

长石溶蚀作用对储层物性的影响 ——以渤海湾盆地东营凹陷为例

于川淇^{1,2,3}, 宋晓蛟⁴, 李景景⁵, 蒋双泽⁶, 张连梁⁷

(1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 北京大学 石油与天然气研究中心, 北京 100871; 3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 陕西省地质矿产勘查开发局 第二综合物探大队, 陕西 西安 710016; 5. 中国石油新疆油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 克拉玛依 834000; 6. 中国石油西部钻探工程有限公司 井下作业分公司, 新疆 克拉玛依 834000; 7. 中国石油测井有限公司 青海事业部, 甘肃 敦煌 736202)

摘要:渤海湾盆地东营凹陷砂岩储层中长石含量丰富,而且长石溶蚀现象普遍,对储层物性具有重要影响。运用偏光显微镜、扫描电镜以及X-射线粉晶衍射等分析技术,对东营凹陷砂岩储层中长石及其溶蚀产物的分布特征进行了研究。结果表明:在不同地区长石含量存在差异,凹陷北部长石含量最高,其次是南部,最低的是中部地区;在层位上,沙河街组一段长石含量最高,其次为沙河街组二段和沙河街组四段,含量最低的是沙河街组三段;在东营凹陷砂岩储层中,长石主要的溶蚀产物为高岭石、伊利石和绿泥石。由于高岭石向伊利石和绿泥石转化,导致高岭石含量逐渐降低,浅部的伊利石和绿泥石主要由伊/蒙混层转化而来,而深部的伊利石和绿泥石主要由高岭石蚀变形成。砂岩储层中的伊/蒙混层矿物在浅层含量高,随着埋藏深度增加,含量逐渐降低。

关键词:长石;溶蚀作用;粘土矿物;东营凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Impact of feldspar dissolution on reservoir physical properties: a case from Dongying Sag, the Bohai Bay Basin

Yu Chuanqi^{1,2,3}, Song Xiaojiao⁴, Li Jingjing⁵, Jiang Shuangze⁶, Zhang Lianliang⁷

(1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Institute of Oil and Gas, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development of CNPC, Beijing 100083, China; 4. The Second Comprehensive Geophysical Survey, Shaanxi Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Xi'an, Shaanxi 710016, China; 5. Exploration and Development Research Institute, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China; 6. Downhole Operation Branch of Western Drilling Engineering Co. LTD, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China; 7. Logging Qinghai Business Division, CNPC, Dunhuang, Gansu 736202, China)

Abstract: Sandstone reservoirs in Dongying Sag, the Bohai Bay Basin are rich in feldspar, dissolution of which is very common and has an important influence on reservoir physical properties. Polarizing microscope, SEM and X-ray powder diffraction technologies were used to study the distribution characteristics of feldspar and its dissolution products in the sandstone reservoirs in Dongying sag. The content of feldspar varies in different areas. The highest content of feldspar occurs in the north, followed by the south, and the lowest is in the central area. Vertically, Es¹ is the richest in content of feldspar, followed by Es² and Es⁴, and Es³ is lowest. The main dissolution products of feldspar in the sandstone reservoirs in Dongying sag include kaolinite, illite and chlorite. The transformation kaolinite to illite and chlorite causes the decrease of content of kaolinite. The illite and chlorite in the shallow layer are mainly transformed from I/S, while they come from kaolinitic alteration in the deep layer. The content of I/S is high in shallow layer, and reduces with the increasing depth.

