

东营凹陷砂岩储层自生高岭石发育特征与成因机制

张永旺^{1,2}, 曾贱辉^{1,2}, 曲正阳², 陈俊兵³

(1. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学 地球科学学院, 北京 102249; 3. 浙江省水文地质工程地质大队, 浙江 宁波 315010)

摘要:通过大量薄片鉴定、岩心观察以及扫描电镜、粘土矿物粉晶衍射等分析测试手段,对东营凹陷砂岩储层中发育的高岭石的分布、产状以及镜下特征等进行了分析。结果表明,研究区砂岩储层中高岭石有自生和陆源两种成因。自生高岭石在储层中较为常见,其微观特征表现为结晶形态完整,呈典型的书页或蠕虫状充填于粒间孔和长石颗粒溶孔内,在铸体薄片上可见自生高岭石集合体呈“斑状”的聚集充填特征。陆源高岭石在研究区较为少见,一般在浅层出现,是在沉积过程中与碎屑颗粒等非粘土矿物同时形成。在上述研究的基础上,对自生高岭石成因机制进行了讨论,认为东营凹陷砂岩储层中长石类矿物的溶蚀作用是自生高岭石形成的主要物质来源。研究区粒度大、分选好的砂岩储层中高岭石含量较高,说明除酸性的流体环境和一定的物质供应外,流体动力条件也是自生高岭石形成的重要控制因素。

关键词:自生高岭石;高岭石成因;砂岩储层;东营凹陷

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Development characteristics and genetic mechanism of authigenic kaolinite in sandstone reservoirs of the Dongying Sag, Bohai Bay Basin

Zhang Yongwang^{1,2}, Zeng Jianhui^{1,2}, Qu Zhengyang², Chen Junbing³

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum Beijing 102249, China;

2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Hydrological and Engineering

Geology Team of Zhejiang Province, Ningbo, Zhejiang 315010, China)

Abstract: Arthroscopic characteristics, distribution and occurrence of kaolinite are analyzed through quantity thin section analysis, core observation, scanning electron microscope and X-ray powder diffraction. The results show that the kaolinite of sandstone reservoirs in Dongying Sag has two genetic types including authigenic kaolinite and terrigenous kaolinite. The authigenic kaolinites are common in the reservoirs. Microscopically, they show complete crystal form, and fill intergranular pores and dissolution pores of feldspar in typical sheet or vermicular shapes. The “spotted” filling feature of the authigenic kaolinite aggregates are clear on cast thin sections. The terrigenous kaolinites are rare and often occur in shallow layers. They are formed in association with the non-clay minerals like clastic particles in deposition process. Based on the study mentioned above, the genetic mechanism of authigenic kaolinite is discussed. It is supposed that feldspar dissolution is the main material source for the formation of authigenic kaolinite. Sandstones with large grain size and well sorting have high content of kaolinite, indicating that, in addition to acid fluid environment and sufficient material supply, strong fluid dynamic is also an important controlling factor of authigenic kaolinite formation.

Key words: authigenic kaolinite, genesis of kaolinite, sandstone reservoir, Dongying Sag

高岭石是砂岩储层中最常见的自生粘土矿物之一,其发育程度是影响储层储集性能的一个重要因素,并且和油气聚集关系密切,受到了石油地质学家和矿物学家的普遍关注^[1-13]。东营凹陷位于渤海湾盆地济阳坳陷的南部,是一个古新世发育起来的、具有典型“北断南超”特点的裂陷盆地,是济阳坳陷油气资源最丰富的凹陷,其中沙河街组(Es)是东营凹陷主要的油气富集层

位。前人对东营凹陷自生高岭石矿物特征及其与油气层损害以及盆地演化关系^[14-15]进行了研究,但对其成因机制研究甚少。本文通过岩心观察、薄片鉴定、扫描电镜和粘土矿物粉晶衍射等分析测试手段,在对东营凹陷砂岩储层中大量发育的自生高岭石特征、含量、产状等分析的基础上,对其成因机制进行讨论,研究成果对于储层评价以及油气运聚成藏研究具有重要指导意义。

收稿日期:2014-08-05;修订日期:2014-11-26。

第一作者简介:张永旺(1975—),男,博士,沉积学和成岩作用。E-mail:zyw75@126.com。

基金项目:国家油气重大专项(2011ZX05006-01,06);国家自然科学基金项目(41172128);中国石油大学(北京)科研基金项目(KYJJ2012-01-25)。

1 砂岩储层高岭石赋存状态与特征

根据高岭石的结晶形态特征可以推断砂岩储层高岭石是否为成岩自生或陆源成因^[14]。东营凹陷沙河街组砂岩储层发育两种晶形不同的高岭石:一种为成岩过程中形成的自生高岭石;另一种为陆源碎屑高岭石。

1.1 自生高岭石

成岩作用过程形成的高岭石为高结晶度,在扫描电镜下结晶形态完整,单晶呈假六方片状,集合体呈书页或蠕虫状,少数呈环状。这种类型的高岭石在储层中较为常见,充填粒间孔和长石颗粒溶孔,主要分布于物性较好的河道砂岩和三角洲前缘砂坝砂岩中(图1)。在铸体薄片,自生高岭石呈“斑状”产出(图2b)。镜下观察发现高岭石虽然占据了粒间孔隙的部分空间,但完全充填孔隙的情况较少,而且其还发育大量的晶间残余孔隙和微孔隙。随着埋深加大、温度压力升高以及成岩流体环境向弱碱性或碱性的转变,高岭石有向伊利石或绿泥石等粘土矿物转化的趋势(图2d)。通过肉眼和薄片观察很难识别研究区砂岩储集层中晶型较好的自生高岭石,但通

