

doi:10.3799/dqkx.2014.051

# 岩石学组成及其成岩演化过程对致密砂岩储集质量与产能的影响:以鄂尔多斯盆地上古生界盒8天然气储层为例

罗静兰<sup>1</sup>,刘新社<sup>2</sup>,付晓燕<sup>2</sup>,李 杪<sup>1</sup>,康 锐<sup>2</sup>,贾亚妮<sup>2</sup>

1.西北大学大陆动力学国家重点实验室,陕西西安 710069

2.中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司勘探开发研究院,陕西西安 710021

**摘要:** 在岩心观察基础上,通过常规、铸体与荧光薄片镜下观察与定量统计,图像粒度与图像孔隙、毛细管压力、孔隙度与渗透率、流体包裹体均一温度测定,结合 LA-ICP-MS 碎屑锆石微区 U-Pb 定年等物源示踪成果,研究了鄂尔多斯盆地北部上古生界盒8段致密砂岩的类型与岩石学组成及其成岩演化过程对各砂岩孔隙结构、储集性能与产能的影响。结果显示:砂岩类型、岩石学组分及其原始物性特征主要受源区母岩性质的控制,其经历的成岩演化过程存在一定差异,后者决定了各砂岩孔隙发育特征、储集性能的优劣及产能的大小。石英砂岩与岩屑石英砂岩经历了复杂的多期成岩作用过程,前者的粒间溶孔和高岭石晶间微孔与微溶孔发育,其储集性能及含气性最好;后者较发育的绿泥石薄膜保存了较多的原生粒间孔,加之粘土矿物与凝灰质填隙物中大量晶间微孔与微溶孔较发育,其储集性能与含气性次之。高塑性岩屑砂岩与钙质胶结砂岩经历的成岩演化过程相对较简单,前者经历早成岩阶段强烈压实作用后大部分已成为低孔低渗、部分成为致密储层;碳酸盐胶结物是导致钙质胶结砂岩低孔、低渗一致密储层的主要胶结物,此类砂岩经历中成岩阶段 A 期之后,基本成为致密的非储层。研究成果对于深入理解致密砂岩成岩—烃类充注演化序列及致密化过程与机理,寻找天然气储层“甜点”均具有重要的理论意义与实际意义。

**关键词:** 岩石学;成岩演化过程;储集性能;致密砂岩;上古生界盒8段;鄂尔多斯盆地。

**中图分类号:** P618.130; TE122.2

**文章编号:** 1000-2383(2014)05-0537-09

**收稿日期:** 2013-03-12

## Impact of Petrologic Components and Their Diagenetic Evolution on Tight Sandstone Reservoir Quality and Gas Yield: A Case Study from He 8 Gas-Bearing Reservoir of Upper Paleozoic in Northern Ordos Basin

Luo Jinglan<sup>1</sup>, Liu Xinshe<sup>2</sup>, Fu Xiaoyan<sup>2</sup>, Li Miao<sup>1</sup>, Kang Rui<sup>2</sup>, Jia Yanni<sup>2</sup>

1.State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China

2.Research Institute of Exploration and Development, Changqing Oil Field, PetroChina, Xi'an 710021, China

**Abstract:** Sandstone types, detrital components and cements, pore types and reservoir quality characteristics, differential diagenetic evolution processes resulted from sandstone types and their petrologic components, impact of the diagenetic evolution on pore structures, reservoir quality and gas yield of the He 8 tight gas-bearing sandstone reservoir, Middle Permian, Upper Paleozoic from the northern Ordos basin are studied, based upon observation of cores, identification and quantitative study of conventional, fluorescent and casting thin sections by vacuum impregnated with epoxy resin under microscope, image measurement of sandstone grain size, pores and pore throats, measurement of porosity and permeability, capillary pressure and homogenization temperature of fluid inclusions, combined with LA-ICP-MS detrital zircon in situ U-Pb dating provenance tracing. The results show that sandstone types and their petrologic components, primary reservoir capacity are controlled by provenance and parent rocks. Different sandstone types experienced differential diagenetic evolution processes and in turn resulted in differentia-

**基金项目:** 国家自然科学基金(No.41272138);国家重大科技专项(No.2011ZX05008-004-061)。

**作者简介:** 罗静兰(1957—),女,教授,主要从事碎屑岩储层沉积学与成岩作用、火山岩油气藏岩性与岩相学、储层特征及成岩作用研究。

E-mail: jlluo@nwu.edu.cn

tion in pores and pore throats development, thus reservoir quality and gas yield. Quartzarenite and sublitharenite have experienced relatively more complex multi-diagenetic processes, with inter-crystal micro-pores and micro-dissolution pores developed in kaolinite cements and inter-granular dissolution pores, turning quartzarenite into an excellent gas-bearing reservoir. A great quantity chlorite thin film formation on detrital grains have resulted in significant primary inter-granular pores preserved, together with a large number of inter-crystal pores in clay minerals and in interstitial tuff materials, turning sublitharenite into the second best gas-bearing reservoir. Diagenetic evolution of litharenite with high content of plastic fragments and calcareous cemented sandstone is relatively simple. Litharenite with high content of plastic fragments has experienced intensive compaction in early diagenetic phase, leading to rapid reduction of pores, of which the majority became reservoir with low porosity and low permeability and few turned into tight reservoir at that time; however, part of the primary pores in part litharenite are preserved, which could have formed gas-bearing reservoir if pore network formed by later dissolution event occurred in sandstones. Carbon cements are the major cement which led the calcareous cemented sandstone to be reservoir with low porosity and permeability to tight reservoirs, thus non-reservoir for natural gas. The results are of significance both in theory and practice, for the understanding of diagenetic-hydrocarbon filling and densification process and mechanism, and for tracing "sweet spots" in natural gas-bearing reservoir as well.

**Key words:** petrology; diagenetic evolution process; reservoir quality; tight sandstone; He 8 group of the Upper Paleozoic; Ordos basin.

