

松辽盆地龙西地区泉四段砂岩成岩序列及孔隙演化特征

连承波¹, 钟建华^{2,3}, 杨玉芳³, 渠芳¹, 杨军⁴

(1. 西南石油大学 资源与环境学院, 四川 成都 610500; 2. 中国石油大学 地球资源与信息学院, 山东 东营 257061;

3. 中国科学院 广州地球化学研究所, 广东 广州 510640; 4. 中国石油天然气集团公司

大庆油田有限责任公司 勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712)

摘要: 通过岩芯观察、镜下薄片、扫描电镜和 X 衍射分析等资料, 对松辽盆地龙西地区泉四段砂岩的岩石学特征、成岩作用类型、成岩阶段划分和成岩共生序列及孔隙演化特征进行了研究。结果表明: 龙西地区泉四段主要为长石质岩屑砂岩, 局部为岩屑质长石砂岩; 经历的主要成岩作用类型有压实作用、自生石英胶结作用、自生黏土矿物胶结作用、碳酸盐胶结作用、交代和溶蚀作用等; 龙西地区泉四段砂岩为中成岩阶段 A 期, 且细分为 A1 和 A2 亚期; 随着成岩演化, 压实和胶结作用使得原生孔隙减小, 而溶蚀作用使得储层孔隙结构得到改善; 孔隙类型由缩小粒间孔组成变为由缩小粒间孔和溶蚀粒间孔组合组成。

关键词: 成岩序列; 孔隙演化; 泉四段; 龙西地区; 松辽盆地

中图分类号: TE122.2 文献标志码: A 文章编号: 1672-6561(2010)02-0155-06

Characteristics of Quan-4 Formation Sandstone Diagenetic Sequence and Porosity Evolution in Longxi Area of Songliao Basin

LIAN Cheng-bo¹, ZHONG Jian-hua^{2,3}, YANG Yu-fang³, QU Fang¹, YANG Jun⁴

(1. School of Resources and Environment, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China;

2. School of Geo-resources and Information, China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong, China;

3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China;

4. Institute of Exploration and Development, Daqing Oilfield Company, China National Petroleum Corporation, Daqing 163712, Heilongjiang, China)

Abstract Based on core, cast thin section, scanning electron microscope, X-ray diffraction and so on, the characteristics of petrology, types of diagenesis, division of diagenetic stage, diagenetic concordant sequence and porosity evolution in Quan-4 Formation sandstone in Longxi area of Songliao Basin are studied. The results show that the lithology is mainly feldspathic litharenites, and secondly lithic arkose; types of diagenesis are compaction, authigenic quartz cementation, authigenic clay mineral cementation, carbonate cementation, metasomatism and dissolution; the diagenetic stage in Quan-4 Formation is A period mesogenetic stage, and divided into A1 and A2 substages; diagenetic compaction and cementation decrease the primary pore structure intensively, however dissolution improves it effectively; pore type is changed from reduced intergranular pore into combination of reduced intergranular pore and corrosion intergranular pore gradually because of diagenetic evolution.

Key words: diagenetic sequence; porosity evolution; Quan-4 Formation; Longxi area; Songliao Basin

0 引言

龙西地区在区域构造上与松辽盆地北部中央

拗陷区龙虎泡—大安阶地、东部齐家—古龙凹陷、西部斜坡区泰康隆起带相临。研究区东部为龙虎泡油田, 北临敖古拉油田, 东南为龙南油田。泉四

收稿日期: 2009-07-11

基金项目: 中国石油天然气集团公司创新基金项目(2002F70108)