Key words: feldspar, dissolution, clay mineral, Dongying sag, Bohai bay basin

1 区域地质背景

东营凹陷位于渤海湾盆地济阳坳陷的东南部,是一

个从古新世发育起来的、具有典型“北断南超”特点的箕状断陷盆地,其西为青城凸起和滨县凸起,北为陈家庄凸起,东北为青坨子凸起,南为鲁西隆起和广饶凸起,东西长90 km,南北宽65 km,凹陷可以分为利津、牛庄、博

主要因素之一。长石作为砂岩储层中分布最为广泛的易溶骨架颗粒,它的溶蚀在储层砂岩次生孔隙形成过程中占有重要的地位,被认为是次生孔隙产生的主要原因,特别是在原生孔隙较低、长石含量相对较高的砂岩储层中,次生孔隙可接近总孔隙的100%^[5]。长石溶蚀形成的次生孔隙可提高砂岩储层的孔隙度和渗透率,尤其是对深埋压实条件下的砂岩储层储渗条件的改善具有重要意义^[6]。东营凹陷碎屑岩储层溶蚀作用很普遍,主要为长石和碳酸盐胶结物溶蚀,石英是砂岩中占绝对优势且相对稳定的碎屑矿物,一般不发生溶解,个别井较深部位偶见溶解现象。通过对本区不同埋藏深度砂岩样品的扫描电镜,X-射线衍射和岩石薄片综合研究分析表明,长石矿物溶蚀包括长石的溶解和蚀变两种表现形式。长石溶解后可有3种情况:①溶解物质全部进入溶液迁移到它处;②K和Na等金属元素迁移出去, SiO_2 和 Al_2O_3 等在附近形成高岭石,或进一步溶蚀形成伊利石等粘土矿物;③只剩下 SiO_2 形成硅质填隙物、硅质骨架或硅球堆积,另外还有自生钠长石或次生加大钠长石边生成^[7]。被溶解的长石往往具港湾状、锯齿状边缘,强烈溶解的长石可呈残骸状,甚至铸模状。长石溶解会形成自生高岭石等粘土矿物和 SiO_2 沉淀,将 K^+ 和 Ca^{2+} 释放进入水中,导致钾长石的钠长石化,促使粘土矿物形成并转化。从长石含量随深度变化图可以得出,大约2 500 m至3 500 m

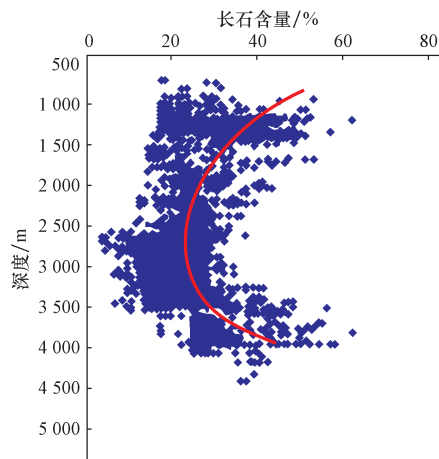


图2 东营凹陷长石含量随深度变化关系

Fig. 2 Feldspar content vs. depth in the Dongying Sag

深度段是长石类矿物发生溶解和转化的主要深度范围(图2)^[8]。

研究区常见自生粘土矿物有4种,它们分别是高岭石、伊利石、绿泥石、伊/蒙混层矿物。在扫描电镜下,高岭石形态呈片状集合体充填粒间孔和长石颗粒溶孔;在铸体薄片,高岭石虽然充填孔隙,占据了孔隙的部分和大部分空间,但高岭石完全堵塞孔隙的情况较为少见,其晶体间常存在大量的残余孔隙和微孔隙(图3)。伊利石在电镜下主要为粒表丝状或粒间片状,以片状披盖在颗粒表面或充填孔隙中(图4),伊利石主要分布在深层,形成于较晚成岩阶段,多来源于伊/蒙混层的成岩

