

文章编号:0253-9985(2006)05-0668-07

松辽盆地大情字井地区高台子油层储集层 孔隙结构的微观特征

张大伟^{1,2}, 陈发景¹, 程刚¹

(1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国石油天然气股份有限公司 吉林油田勘探事业部, 吉林 松原 138001)

摘要:岩石孔隙结构特征是影响储层流体(油、气、水)的储集能力和开采油气资源的主要因素,因此明确储集层岩石的孔隙结构特征是充分发挥油气产能和提高油气采收率的关键。根据岩心分析、铸体薄片和岩石图像分析方法,尤其是运用了激光扫描共聚焦显微镜三维图像分析方法,对大情字井地区白垩系下统青山口组高台子油层低渗透孔隙结构进行了综合研究,重点讨论了孔隙度和渗透率的关系、孔隙结构对渗透率的影响以及影响储层储集性的因素。

关键词:孔隙结构;图像分析;控制因素;储层评价;低渗透储层;高台子油层;松辽盆地

中图分类号: TE112.2

文献标识码: A

The microscopic features of pore structure in Gaotaizi oil layer of Daqingzijing area

Zhang Dawei^{1,2}, Chen Fajing¹, Cheng Gang¹

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083;

2. Exploration Department, Jilin Oilfield Company, PetroChina, Songyuan, Jilin 138001)

Abstract: Rock pore structure is a main factor affecting oil and gas recovery and fluid (oil, gas and water) storage capacity of reservoirs. Therefore, understanding the features of pore structure is crucial for improving productivity and recovery factor. The pore structure in Gaotaizi oil layer of low permeability in the Lower Cretaceous Qing-shankou Formation in Daqingzijing area are studied comprehensively by utilizing several analytical methods such as core, cast thin section and petrographic images, especially laser scanning confocal microscopic 3-D image. Three topics concerning the issue are discussed here: (1) relationship between porosity and permeability; (2) influence of pore structure upon porosity and permeability; and (3) factors affecting the capacity of a reservoir.

Key words: pore structure; images analysis; control factor; reservoir evaluation; reservoir of low permeability; Gaotaizi oil layer; the Songliao Basin

大情字井地区位于松辽盆地中央坳陷区长岭凹陷南部(图1)。勘探主要目的层为白垩系下统青山口组高台子油层,其次是葡萄花、扶余及黑帝庙油层,属三角洲前缘相水分支河道沉积^[1],岩性以粉砂岩、细砂岩为主,形成大面积岩性油藏^[2-4]。本文选用了8口井中的12块岩心样品,采用岩心物性分析、铸体薄片观察、扫描电镜二维图像分析,特别是激光共聚焦扫描电镜三维图像

分析综合研究了高台子油层的物性和孔隙微观结构,分析了影响储层储集性因素。

1 储层的孔隙度与渗透率

通过12个岩样的分析测定(表1),序号为9,10的岩样氮孔隙度分别为19.6%和18.0%,空气渗透率为 $7.82 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $5.60 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于

收稿日期:2006-05-24

第一作者简介:张大伟(1964—),男,高级工程师,石油地质

基金项目:中国石油天然气股份有限公司科技项目(3-4-04-107)

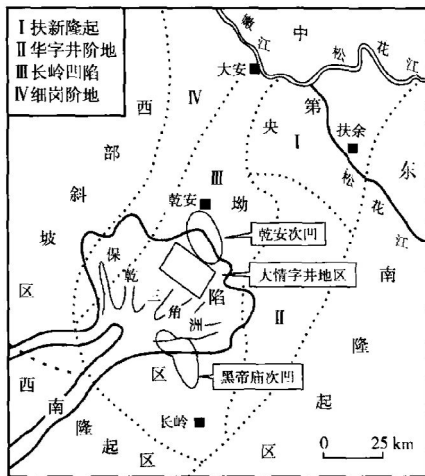


图1 区域位置

Fig. 1 Map showing the location of Daqingzijing area

低渗透储层;其余10个岩样的氦孔隙度在5.3%~14.8%,空气渗透率为 $0.06 \times 10^{-3} \sim 1.41 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属于特低渗透储层。前人研究成果^[5,6]显示,大情字井地区高台子油层孔隙度一般为7.0%~18.0%,平均为12.9%,渗透率一般为 $0.04 \times 10^{-3} \sim 12.50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $1.90 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。本次孔渗测试数据与前人资料大体相符。12块岩样测试数据还显示,大情字井地区储层的孔隙度与渗透率具有较好的正相关关系。按物性条件,可将该区储层分成三大类型,其中9,10号为I型,属低孔低渗;5,7,8号为II型,属低孔低渗;1,