作者简介: 连承波(1979—), 男, 山东荣成人, 理学博士, 从事储层地质学研究。E-mail: lianchengbo1999@163.com

段为其主要油层之一,下白垩统的泉头组第四段主要以浅水湖泊三角洲体系为主、滨浅湖为辅的沉积体系,其内砂体发育且分布广泛^[1]。上覆青山口组超高压压源泥岩,并有断层与其沟通疏导,具有得天独厚的油气成藏条件^[2-4]。泉四段砂岩油藏含油范围小且不稳定,油水关系十分复杂,砂体储层物性差,表现为明显的低孔低渗特征,储层物性是影响该区勘探开发进程的重要因素。储层及其储集性能既受沉积作用控制,又受到成岩作用的强烈影响^[5-11]。在评价储层时,研究成岩作用对砂体储集性能的影响非常有意义。龙西地区泉四段砂岩具有粒度细和成分成熟度低的特点,成岩作用对砂岩储层物性具有重要影响。弄清楚成岩作用是研究孔隙形成、发育条件和次生孔隙发育带的基础^[12-18]。为此,笔者对龙西地区泉四段砂岩岩石学特征、成岩作用类型、成岩阶段和成岩序列及孔隙演化进行了研究,以为龙西地区泉四段油藏的勘探开发决策提供参考依据。

1 岩石学特征

碎屑岩储集性能的好坏,直接受其物质成分和结构的影响,它不仅影响储集层原始孔隙的发育,而且还影响着成岩变化,因此,碎屑岩储集层的岩石学特征是研究成岩变化的主要依据。通过对龙西地区泉四段的岩芯观察以及薄片镜下鉴定,砂岩碎屑颗粒粒度一般为 0.05~0.25 mm,大多具有细粒结构,粉砂质结构次之,少量中粗粒结构和细粉砂结构。总体来看,砂岩粒度较细。砂岩分选性总体中等—较好,以细粒结构为主,夹少量中粒碎屑和粉砂级碎屑。碎屑颗粒以次棱角状为主,次圆状次之,磨圆度中等,风化程度中等,颗粒接触关系以点接触和线接触为主。胶结类型以再生式—薄膜式—孔隙式组合、薄膜—接触—再生组合和再生—薄膜—溶蚀组合为特征。大量的薄片镜下鉴定结果表明,龙西地区泉四段砂岩中颗粒数量百分比一般为 85%~95%,以岩屑为主,其次为长石和石英。岩屑颗粒数量一般为 40%~50%,平均 43%,岩屑类型为火山岩岩屑,主要为酸性喷发岩。长石颗粒数量一般为 25%~35%,平均 32%,正长石、斜长石均有,以正长石为主,可见少量具有格子双晶的斜长石。石英颗粒数量一般为 20%~30%,平均 25%,棱角一次棱角状,分选好,以单晶为主,见次生加大现象。根据 Folk^[19] 砂岩分类,泉四段砂岩主要为长石岩

屑砂岩为主,其次为岩屑长石砂岩(图 1)。胶结物主要有自生石英、碳酸盐矿物、自生黏土矿物及自生长石、黄铁矿和石膏等。

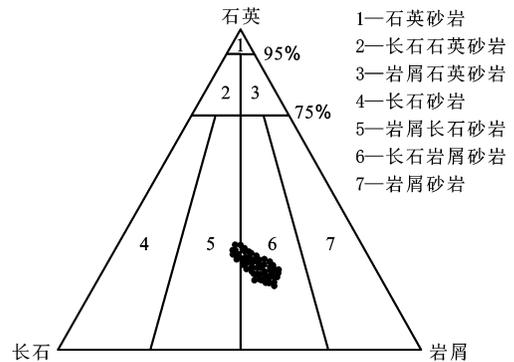


图 1 松辽盆地龙西地区泉四段砂岩分类

Fig. 1 Classification of Quan-4 Formation Sandstone in Longxi Area of Songliao Basin

2 成岩作用类型

龙西地区泉四段的埋藏深度为 1 500~2 100 m,其深度变化较大,成岩作用类型较多。根据对龙西地区泉四段大量砂岩样品的铸体薄片、扫描电镜、X 衍射分析,具体的成岩作用类型有压实作用、胶结作用、重结晶作用以及组分的溶蚀和溶解作用,其中胶结作用和压实作用导致孔隙减小,溶解作用和溶蚀作用有利于产生次生孔隙。