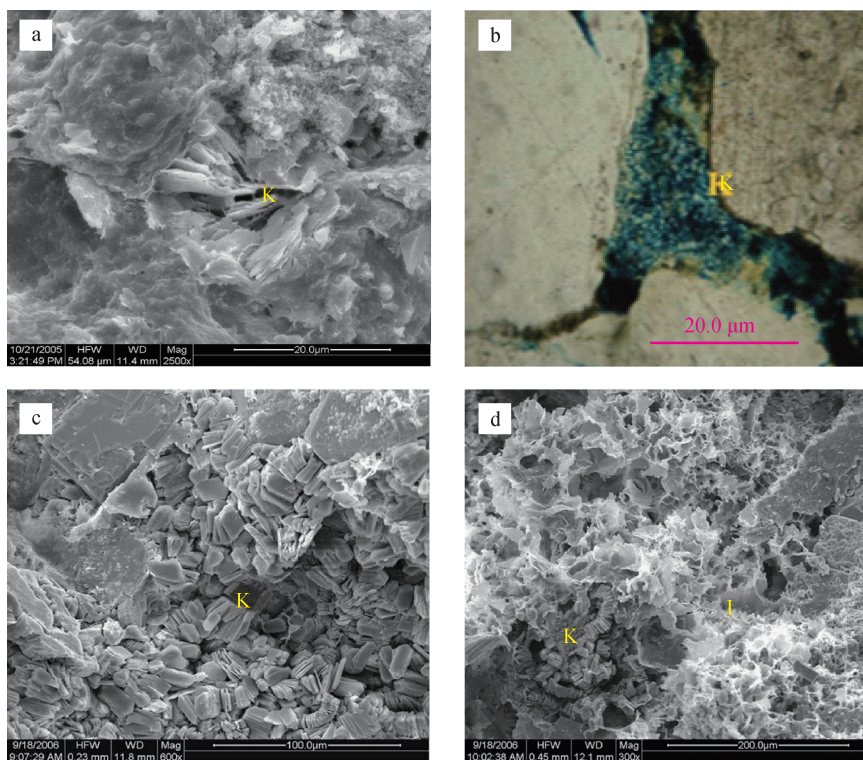


图3 东营凹陷长石溶蚀及被高岭石充填扫描电镜下特征

Fig. 3 SEM features of feldspar dissolution and kaolinite filling in the Dongying Sag

- a. 王斜583井,3 469.00 m,长石溶孔被书页状高岭石充填;b. 盐22-22井,3 431.90 m,次生高岭石,单偏光;c. 永925井,2 507.20 m,粒间孔隙充填假六边形高岭石;d. 坨古2井,3 216.95 m,粒间充填丝片状伊利石和蠕虫状高岭石共存

