

文章编号:1673-5005(2010)04-0001-06

# 川西新场气田上三叠统须家河组二段致密砂岩优质储层控制因素

赵艳, 吴胜和, 徐樟有, 温立峰

(中国石油大学 地球科学学院, 北京 102249)

**摘要:**依据岩石薄片分析,利用成岩作用定量分析及成岩演化等技术,对新场地区上三叠统须家河组须二段砂岩储层进行详细研究。结果表明:虽然须二段储层普遍具有低孔低渗的特征,但亦存在孔隙发育的优质储层段;优质储层主要发育在具有较高的成分成熟度和结构成熟度,粒度较粗,岩屑含量相对较低的砂岩中,在成岩过程中优质砂岩储层抗压实能力强;早期绿泥石与自生石英共同起到了抗压实的作用,保存较多的原生孔隙,提供了有利的渗流通道,有利于后期溶解作用形成大量次生孔隙。

**关键词:**新场气田;须家河组;优质储层;成岩作用;孔隙度

**中图分类号:**TE 122.2 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-5005.2010.04.001

## Control factors of compacted high-quality sandstone reservoirs of member 2 of Xujiahe formation, upper Triassic in Xinchang gas field of Western Sichuan depression

ZHAO Yan<sup>1</sup>, WU Sheng-he<sup>1</sup>, XU Zhang-you<sup>1</sup>, WEN Li-feng<sup>1</sup>

(College of Geosciences in China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** Based on the rock thin section analysis, the sandstone reservoirs of member 2 of Xujiahe formation, upper Triassic in Xinchang area were studied by using technologies of quantitative analysis of diagenesis and diagenetic evolution. The results show that the reservoirs have the characteristics of low porosity and low permeability in Xinchang area, but the high-quality reservoirs with pore developed also exist. The high-quality reservoirs developed in sandstone with high maturity and structure maturity, coarse grain size and low debris content. During the process of diagenesis, the high-quality reservoirs have strong resistance to compaction. The combined effect of self-quartz and chlorite reached the role of compaction resistance, which preserves more primary pore and provides beneficial filtration path. The filtration path will advantage to form post-secondary dissolution pores.

**Key words:** Xinchang gas field; Xujiahe formation; high-quality reservoir; diagenesis; porosity

随着常规储层勘探开发难度的增加,人们越来越重视对低渗透油气田的勘探和开发<sup>[1-2]</sup>。四川盆地新场气田须家河组须二段砂岩孔隙度主要为1%~4%,渗透率为 $(0\sim35)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,为典型的低孔、低渗致密储层。勘探实践表明,在大规模的致密砂体内部发育储层质量相对较好的优质储层(即“甜点”),其中已钻获一批高产气井。产层主要为裂缝-孔隙型储层,而气井的稳产主要取决于孔隙的发育。开展大规模致密砂岩内部相对高渗“甜点”的

形成机制与分布规律研究,对于新场气田的优质储层预测及天然气勘探至关重要。因此,笔者依据岩石薄片分析,利用对成岩作用定量分析及成岩演化研究等技术,对新场地区上三叠统须家河组须二段砂岩储层进行研究。

### 1 区域地质概况

川西新场气田位于四川省德阳市以北约20 km,区域构造位置处于四川盆地川西坳陷中段绵竹

收稿日期:2010-01-17

基金项目:中国石油天然气集团公司石油科技中青年创新基金项目(07E1002)

作者简介:赵艳(1979-),女(汉族),河北秦皇岛人,博士研究生,主要从事储层地质学和沉积盆地流体矿产研究。

—盐亭北东东向大型隆起带中部。新场地区发育侏罗系和三叠系含气层系,其中侏罗系含气层系已进入开发阶段,而三叠系(主要为上三叠统须家河组)含气层系目前仍处于勘探阶段,须二段是新场地区的主力产层,产气层(优质储层)主要集中在4和5砂组。新场地区主要以辫状河三角洲沉积为主,须二段主要为三角洲前缘沉积,产层段主要以分流河道、河口坝微相为主。