2,3,4,6,11,12号为III型,属低孔极低渗。

2 储层的孔隙结构

孔隙结构主要指岩石所具有的孔隙和喉道大小、分布、几何形状及其相互间的连通关系。无论油气进入孔隙,或在开采过程中油气从孔隙中被驱替出来,都受到孔隙与喉道连通性及喉道大小控制,显然孔隙结构是影响储集岩渗透能力的主要因素^[7]。研究储层孔隙结构直观和有效的方法是:铸体薄片观察、扫描电镜和激光共聚焦电镜扫描^[8]。

通过对12个样品进行三维共聚焦电镜扫描和二维电镜扫描岩石图像分析,获得了有关的孔隙结构参数,并根据孔隙的数量、大小、几何形态、分布特征和连通程度等参数,结合岩心分析,也将研究区储层分成三大类型。其中9,10号为I型,5,7,8号为II型,1,2,3,4,6,11,12号为III型(图2;表2),与物性分类一致。

2.1 孔隙数量

孔隙数量反映在扫描电镜图像中,有体积孔隙度、孔隙个数和孔隙总面积3个参数。共聚焦电镜扫描三维图像的体积孔隙度及孔隙总面积与空气渗透率有密切的关系。体积孔隙度大和孔隙总面积数量大的样品,渗透率值也高,反之亦然。如表3所示,第I类样品有最大的体积孔隙度(16.0%)和孔隙总面积($614\,448 \sim 798\,102 \mu\text{m}^2$),

表1 大情字井地区高台子油层氦孔隙度和空气渗透率分析数据

Table 1 Helium - porosity and air - permeability of Gaotaizi oil layer in Daqingzijing area

序号	岩样号	取样深度/m	岩性	孔隙度, %	渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)
1	查28-26	2 125.50 ~ 2 189.82	细砂质粉砂岩	8.7	0.11
2	查29-S7	2 125.50 ~ 2 189.82	含云母细砂质粉砂岩	6.1	0.06
3	花31-S5	2 185.35 ~ 2 271.30	含灰细粒长石岩屑砂岩	6.5	0.08
4	花31-S8	2 185.35 ~ 2 271.30	粉砂质细粒长石岩屑砂岩	7.3	0.10
5	黑158-7	1 939.10 ~ 1 949.50	细粒长石岩屑砂岩	11.9	0.67
6	乾181-21	1 626.50 ~ 1 637.55	含泥细粒岩屑砂岩	9.3	0.09
7	乾191-19	1 906.50 ~ 1 938.15	细砂质粉砂岩	14.8	1.01
8	乾191-S20	1 906.50 ~ 1 938.15	粉砂质细粒长石岩屑砂岩	12.9	1.41
9	乾195-S6	2 089.80 ~ 2 191.10	粉砂岩	19.6	7.82
10	乾195-63	2 089.80 ~ 2 191.10	粉砂岩	18.0	5.60
11	乾198-1	2 241.40 ~ 2 245.70	含云母细砂质粉砂岩	5.3	0.22
12	乾198-7	2 241.40 ~ 2 245.70	粉砂质泥岩	7.9	0.08