前人对鄂尔多斯盆地上古生界含气砂岩的成岩作用研究显示,砂岩埋藏深度大、埋藏历史长、热演化程度高、成岩作用改造复杂,储层的孔隙演化与成岩演化关系密切(惠宽洋等,2002;张铭等,2002;朱宏权和张峭南,2004;赵国泉等,2005;赵文智等,2005;刘小洪等,2006,2010;丁晓琪等,2007;李向博和王建伟,2007;宁宁等,2007;罗静兰等,2010)。但上述成岩作用研究较少考虑母岩性质对砂岩类型及其岩石学组分等砂岩原始特征的控制,以及由此导致的成岩演化路径成岩产物及孔隙结构特征的差异等因素,从而忽略了储层储集性能、成岩演化的部分成因信息。

砂岩的物质成分及其在成岩演化过程中经历的物理的、特别是水-岩反应引起的化学成分的变化,将影响成岩产物的类型及其分布特征,后者直接导致各砂岩孔隙结构与储集物性的差异,并可能影响产能与开发效果。本研究通过多种分析测试手段,研究了鄂尔多斯盆地北部主力含气层盒 8 段母岩性质对砂岩类型、矿物组合与原始物性等原始特征的控制,分析了不同砂岩类型的成岩产物及其特征、成岩序列与成岩演化过程、孔隙结构及其对砂岩储集性能与产能的影响机理。该研究对于深入理解致密砂岩在成岩过程中发生的流体-岩石相互作用、成岩演化及其对砂岩储集性能的影响,以及砂岩致密化过程的机理,寻找更多的优质储层及天然气有利储集地带,加快鄂尔多斯盆地天然气的勘探开发步伐及增储上产都具有重要的理论意义与实际指导价值。

## 1 母岩性质对岩石学组分特征与原始物性的影响

### 1.1 源区与母岩性质

盒 8 砂岩中碎屑锆石的 LA-ICP-MS 微区 U-Pb 同位素峰期年龄 (2 000 ~ 1 800 Ma、2 450 ~ 2 350 Ma、400 ~ 300 Ma) 及次峰期年龄 (2 300 ~ 2 100 Ma) (图 1), 与前人揭示的阴山地块东部集宁地区孔兹岩系碎屑锆石的 2 060 Ma、1 940 Ma 和 1 890 Ma 3 期峰值年龄 (Xiao *et al.*, 2006), 西部乌拉山地区孔兹岩系碎屑锆石的 3 个峰期年龄 2 200 Ma、2 000 Ma 和 1 800 Ma (吴昌华等, 2006), 以及早元古界 TTG 片麻岩、麻粒岩和片麻状花岗岩的形成年龄 (1 800 ~ 2 500 Ma), 古生界花岗岩及

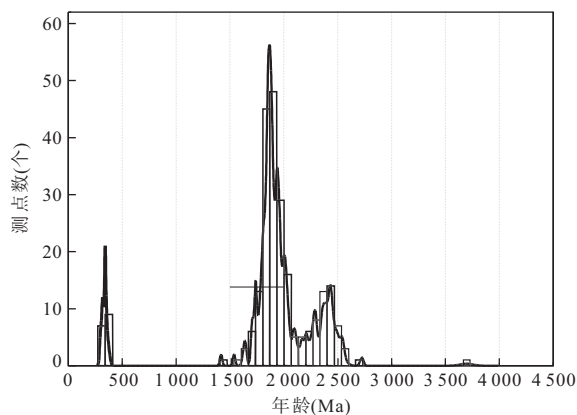


图 1 盒 8 砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄频率

Fig.1 Detrital zircon U-Pb dating age frequency from the He 8 sandstones

火山岩的年龄(300~400 Ma)(邵济安,1991;陈斌等,2001)可基本对应。盒8砂岩中出现的少量太古代古老岩石年龄( $3\ 690 \pm 35$  Ma),与华北克拉通东部陆块发现的 $>3.3$  Ga的变质岩系的岩石年龄(Gao *et al.*,2004)接近,也与华北克拉通其他地方发现的 $>3.3$  Ga的变质岩系的岩石年龄(Zhai *et al.*,2000)相似。结合前期对盒8段与山1段砂岩的重矿物组合、骨架矿物成分及其平面分布规律等研究成果(罗静兰等,2010),鄂尔多斯盆地北部上古生界沉积物源主要来自:阴山地块元古界孔兹岩、TTG片麻岩与片麻状花岗岩,阴山地块泥盆纪—石炭纪火山—岩浆活动产物,华北地块太古代古老变质岩系。

### 1.2 对砂岩类型及岩石学组分特征的影响

根据碎屑组分特征,盒8砂岩可分为石英砂岩、岩屑石英砂岩、高塑性岩屑(塑性岩屑含量 $>15\%$ )砂岩、钙质胶结砂岩(碳酸盐胶结物含量 $>15\%$ )4种砂岩类型。其碎屑成分、岩屑类型存在较明显的差别(图2)。石英砂岩以高石英(平均78.3%)、低岩屑(平均5.1%)为特点;高塑性岩屑砂岩的特点是高岩屑(平均27.5%),较低石英(平均60.8%)含量;岩屑石英砂岩中石英含量(平均67.9%)与岩屑含量(15.0%)介于上述两类砂岩之间;钙质胶结砂岩中石英含量最低(平均52.1%),岩屑含量(平均17.9%)中等。

砂岩类型与岩石学组分在平面上显示出一定分布规律:研究区西部主要为石英砂岩、浅变质岩+石英岩岩屑、重矿物锆石集中分布区;中部为岩屑砂岩与岩屑石英砂岩混合分布地带;东部主要为岩屑砂岩分布区(罗静兰等,2010)。岩屑石英砂岩分布区以浅变质+石英岩+火山岩+沉积岩岩屑组合、磁铁矿+褐铁矿+白钛矿重矿物组合为主;岩屑砂岩分布区主要为浅变质岩+火山岩岩屑组合、磁铁矿+褐铁矿+白钛矿+锆石重矿物组合。自北而南,由东向西,砂岩中的石英含量呈现逐渐增加的趋势,岩屑含量则逐渐降低。