## 2 储层特征

### 2.1 岩石学特征

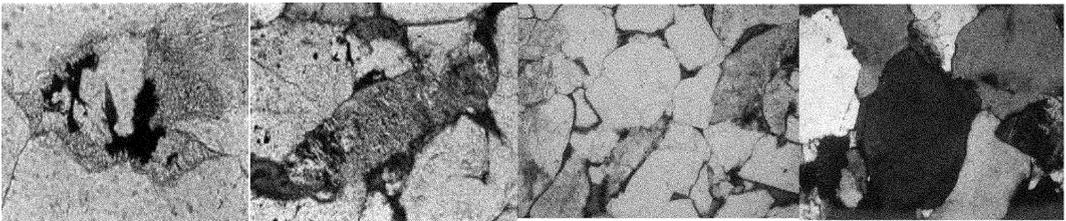
新场地区须家河组储集岩以中粒岩屑砂岩、岩屑石英砂岩以及石英砂岩为主,石英含量平均为69%,长石含量平均为8.2%,岩屑含量平均为22.1%。其中各砂组石英含量变化不大,而长石含量产层段相对较高,岩屑含量在产层段相对较低。粒度主要以中粒为主,优质储层段粒度相对其他层段较粗,粗粒含量约为10%,中粒含量约为64%,普遍高于其他层段。整个须二段储层砂岩分选较好到中等,磨圆中等,以次棱角状为主。

### 2.2 储集特征

根据取心井岩心观察、铸体薄片、岩屑普通薄

片、扫描电镜观察,新场地区须二段储层孔隙类型主要以次生孔隙为主,存在少量的残余粒间孔。优质储层段主要发育次生孔隙,主要为次生粒间溶孔,该类型孔隙主要是具有绿泥石衬边的粒间石英胶结物被溶解而成(图1(a))。其次为粒内溶孔和少量残余粒间孔隙。粒内溶孔主要局限于长石或石英颗粒内,部分溶解呈网格状、残骸状、蜂窝状,常见溶解残余(图1(b))。残余粒间孔孔隙较小,呈不规则多边形或弧三角形,当压实强烈时呈长条状、线状(图1(c))。根据大量薄片观察,孔隙主要分布在须二段中部产层段,其他部位主要表现为强压实强胶结,孔隙不发育(图1(d))。

须二段优质储层段的孔隙度明显高于其他层段。须二段整体储层基块孔隙度约为0.5%~6%,主要为1%~4%,特征值为3.5%;基块渗透率为 $(0\sim35)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,主要为 $(0\sim5)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ (图2)。但是,川高561井产层段岩心孔隙度约为6.61%~10.37%,基块渗透率为 $(0.166\sim0.752)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,由于产层段裂缝的存在,部分裂缝发育段渗透率达到 $35\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。



(a)新853井, 4.961 km (b)川高561井, 4.99235 km (c)川高561井, 4.9929 km (d)新851井, 4.838 km

图1 新场气田须二段薄片照片

Fig.1 Thin section photos of Xujiache formation of Xinchang gas field

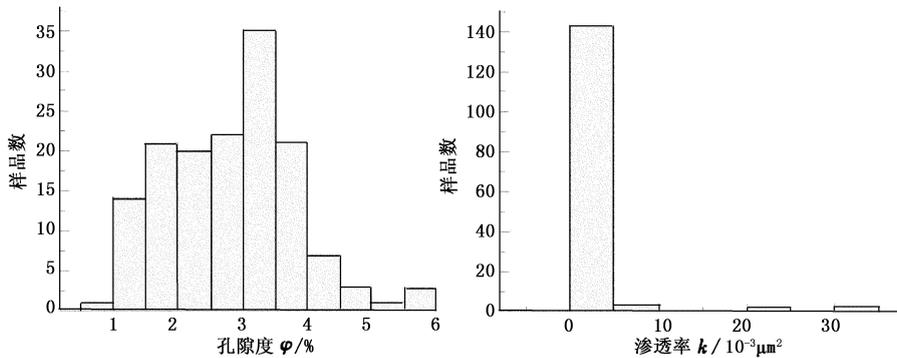


图2 新场气田须二段基块孔隙度、渗透率分布

Fig.2 Porosity and permeability distribution of the second member of Xujiache formation in Xinchang gas field

