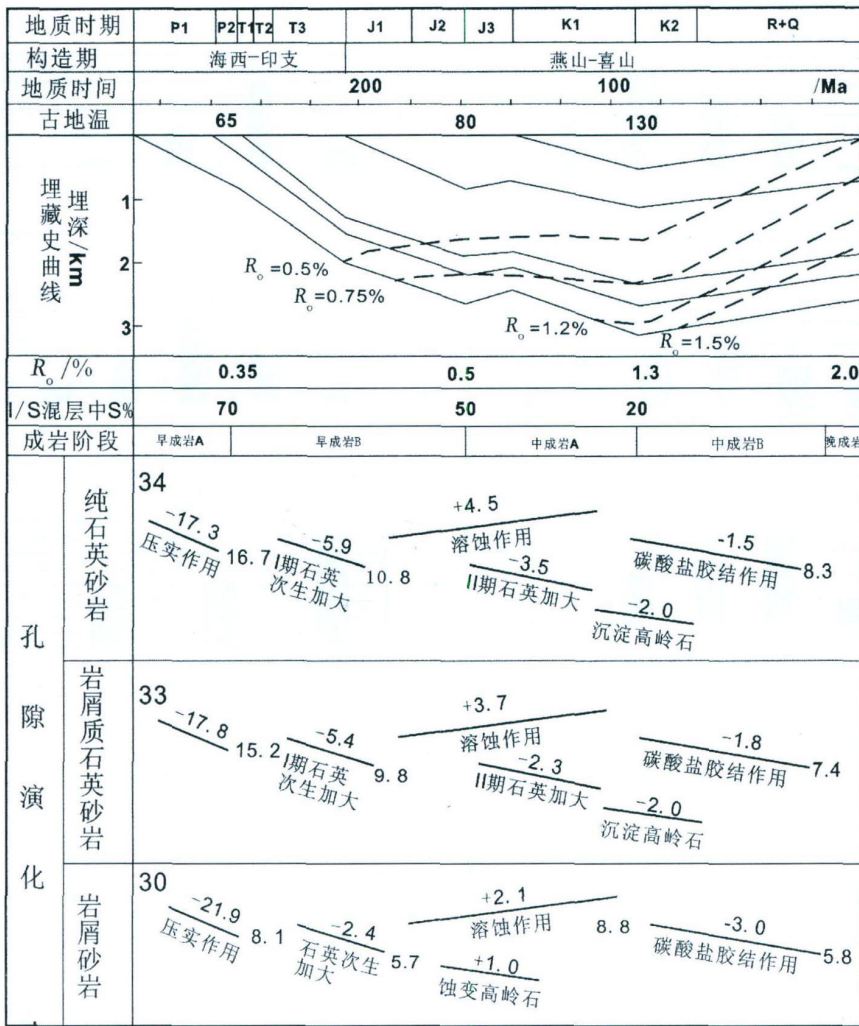


图 6 榆林 SQ8(山 2)砂岩定量孔隙演化

Fig 6 Quantitative pore evolution of sandstone of SQ8 (Shan 2), in Yulin area

因溶蚀作用和泥屑蚀变的高岭石晶间孔增加的孔隙度为 3 1%，本阶段也有少量的石英次生加大，但平均含量比石英砂岩和岩屑质石英砂岩中的少，约 2 4%，因此，当埋深大于 3 000 m 时，岩屑砂岩的孔隙度为 8 8%；中成岩 B 期(含铁)方解石和(含铁)白云石沉淀，占据的孔隙空间 3%，至此岩屑砂岩的孔隙度为 5 8%。

孔隙的演化处在层序的不同体系域中，其孔隙变化的大小也不尽相同。在层序高位体系域中，储集体压实、压溶作用比较强烈，一般孔隙最初减少的更快，中期受酸性水的影响不大，溶蚀作用不明显，孔隙增加不大；在层序低位域，储集体一般厚层堆积，粒度较粗，杂基含量一般较少，石英、长石含量多，因此成岩作用中期石英加大普遍，减少孔隙，而后随着烃源岩生烃作用，酸性水的流动，长石发生溶解，增大孔隙。