2.1 压实作用

压实作用指沉积物在上覆水体和沉积物的负荷压力下,不断排出水分,体积缩小,孔隙度降低的过程。随着孔隙度降低,沉积层的渗透率也相应降低。压实作用主要表现为颗粒发生压实定向。龙西地区泉四段砂岩随着压实作用的加强,碎屑颗粒接触关系由点到线接触变为线凹接触(图 2)。

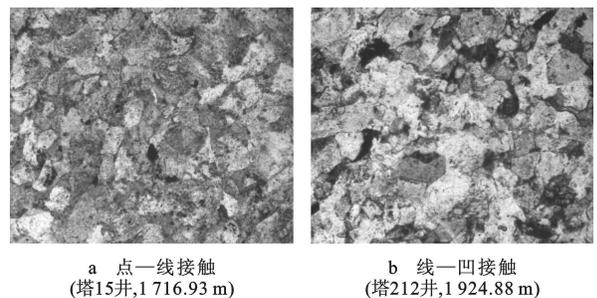


图 2 泉四段砂岩颗粒接触关系

Fig. 2 Grain Contact Types of Quan-4 Formation Sandstone

2.2 胶结作用

胶结作用指矿物在碎屑沉积物孔隙中沉淀并

使沉积物固结为岩石的作用, 它是碎屑岩的主要成岩作用。胶结物可由多种矿物组成, 在各种类型的砂岩中, 大部分胶结物是碳酸盐岩和硅质, 还有黏土矿物、沸石和其他硅酸盐矿物。通过薄片观察分析, 龙西地区泉四段砂岩胶结类型有孔隙式胶结、薄膜式胶结、充填式胶结、自生加大式胶结和接触式胶结。泉四段砂岩的胶结物成分有硅质胶结物、方解石、黏土矿物、褐铁矿、重晶石和黄铁矿, 其中石英、方解石、黏土矿物是研究区主要的胶结物。

2.2.1 碳酸盐胶结

龙西地区泉四段砂岩中碳酸盐胶结物以方解石占绝对优势, 铁白云石、菱铁矿和泥碳酸盐少见, 碳酸盐胶结物最高体积分数达 25%。研究区扶余油层方解石胶结物有泥晶和亮晶两种类型, 泥晶方解石一般分布于颗粒周围, 呈类似薄膜式分布; 亮晶方解石多分布于孔隙中, 多呈连晶形式分布(图 3)。一般认为龙西地区泉四段砂岩中大多数方解石胶结物形成于成岩作用阶段早期^[20]。早期方解石胶结物的主要特征为碎屑颗粒间充填有方解石胶结物。在早期方解石胶结的碎屑颗粒中, 只有极少量的碎屑石英边部发育次生加大边。方解石充填了颗粒之间的孔隙, 堵塞了部分的原生孔隙。