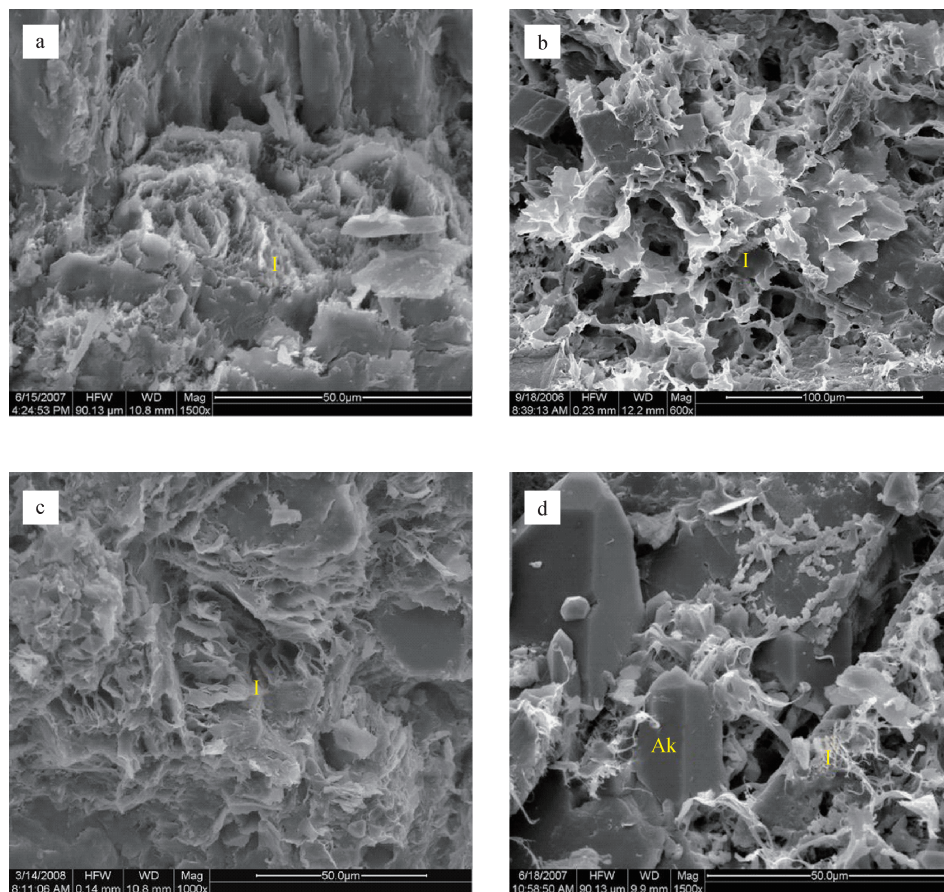


图4 东营凹陷长石被溶蚀及被伊利石充填扫描电镜下特征

Fig. 4 SEM features of feldspar dissolution and illite filling in the Dongying Sag

- a. 王 127 井, 3 100. 81 m, 长石溶蚀形成伊利石(I)及溶孔; b. 永 928 井, 4 006. 80 m, 粒间孔隙充填丝片状伊利石(I); c. 盐 227 井, 3 839. 42 m, 粒间充填片状伊利石(I); d. 坨 741 井, 2 945. 12 m, 孔隙中分布镁黄长石(Ak)和片状伊利石(I)

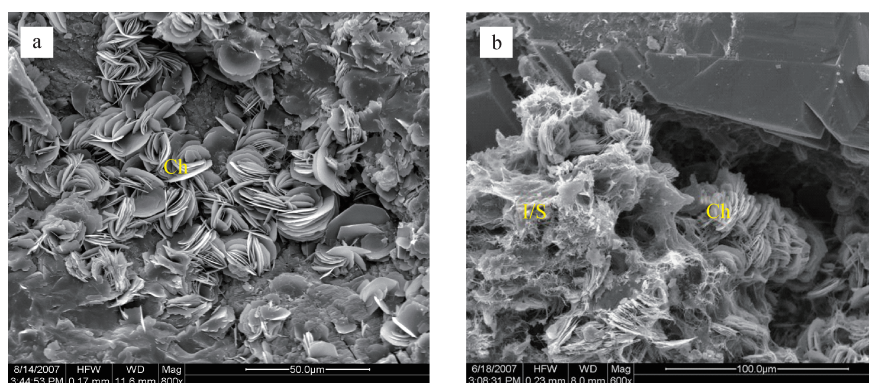


图5 东营凹陷长石被溶蚀及被绿泥石充填扫描电镜下特征

Fig. 5 SEM features of feldspar dissolution and chlorite filling in the Dongying Sag

- a. 盐 222 井, 4 261. 32 m, 花瓣状绿泥石(Ch); b. 丰深 5 井, 4 485. 10 m, 花瓣状绿泥石(Ch)、伊/蒙混层(I/S)

演化;它可由钾长石蚀变而成,也可由粘土基质的重结晶或由孔隙水沉淀而成^[9];绿泥石也主要分布在深层,在扫描电镜下或呈片状沿颗粒表面径向分布,或呈花瓣状集合体充填于孔隙中(图5)。高岭石、伊利石富含 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 时会转化为绿泥石。伊/蒙混层镜下形态上介于蒙脱石和伊利石之间,多以孔隙衬垫和充填的形式出现(图6);多分布在较浅的层位。

3 长石溶蚀作用与储层物性的关系

通过对岩石薄片和砂岩物性等资料的研究,东营凹陷古近系砂岩储层经历了多种类型的成岩作用,对储层性质有重大影响的是压实作用、胶结作用和溶蚀作用^[10]。随深度的增加,压实作用和胶结作用使孔隙

