

文章编号: 1000-0550(2013)04-0616-05

# 东营凹陷泥页岩矿物组成及脆度分析

李钜源

(胜利油田地质科学研究所 山东东营 257000)

**摘要** 对东营凹陷泥页岩矿物组成、脆度进行了系统研究,并与北美页岩进行了对比。研究表明:东营凹陷沙三下和沙四上亚段泥页岩主要由黏土矿物、陆源碎屑矿物(主要指石英和长石)和自生非黏土矿物(主要指碳酸盐和黄铁矿)三部分组成;泥页岩黏土矿物含量平均只有25%左右,远低于海相泥岩和传统观点;石英含量平均为29%,远低于海相页岩;长石含量平均约5%,高于海相泥岩;自生的碳酸盐矿物含量较高,平均约37%;分析认为,陆相盆地面积较小、距物源区近以及相变快是导致研究区泥页岩矿物组成特征的主要原因。鉴于此,提出了新的脆度计算方法并计算了东营凹陷泥页岩的石英脆度、碳酸盐脆度和总脆度。对比发现,碳酸盐含量与泥页岩脆度相关性较好,是影响泥页岩脆度的主要因素。最后指出:研究区泥页岩脆性较好,易于形成天然裂缝或被压裂,是页岩气潜在的有利储层。

**关键词** 泥页岩 矿物组成 页岩气 储层 脆度 东营凹陷

**第一作者简介:** 李钜源 男 1962年出生 博士 高级工程师 石油地质 E-mail: lijuyuan356.slyt@sinopec.com

**中图分类号** TE122.2 **文献标志码** A

传统观点认为:泥岩结构致密、储集物性差,属于非储层。近年来,页岩气在北美地区得到迅猛发展,如美国2006年页岩气产量仅占天然气总产量1%<sup>[1]</sup>,2011年已达34%(产量为 $1\ 800 \times 10^8\ \text{m}^3$ ),预计2035年将超过60%,这充分表明泥页岩能够成为良好储层,其储集性研究也逐渐引起人们的高度重视。裂缝不仅是泥页岩储层的重要储集空间,而且对页岩气开发具有重要意义<sup>[2,3]</sup>。但目前,泥岩裂缝研究主要侧重于外因(如构造应力等),而对内因(如矿物成分以及脆性)重视不够。

本文对东营凹陷沙河街组沙四上( $E_{s_{4s}}$ )和沙三下( $E_{s_{3x}}$ )亚段两套泥页岩矿物组成进行了系统分析,研究了其脆性与矿物组成关系,并与北美地区典型页岩气储层进行了对比。希望能对陆相盆地泥页岩储层的矿物组成特征、物源成因和力学性质等方面的研究有所帮助。

## 1 泥页岩矿物组成特征

东营凹陷位于济阳拗陷东南部,是中国油气最为富集的地区之一。始新世—渐新世早期,凹陷沉积了沙四上亚段( $E_{s_{4s}}$ )、沙三下亚段( $E_{s_{3x}}$ )和沙三中亚段( $E_{s_{3z}}$ )三套烃源层。其中, $E_{s_{4s}}$ 、 $E_{s_{3x}}$ 泥岩属于半深湖—深湖相沉积,岩性主要为纹层状构造泥岩、页岩、油页岩与具块状层理泥岩形成的不等厚互层。纹层泥

岩和页岩有机碳含量较高,一般在3.0%~5.0%之间,部分在10.0%以上;块状泥岩有机质的丰度相对较低,一般在1.5%~3.0%之间; $E_{s_{3z}}$ 属于前三角洲相沉积,以块状泥岩为主,有机碳含量较 $E_{s_{4s}}$ 低,大多<2.5%。总体上, $E_{s_{4s}}$ 、 $E_{s_{3x}}$ 两套泥页岩厚度大、有机质丰富、成熟度较高,是东营凹陷的主力烃源岩。也是东营凹陷页岩油气勘探的最有利层段。

共采集东营凹陷不同地区、不同深度的215个泥岩样品,通过“X”衍射全岩分析,确定了 $E_{s_{3x}}$ 、 $E_{s_{4s}}$ 泥页岩矿物成分。研究区泥页岩主要由陆源碎屑矿物、黏土矿物和自生非黏土矿物三部分组成,各矿物特征如下。