## 2.3 成岩特征

### 2.3.1 压实作用

为了更好地描述压实作用对孔隙的破坏程度,更详细地分析压实作用的影响因素,笔者对研究区的视压实率进行研究<sup>[2]</sup>。视压实率 $R_{\text{压实}}$ 定义为

$$R_{\text{压实}} = \frac{\text{原始孔隙度} - \text{粒间孔含量} - \text{胶结物含量}}{\text{原始孔隙度}}$$

对研究区1319个样品点的视压实率统计分析发现,川西凹陷新场地区须二段储层压实作用强烈,视压实率普遍大于70%,孔隙度绝对损失量大于30%,压实作用是导致孔隙减少、储层致密化的主要因素。

### 2.3.2 胶结作用

须二段储集砂岩胶结矿物以石英、方解石为主,其次为绿泥石。薄片和电镜观察表明,绿泥石主要存在于孔隙发育带中,说明绿泥石的发育对孔隙的保存有一定意义。但是,在部分层位绿泥石分布于被压实的岩石颗粒之间,说明绿泥石自身尚难于抵抗强烈压实。薄片观察发现优质储层段孔隙中绿泥石与自生石英均发育,认为早期绿泥石胶结与自生石英是抗压实的主要胶结物。部分胶结的石英在后期可发生溶解作用形成次生粒间溶孔,但石英强胶结也可导致岩石致密<sup>[3-4]</sup>。

### 2.3.3 溶解作用

溶解作用是决定须家河组储层物性好坏的又一关键因素,它能形成次生孔隙,对改善储层物性起到积极作用,研究区广泛发育的粒间溶孔、粒内溶孔都是溶解作用的结果。在须二段砂岩中,有时见到石英颗粒内部发生微弱溶解,充填于粒间孔中的自生石英常见溶蚀现象。

许多学者对石英颗粒溶解的可能性及其相关问题进行过探讨<sup>[5-10]</sup>,结果都认为在一定条件下石英是可以发生溶解的,Partica M 还通过试验获得了石英随温度、溶液中碱性离子含量以及pH值不同而呈现不同溶解速率的经验公式<sup>[11]</sup>;前人对储层中石英的溶解现象也做了大量研究<sup>[12-13]</sup>,在对油气储层的碱驱提高采收率作业中也观察到了石英的明显溶解现象<sup>[14]</sup>。石英溶解是储层中沉积作用、埋藏成岩作用和孔隙水演化的结果,pH值大于8.5时有利于石英的溶解<sup>[15]</sup>,pH值大于9时 $\text{SiO}_2$ 的溶解度随pH值的增大而迅速增高<sup>[16]</sup>。由薄片镜下观察可知,须二段自生石英的溶解作用主要发生在中成岩A末期至中成岩B期,有机质演化程度升高,大量生成凝析油和湿气,有机酸遭到破坏,脱羧基作用减弱,

$\text{CO}_2$ 来源减少,在这种情况下,随着 $\text{H}^+$ 的消耗、弱酸根的水解等,溶液的pH值升高,碱性逐渐增强,孔隙流体性质逐渐由酸性转变为碱性,使残余粒间孔中充填的自生石英溶解,形成粒间胶结物溶孔。

## 3 优质储层发育的主控因素

任何沉积储层的形成和发育均受控于沉积作用、成岩作用和构造改造作用,但这3种作用对不同地区不同层位储层的影响程度则有一定的差异。控制优质储层发育的因素主要有高能砂体与较低岩屑含量、部分胶结及溶解作用、构造作用。

### 3.1 高能砂体与较低的岩屑含量

从储层特征分析可知,优质储层仅发育于高能的分流河道和河口坝砂体中,而所有的相对低能、粒度较细、厚度较薄的砂体(如河道间砂体、远砂坝砂体)均已致密,说明高能砂体有利于优质储层的形成。高能砂体沉积时的水动力能量强,粒度大(多为中-粗粒砂岩)、分选好、磨圆度高,原始孔渗性好,在同一埋藏条件下比低能砂体具有更强的抗压实能力,更有利于成岩流体的流动而形成次生溶孔。因此,高能沉积砂体是优质储层发育的必要条件。