减少,而溶蚀作用使孔隙增加^[11]。砂岩中长石溶蚀对储层物性的影响作用,可以近似的看为高岭石含量与储层物性的关系,通过对比高岭石含量与储层物性的关系可以得出高岭石的含量越高,即长石溶蚀生成的高岭石在自生粘土矿物中的比重越高,孔隙度相对就越高(图 7)。而自生粘土矿物总量含量越高,孔隙度越低(图 8)。

岩性对溶蚀作用具有明显的控制作用,粒度中等(中-细砂岩)、分选好、杂基含量低的砂岩长石溶蚀作用较强,这是由于这类砂岩原生孔隙发育,酸性流

体易于进入储层,溶蚀作用强,物性好。而粒度细(如粉砂岩)、分选差(含砾砂岩、砾状砂岩)、杂基含量高(如泥质砂岩、泥质粉砂岩)的砂岩,由于压实作用或碳酸盐胶结作用使原生孔隙遭受很大破坏,酸性水难以进入^[12-15]。因此,它们的溶蚀作用较弱,物性相对较差(图 9)。粗到细的 5 种不同岩性共 348 个砂岩样品的物性进行研究发现也具有类似现象。粒度中等的砂岩物性最好,溶蚀作用强,而粒度细、杂基含量高(如泥质砂岩、泥质粉砂岩)的砂岩,物性最差(表 1)。

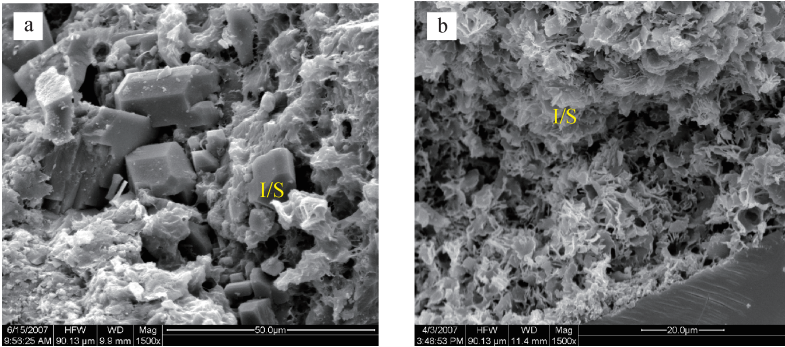


图 6 东营凹陷长石溶蚀及被伊/蒙混层充填扫描电镜下特征

Fig. 6 SEM features of feldspar dissolution and I/S filling in the Dongying Sag

a. 盐 222 井,3 716. 00 m,粒间孔隙充填伊/蒙混层(I/S);b. 永 928 井,3 526. 70 m,粒间充填伊/蒙混层(I/S)

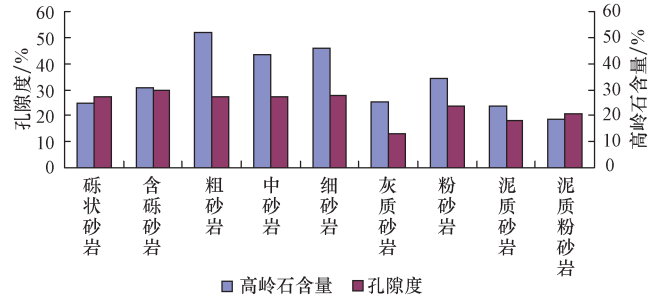


图 7 东营凹陷不同岩性长石溶蚀产物(高岭石)与孔隙度关系

Fig. 7 Histogram showing the relationship between feldspar dissolution product (kaolinite) content and porosity of different lithologies in the Dongying Sag

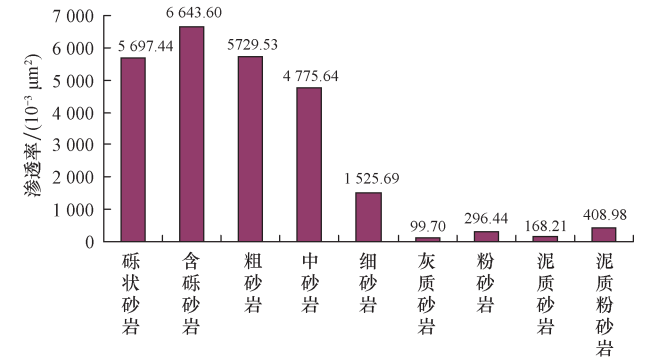


图 9 东营凹陷不同岩性长石的物性

Fig. 9 Histogram showing the physical properties of feldspar of different lithologies in the Dongying Sag