过扫描电镜观察结合能谱化学成份分析可较好地识别。

成岩自生高岭石一般有两种形成方式:一种是经过长石类矿物在酸性流体中的溶蚀作用而形成。长石在酸性流体环境中首先失去钾、钠和钙等碱性离子,随着碱性离子的减少,当硅和铝元素富集到一定程度时便直接结晶、蚀变形成高岭石;另一种是成岩期从孔隙溶液中直接沉淀形成的高岭石^[16]。从孔隙溶液中结晶、沉淀形成的高岭石常呈“斑状”充填粒间孔隙(图2b),其原因可能与其形成过程中的“亲合性”有关。孔隙流体中的铝离子一般呈络合物形式存在,孔隙中一旦有高岭石析出,便会形成一个“凝集”中心,之后析出的高岭石则向这个中心靠拢,聚集形成“斑状”而不是分散状^[17]。

X-射线衍射分析高岭石含量很高的砂岩样品,扫描电镜也观察到大量高岭石。高岭石为二八面体1:1层型层状构造硅酸盐。衍射谱图(001)0.715 nm,(002)0.358 nm衍射峰清楚。在高岭石含量高的砂岩图谱上,(001)衍射峰尖锐而对称,说明结晶程度高,反映了成岩自生高岭石的特征^[18]。