因此在同样一个层序格架里，处在不同的体系域中，由于成岩作用的变化，从而孔隙增减变化也不同。

5 层序体系域的成岩模式

不同层序具有不同的沉积环境，不同的沉积特征，从而具有成岩演化过程下的独特的成岩作用。鄂尔多斯盆地 SQ8、SQ11 发育时期都发育大型三角洲沉积体系。SQ8 处于煤系沉积背景下，储集体中粘土杂基以高岭石为主，其水环境开始主要为半碱性，容易形成碳酸盐胶结作用，中后期则出现大规模的高岭石溶蚀作用，同时石英次生加大现象在 SQ8 低位域砂岩储层中十分普遍，其发育程度与岩石组分、砂岩粒度、杂基含量有关。SQ11 时期岩性主要为岩屑砂岩及岩屑石英砂岩，主要出现硅质胶结、碳酸盐胶结成岩作用为主，高岭石在碳酸盐胶结物溶蚀后大量生

成, 充填孔隙, 并发育晶间孔。

5.1 SQ8(山 2段)储层—成岩发育模式

SQ8发育时期, 鄂尔多斯盆地总体处于煤系沉积背景下, 煤层主要发育于三角洲平原亚相, 砂岩储层主要发育于曲流河边滩、三角洲平原分流河道、前缘水下分流河道及河口坝微相, 在不同时期沉积储层具有不同的演化特征(图 7)。

早成岩 A 期: 沉积物尚未脱离沉积水体的影响,

故在三角洲前缘及湖泊相中以碱性—中性地层水环境为主, 主要成岩作用为早期泥晶碳酸盐胶结作用; 湖平面以上的三角洲平原及曲流河地区则广泛发育沼泽相沉积, 表现为酸性水介质环境, 其主要成岩作用为压实压溶和早期硅质胶结作用。在山前辫状河发育地区则主要处于中性—弱碱性的地表水环境, 成岩作用以泥晶碳酸盐胶结为主。