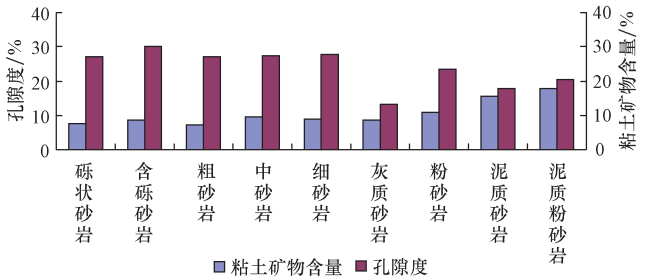


图 8 东营凹陷不同岩性自生粘土矿物总量与孔隙度关系

Fig. 8 Histogram showing the relationship between authigenic clay mineral content and porosity of different lithologies in the Dongying Sag

表 1 东营凹陷不同岩性物性对比

Table 1 Comparison of physical properties of different lithologies in the Dongying Sag

岩石类型	孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	样品数/个
含砾砂岩	16. 03	142. 29	44
中砂岩	17. 65	139. 27	32
泥质砂岩	12. 41	13. 27	198
粉砂质细砂岩	16. 48	132. 67	44
泥质粉砂岩	10. 74	0. 78	18

注:滨 5-2 井,井深 2 539. 37 ~ 2 580. 15 m 井段。

4 结论

1) 东营凹陷砂岩储层中长石含量丰富,统计结果

表明长石含量高达 26.22%。在不同构造带上长石含量差异性明显,在凹陷北带长石含量最高,南坡长石含量相对较低,长石含量最低的为中央隆起带。在层位上,Es¹ 长石含量最高,其次是 Es² 和 Es⁴,Es³ 长石含量最低。长石含量与砂岩的分选性有关,砂岩分选性越差,长石含量就越高。长石含量在不同岩性砂岩中表现为砂岩粒度越大,长石的含量越高,砂岩粒度越小,长石的含量越低。

2) 东营凹陷长石溶蚀现象普遍,长石溶蚀产物主要是高岭石、伊利石及绿泥石。高岭石含量随深度增大而增加,到 3 000 m 左右达到最大值,此后由于高岭石向伊利石和绿泥石转化,导致高岭石含量逐渐减小。总体来说,伊利石和绿泥石含量是随埋深的增加而增大,浅部的伊利石和绿泥石主要由伊蒙混层转化而来,深部伊利石和绿泥石主要由高岭石转化而来。

3) 对于不同岩性长石和储层物性的关系,岩性对溶蚀作用具有明显的控制作用,粒度中等、分选好、杂基含量低的砂岩长石溶蚀作用较强,粒度细、分选差(含砾砂岩、砾状砂岩)、杂基含量高的砂岩,它们的溶蚀作用较弱,物性相对较差。