由源区母岩性质与砂岩的岩石学组成平面分布特征可以推断,石英砂岩的物源主要受阴山地块早元古代富含石英与石英岩的孔兹岩带(或孔兹岩带所在的物源区)以及TTG片麻岩与片麻状花岗岩的控制;岩屑砂岩除受到孔兹岩带、TTG片麻岩与片麻状花岗岩的影响外,来自阴山地块的太古代古老变质岩与泥盆系—石炭系花岗岩及火山岩对其,特别是研究区东部高塑性岩屑砂岩的物质组成,也

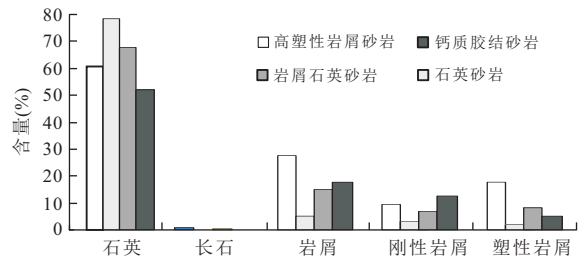


图2 砂岩类型及碎屑成分含量直方图

Fig.2 Histogram of the He 8 sandstone fragments

产生了较大影响;岩屑石英砂岩的物源同时受到与石英砂岩和岩屑砂岩相同物源的控制。

### 1.3 对砂岩的原始物性特征的影响

母岩性质决定了砂岩类型、原始矿物组合特征及砂岩的原始物性特征。计算结果表明,盒8段石英砂岩的原始孔隙度最高(在33.0%~36.4%之间,平均35.1%,44块样品);岩屑石英砂岩次之(在29.8%~36.4%之间,平均34.0%,135块样品);岩屑砂岩的原始孔隙度较低(在31.6%~36.4%之间,平均33.6%,84块样品),其中高塑性岩屑砂岩的原始孔隙度最低(在25.7%~35.7%之间,平均32.7%,34块样品)。钙质胶结砂岩的原始孔隙度在28.5%~35.8%之间,平均33.8%,7块样品)。

## 2 成岩—孔隙演化过程

母岩性质同时影响砂岩成岩作用过程与成岩产物的类型。不同的砂岩类型及其岩石学特征在成岩作用过程中发生的变化不同,胶结物成分及产状存在差异,因而对砂岩的孔隙演化有不同的影响,进而决定了孔隙发育状况、孔隙结构特征及储集性能的优劣。

### 2.1 各砂岩岩石学组分的差异性、成岩演化过程对砂岩孔隙发育的影响

对盒8段砂岩的成岩演化过程研究显示,高塑性岩屑砂岩的主要成岩作用事件发生在早成岩作用阶段(图3)。高含量的塑性岩屑(平均17.9%)受早期成岩阶段压实作用的影响发生塑性变形、吸水膨胀及与假杂基化(图4a),凝灰质杂基的蚀变产物(图4b)使大量粒间孔与喉道堵塞。砂岩中的塑性岩屑含量与孔隙度、特别是渗透率呈较明显的负相关关系(图5),当砂岩不发育微裂缝时,孔隙度 $>10\%$ 、渗透率 $>1$  mD的砂岩其塑性岩屑含量普遍小于10%。岩屑砂岩与高塑性岩屑砂岩由压实作用造成的平均

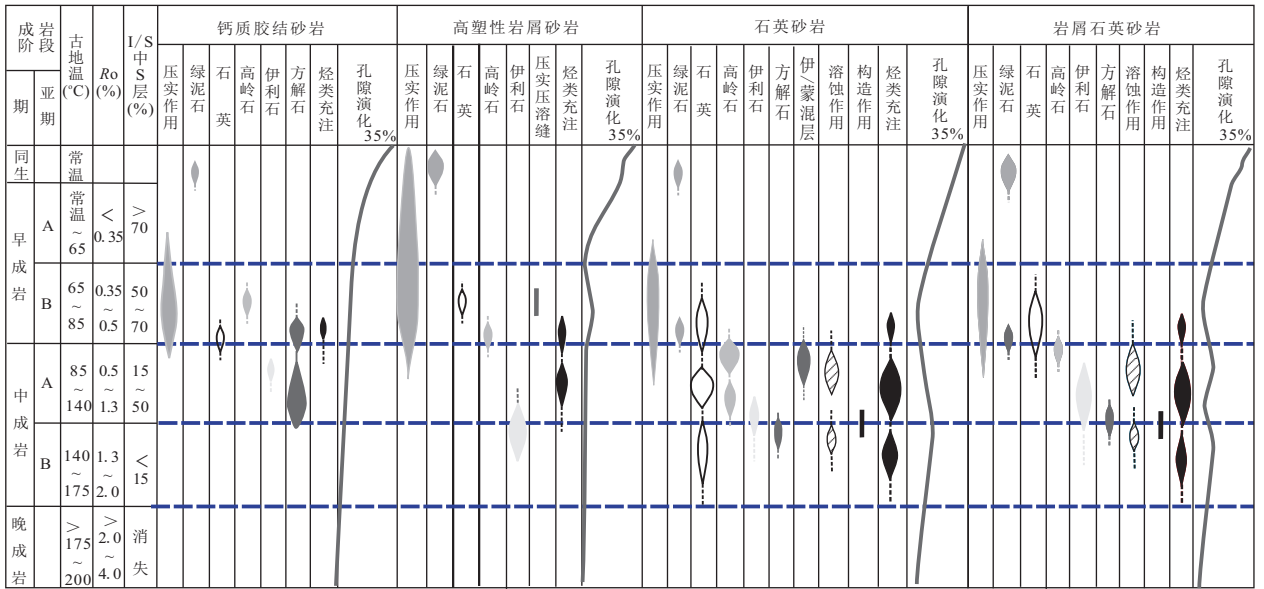


图 3 研究区盒 8 各砂岩储层成岩演化序列对比

Fig.3 Sketch shows diagenetic evolution sequences of the He 8 sandstone reservoirs