1.2 陆源碎屑高岭石

陆源碎屑高岭石在镜下呈碎片状,结晶形态不完

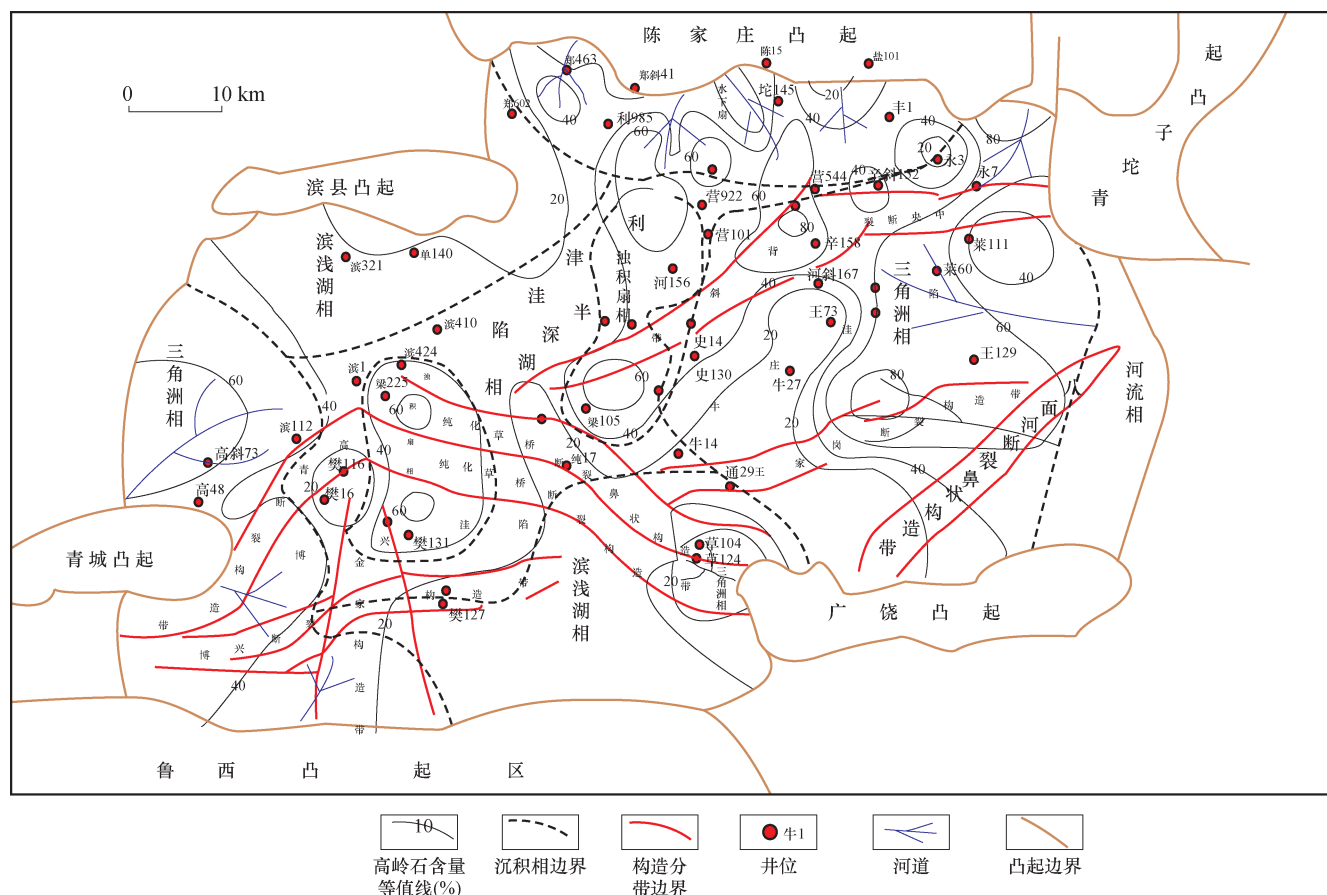


图1 东营凹陷沙三段高岭石平面分布特征

Fig. 1 Kaolinite distribution of the Es₃ in the Dongying Sag

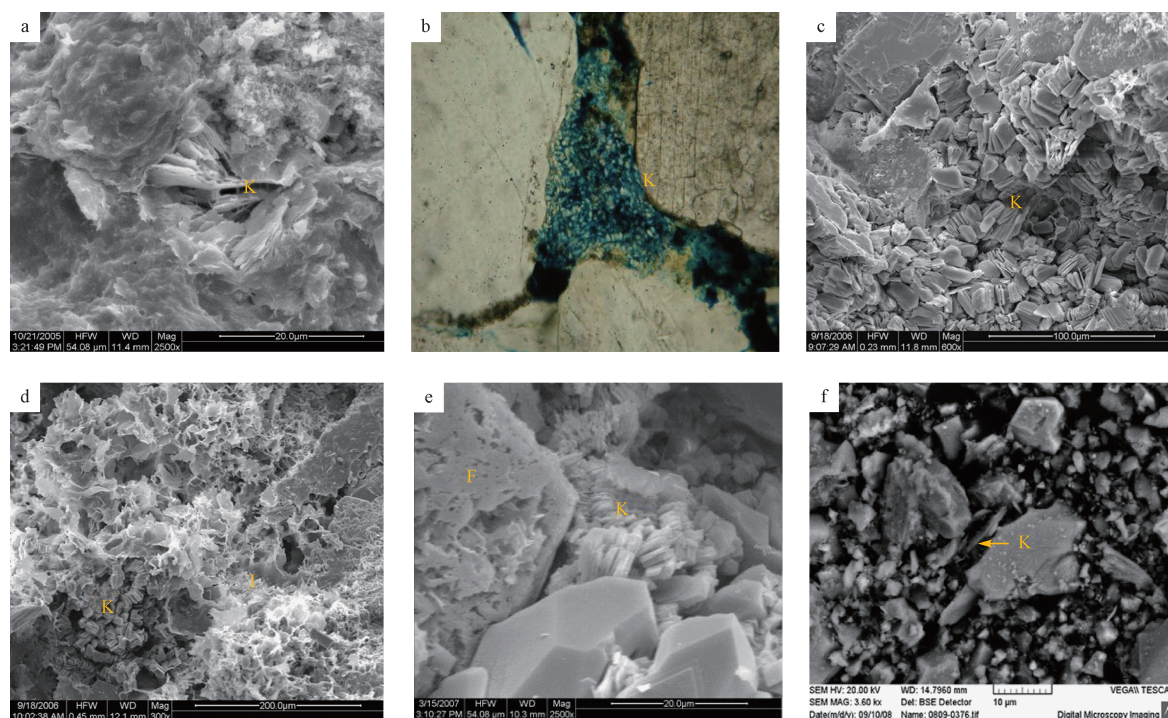


图2 东营凹陷高岭石镜下赋存状态和特征

Fig. 2 Arthroscopic occurrence and characteristics of kaolinite in the Dongying Sag

- a. 长石溶孔被书页状高岭石(K)充填,王斜583井,埋深3 469.00 m; b. 高岭石充填粒间孔隙,单偏光,盐22-22井,埋深3 431.90 m;
c. 粒间孔隙充填假六边形高岭石,永925井,埋深2 507.20 m; d. 粒间充填丝片状伊利石(I)和蠕虫状高岭石共存,坨古2井,埋深3 216.95 m;
e. 长石溶蚀成为蜂窝状,粒间充填高岭石和自生石英(Q),樊153井,埋深2 807.83 m; f. 原生的片状高岭石,史142井,埋深1 314.50 m

整(图2f),在研究区较为少见,一般在研究区浅层出现,这种高岭石是以碎屑的形式与砂粒等非粘土矿物同时在沉积过程中形成。部分砂岩样品X-射线衍射分析含高岭石,由于陆源碎屑高岭石形态上不是呈典型的书页状或蠕虫状,因此在扫描电镜下很难观察到只能依靠扫描电镜能谱测定主要组成元素来确定矿物类型。陆源碎屑高岭石大部分位于砂岩粒间孔隙,镜下形态不完整,但还保留有一定的典型的原始结晶形态特征。矿物颗粒棱角有磨圆化特征,反映了碎屑状高岭石经过了一定距离的搬运。

2 自生高岭石成因机制

砂岩中自生粘土矿物的形成与孔隙流体的pH值、离子成分类型以及含量等密切相关。高岭石形成于钾、钠等碱性离子含量低的酸性流体环境中,而蒙脱石、伊/蒙间层、伊利石和绿泥石等粘土矿物形成于富钾、铁及镁等离子的碱性流体成岩环境中。