### 1.1 黏土矿物

东营凹陷泥页岩中的黏土矿物含量平均不到三分之一(表1),主频在10%~40%之间。其中 $E_{s_{3x}}$ 的78个样品中黏土矿物含量超过50%的仅一块(为54%),最低为8%,平均为25.9%; $E_{s_{4s}}$ 的137个泥页岩样品中黏土矿物含量超过50%的也仅有一块(为73%),最低6%,平均为24%,主频为10%~20%(图1)。这两套泥页岩中的黏土矿物含量很接近, $E_{s_{4s}}$ 略低于 $E_{s_{3x}}$ 。

综上所述,东营凹陷 $E_{s_{4s}}$ 和 $E_{s_{3x}}$ 泥页岩中的黏土矿物含量普遍较低,远低于一般的海相泥岩和传统的观点(50%以上),且变化很大。分析认为,这主要是

收稿日期:2012-09-05;收修改稿日期:2012-12-07

表 1 东营凹陷 Es<sub>4s</sub>和 Es<sub>3x</sub>泥页岩全岩矿物组成

Table 1 Mineral composition of the Es<sub>4s</sub> and Es<sub>3x</sub> shale in Dongying Sag

层位	全岩矿物组成/%				
	黏土矿物	陆源碎屑	碳酸盐	黄铁矿	
Es <sub>3x</sub>	范围	8~54	6~57	1~74	0~13
	平均/样品数	25.9/78	33.4/78	38.3/78	2.5/78
Es <sub>4s</sub>	范围	3~73	3~76	3~91	0~14
	平均/样品数	24/137	36.0/137	37/137	2.3/137

表 2 东营凹陷 Es<sub>4s</sub>和 Es<sub>3x</sub>泥页岩碳酸盐及碎屑矿物组成

Table 2 Compositions of carbonate and mineral clast of the Es<sub>4s</sub> and Es<sub>3x</sub> shale in Dongying Sag

层位	碳酸盐/%			陆源碎屑矿物/%		
	方解石	白云石	菱铁矿	石英	长石	
Es <sub>3x</sub>	范围	1~68	0~72	0~3	6~50	0~35
	平均/样品数	34.1/78	3.9/78	0.3/78	29.1/78	4.2/78
Es <sub>4s</sub>	范围	0~89	0~87	0~12	0~66	0~42
	平均/样品数	28.9/137	7.8/137	0.3/137	28.5/137	6.9/137

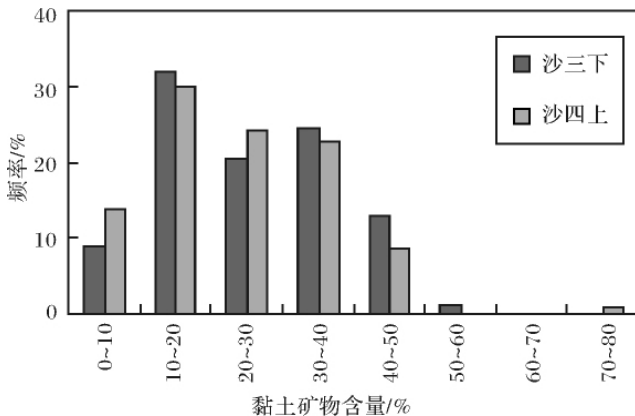


图 1 东营凹陷 Es<sub>4s</sub>和 Es<sub>3x</sub>泥页岩全岩矿物频率分布

Fig. 1 Frequency distribution of the mineral composition of the Es<sub>4s</sub> and Es<sub>3x</sub> shale in Dongying Sag

因为陆相盆地面积较小、距物源区较近,以至于泥页岩中含有较多的陆源碎屑,而黏土矿物含量较低。另外,王新洲等<sup>[4]</sup>对松辽和三水盆地泥岩进行了分析,其中松辽盆地泥岩中黏土矿物平均为 34%,三水盆地泥岩中黏土矿物平均只有 30%,其烃源岩黏土矿物含量与东营凹陷很相似。

1.2 陆源碎屑矿物

东营凹陷 Es<sub>4s</sub>和 Es<sub>3x</sub>泥页岩中的陆源碎屑矿物主要由石英和长石组成(表 2)。

与黏土矿物不同,陆源碎屑矿物在埋藏过程中常常被有机质溶蚀,形成新矿物。分析发现,研究区 Es<sub>3x</sub>、Es<sub>4s</sub>泥页岩中的石英和长石含量变化很大。其中,Es<sub>3x</sub>泥岩中的石英含量最高达 50%,最低为 6.0%,平均为 29.1%,主频为 20%~30%;长石含量最高为 35%,主频为 10%~20%,平均为 4.2%。Es<sub>4s</sub>泥岩中石英含量最高达 66%,最低为 0%,平均为 28.5%,主频为 10%~50%;长石含量最高达 42%,平均为 6.2%,主频在 0%~10%之间(表 2 图 2)。