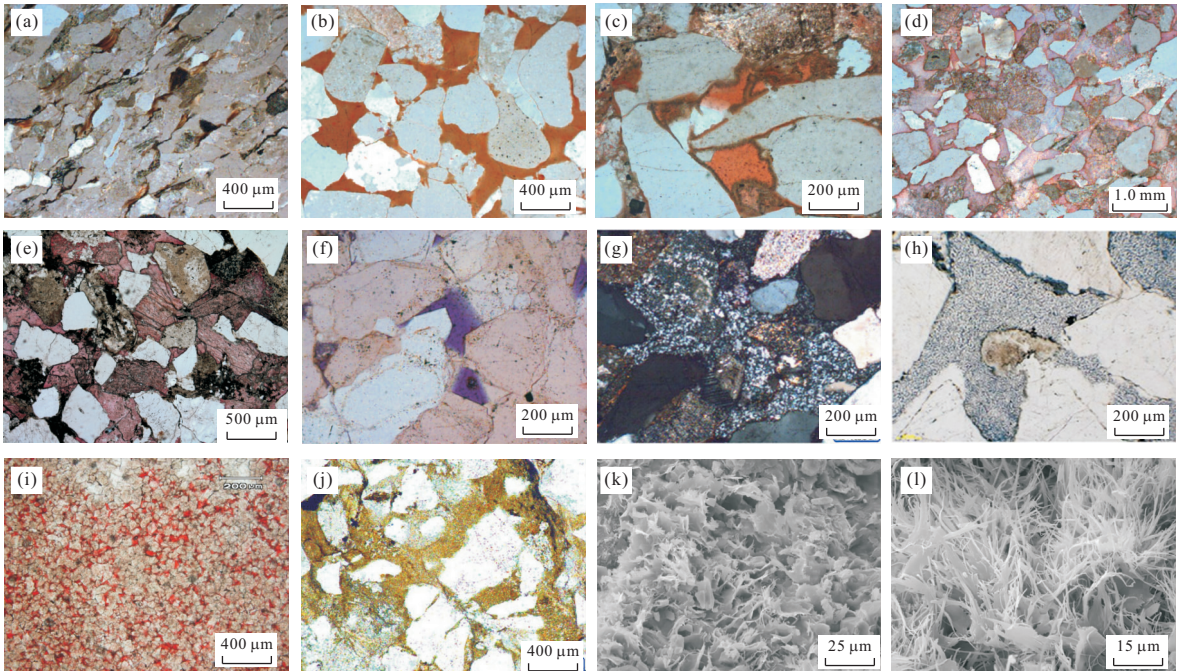


图 4 盒 8 砂岩储层岩石学与成岩演化特征照片

Fig.4 Photos show characteristics of lithology and reservoir evolution of He 8 sandstones

a.高塑性岩屑砂岩中塑性岩屑受压实作用变形致使粒间孔丧失殆尽.召 17 井,3 035.60 m;b.岩屑石英砂岩的粒间伊/蒙混层粘土矿物.统 21 井,2 788.72 m;c.石英砂岩中碎屑边缘的绿泥石薄膜使原生粒间孔得以保存.召 17 井,3 102.71 m;d.钙质胶结砂岩中的早期基底式方解石胶结,召 6 井,2 980.2 m;e.钙质胶结砂岩中的晚期孔隙式方解石胶结,神 8,1 972.45~1 972.55 m;f.石英砂岩中石英次生加大使部分粒间孔丧失.召 14 井,3 019.00 m;g.石英砂岩的粒间微晶硅质胶结物.统 21 井,2 970.76 m;h.石英砂岩的粒间高岭石胶结物发育晶间微孔隙(蓝色).召 65 井,2 903.46 m;i.石英砂岩的粒间高岭石胶结物发育晶间微孔与微溶孔(红色).召 23 井,3 057.88 m;j.岩屑石英砂岩的粒间伊利石胶结物.统 24 井,2 865.55 m;k.伊/蒙混层粘土矿物的晶间微孔隙.统 3-6 井,3 017.76 m;l.伊利石-埃洛石胶结物的晶间微孔隙.神 3 井,2 091.13 m

孔隙丧失分别为 18.3%和 22.8%，高塑性岩屑砂岩经历早成岩阶段后，孔隙基本丧失或丧失殆尽，成为

低孔低渗储层，部分甚至成为致密储层。

石英砂岩的塑性岩屑(平均 2.2%)、凝灰质(平

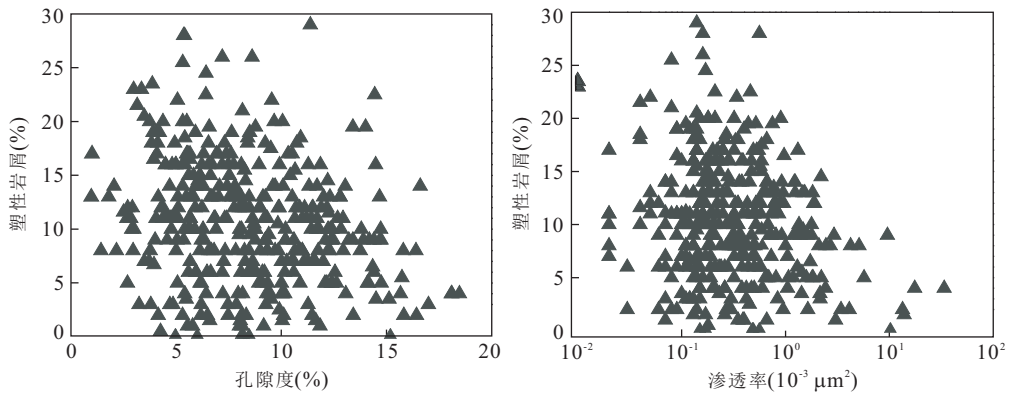


图 5 砂岩中塑性岩屑与物性关系

Fig.5 Correlation relations of plastic debris to porosity and permeability

均 0.2%) 含量较低,由压实作用造成平均 18.2% 的孔隙丧失.岩屑石英砂岩由压实作用造成的孔隙丧失(平均 17.7%)低于石英砂岩的主要原因可能是前者的绿泥石薄膜(图 4c)含量(平均 1.1%)明显高于后者(平均 0.3%),绿泥石薄膜阻止了其他自生矿物的沉淀,从而使较多的原生粒间孔得以保存.