高岭石是砂岩储层中较常见的富铝成岩粘土矿物,由铝硅酸盐类矿物在酸性流体介质中溶蚀而形成。据Stossell(1981)的研究^[19],砂岩中自生高岭石的发育决定于以下3个条件:① Al^{3+} 来源。砂岩储层中长石类矿物以及酸性岩屑等骨架组分的溶蚀作用是孔隙流体中 Al^{3+} 的主要物质来源。②孔隙介质始终保持

酸性。有酸性流体的来源并使成岩流体环境始终保持酸性是形成自生高岭石的必要条件。据Franks等(1984)^[20]对德克萨斯湾岸地区的研究,在pH值为5.3~6.0条件下,铝硅酸盐类矿物在酸性流体中发生溶蚀反应可生成自生高岭石。③砂岩孔渗性较好。在长石溶蚀产生自生高岭石的过程中,同时有 K^+ 和 Na^+ 等碱性离子析出,如果这些离子不能及时排出孔隙,这些碱性离子在孔隙介质中的富集将会改变介质条件的性质,终止长石高岭石化的反应^[21]。因此,流体具有较强的动力是保持酸性的成岩环境,形成自生高岭石的重要控制因素^[22]。

2.1 物质来源

作为砂岩储层中最常见的自生粘土矿物之一,高岭石是岩石骨架颗粒与孔隙流体在酸性成岩环境中发生化学反应的产物,高岭石的析出常与长石和酸性岩屑等溶蚀作用伴生^[22]。

研究区砂岩储层中含有机酸和 CO_2 的酸性流体与长石的成岩反应是自生高岭石形成的重要物质来源。通过偏光显微镜及扫描电镜,观察到研究区砂岩储层中部分晶体形态发育较好的自生高岭石占据了长石溶蚀形成的粒内孔隙(图2a),而且高岭石的析出常与长石溶蚀现象伴生,在高岭石发育的地方,也是长石溶蚀的区域,并常见自生石英矿物与自生高岭石相伴

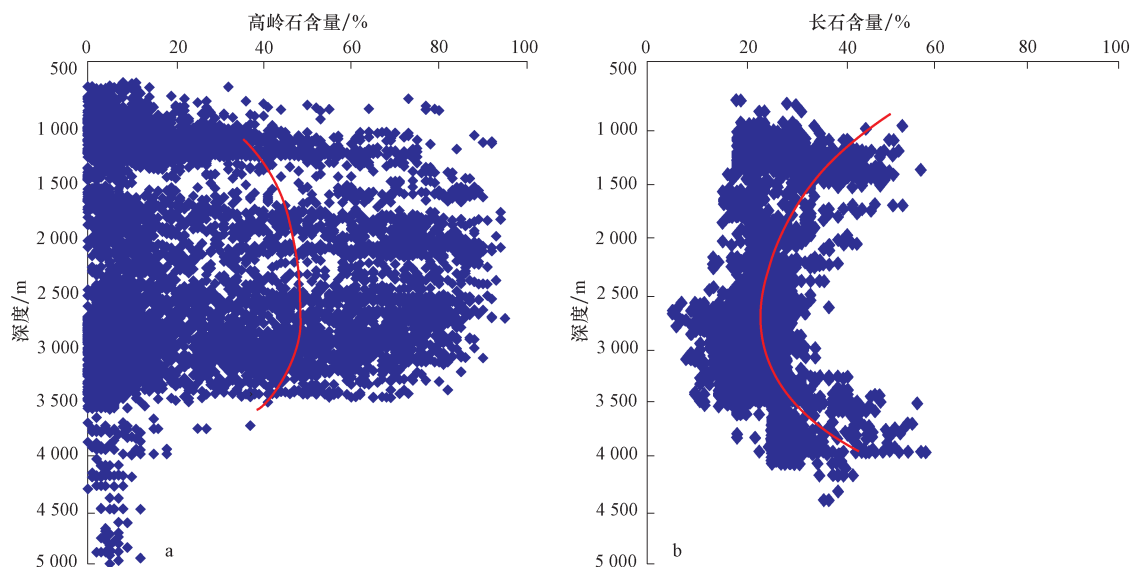
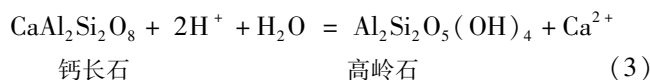
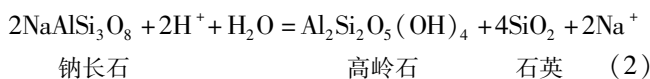
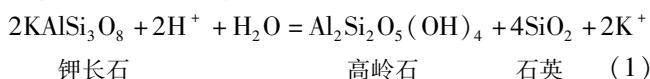