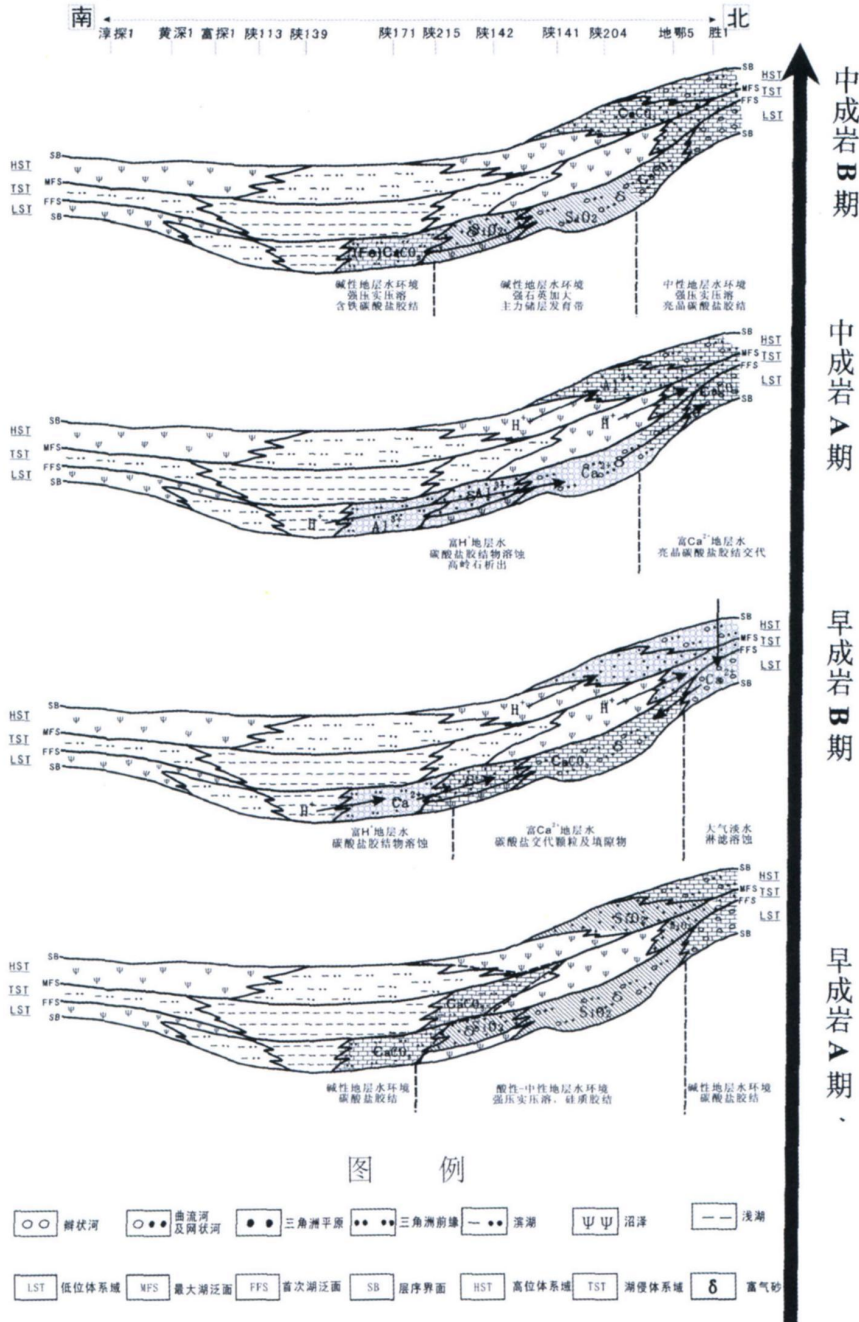


图 7 SQ8储层层序结构与成岩演化模式图

Fig 7 sequence structure and diagenetic evolution model of SQ8 reservoirs

早成岩 B 期: 随埋深的增加和压实作用的增强, 湖盆中心的有机质逐渐成熟, 地层流体表现为离心流的特征, 湖盆内烃源岩产生的有机酸首先进入相邻的三角洲前缘砂体中, 使其中的早期碳酸盐胶结物溶解; 溶出的富钙离子的地层水进入埋深更浅的三角平原及曲流河砂体中, 并由于 pH 值降低而析出, 形成对碳酸盐颗粒及填隙物的交代作用; 山前辫状河地区则受大气淡水淋滤, 具有一定的溶蚀作用。

中成岩 A 期: 在此阶段有机质充分成熟, 产生大量有机酸, 进入三角洲及曲流河道砂体中, 使其中的碳酸盐胶结物进一步溶蚀, 由于酸性增强, 部分不稳定岩屑及粘土矿物也开始溶蚀^[10], 析出的铝离子在酸性水介质条件下就近沉淀形成高岭石充填粒间; 辫状河沉积地区则由于富钙地层水的进入发育亮晶碳酸盐胶结交代。此阶段为次生孔隙发育的主要阶段。

中成岩 B 期: 在此阶段有机质过成熟, 地层水介质渐趋中性—弱碱性, 在三角洲前缘地区云母、泥岩等柔性岩屑含量高, 粒度较细, 故压实强烈, 同时该带还原作用较强, 暗色矿物较丰富, 晚期含铁碳酸盐胶结也比较发育; 三角洲平原及曲流河—网状河道地区砂岩类型以中粗粒石英砂岩为主, 分选较好, 有一定的抗压实作用, 此阶段主要为石英压溶—次生加大作用, 有部分孔隙得以保存; 山前带则体现为强压实压

溶及亮晶碳酸盐胶结, 物性条件较好但成藏条件较差。此阶段是本区储层最终定型阶段, 决定了现今储层的展布特征。

5.2 SQ11(盒 8下段)储层一成岩发育模式

SQ11时期本区基本脱离煤系背景的影响, 早期较强的酸性水环境只在局部地区发育。早成岩 A 期受沉积水体影响, 在三角洲相中以碱性—中性地层水为主, 故主要发育早期泥晶碳酸盐胶结作用, 与之相邻的辫状河沉积则为中性—弱酸性地层水环境, 在此阶段主要发育硅质及泥晶碳酸盐胶结, 局部发育粘土矿物交代作用; 山前冲积扇则以碱性地层水环境的泥晶碳酸盐胶结作用为主。早成岩 B 期三角洲前缘地区主要发生早期碳酸盐胶结物溶蚀, 其后富钙离子的地层水再进入三角洲前缘及辫状河道砂体中, 形成碳酸盐胶结—交代作用。中成岩 A 期酸性地层水进入砂体中, 其溶蚀影响可越过坡折带, 抵达辫状河道上游, 同时溶出的铝硅酸盐形成高岭石充填溶孔。中成岩 B 期有机质过成熟, 地层水介质为弱碱性—中性, 其主要成岩—储层演化与 SQ8 类似, 河道砂体是较好的储层, 此外在三角洲前缘及三角洲平原地区由于早期碳酸盐胶结物的发育, 抗压实作用及后期溶蚀作用均较发育, 故其物性也较好。此阶段压实压溶及晚期胶结作用决定现今储层物性。