2.2 胶结物对砂岩孔隙演化的影响

薄片鉴定与统计结果表明:盒 8 段各砂岩类型中胶结物类型及其含量存在一定差异.

高塑性岩屑砂岩由于主要受压实作用影响孔隙迅速减少,后期胶结作用及其产物的量(10.0%)受到限制,胶结物以伊利石(4.9%)为主,少量高岭石(1.6%)、硅质(1.4)、碳酸盐(1.2%)和绿泥石膜(0.8%)(图 6).由胶结作用造成的孔隙丧失率较低,平均仅为 6.2%.成岩演化序列较简单:绿泥石薄膜→烃类充注 I→压实作用→石英加大→高岭石→烃类充注 II—伊利石(图 3).

钙质胶结砂岩以碳酸盐胶结物为主(平均 23.50%),少量伊利石(平均 1.40%)、绿泥石(平均 0.12%)与高岭石(平均 0.09%)(图 6).经历的成岩作用相对较简单,其成岩演化序列为:绿泥石薄膜→烃类充注 I→压实作用→高岭石→方解石 I→伊利石→构造作用→方解石 II(图 3).钙质胶结砂岩中的碳酸盐胶结物可分为早期基底式(图 4d)与晚期为孔隙式(图 4e)胶结两种类型.成岩—烃类充注演化研究以及砂岩中方解石胶结物中流体包裹体均一温度(90~140 °C)测定结果显示,碳酸盐胶结物主要形成于中成岩阶段 A 期,是导致这类砂岩低孔、低渗—致密储层的主要胶结物,由胶结作用造成的孔隙丧失平均高达 21.40%.经历中成岩阶段 A 期之后,钙质胶结砂岩基本成为致密的非储层(其平均孔

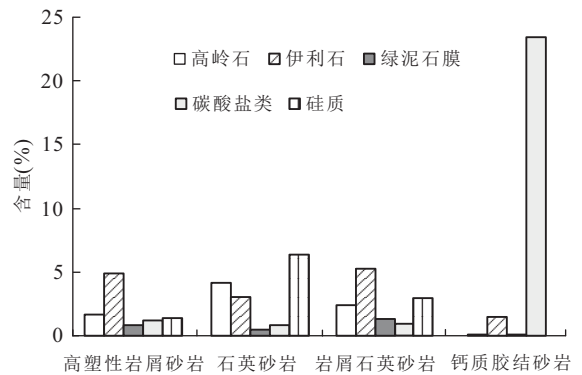


图 6 砂岩类型及胶结物成分直方图

Fig.6 Histogram of the He 8 sandstone cements

隙度 4.20%,面孔率为零).这类砂岩由压实作用造成的孔隙丧失率较低,平均 12.40%.但早期碳酸盐胶结物的存在为后期发生溶蚀作用形成次生溶孔奠定了物质基础.

石英砂岩与岩屑石英砂岩经历了较复杂的多期成岩作用过程,其中,石英砂岩的成岩演化序列为:绿泥石膜 I→烃类充注 I→压实作用→石英加大 I→绿泥石膜 II→石英加大 II→高岭石 I→伊/蒙混层→溶蚀 I→烃类充注 II→高岭石 II→微晶硅质→伊利石→构造作用→方解石→溶蚀 II→烃类充注 III(图 3).胶结物(15.20%)主要为硅质(6.40%)、高岭石(4.20%)与伊利石(2.90%),由胶结作用造成的平均孔隙丧失为 15.00%;岩屑石英砂岩的胶结物(12.60%)成分相对较复杂,包括伊利石(5.20%)、硅质(2.90%)、高岭石(2.40%)、绿泥石膜(1.10%)、碳酸盐(1.00%).

岩屑石英砂岩由胶结作用造成的平均孔隙丧失为 15.40%,其成岩演化序列如下:绿泥石膜 I→烃类充注 I→压实作用→石英加大 I→绿泥石膜 II→

高岭石 I → 伊/蒙混层 → 溶蚀 I → 烃类充注 II → 高岭石 II → 伊利石 → 构造作用 → 方解石 → 溶蚀 II → 烃类充注 III (图 3)。

石英砂岩中较发育的石英次生加大与粒间微晶硅质(图 4f, 图 4g, 图 6)使部分粒间孔损失, 但石英加大边对骨架颗粒的支撑抑制了压实作用的程度, 对原生粒间孔起一定保护作用。其中的粒间高岭石胶结物(图 4h, 图 4i)提高了砂岩的抗压性能, 并在深埋藏阶段向地开石转变过程中形成晶间微孔隙(图 4h)或在溶蚀作用过程中形成大量晶间微溶孔(图 4i)。

岩屑砂岩与岩屑石英砂岩中伊利石+伊/蒙混层粘土矿物与凝灰质填隙物(图 4b, 图 4h, 图 4k, 图 4l)含量(平均分别为 5.80% 和 7.00%)较高, 是造成砂岩孔、渗降低的主要胶结物之一。但随埋深与地温的增加、流体介质条件的改变, 蒙脱石可依次向伊/蒙混层 → 伊利石 → 埃洛石转变。这些粘土矿物中存在大量晶间微孔隙与微裂缝, 各砂岩中微孔隙含量与粘土矿物含量成正比, 岩屑石英砂岩、高塑性岩屑砂岩、石英砂岩中的微孔隙平均分别为 8.50%、7.80%、5.8%。盒 8 段各砂岩粘土矿物与凝灰质填隙物中存在多种晶间微孔与微溶孔(图 4b, 图 4h~图 4l), 是天然气十分重要的储集空间。