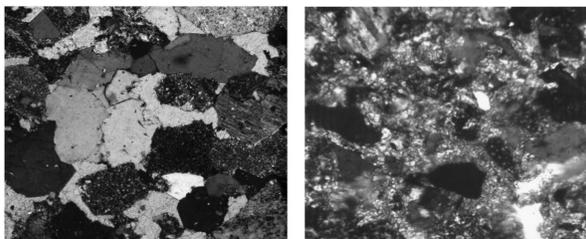


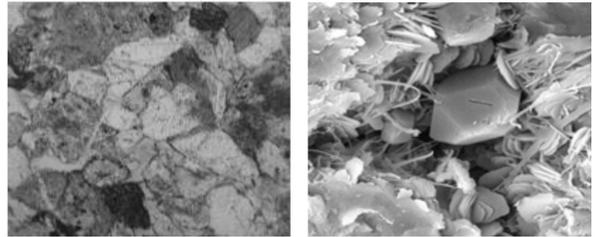
图 3 泉四段砂岩方解石胶结

Fig. 3 Calcite Cementation of Quan-4 Formation Sandstone

2.2.2 硅质胶结

硅质胶结是龙西地区扶余油层砂岩主要的胶结作用类型, 硅质胶结物主要以石英次生加大为主。石英胶结物在砂岩中很普遍, 但在杂砂岩中少见。石英沉淀不一定需要过饱和, SiO_2 质量分数达到每升几十毫克即可, 但需要孔隙水不断循环才能形成一定量的胶结物。镜下薄片观察表明, 硅质胶结有 2 种类型(图 4): 石英颗粒光性连续增生, 即石英自生加大, 常形成石英自形晶面, 在薄片普遍见到石英次生加大现象, 且加大边有宽有窄。孔隙

充填式胶结, 晚期次生石英形成于压实期之后。当石英颗粒边缘有黏土薄膜时不能形成连续的加大石英, 因而呈现孔隙充填式。孔隙充填石英是以自形石英晶体充填于黏土薄膜后形成的剩余孔隙空间。



a 石英次生加大
(塔182井, 1618.63 m)

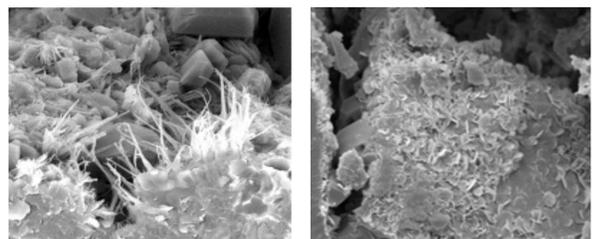
b 自生石英孔隙充填
(塔281井, 1849.93 m)

图 4 泉四段砂岩硅质胶结

Fig 4 Siliceous Cementation of Quan-4 Formation Sandstone

2.2.3 自生黏土矿物胶结

自生黏土矿物指成岩作用过程中, 孔隙水溶液过饱和而沉淀出的黏土矿物。龙西地区泉四段常见的自生黏土矿物主要为伊利石和绿泥石, 自生黏土矿物呈薄膜式胶结, 常与自生石英共生(图 5)。在扫描电镜下可观察到龙西地区泉四段的自生伊利石主要为搭桥状和发丝状充填于孔隙或附着于颗粒表面。泉四段砂岩中绿泥石胶结多呈微细叶片状或纤维状晶体垂直碎屑颗粒表面或孔喉壁生长, 常发育成孔隙内衬, 在碎屑颗粒接触处缺失, 可见部分绿泥石薄膜包围整个碎屑颗粒, 说明绿泥石薄膜形成于压实作用的同时或稍后, 是成岩作用早期阶段的产物。绿泥石胶结物除以孔隙衬边和薄膜包壳状产出外, 部分呈孔隙充填状产出, 多数充填残余粒间孔部分充填溶蚀孔隙, 表明这部分绿泥石形成时间较晚。



a 自生伊利石
(塔21井, 1908.65 m)

b 自生绿泥石
(塔285井, 1939.40 m)

图 5 泉四段砂岩自生黏土矿物胶结

Fig 5 Authigenic Clay Mineral Cementation of Quan-4 Formation Sandstone

2.3 交代作用

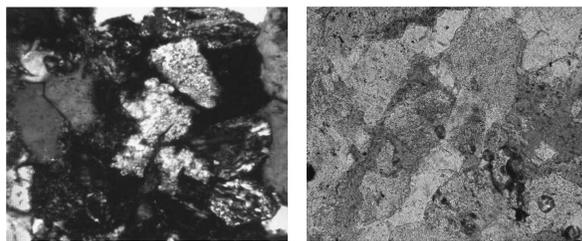
交代作用指矿物被溶解, 同时被孔隙所沉淀出

来的矿物所置换,新形成的矿物与被溶矿物化学成分组成不同。龙西地区扶余油层砂岩的交代作用主要有黏土化、方解石化、钠长石化,方解石化和钠长石化保持原矿物的形貌特征,对储层孔隙结构不产生明显影响,但黏土化使原矿物粒度细化,抗压性变弱;因此,对储层物性产生重要影响。