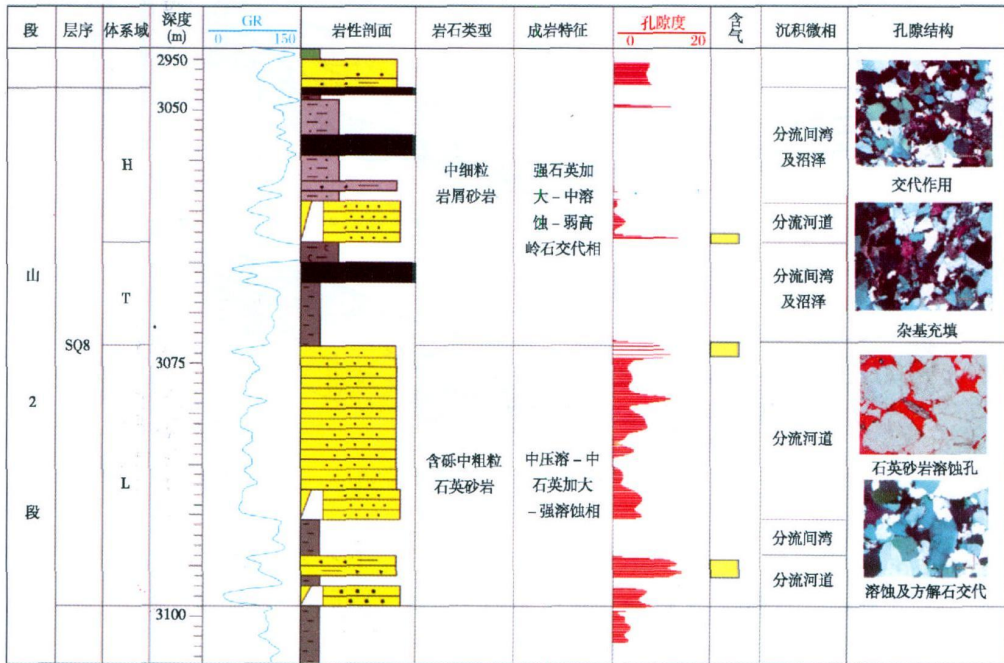


图 8 SQ8 不同体系域成岩作用 (以陕 193 为例)

Fig 8 Diagenesis of system tracts in SQ8 (for example of Shan 193)

6 成岩相分布及储层评价

6.1 层序体系域中的成岩作用

盆地北部持续性隆起为沉积体系的形成、沉积体系的延伸、沉积物搬运过程中的分异作用提供了优越的构造背景, 造就了层序地层格架内类型各异的沉积体系与沉积相, 同时也造成不同体系域成岩作用的不同(图 8)。整个 SQ8 层序厚度较小, 成岩环境变化不大, 高位到低位受埋深作用影响最大的为压实、压溶作用, 其它成岩作用受埋深的影响较小。

低位体系域主要发育含砾中、粗砂岩, 岩石以低结构成熟度和低成分成熟度为特征, 岩石类型以石英砂岩为主; 胶结类型以孔隙为主, 另见基底—孔隙式和孔隙—接触胶结类型。由于储层埋深在 3 000 m 左右, 因此碎屑颗粒接触关系紧密, 一般为线或点—线接触关系, 以中压溶—强溶蚀—中石英加大成岩相为主, 孔隙度较好, 最高可到 16%。

水侵及高位体系域以发育中粒砂岩为主, 岩石类型以岩屑砂岩为主, 石英含量为 45% 左右, 长石含量为 15% 左右, 岩屑 30%, 泥质 3% ~ 8%, 并含钙质。结构成熟度较高, 分选中等至好。碎屑颗粒接触关系紧密, 为点—线接触关系。早期方解石溶解所形成的次生孔隙大部分被高岭石胶结物充填, 同时受到的压实作用较弱, 晚期方解石胶结作用普遍, 方解石溶解形成的次生孔隙很大, 自生高岭石含量比较高, 高岭石充填分布很明显。