### 3 成岩演化过程对各砂岩储集性能与产能的影响

成岩作用的类型及其强度控制砂岩的孔隙结构特征。各砂岩的成岩演化过程的差异决定了其孔隙发育状况、孔隙结构特征及储集性能的优劣, 最终导致各砂岩的储集性能存在差异。

#### 3.1 各砂岩孔隙发育与物性特征

铸体薄片镜下统计结果表明, 石英砂岩的平均面孔率(3.70%)高于岩屑石英砂岩(2.00%)和高塑性岩屑砂岩(1.50%), 钙质胶结砂岩的面孔率几乎为零(图 7)。石英砂岩以粘土矿物晶间微孔(5.80%)和次生溶孔(2.40%)为主, 少量原生粒间孔(1.10%); 岩屑石英砂岩以粘土矿物晶间微孔(8.50%)为主, 其次是次生溶孔(1.80%); 高塑性岩屑砂岩以粘土矿物晶间微孔(7.80%)为主, 其次是次生溶孔(1.40%)。

实测孔隙度以岩屑石英砂岩最高(平均 10.50%), 其次是岩屑砂岩(平均 9.50%)与石英砂

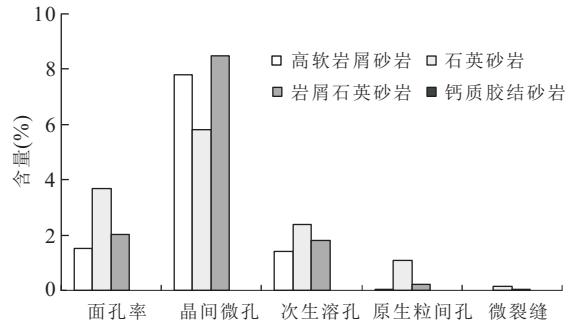


图 7 砂岩孔隙类型直方图

Fig.7 Histogram of the He 8 sandstone pore types

岩(平均 9.50%)。实测渗透率则以石英砂岩的渗透率最高(平均为 2.66 mD), 其次是岩屑石英砂岩(平均为 0.77 mD), 高塑性岩屑砂岩的渗透率最低(平均 0.39 mD)。

#### 3.2 砂岩的孔隙结构及其储集性能与产能

对于致密砂岩而言, 渗透率是衡量储集性能的主要参数, 而渗透率主要受与成岩演化过程密切相关的孔隙结构特征的影响。盒 8 砂岩的渗透率与毛细管压力主要孔隙结构参数关系表明, 门槛压力、中值压力、孔喉均值系数与渗透率呈明显的负相关性; 孔喉中值半径、变异系数与渗透率呈较明显的正相关性(图 8)。表明盒 8 砂岩的渗透率和储集性能主要与最大孔喉与平均孔喉大小及其连通性(即最大有效孔喉与平均有效孔喉大小)密切相关, 砂岩的孔喉越大, 其间的连通性越好, 渗透率与储集性能越好; 渗透率和储集性能好的砂岩, 其孔喉大小的分选性较差, 孔喉大小分布不均匀(即均值系数小、变异系数大)。

恒速压汞实验结果表明, 盒 8 段砂岩的孔隙度、特别是渗透率主要取决于: (1) 有效孔隙、特别是有效喉道的大小; (2) 有效孔隙与有效喉道数量与体积。盒 8 段各砂岩的主要孔隙区间(90~200  $\mu\text{m}$ )相差无几, 大部分属于中一大孔隙, 但各砂岩主峰喉道分布区间较宽(0.5~20.0  $\mu\text{m}$ , 细—粗喉道)。总体上, 孔隙度与渗透率较高的砂岩(以石英砂岩为主, 少量岩屑石英砂岩)其喉道略粗, 分布区间较宽(0.5~20.0  $\mu\text{m}$ ), 即分选性较差; 孔隙度与渗透率较低砂岩(岩屑砂岩和部分岩屑石英砂岩)的喉道半径峰值较小, 但分布较集中(0.5~3.0  $\mu\text{m}$ ), 即分选性较好。说明孔喉分选性较好的砂岩其孔隙、特别是喉道较细, 孔喉之间的连通性较差, 部分孔隙成为无效孔隙, 从而影响了砂岩的渗透性与储集能力。

图 8 同时显示出砂岩的粒度越粗其渗透率越高, 表明砂岩的储集物性也受沉积时水动力条件的

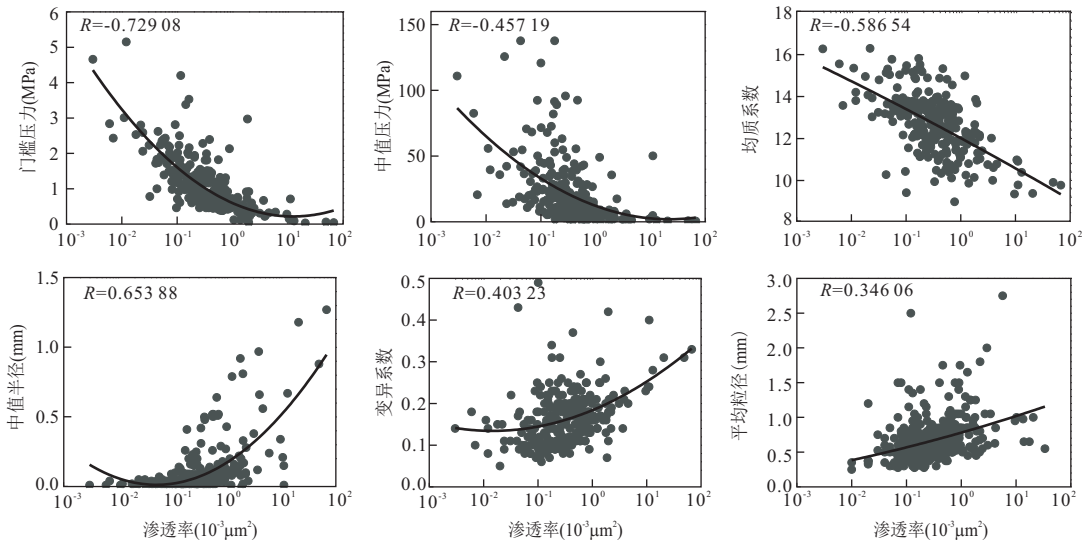


图 8 主要孔隙结构参数与砂岩渗透率关系

Fig.8 Correlation relation of the major pore parameters to permeability of He 8 sandstones