图3 东营凹陷高岭石(a)和长石(b)含量随深度变化

Fig. 3 Kaolinite(a) and feldspar(b) content vs. depth in the Dongying Sag

生的镜下特征(图2e)。对研究区砂岩储层中的矿物含量进行X-射线衍射分析测试,结果表明,砂岩中长石类矿物含量与高岭石含量之间呈明显的负相关关系(图3,图4),而且砂岩中粘土矿物总量越少,长石与高岭石含量间负相关性就越强。随着长石含量的减少,相应高岭石含量增加,说明研究区高岭石的形成与长石类矿物的溶蚀作用有关。以上证据均说明自生高岭石是长石等铝硅酸盐矿物的溶蚀产物。Osborne等(1994)^[23]认为北海地区Brent组砂岩中大量的自生高岭石由长石的溶蚀作用形成。砂岩中骨架颗粒长石与酸性孔隙流体反应,形成了 Al^{3+} 和 SiO_3^{2-} ,当铝离子和硅离子达到饱和时,孔隙流体中便结晶沉淀出来自生高岭石。由于高岭石形成时,硅离子和铝离子严格按一定比例进入高岭石的晶格,所以单晶呈典型的假六方片状、集合体呈书页状或蠕虫状等。这种成岩反应可以在温压较低的情况下完成,所以在埋藏较浅储层中可见到这种高结晶度的自生高岭石^[17,24]。碎屑岩地层中长石等铝硅酸盐矿物(钾长石、钠长石和钙长

石)溶蚀形成自生高岭石的化学反应方程为^[25]:



如果整个成岩系统的开放性较好,长石等铝硅酸盐矿物在酸性流体中的溶蚀反应形成的钾、钠和钙离子等能及时被流体带走或通过一定的成岩反应沉淀下来,就可以形成自生高岭石。

镜下观察和X-射线粉晶衍射发现,东营凹陷碎屑岩储层砂岩类型以岩屑长石砂岩为主,其次是长石砂岩和长石岩屑砂岩,含量最少的是岩屑砂岩(图5)。长石包括正长石、条纹长石、微斜长石及斜长石,总含量为16%~63%,平均含量为26.22%。钾长石含量为10%~42%,平均含量为8.55%;斜长石含量为17%~61%,平均含量为17.67%,可见长石占有较大的比例(表1)。碎屑岩储集层中含量较高的长石、岩屑类化学活性组分稳定性差,在埋藏成岩过程中容易与孔隙中流体介质发生各种化学反应,生成各种自生粘土矿物。因此,富含长石(岩屑)的骨架组成是碎屑岩储集层富含多种自生粘土矿物的物质基础。

通过镜下观察,东营凹陷长石的溶蚀现象非常普遍,长石颗粒溶蚀形成粒内溶孔,或沿解理、颗粒边缘溶蚀,形成港湾状、锯齿状边缘(图6)。东营凹陷长石含量丰富且溶蚀特征明显,具备形成自生高岭石的物质基础。

2.2 流体动力条件

含油气盆地中有机质热演化形成的有机酸和二氧

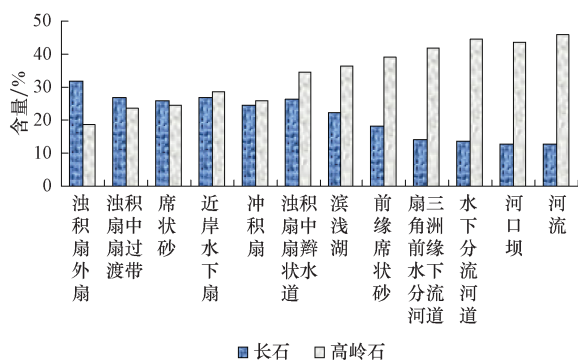


图4 东营凹陷不同沉积相(微相)高岭石含量与长石含量关系

Fig. 4 Relation between kaolinite and feldspar content in different sedimentary facies (microfacies) in the Dongying Sag

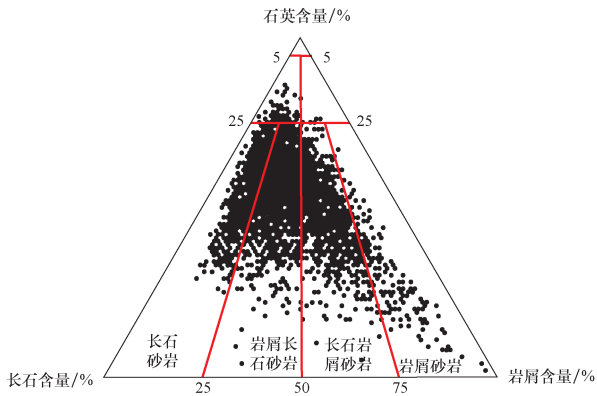


图 5 东营凹陷碎屑成分和岩石类型

Fig. 5 Detrital composition and rock types in the Dongying Sag

表 1 东营凹陷砂岩储层岩石学特征

Table 1 Petrologic characteristics of the sandstone reservoirs in the Dongying Sag

组分	石英	斜长石	钾长石	长石	岩屑
含量/%	51.76	17.67	8.55	26.22	22.02

化碳在自生高岭石形成过程中具有重要作用,然而长期以来对自生高岭石成因的认识仍仅停留在有机酸和碳酸提供了有利于其形成的酸性环境方面,有关其它方面的论述甚少。除酸性的流体环境,一定的流体动力条件也是自生高岭石形成的重要控制因素。

统计发现,东营凹陷粒度偏中等的砂岩中高岭石的相对含量最高,粗砂岩中高岭石含量为 52.00%,细砂岩中高岭石为 46.08%,中砂岩中高岭石含量为 43.54%,而粒度较大的含砾砂岩、砾状砂岩以及粒度较小的泥质砂岩、泥质粉砂岩中高岭石的含量较低,平均含量不到 30%(图 7)。也就是高岭石在分选不好、本身渗透性差的砂岩中含量低,而在分选性好、本身渗透性强的砂岩中含量高。这也有利地说明了粒度大、分选好的砂岩具有很好的渗透系统,流体动力较强,有利于高岭石的形成。如果砂岩储集层中泥质杂基等含量较高,会降低孔隙流体的渗流强度,长石溶蚀弱,就很难形成自生高岭石。