6.2 成岩相平面分布与储层评价

在研究成岩阶段、成岩作用的基础上, 结合孔隙的演化模式, 分析各层序的成岩相展布特点。研究区主要发育五种成岩相: ①强压溶—石英加大—溶蚀相; ②压溶—碳酸盐溶蚀—高岭石交代相; ③溶蚀—弱杂基充填—高岭石交代相; ④强压实—粘土胶结相; ⑤强压实—碳酸盐胶结、交代相。其中, ①强压实—石英加大—溶蚀相通常形成本区优质天然气储层, 主要分布于苏里格庙、乌审旗盒 8(SQ11~12)和榆林地区山 2(SQ8)砂体中。②压溶—碳酸盐溶蚀—高岭石交代相在盒 8 段三角洲前缘部位较发育, 如鄂 6 井 3 467~3 475 m 井段盒 8 段砂岩溶蚀作用充分, 粒间溶蚀孔隙面孔率达 2.5%, 高岭石晶间孔平均为 3.2%, 压汞测试孔隙度达 13.8%, 平均渗透率为 $0.93 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。③溶蚀—弱杂基充填—高岭石交代相是苏 6、8、9、10、12 和 18 井等盒 8 段河道砂岩、

分流河道砂岩常见的成岩相类型。④强压实—粘土胶结相代表河流改道、侧向迁移, 河道废弃化的特征, 其中下部为分选磨圆较好的粗粒砂岩, 不稳定组分的蚀变、溶蚀形成以高岭石晶间孔为主, 含少量溶孔、粒间孔的孔隙分布特征, 面孔率达 5.8%; 上部为高杂基废弃河道沉积, 细鳞片状水云母充填了粒间孔隙, 面孔率小于 1%。⑤强压实—碳酸盐胶结、交代相主要发育在盆地近物源堆积的北部和盆地的东部。

根据前面成岩阶段划分、次生孔隙成因及孔隙演化模式分析, 建立了成岩相划分特征和依据, 从而可以预测有利储层分布(图 9)。本区上古生界碎屑岩储层可分为三类。I 类储层岩石类型以石英砂岩为主, 孔隙结构以粒间溶孔为主, 有少量的高岭石晶间孔, 发育的成岩作用主要有压溶作用、中等石英加大作用和强烈的溶蚀作用, 成岩相的类型主要是强压溶—石英加大—强溶蚀相, 溶孔发育, 储集性能好。II 类储层以石英砂岩和岩屑石英砂岩为主, 储层物性较好, 孔隙组合以粒间溶孔为主, 有少量的高岭石晶间孔, 成岩相类型为压溶—碳酸盐溶蚀—高岭石交代相及溶蚀—弱杂基充填—高岭石交代相。III 类储层岩石类型主要为岩屑砂岩, 砂岩中杂基含量较多, 储层的物性较差, 孔隙组合以少量的粒间溶孔为主, 另有少量的岩屑或长石溶孔, 主要的成岩相类型是强压实—粘土胶结相及强压实—碳酸盐胶结、交代相。

7 结论

(1) 研究区主要发育石英砂岩、岩屑砂岩、杂砂岩、牛毛毡砂岩、黑色石英砂岩 5 种主要的岩石类型, 碎屑颗粒富石英和岩屑, 贫长石, 填隙物类型多, 以高岭石和伊利石为主。

(2) 建立了盆地上古生界层序格架, 在层序格架下研究了储层成岩演化特征: SQ8(山 2) 压实作用较发育, 少量石英次生加大存在, 大量杂基蚀变为高岭石, 充填孔隙, 自生高岭石较少, 溶蚀作用不甚发育, 碳酸盐胶结明显; SQ11(盒 8 下) 硅质胶结物发育, 从早成岩阶段到晚成岩阶段均有碳酸盐胶结物形成, 而且晚期碳酸盐的沉淀作用形成于石英次生加大以及溶蚀作用之后。

(3) 研究区主要发育的成岩相有: ①强压溶—石英加大—溶蚀相; ②压溶—碳酸盐溶蚀—高岭石交代相; ③溶蚀—弱杂基充填—高岭石交代相; ④强压实—粘土胶结相; ⑤强压实—碳酸盐胶结、交代相。