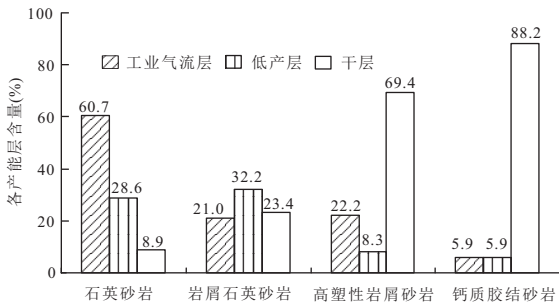


图 9 砂岩类型及天然气产能直方图

Fig.9 Histogram of He 8 sandstone gas yield

与低产层均占 5.9%，干层占 88.2%)(图 9)。

成岩演化最终形成不同的成岩相带.研究显示,盒 8 段砂岩成岩相的纵向叠置和配套关系直接影响天然气的产能.有利的成岩相带、成岩圈闭盖层的形成、天然气运移的输导层或优势通道的空间配置与组合是形成高产天然气藏的关键.目前已发现的高产气流井纵向上均显示出:下部为微裂缝发育或各种孔隙发育并且彼此连通较好的良好输导层,中部为储集性能有利的成岩相带,顶部多为钙质胶结等成岩致密圈闭盖层。

影响.因为沉积时的水动力条件越强,砂岩的粒度越粗,碎屑颗粒间的细粒杂基含量越低,原始孔隙结构较好,其在成岩演化过程中孔隙流体易与外界沟通成为相对开放的成岩环境而使其中的流体易于排出,从而在砂岩中形成较多连通的粒间孔隙,提高了砂岩的渗透性能。

致密砂岩的渗透率是决定其产能的主要指标,一般渗透率高的砂岩其产能也高.试气试采结果显示,以石英砂岩的含气性最好(图 9),55 个试气试采层中:工业气流( $>2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )层占 60.7%,低产( $(0.5 \sim 2.0) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )层占 28.6%,干层( $<0.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )占 8.9%;其次是岩屑石英砂岩(图 9),214 个试气试采层中:工业气流层占 21.0%,低产层占 32.2%,干层占 23.4%;高塑性岩屑砂岩的产能较低(图 9),33 个试气试采层中:工业气流层占 22.2%,低产层占 28.3%,干层占 69.4%;钙质胶结砂岩基本不含气,17 个试气试采层中:工业气流层

## 4 结论

(1)盒 8 段致密砂岩类型、岩石学组分与原始物性特征受源区母岩性质的控制.石英砂岩主要受阴山地块元古界富含石英与石英岩的孔兹岩系、TTG 片麻岩与片麻状花岗岩母岩的控制,其原始孔隙度最高;岩屑砂岩除受上述母岩影响外,来自阴山地块太古界古老变质岩与泥盆系一石炭系花岗岩及火山岩对其、特别是研究区东部高塑性岩屑砂岩的物质组分产生了较大影响,岩屑砂岩、特别是高塑性岩屑砂岩的原始孔隙度最低;岩屑石英砂岩同时受与石英砂岩和岩屑砂岩相同物源母岩的共同控制,其原始孔隙度介于石英砂岩与岩屑砂岩之间。

(2)高塑性岩屑砂岩经历早成岩阶段压实作用(导致高达 22.80%的孔隙丧失)孔隙迅速减少,大部分成为低孔低渗、部分成为致密储层,后期胶结作用

及其产物受到一定限制。碳酸盐胶结物是钙质胶结砂岩低孔、低渗一致密储层的主要胶结物,由胶结作用造成的孔隙丧失平均高达 21.40%,经历中成岩阶段 A 期之后,成为致密的非储层。压实作用是造成石英砂岩与岩屑石英砂岩储集性能变差(分别造成 17.70%和 18.20%的孔隙丧失)的主要因素,其次是胶结作用(分别造成 15.00%和 15.40%的孔隙丧失)。

(3)不同砂岩类型的成岩演化过程存在差异,其岩石学组分在成岩作用过程中发生的变化及其水-岩反应产物不同,进而决定了其孔隙发育状况、孔隙结构特征及储集性能与产能的优劣。石英砂岩中发育的石英次生加大是砂岩致密的主要胶结物,粒间高岭石胶结物提高了砂岩的抗压性能,其中发育大量晶间微孔与微溶孔,加之较发育的溶蚀孔使其储集性能及含气性最好;岩屑石英砂岩中较多绿泥石薄膜的形成保存了一部分原生粒间孔隙,其高含量的粘土矿物与凝灰质填隙物中的晶间微孔与微溶孔是天然气十分重要的储集空间,其储集性能与含气性次之;高塑性岩屑砂岩储集性能较差,但部分经历早成岩阶段之后仍然保留了一部分原生孔隙,如果后期溶蚀作用与构造作用形成较好的孔隙-裂缝网络,加之粘土矿物晶间微孔等,也可形成含气层;钙质胶结砂岩各类孔隙不发育,基本为非储层。

## References

Chen, B., Zhao, G. C., Wilde, S., 2001. Subduction- and Collision-Related Granitoids from Southern Sonidzuoqi, Inner Mongolia: Isotopic Ages and Tectonic Implications. *Geological Review*, 47(4): 361-367 (in Chinese with English abstract).

Ding, X. Q., Zhang, S. N., Zhou, W., et al., 2007. Characteristics and Genesis of the Upper Paleozoic Tight Sandstone Reservoirs in the Northern Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 28(4): 491-496 (in Chinese with English abstract).

Hui, K. Y., Zhang, S. N., Li, D. M., et al., 2002. Reservoir Petrology and Diagenesis of Lower Shihezi Formation and Shanxi Formation in Northern Ordos Basin. *Journal of Chengdu University of Technology*, 29(3): 272-278 (in Chinese with English abstract).

Li, X. B., Wang, J. W., 2007. The Formation and Evolution of Volcanic Dust Fillings of Sandstone in Coal Measures Strata of Ordos Basin. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26(1): 42-48 (in Chinese with English abstract).