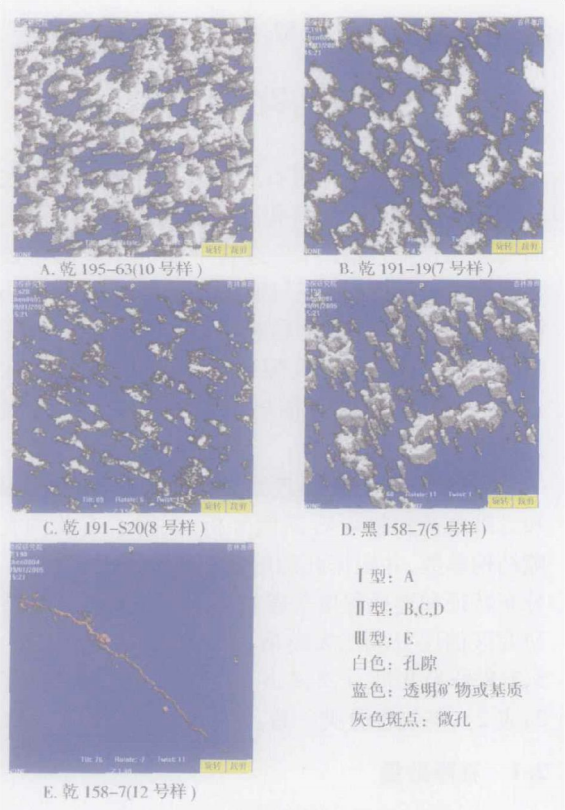


图 2 不同类型孔隙结构的三维图像
Fig. 2 3-D images showing the pore structure of different types

渗透率也相对最高($5.60 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。Ⅱ类中的 5,7,8 号样体积孔隙度分别达到 9.1%,9.6%和

5.8%,孔隙总面积也比较高,多在 $2 \times 10^5 \sim 4 \times 10^5 \mu\text{m}^2$ 之间,渗透率都在 $1.01 \times 10^{-3} \sim 1.41 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右(0.67×10^{-3} , 1.01×10^{-3} 和 $1.41 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。相比而言,属Ⅲ类的 12 号样的体积孔隙度和孔隙总面积要小得多,因此渗透率值很低($0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。以上 5 个样品总的分析结果与岩心分析的结果基本一致。

2.2 孔径大小

按薄片下孔径大小分级:孔径在 $125 \sim 250 \mu\text{m}$ 之间的孔隙是细孔隙, $62 \sim 125 \mu\text{m}$ 之间的孔隙为很细孔隙,而 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ 则是微孔隙^[9]。12 个样品中的孔径大小不一,最大孔径达到 $151 \mu\text{m}$,为细孔隙。小的孔径在 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ 之间,为微孔隙,即研究区储层孔隙广泛发育细孔隙、很细孔隙和微孔隙,尤其是微孔隙。

不同的岩心的微孔隙数量不同。总孔隙度中的微孔隙度等于岩心分析中测出的氮孔隙度减去扫描电镜三维图像统计获得的体积孔隙度并除以氮孔隙度。

统计了 12 个样品的微孔隙度及其与相关参数的关系(表 4)。我们可以看出,属Ⅰ类的 10 号样品氮孔隙度高(18.0%),微孔隙度低(11.3%),渗透率最高。而Ⅱ类样品氮孔隙度降低且微孔隙度增高,导致渗透率降低。其中 5 号样比较特殊,扫描电镜的体积孔隙度较高(9.1%),岩心分析中

表 2 不同类型孔隙结构参数值
Table 2 Parameters of pore structure of different types

类 型	数 量	形 状	大 小	分布特征	连通程度	渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)
Ⅰ 型(图 2 中 A)	体积孔隙度高,孔隙面积大	大小不一,花斑状为主	细孔-很细孔为主	密集和均匀程度较高	稍高	相对较高(5.00~10.00)
Ⅱ 型(图 2 中 B,C,D)	中等	花斑状和星点状微孔	细孔-很细孔-微孔	中等	稍低	中等(0.60~1.50)
Ⅲ 型(图 2 中 E)	少	微裂缝为主	微孔为主	局部分布	低	很低(<0.30)

表 3 体积孔隙度、孔隙总面积和渗透率
Table 3 Volumetric porosity, total pore area, permeability, and other parameters

样品序号	井 号	体积孔隙度,%	孔隙总面积/ μm^2	渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	类型
10	乾 195-63	16.0	614 448~798 102	5.60	Ⅰ
5	黑 158-7	9.1	283 928~393 307	0.67	Ⅱ
7	乾 191-19	9.6	263 089~336 528	1.01	
8	乾 191-S20	5.8	140 337~557 872	1.41	
12	乾 198-7	0.6	19 043~23 821	0.08	Ⅲ

表4 微孔隙度及孔隙和喉道大小
Table 4 Micro-porosity and pore-throat size

样品序号	氮孔隙度, %	渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	微孔隙度, %	面积频率在6%以上的 孔径/ μm	平均孔径/ μm
10	18.0	5.60	11.3	18~39	14.2
5	11.9	0.67	23.6	12~36	14.1
7	14.8	1.01	34.9	6~33	11.2
8	12.9	1.41	55.1	15~45	14.0
12	7.9	0.08	92.0		