进一步分析表明,致密储层与优质储层中的岩屑含量差异是两者压实强度差异的重要原因。研究区须二段岩屑成分主要为泥岩、粉砂岩以及碳酸盐岩,平均含量为22%。一般塑性颗粒(如岩屑)比刚性颗粒(如石英)具有更低的抗压实能力。通过大量的薄片分析和计算发现,岩石岩屑含量与视压实率呈较明显的正相关关系(图3),即对于同一粒度

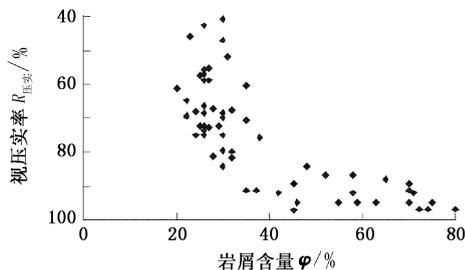


图3 新场地区须家河组二段储层视压实率与岩屑含量关系

Fig. 3 Relation of apparent compaction percentage and debris content of the second member of Xujiahe formation in Xinchang area

的岩石,岩屑含量越高,则压实强度越大。这意味着岩屑含量相对较低的砂体在压实进程中具有更大的抗压实能力,因而更有利于原始孔隙的保存,同时也有利于成岩流体的流动,从而有利于胶结物和次生

溶孔的形成。

由于岩石矿物成分与物源供应有关,即岩石矿物成分的差异主要是由物源母岩性质的差异造成的,不同砂体岩屑含量不同体现了储层“源控”的特征。

### 3.2 部分胶结及溶解作用

须二段储集砂岩的自生胶结矿物主要有自生石英、自生绿泥石等。薄片和电镜观察表明,绿泥石广泛存在于孔隙发育带中,说明绿泥石与孔隙的发育密切相关。很多学者也探讨了绿泥石对孔隙保存的影响。须二段自生绿泥石主要是以孔隙衬边形式存在,晶体呈针状垂直颗粒表面向孔隙空间中心生长,形成栉壳状结构,呈显微片状密集生长,包膜较薄(一般为2~10 μm)。扫描电镜下自生绿泥石常呈针叶状、板片状、蔷薇花状、蜂窝状等形态。然而,在一些压实致密的岩石中,绿泥石分布于呈线接触的

岩石颗粒之间,说明在深埋条件下绿泥石自身尚难于抵抗强压实进程。在深埋压实进程中,如果没有其他胶结物的存在,单靠绿泥石薄膜是难于抵抗强压实进程的。

岩石中的绿泥石薄膜常与自生石英共生(多以绿泥石为基础生长成自形晶体)。自生石英的含量变化较大,在川高561(CG561)井的4.992~4.995 km井段,自生石英含量从下部的3.0%(石英胶结致密,图4(a))至顶部的0.5%(粒间溶孔发育,图4(b))。在粒间溶孔发育的岩石中,可见明显的石英溶解现象(溶解残余,图4(c))。这说明岩石曾遭受较为普遍的石英胶结,然后在部分胶结的岩石中发生石英溶解作用而形成粒间溶孔,同时还意味曾经普遍发育石英胶结物抵抗着深埋条件下的强压实进程。

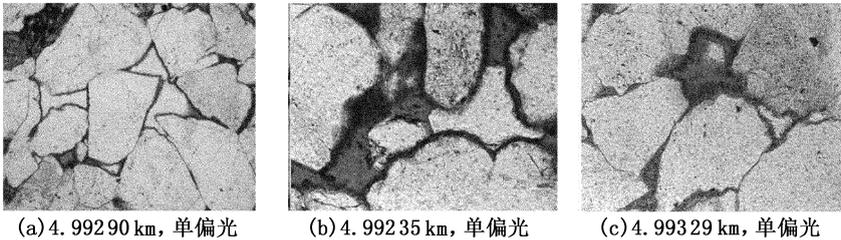


图4 CG561井产层段自生石英及石英溶解残余  
Fig.4 Authigenic quartz and residual quartz of productive reservoir in well CG561