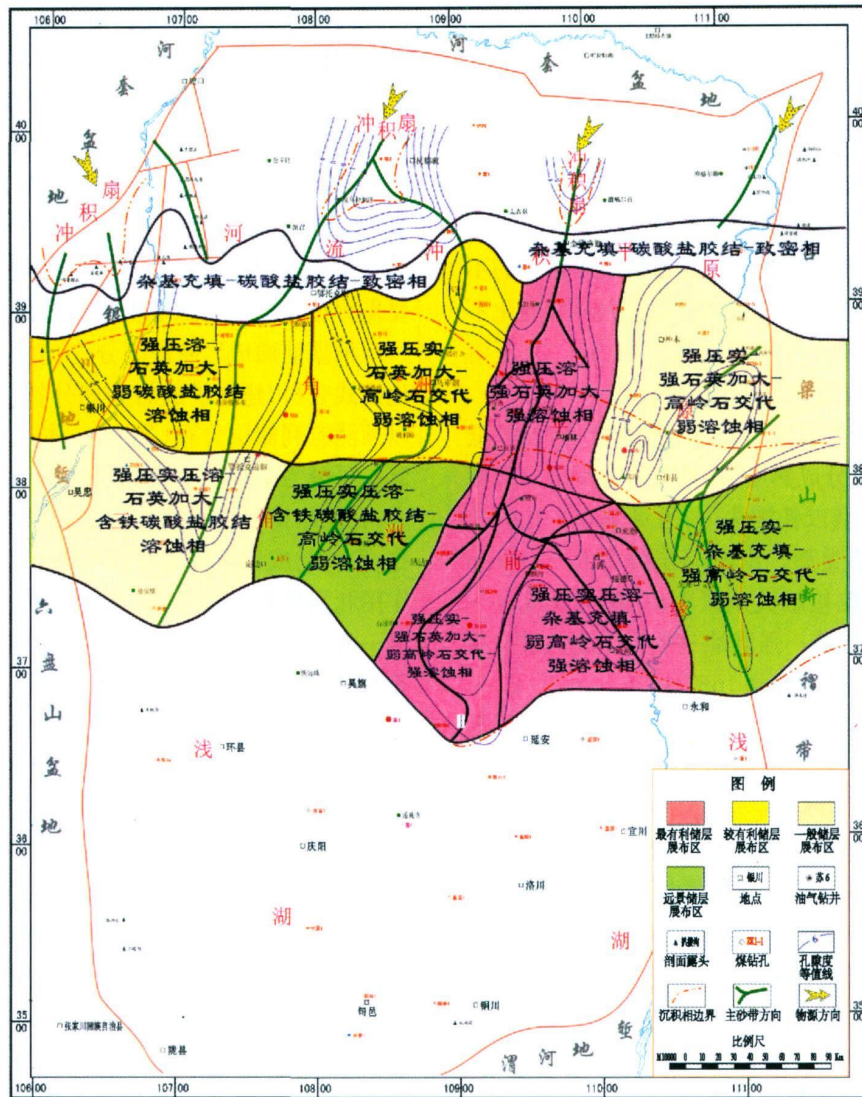


图 9 盆地 SQ8 低位体系域储层评价图

Fig 9 Reservoir evaluation of LST in SQ8(Shan 2)

(4) 成岩相 ① 主要形成 I 类储层; 成岩相 ②、③ 主要形成 II 类储层; 成岩相 ④、⑤ 主要形成 III 类储层。通过成岩相平面分布, 对储层的分布进行了预测。

参考文献 (References)

- 1 长庆油田石油地质志编写组. 中国石油地质志. 北京: 石油工业出版社, 1992 [Editorial Committee of "Petroleum Geology of China Petroleum Geology of China Beijing Petroleum Industry Press 1992]
- 2 陕西地质矿产局. 陕西省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1986 [The Bureau of Geology and Mineral Resources of Shaanxi Province The Regional Geology of Shaanxi Province Beijing Geological Publishing House 1986]
- 3 郭英海, 刘焕杰. 陕甘宁地区晚古生代沉积体系. 古地理学报, 2000, 2(1): 19-30 [Guo Yinghai, Liu Huanjie. The Late Palaeozoic depositional systems of Shaanxi-Gansu-Ningxia area. Journal of Palaeogeography, 2000, 2(1): 19-30]