的氮孔隙度较高(11.9%),微孔隙度较低(23.6%)。按理其渗透率较高、但实际却较低($0.67 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),结合铸体薄片鉴定资料,发现与铁方解石孔隙式胶结有关。

除了微孔隙度的影响,孔径大小与渗透率的相关关系还表现在较粗的孔隙储层有较高的渗透率。从表4中平均孔径、面积频率6%以上的孔径范围可以看出,I类10号样品的平均孔径较粗($14.2 \mu\text{m}$),面积频率6%以上的孔径范围比其它样品较大,平均在 $20 \sim 30 \mu\text{m}$ 。II类的5,7,8样品面积频率6%以上的孔径范围较小,平均在 $10 \sim 20 \mu\text{m}$,且平均孔径也要小些($14.1 \mu\text{m}$, $11.2 \mu\text{m}$, $14.0 \mu\text{m}$),所以渗透率相比较I类的小一些。III类中的12号样品的渗透率仅有 $0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。通过参考铸体薄片鉴定资料,发现该样品非常致密,虽发育微孔隙,但因孔隙连通性太差而使铸体无法注入(图3)。

2.3 孔隙形状

低渗透储层的孔隙几何形态复杂多样,主要有以下类型:

1) 不规则的花斑状孔隙,大小悬殊,分布不

均,孔隙边缘不规则,中小型花斑状孔隙分布在颗粒间,较大型孔隙呈港湾状,其间颗粒像孤岛漂浮在孔隙内,它们一般为溶蚀程度不等的粒间次生孔隙;

2) 呈星点状散布的微孔;

3) 线状的裂缝孔隙。

如表2所示的分类类型,I型的孔隙形状以大小不一的花斑状为主(图2中的A),II型为花斑状孔隙和星点状微孔混合(图2中的B,C,D),III型的孔隙形状完全是以线状微裂缝为主,在裂缝边缘见有少量微孔(图2中的E)。通常情况下,孔隙边缘为不规则的花斑状类型的样品,一般为细砂岩,但本次所测样品I型却全为粉砂岩,储层的孔隙度和渗透率总体较低。以微孔为主或发育少量微裂缝的II型岩样多为粉砂岩,5号样品等少数样品为细砂岩,但其孔隙度和渗透率反而较低,分析系方解石胶结程度高,后期溶蚀程度低所致。以微孔和微裂缝为主的III型样品也有这种情况。

2.4 孔隙分布特征

从图2可以看出,孔隙分布的密集和均匀程度不同。一般情况下,密集和均匀程度越高则孔隙度和渗透率越高。I型密集和均匀程度较高,所以它的孔隙度和渗透率高;II型的密集和均匀程度较差,它的孔隙度和渗透率降低。III型是由微孔和局部裂缝所组成,故它的孔隙度和渗透率很低。

2.5 孔隙连通性

孔隙连通性的好坏与喉道的发育程度和大小有关。主要是喉道的形状和大小控制着孔隙的储集性和渗透性^[5-9]。孔隙喉道的大小和形态主要取决于碎屑颗粒接触类型和胶结类型,以及与砂粒本身的大小和形状。常见4种孔隙喉道类型:

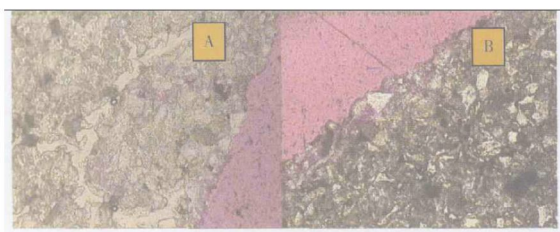


图3 12号样品的铸体薄片图像

Fig.3 Images of the cast thin section of No. 12 sample

(单偏光, 10×10)

红色为树脂,其他部分为未注入树脂的部分

①孔隙的缩小部分是喉道;②可变断面收缩部分是喉道;③片状或弯片状喉道;④管束状喉道^[6]。研究区仅见①、②和④3种孔隙喉道类型。

喉道的发育程度和大小可以用喉道平均配位数和平均喉径来定量表示。通常情况下,平均配位数越少,平均喉径越小,则渗透率越小,反之渗透率越大。平均配位数和平均喉径可以通过图2图像目估得到大致范围。平均配位数相隔不大,处在1~2之间。平均喉径主要为2~5 μm ,按薄片下喉道大小分级(粗喉大于20 μm ,中喉10~20 μm ,细喉3~10 μm ,很细喉1~3 μm ,微喉小于1 μm)^[10],样品以细喉、很细喉为主。