自生高岭石的形成条件需要开放性的成岩体系、酸性流体场特征以及发育较好的孔隙系统。酸性地层水溶蚀含有硅、铝元素的矿物,当 Si^{4+} 和 Al^{3+} 浓度达到过饱和时,则在砂岩孔隙中晶析出自生高岭石。如果上述成岩反应后的地层水被及时排出,而含 Si^{4+} 和 Al^{3+} 的水不断进入岩石孔隙中,则会连续形成自生高岭石。能生成自生高岭石的成岩环境本身应具有较好的孔、渗条件。长石类矿物与酸性孔隙流体反应形成自生高岭石时,如果长石溶蚀释放出的钾、钠等碱性离子不能被成岩流体及时带到别处,碱性离子的逐渐富集就会使孔隙流体性质发生改变,酸度降低,矿化度增大,从而形成自生伊利石或绿泥石等粘土矿物。因此,

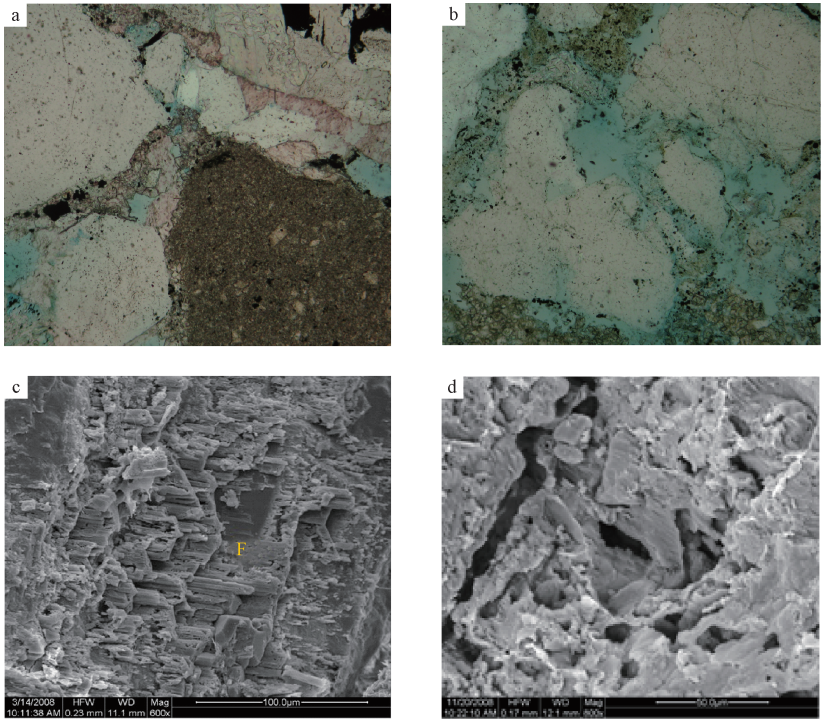


图 6 东营凹陷长石溶蚀特征

Fig. 6 Feldspar dissolution characteristics in the Dongying Sag

- a. 长石被溶蚀呈铸模状,利 563 井,埋深 2 570.70 m,10 × ; b. 长石沿颗粒边缘溶蚀,利 563 井,埋深 2 575.40 m,10 × ;
c. 长石沿解理溶蚀呈条带状,盐 227 井,埋深 3 841.14 m; d. 长石溶蚀,溶蚀孔、溶蚀缝,牛 47 井,埋深 2 774.00 m

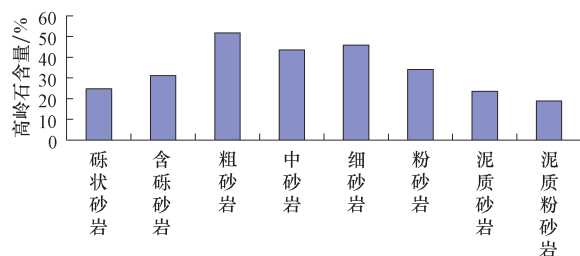


图7 东营凹陷不同粒度砂岩高岭石(相对)含量

Fig.7 Kaolinite (relative) content in sandstones with different granularity in the Dongying Sag

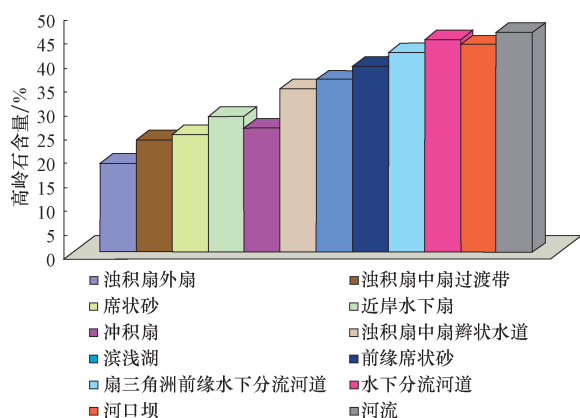


图8 东营凹陷不同沉积相(微相)中高岭石含量

Fig.8 Kaolinite content in different sedimentary facies (micro facies) in the Dongying Sag