### 3.3 构造作用

研究表明,新场地区须家河组须二段地层自沉积至今经历多期构造变形(印支、燕山和喜山等),使得新场地区断裂较为发育,存在SN向、近EW向和NE向三组方向的断裂。大量的岩心资料观察发现,新场地区须二段储层裂缝发育,同时在岩屑录井

中常见次生石英和方解石晶体。截至目前,须家河组须二段所获得的工业气井的产层段多分布在裂缝较发育层段(图5),同时也是砂岩成分成熟度和结构成熟度高的层段,以及视压实率较低,绿泥石衬边发育、粒间自生石英溶解发育的层段,这些层段初始产能高,同时具有较长的稳产期。

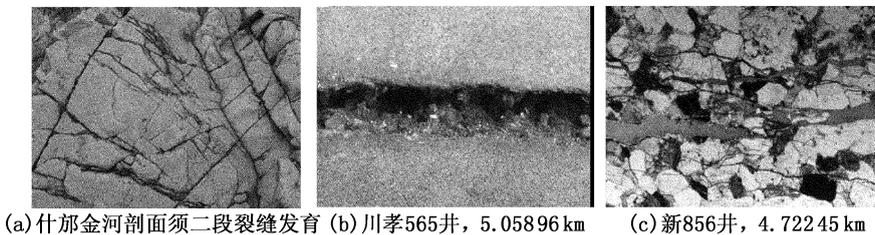


图5 新场地区须二段储层不同尺度的裂缝

Fig.5 Cracks with different scales of the second member of Xujiahe formation in Xinchang area

## 4 优质储层成岩与孔隙演化序列

新场地区须二段储层所经历的成岩阶段有同生成岩阶段、早成岩阶段A期和B期、中成岩A期和B期。

(1)早成岩A期。须三段沉积期,为浅埋藏成岩环境。镜质体反射率 $R_o < 0.35$ ,须二段有机质未成熟。沉积物处于弱固结—半固结状态。在颗粒表面形成绿泥石孔隙衬垫,压实作用使粒间孔隙缩小,孔隙度约为30%。

(2)早成岩 B 期。须四段至须五段沉积期,镜质体反射率为 0.35 ~ 0.50,有机质半成熟。沉积物进入快速压实阶段,粒间孔急剧缩小,处于半固结—固结状态。下伏须一段烃源岩进入生油高峰期,形