3 影响储层储集性的因素

影响储层储集性的因素很多,主要有沉积作用和成岩作用两大因素。沉积作用对碎屑岩的矿物成分、结构、分选、磨圆、杂基含量等都有明显的控制作用,而这些因素对储层物性都有不同程度的影响^[11,12]。大情字井地区处于保乾三角洲前缘相带,主要发育前缘水下分流河道、河口坝砂体,颗粒分选中等,磨圆次棱角状;砂岩结构一般为粗粉砂状-细砂状结构为主。储层岩石成分:石英

含量30%~42%、长石含量32%~45%,岩屑20%~34%,为岩屑质长石砂岩。储层原始孔隙发育,普遍有较好的储集物性。

成岩作用主要控制储层孔隙的演化规律。压实、胶结及溶蚀作用是该储集层在埋藏成岩过程中主要的成岩作用;尤其是溶蚀作用,对高台子储层的储集性有较大的影响。

3.1 机械压实作用

机械压实作用是指沉积物在上覆水体和沉积物的重力作用下,体积缩小,孔隙减小的过程。薄片鉴定、图像分析及扫描电镜分析等表明,研究区储集层大部分颗粒以点-线接触为主,少数凹凸接触,无缝合接触,说明岩石经历了弱-中等强度的压实作用。

3.2 化学胶结作用

化学胶结作用是指孔隙水介质由于物化条件的变化而沉淀结晶的过程。研究区扫描电镜观察发现,早中期的硅质胶结物(石英加大I-II级)和早期的碳酸盐胶结物可以抑制机械压实作用,使得一部分粒间孔隙较好地保存下来。研究区目的层胶结物主要为碳酸盐类(铁方解石、铁白云石和方解石)和硅酸盐类(石英次生加大)(图4)。