长石在弱酸性环境下发生黏土化,钾长石向伊利石、绢云母转长石的黏土矿化主要表现为长石表面上形成细小晶体。龙西地区泉四段砂岩中主要表现为长石表面的绢云母化和伊利石化,绢云母化晶体特征比较明显,伊利石化长石表面变得不干净。钾长石的钠长石化是龙西地区泉四段砂岩中的重要交代作用类型,龙西地区泉四段砂岩中钾长石的钠长石化比较普遍。方解石交代长石(特别是钾长石)是常见现象,方解石常沿长石边缘、解理缝或双晶缝进行交代,甚至可以深入长石碎屑晶体内部。龙西地区泉四段砂岩中其他交代作用有黏土杂基的方解石化、岩屑的方解石化和岩屑的黏土化。

2.4 溶蚀作用

溶蚀作用主要是使已有矿物(包括有碎屑成分和次生胶结物)完全或部分溶解,其作用是使不稳定或易溶解的矿物被溶解搬运或转化为其他稳定的矿物。随着埋藏深度增加,地层温度和压力增大,孔隙水和地层水的性质发生变化,部分矿物被溶解而形成次生孔隙。龙西地区泉四段砂岩碎屑组分常出现不同程度的溶蚀现象,普遍见到有的长石局部溶蚀,部分碳酸盐胶结物物质也被溶蚀(图 6)。



a 方解石溶解 (塔21井,2010.12 m) b 钾长石溶解 (塔21井,1896.84 m)

图 6 泉四段砂岩溶蚀作用

Fig. 6 Dissolution of Quan-4 Formation Sandstone

3 成岩阶段及成岩序列

松辽盆地龙西地区泉四段埋藏深度为 1 500 ~ 2 100 m, 流体包裹体的均一温度测试结果表明^[21-22]古地温为 90 ~ 120 °C, 地温梯度为 5 °C/100 m 左右, 处于中成岩阶段的 A 期。黏土矿物变化特征明显(图 7), 伊利石和绿泥石体积分数逐渐增加, 高岭石体积分数逐渐减少, 伊蒙混层体积分数先增加后逐渐减少。依据中国石油天然气集团公司行业标准^[23], 将龙西地区泉四段砂岩成岩作用阶段划分为中成岩作用阶段的 A 期, 具体细分为 A1 期和 A2 期。龙西地区泉四段黏土矿物的体积分数变化特征表明, 由于流体性质的变化, 伊蒙混层和高岭石体积分数响应变化明显, 在 1 900 m 左右高岭石大量减少, 而伊蒙混层由增加趋势变为减少的趋势, 这种体积分数变化反映了成岩环境变化; 因此, 本研究将 1 900 m 作为中成岩 A1 亚期和