一些主力油层砂岩中高岭石含量的高低与砂岩渗透率的高低具有明显的相关性。

不同沉积相中高岭石含量统计结果表明(图8),高岭石的分布往往与沉积相带有着较为密切的关系。不同的沉积相和沉积微相中高岭石的含量有很大的差异性,最有利于自生高岭石发育的是河口坝、水下分流河道和前缘席状砂等沉积微相,高岭石含量最高,达40%以上,其次是冲积扇和近岸水下扇等,高岭石含量大约在25%~40%。河道砂岩和三角洲前缘砂坝等砂岩储层富含高岭石是由于其本身具有良好的孔隙度和渗透率,孔隙水流动性好,为高岭石形成提供了充足的空间条件和流体动力条件。但一些处于泥岩中的透镜状砂体、浊积砂体等由于渗透性低,流体活动弱,所以一般富含伊利石、伊蒙混层等碱性粘土矿物。

3 结论

1) 东营凹陷砂岩储层多见自生高岭石,在扫描电镜下结晶形态完整,晶型较好,单晶呈假六方片状,集合体呈典型的书页或蠕虫状,以分散质点式充填碎屑颗粒粒间孔和长石溶蚀粒内孔,主要分布于

物性较好的河道砂岩和三角洲前缘砂坝砂岩中。在铸体薄片,自生高岭石呈“斑状”充填于砂岩粒间孔隙中。

2) 砂岩储层中陆源高岭石较为少见,一般在浅层出现,结晶形态不完整,呈碎片状,这种高岭石是以碎屑的形式与砂粒等非粘土矿物同时在沉积过程中形成。

3) 扫描电镜及显微镜下观察,结合X射线衍射分析测试,结果表明,东营凹陷砂岩储层中自生高岭石形成的主要物质来源为长石类矿物在酸性孔隙流体中的溶蚀作用。

4) 统计发现研究区粒度大、分选好的砂岩储层高岭石含量较高,说明除酸性的流体环境和一定的物质供应外,较强的流体动力条件也是自生高岭石形成的重要控制因素。

参 考 文 献

- [1] Surdam R C, Crossey L J, Hagen E S, et al. Organic-inorganic interaction and sandstone diagenesis[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(1): 1-23.
- [2] Emery D, Meyers K. Ancient subaerial exposure and freshwater leaching in sandstones[J]. Geology, 1990, 18: 1178-1181.
- [3] 伏万军. 粘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): 59-67.
Fu Wanjun. Influence of clay minerals on sandstone reservoir properties[J]. Journal of Palaeogeography, 2000, 2(3): 59-67.
- [4] 曹剑, 张义杰, 胡文瑄, 等. 油气储层自生高岭石发育特点及其对物性的影响[J]. 矿物学报, 2005, 25(4): 367-373.
Cao Jian, Zhang Yijie, Hu Wenxuan, et al. Developing characteristics of kaolinite in central Junggar Basin and their effect on the reservoir quality [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2005, 25(4): 367-373.
- [5] 陈鑫, 钟建华, 袁静, 等. 渤海洼陷古近系高岭石发育特征及转化机理[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(4): 456-462.
Chen Xin, Zhong Jianhua, Yuan Jing, et al. Development and formation of Paleogene kaolinite, Bonan Subsalt [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(4): 456-462.
- [6] 张建培, 葛和平, 漆滨汶. 西湖凹陷砂岩自生高岭石发育特征及其对储层物性的影响[J]. 海洋石油, 2008, 20(6): 362-366.
Zhang Jianpei, Ge Heping, Qi Binwen. Characteristics of authigenic kaolinite in sandstones of Xihu Sag and its impact on reservoir physical properties [J]. Offshore Oil, 2008, 20(6): 362-366.
- [7] 钟大康, 周立建, 孙海涛, 等. 储层岩石学特征对成岩作用及孔隙发育的影响——以鄂尔多斯盆地陇东地区三叠系延长组为例[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(6): 890-899.
Zhong Dakang, Zhou Lijian, Sun Haitao, et al. Influences of petrologic features on diagenesis and pore development: an example from the Triassic Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(6): 890-899.
- [8] 国殿斌. 东濮凹陷三叠系裂缝性砂岩储层微观孔隙结构特征[J]. 断块油气田, 2011, 18(2): 191-194.