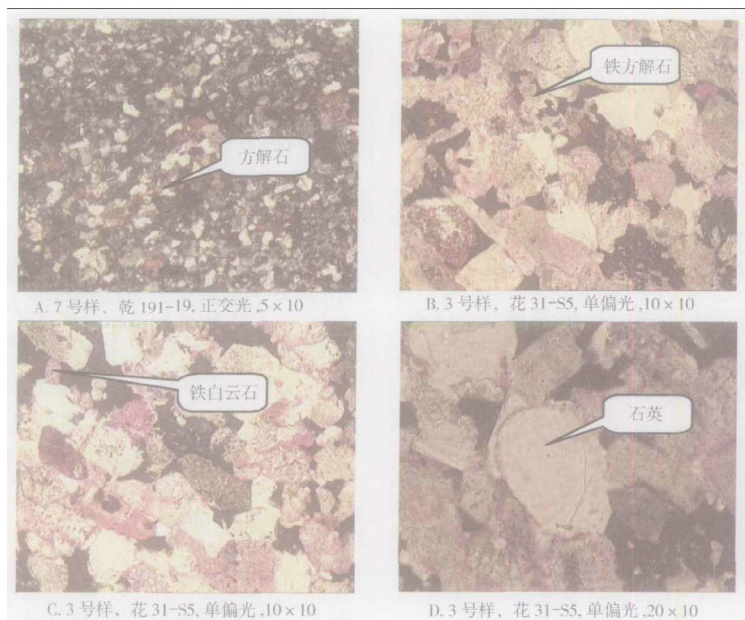


图4 3号和7号样品的铸体薄片图像

Fig. 4 Images of the cast thin section of No. 3 and 7 samples

A. 7号样品中的方解石孔隙式充填;B. 3号样品中的铁方解石孔隙式胶结;C. 3号样品中的半自形铁白云石;

D. 3号样品中的石英次生加大

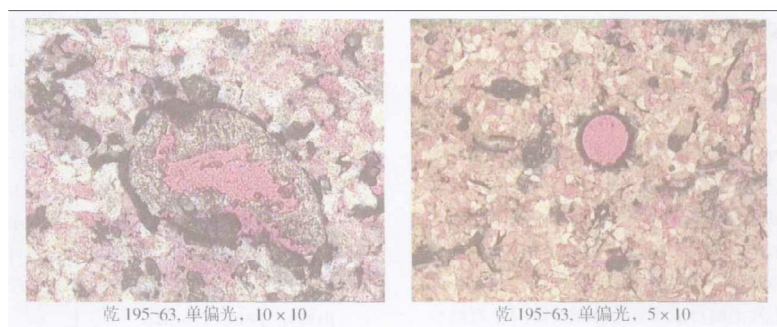


图5 10号样品的铸体薄片图像

Fig. 5 Images of the cast thin section of No. 10 sample

红色是充填的树脂,黑色是泥质矿物充填

3.3 溶蚀作用

溶蚀作用主要是指由于沉积物中有机质热演化产生的有机酸或富含 CO_2 的大气水淋漓导致骨架颗粒溶解,主要是长石类碎屑的溶解。研究区内高台子油层主要是岩屑长石砂岩,长石的含量较为丰富,为溶蚀作用的发生提供了良好的条件,有效地改善了储集层的储集性(图5)。

由图6可见,随埋深增大,原生孔隙由800 m埋深处的30%左右逐渐降低为2500 m处的10%左右。在生烃门限深度之下,发育3个有利次生孔隙带,分别对应于1500~1900,2150~2275和2375~2550 m埋深段^①。高台子油层埋深2000~2550 m,青山口组主要处于第二、三孔隙发

育带。因此,该区普遍存在的溶蚀作用是建设性的成岩作用,它大大地改变了高台子油层的储集性。

4 结论

激光共聚焦电镜扫描获得的三维图像直观清晰地表明,具有较大孔隙半径的储层渗透性相对较好,而以微孔为主的储层渗透性较差。根据孔隙结构的各个参数与渗透率之间的关系,将大情字井地区高台子油层按孔隙结构对其储集性评价为:Ⅰ型孔隙结构为中孔较细喉,属于中孔低渗储层,储集性较好;Ⅱ型孔隙结构为小孔细喉,属于低孔低渗储层,储集性较差;Ⅲ型孔隙结构为很小