参 考 文 献

- [1] 冯炎松. 东营凹陷“相一势”控藏特征研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2007.
Feng Yansong. Characteristics of “Facies-Potential” controlling reservoir formation in Dongying Sag[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2007.
- [2] 李丕龙. 陆相断陷盆地油气地质与勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 11-19.
Li Pulong. Oil gas geology and prospecting in continental Rift Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 11-19.
- [3] 帅德福, 王秉海. 中国石油地质志(卷六, 胜利油田)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993: 1-260.
Shuai Defu, Wang Binghai. Petroleum geology of China (Vol Six, Shengli oil field) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993: 1-260.
- [4] 蒋有录, 刘华, 张乐, 等. 东营凹陷含油气系统的划分与评价[J]. 石油学报, 2005, 26(5): 33-37.
Jiang Youlu, Liu Hua, Zhang Le, et al. Characteristics of petroleum system in Dongying Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(5): 33-37.
- [5] 郭春清, 沈忠民, 张林晔, 等. 砂岩储层中有机酸对主要矿物的溶蚀作用及机理研究综述[J]. 地质地球化学, 2003, 31(1): 51-56.
Guo Chunqing, Shen Zhongmin, Zhang Linye, et al. The corrosion and its mechanism of organic acids on main minerals in oil-gas reservoir sand rocks[J]. Geology Geochemistry, 2003, 31(1): 51-56.
- [6] 黄洁, 朱如凯, 侯读杰, 等. 深部碎屑岩储层次生孔隙发育机理研究进展[J]. 地质科技情报, 2007, 26(6): 76-82.
Huang Jie, Zhu Rukai, Hou Dujie, et al. The new advances of secondary porosity genesis mechanism in deep clastic reservoir[J]. Geological Science and Technology Information, 2007, 26(6): 76-82.
- [7] 张枝焕, 胡文瑛, 曾溅辉, 等. 东营凹陷古近系流体-岩石相互作用研究[J]. 沉积学报, 2000, 18(4): 560-566.
Zhang Zhihuan, Hu Wenxuan, Zeng Jianhui, et al. Repercussion study of Dongying sag paleogene system fluid and rock[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(4): 560-566.
- [8] 蔡进功, 张枝焕, 朱筱敏, 等. 东营凹陷烃类充注与储集层化学成岩作用[J]. 石油勘探与开发, 2006, 30(3): 79-83.
Cai Jingong, Zhang Zhihuan, Zhu Xiaomin, et al. Hydrocarbon filling and chemical diagenesis evolution of the clastic reservoir of the Paleogene in Dongying Sag[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 30(3): 79-83.
- [9] 蔡进功. 东营凹陷烃类充注与储集层化学成岩作用[J]. 石油勘探与开发, 2003, 21(6): 66-81.
Cai Jingong. Hydrocarbon filling and chemical diagenesis evolution of the clastic reservoir of the Paleogene in Dongying Sag[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 21(6): 66-81.
- [10] 张琴, 朱筱敏, 钟大康, 等. 山东东营凹陷古近系碎屑岩储层特征及控制因素[J]. 古地理学报, 2004, 6(4): 43-502.
Zhang Qin, Zhu Xiaomin, Zhong Dakang, et al. Clastic reservoir properties and their controlling factors of the Paleogene in Dongying Sag, Shandong Province[J]. Journal of Palaeogeography, 2004, 6(4): 43-502.
- [11] 游国庆. 东营凹陷古近系砂岩成岩作用与孔隙演化[J]. 岩石矿物学杂志, 2006, 6(3): 76-88.
You Guoqing. Diagenesis and pore evolution of Paleogene sandstone reservoir in Dongying Depression[J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 2006, 6(3): 76-88.
- [12] 冯娟萍. 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, 8(6): 6-11.
Feng Juanping. Major factors controlling reservoir quality of the Upper Triassic Chang 2 Sandstones in the Qinghuabian oilfield, Northern Shaanxi[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008, 8(6): 6-11.
- [13] 宋守德. 碎屑岩储层物性的主要控制因素[J]. 内蒙古石油化工, 2008, 6(4): 46-52.
Song Shoude. Main controlling factors on property of clastic reservoir [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2008, 6(4): 46-52.
- [14] 朱世发. 准格尔盆地西北缘克-百地区侏罗系储层特征及质量评价[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2008.
Zhu Shifa. Characteristics and quality evaluation of jurassic reservoirs at Ke-Bai area, NW Margin of Junggar Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2008.
- [15] 张永旺. 成岩过程中的矿物“耗水作用”模拟实验及其机理分析(博士后出站报告)[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2009.
Zhang Yongwang. Simulation experiment and mechanism analysis of mineral's "water consumption" in diagenetic stage (post-doctoral outbound report) [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2009.

(编辑 高 岩)