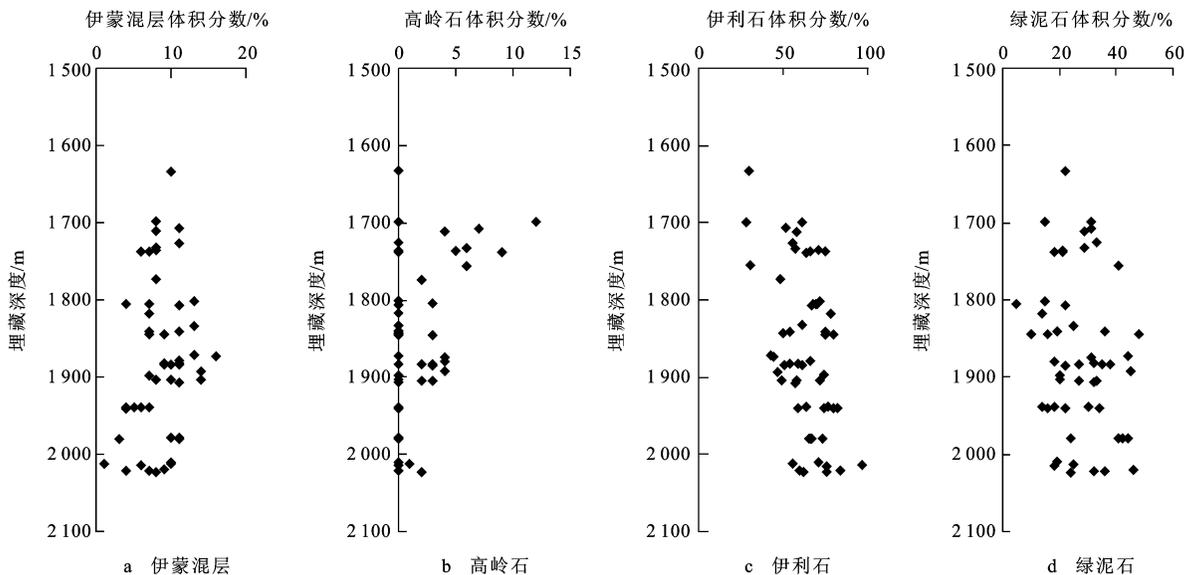


图 7 泉四段砂岩中黏土含量的垂向变化

Fig. 7 Vertical Variation of Clay Content of Quan-4 Formation Sandstone

A2 亚期的分界。

大量统计结果表明(图 8), 松辽盆地龙西地区泉四段砂岩随着成岩演化, 石英次生加大作用逐渐增强, 碳酸盐胶结物含量在中成岩 A1 亚期逐渐减少, 到 A2 亚期又逐渐增加, 钾长石的钠长石化作用由弱变强, 长石溶蚀作用由弱变强。其孔隙类型由缩小粒间孔为主要类型逐渐演变为缩小粒间孔和溶蚀粒间孔共生的组合孔隙类型。