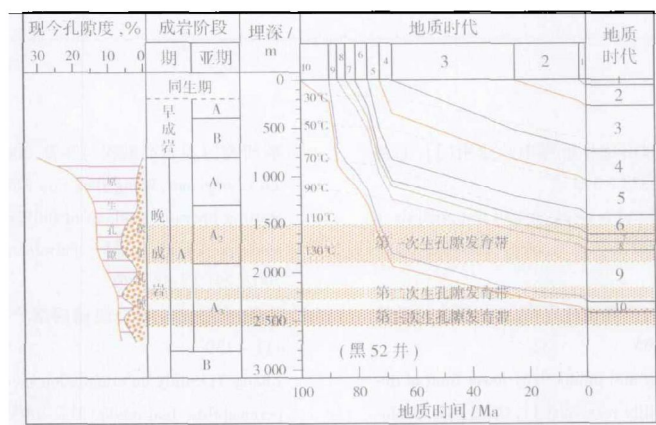


图6 大情字井地区储层成岩演化模式

Fig. 6 Diagenetic evolutionary pattern of reservoirs in Daqingzijing area

1. Q; 2. R; 3. K_2s ; 4. K_2s ; 5. K_1n^{4+5} ; 6. K_1n^{2+3} ; 7. K_1n^1 ; 8. K_1y ; 9. K_1qn^{2+3} ; 10. K_1qn^1

① 吉林油田勘探开发研究院, 松南长岭凹陷勘探目标评价及勘探部署, 内部资料, 2001

孔极细喉,属于非储集层。

参 考 文 献

- 1 韩殿杰,孙新波. 松辽盆地地下白垩统层序地层格架及油气勘探方向[J]. 石油与天然气地质,1995,16(4):384~389
Han Dianjie, Sun Xinbo. Sequence stratigraphic framework of Lower Cretaceous in Songliao basin and its hydrocarbon exploration [J]. Oil & Gas Geology, 1995, 16(4): 384~389
- 2 杨玉峰. 松辽盆地岩性油藏形成条件与分布规律[J]. 石油与天然气地质,2004,25(4):393~399
Yang Yufeng. Formation condition and distribution of lithologic pools in Songliao basin [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(4): 393~399
- 3 杨明达,杨铭辉. 松辽盆地南部大情字井地区油气分布控制因素分析[J]. 石油实验地质,2003,25(3):252~256
Yang Mingda, Yang Minghui. Analysis of hydrocarbon distribution in Daqingzi area of the southern Songliao basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(3): 252~256
- 4 梁春秀,王永春. 现代勘探新技术在隐蔽油气藏勘探中的作用—松辽盆地大情字井超亿吨级油田的发现[J]. 中国石油勘探,2003,8(3):50~57
Liang Chunxiu, Wang Yongchun. The effect of modern new exploration technology in the exploration of subtle reservoir—discover of over a hundred million tons oilfield of Daqingzi area in Songliao basin [J]. China Petroleum Exploration, 2003, 8(3): 50~57
- 5 魏志平,孙岩. 松辽盆地南部大情字井地区油气成藏过程分析[J]. 石油勘探与开发,2002,29(3):11~16
Wei Zhiping, Sun Yan. Oil and gas accumulation process in Daqingzi region of southern Songliao basin [J]. Petroleum Exploration & Development, 2002, 29(3): 11~16
- 6 刘宝柱,魏志平. 大情字井地区低孔、低渗型岩性油藏成因探讨[J]. 特种油气藏,2004,11(1):24~27
Liu Baozhu, Weizhiping. Genesis study of low porosity, low permeability, lithologic reservoirs in Daqingzi area [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2004, 11(1): 24~27
- 7 Ehrlich R, Crabtree S J, Horkowitz K O. Petrography and reservoir physics (I): objective classification of reservoir porosity [J]. AAPG Bulletin, 75(10):1 547~1 562
- 8 戴启德,纪友亮. 油气储层地质学[M]. 山东东营:石油大学出版社,1995. 79~84
Dai Qide, Ji Youliang. Petroleum Reservoir Geology [M]. Dongying, Shandong: Petroleum University Press, 1995. 79~84
- 9 罗蛰潭,王允诚. 油气储集层的孔隙结构[M]. 北京:科学出版社,1986. 29~31
Luo Zhetan, Wang Yuncheng. Pore Structure of petroleum reservoir [M]. Beijing: Science Press, 1986. 29~31
- 10 应凤祥,杨式升. 激光扫描共聚焦显微镜研究储层孔隙结构[J]. 沉积学报,2002,20(1):75~79
Ying Fengxiang, Yang Shisheng. Application of laser scanning confocal microscope to the measurement of pore texture in reservoirs [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2002, 20(1): 75~79
- 11 王宝清,徐文发,徐站立,等. 三肇地区扶余和杨大城子油层储集岩的成岩作用[J]. 石油与天然气地质,2001,22(1):82~87
Wang Baoqing, Xu Wenfa, Xu Zhanli, et al. Diagenesis of reservoirs in Fuyu and Yangdachengzi of Sanzhao region [J]. Oil & Gas Geology, 2001, 22(1): 82~87
- 12 陈昭年. 石油与天然气地质学[M]. 北京:地质出版社,2005. 51
Chen Zhaonian. Petroleum Geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005. 51

(编辑 陈喜禄)

(上接第667页)

- 11 王安辉. 神经网络在低渗透油田试井解释中的应用[J]. 石油与天然气地质,2004,25(3):338~343
Wang Anhui. Application of neural network in well test analysis in low permeability oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(3): 338~343
- 12 王秀娟. 低渗透应力敏感性与产能物性下限[J]. 石油与天然气地质,2003,24(2):162~165
Wang Xiujuan. Stress sensitivity and productivity lower limit of deliverability in the low-permeability reservoir [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(2): 162~165
- 13 吕成远,王建,孙志刚. 低渗透砂岩油藏渗流启动压力梯度实验研究[J]. 石油勘探与开发,2002,29(2):86~89
Lu Chengyuan, Wang Jian, Sun Zhigang. An experimental study on starting pressure gradient of fluids flow in low permeability sandstone porous media [J]. Petroleum Exploration & Development, 2002, 29(2): 86~89
- 14 张毅. 低渗透双重介质储层增产机理及技术研究[D]. 2003. 111~130
Zhang Yi. Study on stimulation mechanism and technology of low-permeability dual media [D]. 2003. 111~130

(编辑 高岩)