Liu X. H., Feng, M. Y., Luo, J. L., et al., 2010. Characteristics

of Fluid Inclusions in Reservoirs in the Eighth Member of the Shihezi Formation and the First Member of the Shanxi Formation in Uxin Ju Area, the Ordos Basin and Their Significance. *Oil & Gas Geology*, 31(3): 360-366, 374 (in Chinese with English abstract).

Liu, X. H., Luo, J. L., Zhang, S., et al., 2006. Diagenesis and Diagenetic Facies of Gas-Bearing Sandstone Reservoirs from Shan 2 and He 8 Members of the Upper Paleozoic in Yulin-Shenmu Area, Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 27(2): 200-208 (in Chinese with English abstract).

Luo, J. L., Wei, X. S., Yao, J. L., et al., 2010. Provenance and Depositional Facies Control on Excellent Natural Gas Reservoir of the Upper Paleozoic in the Ordos Basin. *Geological Bulletin of China*, 29(6): 811-820 (in Chinese with English abstract).

Ning, N., Chen, M. J., Liu, R. E., et al., 2007. Upper Paleozoic Quartz-Sandstone Reservoir Diagenesis and Pore Evolvement, Eastern Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 18(3): 334-338 (in Chinese with English abstract).

Gao, S., Rudnick, R. L., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling Lower Continental Crust in the North China Craton. *Nature*, 432: 892-897. doi: 10.1038/nature03162

Shao, J. A., 1991. Crust Evolution in the Middle Part of the Northern Margin of Sino-Korean Plate. Peking University Press, Beijing, 11-91 (in Chinese).

Wu, C. H., Sun, M., Li, H. M., et al., 2006. LA-ICP-MS U-Pb Zircon Ages of the Khondalites from the Wulashan and Jining High-Grade Terrain in Northern Margin of the North China Craton: Constraints on Sedimentary Age of the Khondalite. *Acta Petrologica Sinica*, 22(11): 2639-2654 (in Chinese with English abstract).

Xiao, P. X., Min, S., Guo, C. Z., et al., 2006. LA-ICP-MS U-Pb Geochronology of Detrital Zircons from the Jining Complex, North China Craton and Its Tectonic Significance. *Precambrian Research*, 144: 199-212. doi: 10.1016/j.precamres.2005.11.004

Zhai, M. G., Bian, A. G., Zhao, T. P., 2000. The Amalgamation of the Supercontinent of North China Craton at the End of Neo-Archaean and Its Breakup during Late Palaeoproterozoic and Meso-Proterozoic. *Science in China (Series D)*, 43(Suppl): 219-232. doi: 10.1007/BF02911947

Zhang, M., Deng, H. W., Cui, B. C., et al., 2002. Controlling Factors of High Gas Production in the Upper Paleozoic of Wushenqi Gasfield, the Shanganning Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 24(2): 115-118, 125 (in Chinese with English abstract).

Zhao, G. Q., Li, K. M., Zhao, H. L., et al., 2005. Feldspar Cor-



rosion and Secondary Pore Formation in the Upper Paleozoic Gas Reservoir, Ordos Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 32(1): 53-55, 75 (in Chinese with English abstract).

Zhao, W.Z., Wang, Z.C., Chen, M.J., et al., 2005. The Formation Mechanism in the Upper Paleozoic Gas High Quality Reservoir, Ordos Basin. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 833 (in Chinese).

Zhu, H.Q., Zhang, S.N., 2004. Diageneses of Upper Paleozoic Reservoirs in North Ordos Basin. *Natural Gas Industry*, 24(2): 29-32 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

陈斌, 赵国春, Simon Wilde, 2001. 内蒙古苏尼特左旗南两类花岗岩同位素年代学及其构造意义. *地质论评*, 47(4): 361-367.

丁晓琪, 张哨楠, 周文, 等, 2007. 鄂尔多斯盆地北部上古生界致密砂岩储层特征及其成因探讨. *石油与天然气地质*, 28(4): 491-496.

惠宽洋, 张哨楠, 李德敏, 等, 2002. 鄂尔多斯盆地北部下石盒子组—山西组储层岩石学和成岩作用. *成都理工学院学报*, 29(3): 272-278.

李向博, 王建伟, 2007. 煤系地层中砂岩火山尘填隙物的成岩作用特征——以鄂尔多斯盆地天然气储层为例. *岩石矿物学杂志*, 26(1): 42-48.

刘小洪, 冯明友, 罗静兰, 等, 2010. 鄂尔多斯盆地乌审召地区

盒8、山1段储层流体包裹体特征及其意义. *石油与天然气地质*, 31(3): 360-366, 374.

刘小洪, 罗静兰, 张三, 等, 2006. 榆林—神木地区上古生界盒8段及山2段气层的成岩作用和成岩相. *石油与天然气地质*, 27(2): 200-208.

罗静兰, 魏新善, 姚泾利, 等, 2010. 物源与沉积相对鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气优质储层的控制. *地质通报*, 29(6): 811-820.

宁宁, 陈孟晋, 刘锐娥, 2007. 鄂尔多斯盆地东部上古生界石英砂岩储层成岩及孔隙演化. *天然气地球科学*, 18(3): 334-338.

邵济安, 1991. 中朝板块北缘中段地壳演化. 北京: 北京大学出版社, 11-91.

吴昌华, 孙敏, 李惠民, 等, 2006. 乌拉山—集宁孔兹岩锆石激光探针等离子质谱(LA-ICP-MS)年龄. *岩石学报*, 22(11): 2639-2654.

张铭, 邓宏文, 崔宝琛, 等, 2002. 陕甘宁盆地乌审旗气田上古生界高产控制因素研究. *石油实验地质*, 24(2): 115-118, 125.

赵国泉, 李凯明, 赵海玲, 等, 2005. 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*, 32(1): 53-55, 75.

赵文智, 汪泽成, 陈孟晋, 等, 2005. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气优质储层形成机理探讨. *地质学报*, 79(6): 833.

朱宏权, 张哨楠, 2004. 鄂尔多斯盆地北部上古生界储层成岩作用. *天然气工业*, 24(2): 29-32.