- 4 陈洪德, 侯中健, 田景春, 等. 鄂尔多斯地区晚古生代沉积层序地层学及盆地构造演化研究. 矿物岩石, 2001, 21(3): 16-22 [Chen Hongde, Hou Zhongjian, Tian Jingchun, et al. Study on sequence stratigraphy of deposits and tectonic-sedimentary evolution in Ordos Basin during Late Palaeozoic. Journal of Mineralogy and Petrology, 2001, 21(3): 16-22]
- 5 朱筱敏, 康安, 王贵文, 等. 鄂尔多斯盆地西南部上古生界层序地层和沉积体系特征. 石油实验地质, 2002, 24(4): 327-333 [Zhu Xiaomin, Kang An, Wang Guiwen, et al. The Upper Palaeozoic sequence stratigraphic and sedimentary system characteristics of the Southwest Ordos Basin. Petroleum Geology and Experiment, 2002, 24(4): 327-333]

- 6 邓礼正. 鄂尔多斯盆地上古生界储层物性影响因素. 成都理工大学学报(自然科学版), 2003, 30(3): 270-272 [Deng L izheng Influential factors on physical property parameters of Upper Paleozoic reservoirs in Ordos basin. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2003, 30(3): 270-272]
- 7 胡宗全. 鄂尔多斯盆地上古生界砂岩储层方解石胶结物特征. 石油学报, 2003, 24(4): 40-43 [Hu Zongquan Calcite cements in Upper Paleozoic sand reservoir of Ordos Basin. Acta Petrolei Sinica 2003, 24(4): 40-43]
- 8 朱宏权, 徐宏节. 鄂尔多斯盆地北部上古生界储层物性影响因素. 成都理工大学学报(自然科学版), 2005, 32(2): 133-137 [Zhu Hongquan Xu Hongjie Factors affecting reservoir properties of Upper Paleozoic in Ordos Basin. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2005, 32(2): 133-137]
- 9 李凌, 王兴志, 方少仙, 等. 鄂尔多斯东部上古生界储层特征及控制因素. 西南石油学报, 2002, 24(6): 4-6 [Li Ling Wang Xingzhi Fang Shaoxian *et al.* Reservoir characteristics and controlling factors of the Upper Paleozoic sandstone, Eastern Ordos Basin. Journal of Southwest Petroleum University, 2002, 24(6): 4-6]
- 10 赵国泉, 李凯明, 赵海玲, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气储集层长石的溶蚀与次生孔隙的形成. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 53-55, 75 [Zhao Guoquan Li Kai ming Zhao Hailing *et al.* Feldspar corrosion and secondary pore formation in the Upper Paleozoic gas reservoir Ordos Basin. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(1): 53-55, 75]

The Diagenesis in Sequence Stratigraphic Framework of the Upper Paleozoic Ordos Basin

LIX i zhe¹ ZHANG M an-lang¹ XIE W u-ren¹ JI H an-cheng²

(1. Langfang Branch of Research Institute of Petroleum Exploration and Development Langfang Hebei 065007;

2. China University of Petroleum, Beijing 102249)

Abstract In the Ordos Basin, the Upper Paleozoic could be divided 5 types of sandstone, mainly including quartz sandstone, lithic sandstone, graywacke, "felly" sandstone, black quartz sandstone, etc. These types of sandstone have some characteristics as that the compositional maturity of the sandstone are relatively high; the textural of the sandstone are relatively medium to low; normal grading grain size is Coarse and Medium Grains; tuff fillings in the reservoir have multitype, and their concentrations vary greatly. The reservoir experienced three important diagenesis phases that early compaction phase-seriously damaged and losing primary pore phase, intermediate diagenetic A phase-organic acids corrosion-Secondary Porosity development phase, intermediate diagenetic B phase-burial, pressurization and secondary cementation diagenesis phases. The main diagenesis of SQ 8 are pressure solution, kaolinite corrosion and quartz overgrowth, *et al.* The ones of SQ 11 are siliceous cementation and carbonate cementation. The diagenetic facies are divided into three grades and five types: the first is strong pressure solution-quartz overgrowth facies; the second is pressure solution-carbonate corrosion-kaolinite metasomatic facies and corrosion-weak matrix filled-kaolinite metasomatic facies; the third is strong compaction-clay cemented facies and strong compaction-carbonate cemented, metasomatic facies. The main reservoir of studying region is low porosity, low permeability sandstone, and mostly develops secondary pores, which include intergranular corrosion pores, and kaolinite intercrystal pores, few primary pores were preserved. Through multidisciplinary analysis of sand body distribution, reservoir diagenetic facies types and reservoir property, to predict the favorable reservoir distribution zone.

Key words rock type, diagenetic stage, diagenetic facies, reservoir predication