为了分析松辽盆地龙西地区砂岩成岩过程的

动态模式, 综合成岩阶段划分和成岩作用演化的分析结果, 对松辽盆地龙西地区泉四段砂岩成岩共生序列及孔隙演化特征进行了系统总结, 详细特征如图 9。

4 结语

(1)松辽盆地龙西地区泉四段砂岩分选中等, 粒度较细, 成分成熟度较低, 主要岩石类型为长石质岩屑砂岩, 其次为岩屑质长石砂岩。

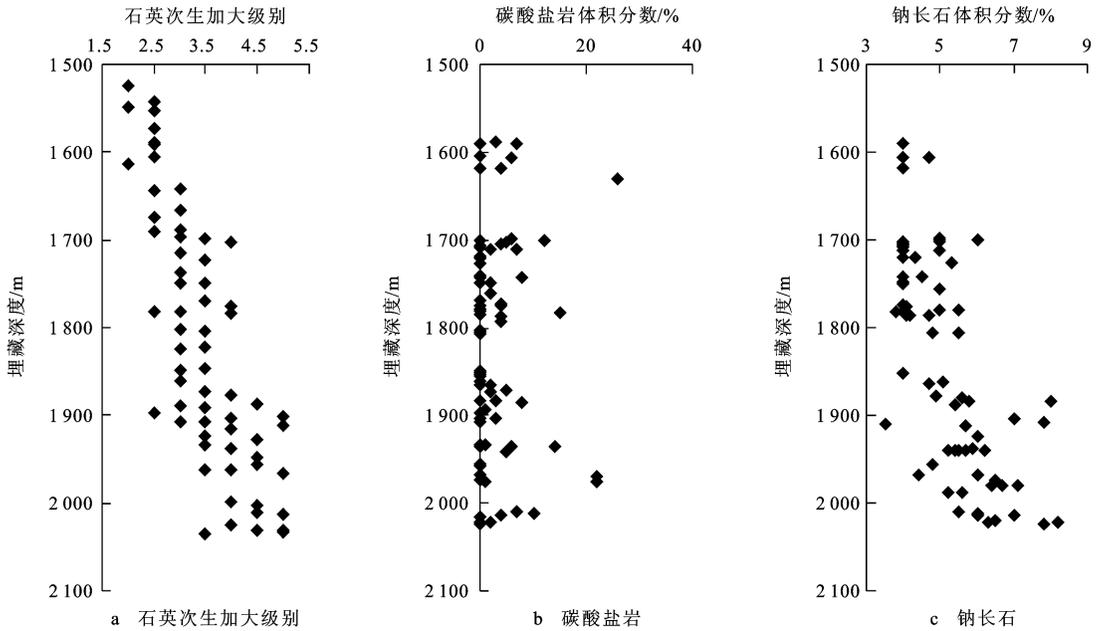


图 8 泉四段石英加大级别、碳酸盐岩和钠长石含量垂向变化

Fig. 8 Vertical Variation of Quartz Overgrowth Calcite Cementation and Albite Content of Quan-4 Formation Sandstone

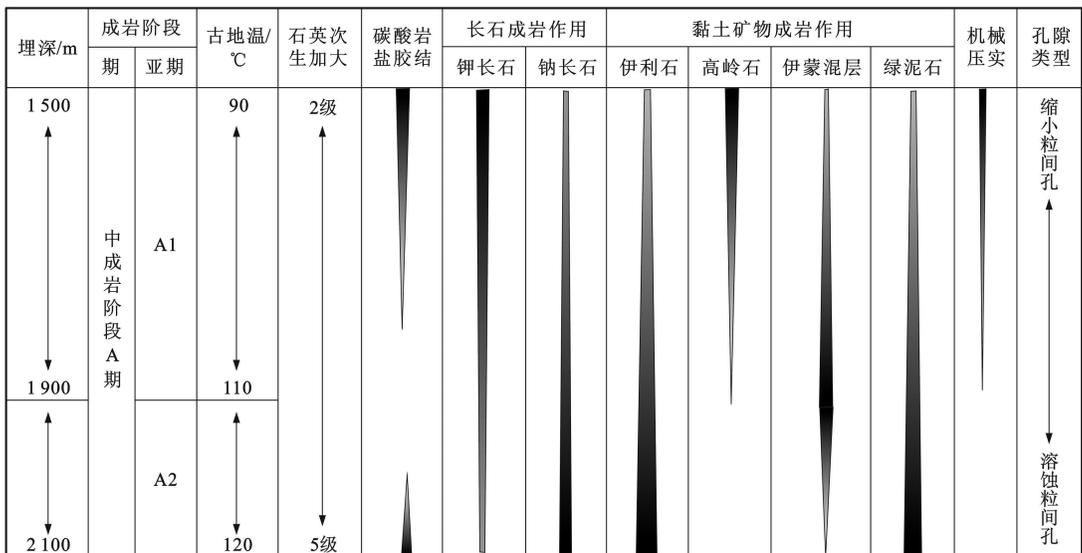


图 9 泉四段砂岩成岩共生序列及孔隙演化

Fig. 9 Diagenetic Sequence and Porosity Evolution of Quan-4 Formation Sandstone

(2)松辽盆地龙西地区泉四段砂岩的主要成岩作用类型有压实作用、胶结作用、交代作用和溶蚀作用,其中压实作用和胶结作用是导致储层物性变差的因素之一,交代作用对储层物性影响不大,溶蚀作用使储层物性得到改善。

(3)松辽盆地龙西地区泉四段砂岩处于中成岩阶段的 A 期,且具体可细分为 A1 和 A2 期,随着成岩演化颗粒接触关系由点线接触变为线凹接触,石英次生加大作用和钾长石溶解作用逐渐级别增强,碳酸盐岩胶结先减弱后增强,孔隙类型由缩小粒间孔演变为缩小粒间孔和溶蚀孔共生的孔隙类型。

参考文献:

- [1] 万俭英,王始波,赵秋枫,等.大庆长垣及以西地区泉三、四段扶杨油层储层特征[J].大庆石油地质与开发,2007,26(5):14-17.
- [2] 张革,林景晔,杨庆杰,等.松辽盆地西部扶杨油层成藏条件和勘探潜力[J].大庆石油地质与开发,2002,21(5):5-7.
- [3] 高岗,黄志龙.松辽盆地宋芳屯油田芳3区块油气成藏特征[J].西北地质,2008,41(3):99-105.
- [4] 张小莉,杨懿,刘林玉,等.松辽盆地腰英台油田中-低孔低渗储层孔隙结构特征及含油性[J].西安石油大学学报:自然科学版,2007,22(6):11-13.
- [5] 冯娟萍,李文厚,欧阳征健,等.陕北青化砭油田长2砂岩储层物性的控制因素[J].吉林大学学报:地球科学版,2008,38(3):417-424.
- [6] 朱国华.碎屑岩储集层孔隙的形成、演化和预测[J].沉积学报,1992,10(3):114-123.
- [7] 付国民,李鑫,梁志录,等.油层砂岩成岩作用及其对储层性质的影响[J].西安科技大学学报,2007,27(3):377-381.
- [8] 伏万军.黏土矿物成因及对砂岩储集性能的影响[J].古地理学报,2000,2(3):59-68.
- [9] 张莉,朱筱敏,钟大康,等.惠民凹陷古近系砂岩储层物性控制因素评价[J].吉林大学学报:地球科学版,2007,37(1):105-111.
- [10] 郭艳琴,刘昊伟,李宽亮,等.富县探区上三叠统延长组长3油藏储集因素[J].西安科技大学学报,2009,29(1):73-77.
- [11] 齐亚林,宋江海,王立社,等.鄂尔多斯盆地正宁地区延长组长6、长8砂岩储层成岩作用特征[J].西北地质,2009,42(3):95-101.
- [12] 蒋恕,蔡东升,朱筱敏,等.辽东湾地区孔隙演化的机理[J].地球科学——中国地质大学学报,2007,32(3):366-372.
- [13] 宁宁,陈孟晋,刘锐娥,等.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[J].天然气地球科学,2007,18(3):334-338.
- [14] 杨仁超,樊爱萍,韩作振,等.姬塬油田砂岩储层成岩作用与孔隙演化[J].西北大学学报:自然科学版,2007,37(4):626-630.
- [15] 赵虹,党D,陈永胜,等.鄂尔多斯盆地姬塬地区三叠系延长组长2油层组储层特征及影响因素[J].西安科技大学学报,2009,29(5):579-583.
- [16] 姜向强,钟大康,张琼.辽东湾地区古近系砂岩成岩作用与孔隙演化[J].西安石油大学学报:自然科学版,2007,22(6):14-19.
- [17] 吴少波,李亮,余小雷,等.靖安油田大路沟区长6油层组储层成岩作用与成岩相[J].西安石油大学学报:自然科学版,2009,24(1):8-12.
- [18] 朱亚军,苗建宇,朱静.鄂尔多斯盆地志丹旦八地区延长组长4+5储层成岩作用研究[J].西北地质,2008,41(4):118-123.
- [19] Folk R L. Petrology of Sedimentary Rocks [M]. Austin: Hemphill Publishing Company, 1968.
- [20] 应凤祥,罗平,何东博,等.中国含油气盆地碎屑岩储集层成岩作用与成岩数值模拟[M].北京:石油工业出版社,2004.
- [21] 侯启军,蒙启安,张革.松辽盆地齐家—古龙地区扶杨油层流体包裹体特征[J].石油勘探与开发,2004,31(4):48-51.
- [22] 侯启军,冯子辉,邹玉良.松辽盆地齐家—古龙凹陷油气成藏期次研究[J].石油实验地质,2005,27(4):390-394.
- [23] SY/T 5477—92.碎屑岩成岩阶段划分规划[S].