成有机酸,在酸性水介质环境发生长石溶解形成少量粒内溶孔,并在缩小的粒间孔中沉淀出自生石英。在这一阶段末期砂岩孔隙度约为 15%。

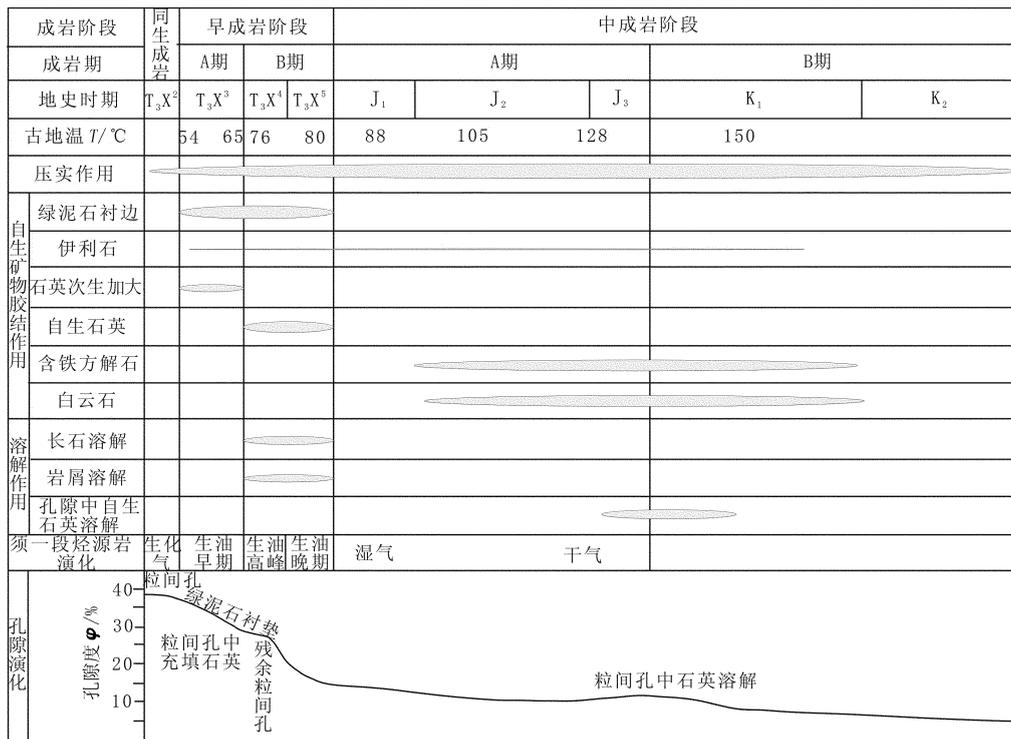


图 6 新场地区须二段优质储层成岩演化序列

Fig. 6 Diagenetic evolution sequence of high-quality reservoir of the second member of Xujiahe formation in Xinchang area

(3)中成岩 A 期。早侏罗世至晚侏罗世沉积期,镜质体反射率为 0.5 ~ 1.3。压实作用增强,颗粒点—线接触。须二段有机质成熟形成的酸性水使长石和岩屑溶解,形成少量粒内、粒间溶孔,出现铁方解石、铁白云石胶结物,孔隙度下降至 8% ~ 10%。

和部分微裂缝。

### 5 结 论

(4)中成岩 B 期。早白垩世末期,达到最大埋深,须二段进入中成岩 B 期。镜质体反射率为 1.3 ~ 2.00,有机质演化程度升高,有机酸遭到破坏,脱羧基作用减弱,CO<sub>2</sub> 来源减少,加之含铁方解石、白云石胶结物形成对有机酸的消耗,成岩环境由酸性转变为碱性,使残余粒间孔中充填的自生石英发生溶解作用,形成粒间溶孔,砂岩孔隙度约为 4% ~ 10%。

(1)新场地区须二段大部分砂体已压实致密(部分胶结致密),产层段砂体由于抗压实及后期溶解而成为优质储层。优质储层主要以分流河道、河口坝沉积微相为主,砂体厚度大,分选好,塑性岩屑含量低,以胶结物含量较低的中粒岩屑石英砂岩为主,储集空间以具有绿泥石衬边的次生粒间溶孔为主。

(2)须二段储层主要经历了压实、胶结、溶解 3 种成岩作用,其中压实作用是导致储层致密的主要因素,自生绿泥石胶结和溶解作用是形成优质储层的主要成岩控制因素。

经过漫长的成岩演化过程中的强烈机械压实作用和胶结作用,砂岩中原始粒间孔隙基本上所剩无几<sup>[8-10]</sup>,大部分砂体成为致密砂体,仅有部分中粗粒的、岩屑含量低的砂体演变为储层质量相对较高的优质储层,其内储集空间主要为粒间溶孔、粒内溶孔

(3)产层段优质储层抗压实的主控因素为高能砂体、较低的岩屑含量、绿泥石衬边和自生石英部分胶结。后期构造改造形成的裂缝改善了储层的渗透性,与绿泥石衬边、自生石英和溶解作用等共同控制了优质储层的形成。