- Guo Dianbin. Characteristics of micropore structure of Triassic sandstone reservoir in Dongpu Depression [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(2): 191–194.
- [9] 钟大康,周立建,姚泾利,等. 储层岩石学特征对成岩作用及孔隙发育的影响——以鄂尔多斯盆地陇东地区三叠系延长组为例[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(6): 890–899.
- Zhong Dakang, Zhou Lijian, Yao Jinli, et al. Influences of petrologic features on diagenesis and pore development: an example from the Triassic Yanchang Formation in Longdong area, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(6): 890–899.
- [10] 史鹏,陈清华,陈义国,等. 海安凹陷南部泰一段成岩作用类型及特征[J]. 石油地质与工程, 2012, 26(5): 32–34.
- Shi Peng, Chen Qinghua, Chen Yiguo, et al. Diagenesis types and characteristics of the 1st member of Taizhou Formation in the south Haian Sag [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2012, 26(5): 32–34.
- [11] 王雅楠,李达,齐银,等. 苏里格气田苏14井区盒8段储层成岩作用与孔隙演化[J]. 断块油气田, 2011, 18(3): 297–300.
- Wang Yanan, Li Da, Qi Yin, et al. Diagenesis and pore evolution of He 8 reservoir in Well Block Su 14 of Sulige Gas Field [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(3): 297–300.
- [12] 陈朝兵,朱玉双,陈新品,等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区延长组长8²储层沉积成岩作用[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 685–693.
- Chen Zhaobing, Zhu Yushuang, Chen Xinjing, et al. Sedimentation and diagenesis of Chang 8² reservoir in the Yanchang Formation in Jiuyan region, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(5): 685–693.
- [13] 张兴良,田景春,王峰,等. 致密砂岩储层成岩作用特征与孔隙演化定量评价——以鄂尔多斯盆地高桥地区二叠系下石盒子组盒8段为例[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 212–217.
- Zhang Xingliang, Tian Jingchun, Wang Feng, et al. Diagenetic characteristics and quantitative porosity estimation of tight sandstone reservoirs: a case from the 8th Member of Permian [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 212–217.
- [14] 张关龙,陈世悦,鄢继华. 东营凹陷郑家—王庄地区沙河街组粘土矿物特征及其与储层伤害的关系[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2006, 30(6): 7–12.
- Zhang Guanlong, Chen Shiyue, Yan Jihua. Relation between clay mineral characteristics and formation damage of Shahejie Formation of Zhengjia-Wangzhuang areas in Dongying Depression [J]. Journal of China University of Petroleum, 2006, 30(6): 7–12.
- [15] 周建国. 东营凹陷自生粘土矿物特征及其与盆地演化的关系[J]. 油气地质与采收率, 2004, 11(4): 7–9.
- Zhou Jianguo. Features on authigenic clay minerals in the Dongying Depression and their relation to the basin evolution. [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2004, 11(4): 7–9.
- [16] 伏万军,刘文彬. 塔里木盆地碎屑岩中钾长石的蚀变作用[J]. 沉积学报, 1996, 14: 84–89.
- Fu Wanjun, Liu Wenbin. Study on the alteration of feldspar from clastic rock in Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1996, 14: 84–89.
- [17] 车启鹏,孙洪斌,张凤莲,等. 牛居地区下第三系砂岩储层中自生高岭石成因分析[J]. 长春地质学院学报, 1995, 25(3): 306–309.
- Che Qipeng, Sun Hongbin, Zhang Fenglian, et al. Authigenic kaolinite origin analysis of Paleogene sandstone reservoir in Niuju area [J]. Journal of Changchun University of Earth Sciences, 1995, 25(3): 306–309.
- [18] 张守鹏. 有利于油气保存的地下成岩环境分析——以渤海湾盆地东营凹陷 RD1 井为例[J]. 石油实验地质, 2008, 30(1): 11–15.
- Zhang Shoupeng. Analysis of underground diagenetic environment favorable for oil and gas storage: a case study of well RD1, Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Experiments, 2008, 30(1): 11–15.
- [19] Stoessell R K. Kaolinite formation in clastic reservoirs carbon dioxide factor[J]. AAPG Bulletin, 1981, 65(5): 991–998.
- [20] Franks S G. Relationships among carbon dioxide, pore fluid chemistry, and second porosity, Texas Gulf coast [J]. AAPG, 1984, 68(4): 478.
- [21] 赵杏媛. 粘土矿物与油气[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(4): 533–536.
- Zhao Xingyuan. The impact of clay minerals on oil-gas reservoir [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 30(4): 533–536.
- [22] 王少依,王行信,韩守华. 影响我国陆相碎屑岩储集层粘土矿物组合和分布的因素[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(6): 19–21.
- Wang Shaoyi, Wang Xingxin, Han Shouhua. Factors affecting the clay mineral components and distributions of continental clastic reservoir in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(6): 19–21.
- [23] Osborne M, Baseline R S, Fallick A E. Variation in kaolinite morphology with growth temperature in isotopically mixed pore-fluids, Brent Group, UK North Sea [J]. Clay Minerals, 1994, 29: 591–608.
- [24] 张关龙,陈世悦,鄢继华,等. 郑家、王庄地区沙三段高岭石矿物特征及对储层物性的影响[C]//第三届全国沉积学大会论文摘要汇编, 2004: 671–674.
- Zhang Guanlong, Chen Shiyue, Yan Jihua, et al. Characteristics of authigenic kaolinite i and its impact on reservoir physical properties of Es³ in Zhengjia-Wangzhuang areas [C]//The Third National Congress of Sedimentology, 2004: 671–674.
- [25] 赖兴运,于炳松,陈军元,等. 碎屑岩骨架颗粒溶解的热力学条件及其在克拉2气田的应用[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2004, 34(1): 45–53.
- Lai Xingyun, Yu Bingsong, Chen Junyuan, et al. Thermodynamics condition for dissolution of framework grain minerals of clastic rocks and its application in Kela 2 gas field [J]. Science in China (D Series: Earth Sciences), 2004, 34(1): 45–53.

(编辑 张玉银)