## 参考文献:

- [1] 蒋凌志,顾家裕,郭彬程. 中国含油气盆地碎屑岩低渗透层的特征及形成机理[J]. 沉积学报, 2004, 22(1):13-18.  
JANG Ling-zhi, GU Jia-yu, GUO Bin-cheng. Characteristics and mechanism of low permeability clastic reservoir in Chinese petroliferous basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(1):13-18.
- [2] 张一伟,熊琦华,王志章,等. 陆相油藏描述[M]. 北京:石油工业出版社,1997.
- [3] 邱隆伟,黄双泉. 民丰洼陷沙三段孔隙发育特征及储层物性主控因素[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2009, 33(4):10-15.  
QIU Long-wei, HUANG Shuang-quan. Characteristics of pore development and controlling factors of reservoir property of Es<sub>3</sub> in Minfeng sag[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(4):10-15.
- [4] 苏妮娜,金振奎,宋璠. 黄骅坳陷北大港构造带沙河街组碎屑岩储层特征及其控制因素[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2009, 33(6):27-31.  
SU Ni-na, JIN Zhen-kui, SONG Fan. Clastic reservoir characteristics of Shahejie formation in Beidagang structural belt of Huanghua depression and its controlling factors[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(6):27-31.
- [5] GRATZ A J, BIRD P. Quartz dissolution: theory of rough and smooth surfaces [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1993, 57(5):977-989.
- [6] BENNETT P C. Quartz dissolution in organic-rich aqueous systems [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1991, 55(7):1781-1797.
- [7] TESTER J W, WORLEY W G, ROBINSON B A, et al. Correlating quartz dissolution kinetics in pure water from 25 to 625 °C [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58(11):2407-2420.
- [8] DOVE Patricia M. The dissolution kinetics of quartz in sodium chloridesolutions at 25 to 300 °C [J]. American Journal of Science, 1994, 294:665-712.
- [9] WORLEY W G, TESTER J W, GRIGSBY C O. Quartz dissolution kinetics from 100–200 °C as a function of PH and ionic strength [J]. Aiche Journal, 1996, 42(12):3442-3457.
- [10] 张生. 二氧化硅水溶物种与热力学性质[J]. 世界地质, 1997, 16(2):16-22.  
ZHANG Sheng. Aqueous species of dissolved silica and the thermodynamic properties [J]. World Geology, 1997, 16(2):16-22.
- [11] 刘孟慧,赵徵林. 碎屑岩储层成岩演化模式[M]. 东营:石油大学出版社,1993:10-13.
- [12] EVANS J. Quartz dissolution during shale diagenesis implications for quartz cementation sandstones [J]. Chemical Geology, 1990, 84(1/4):239-240.
- [13] 傅强. 成岩作用对储层孔隙的影响——以辽河盆地荣37块气田下第三系为例[J]. 沉积学报, 1998, 16(3):92-96.  
FU Qiang. Diagenesis effect on reservoir pores-taking the Rong-37 block of the lower Tertiary, Liaohe Basin as an example [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1998, 16(3):92-96.
- [14] 陈忠,罗蜚潭,沈明道,等. 由储层矿物在碱性驱替剂中的化学行为到砂岩储层次生孔隙的形成[J]. 西南石油学院学报, 1996, 18(2):15-19.  
CHEN Zhong, LUO Zhe-tan, SHEN Ming-dao, et al. Study of secondary pore formation on the basis of chemical behaviour of minerals in alkaline-flooding agents [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1996, 18(2):15-19.
- [15] 曾允孚,夏文杰. 沉积岩石学[M]. 北京:地质出版社,1986:194-199.
- [16] 刘宝珺,张锦泉. 沉积成岩作用[M]. 北京:科学出版社,1992.
- [17] 黄述旺,窦齐丰. 吉林四五家子油田下白垩统泉二段储层成岩储集相及储集空间演化[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2002, 27(6):723-728.  
HUANG Shu-wang, DOU Qi-feng. Characteristics of diagenesis-reservoir facies and pore space evolution of the second member of Quantou formation at Siwujiazi oil-field, Jilin province [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(6):723-728.
- [18] 袁波,杨俊生,杨怀宇. 成岩作用效应模拟的应用[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2009, 33(2):1-6.  
YUAN Bo, YANG Jun-sheng, YANG Huai-yu. Application of effect-simulation of diagenesis [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2009, 33(2):1-6.
- [19] 邵红梅,刘招君,王成,等. 松辽盆地北部深层砂岩成岩作用与孔隙演化[J]. 世界地质, 2005, 24(1):58-62.  
SHAO Hong-mei, LIU Zhao-jun, WANG Cheng, et al. Diagenesis and pore evolution of deep sandstone in north of Songliao Basin [J]. World Geology, 2005, 24(1):58-62.