由此可见,相对于一般的海相以石英为主的泥岩,东营凹陷 Es<sub>4s</sub>和 Es<sub>3x</sub>泥页岩中石英含量不高,而长石含量较高,表明陆相湖盆泥岩与海相泥岩在沉积物源和沉积特征上存在显著差异。

1.3 自生非黏土矿物

研究区泥页岩中的自生非黏土矿物包括碳酸盐岩和黄铁矿。

1.3.1 碳酸盐岩

分析表明:东营凹陷 Es<sub>4s</sub>和 Es<sub>3x</sub>泥页岩中普遍含有碳酸盐岩矿物,且含量较高、变化很大。其中,Es<sub>3x</sub>泥页岩中的碳酸盐含量最高为 78%,最低 1%,平均 38.3%,主频在 20%~60%之间;Es<sub>4s</sub>泥页岩中的碳酸盐含量最高达 91%,最低 3%,平均 37%(表 1),分布很分散,20%~30%和 40%~50%之间占多数。

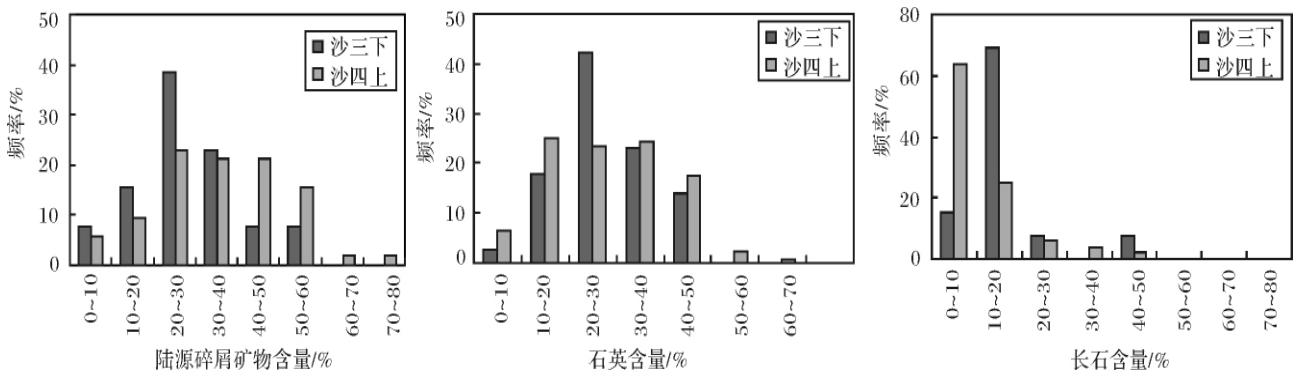


图 2 东营 Es<sub>4s</sub>和 Es<sub>3x</sub>泥页岩中陆源碎屑矿物含量频率分布图

Fig. 2 Frequency distribution of the terrigenous clast content of the Es<sub>4s</sub> and Es<sub>3x</sub> shale in Dongying Sag

这些碳酸盐矿物以方解石为主。其中,  $E_{S_{3x}}$  的方解石含量最高, 占碳酸盐岩 78%, 最低 1%, 平均 34.1%, 主频为 20% ~ 50%;  $E_{S_{4s}}$  的方解石含量最高 89%, 最低 0%, 平均 28.9%, 主频在 0% ~ 30% 之间, 明显低于  $E_{S_{3x}}$ 。另外,  $E_{S_{4s}}$  中的白云石含量最高达 87%, 平均为 7.8%, 最低为 0(表 2); 而  $E_{S_{3x}}$  仅一块样品中的白云石含量超过 50%(为 72%), 其余均低于 20%, 平均只有 3.9%(表 2)。较高的碳酸盐含量表明这些泥页岩主要发育于湖盆较大的深湖及半深湖相。

### 1.3.2 黄铁矿

研究区泥页岩中均含有一定量的黄铁矿, 且变化较大。其中,  $E_{S_{3x}}$  泥页岩中黄铁矿含量最高可达 13%, 平均为 2.5%;  $E_{S_{4s}}$  泥页岩中黄铁矿含量最高达 14%, 平均为 2.3%(表 1)。所以, 这两套泥页岩中的黄铁矿含量差别不大。黄铁矿的存在表明这两套泥页岩沉积环境为具有较强还原性的深湖及半深湖相。

## 2 泥页岩脆度分析

裂缝是泥页岩储层重要的储集空间, 它对页岩气成藏和开发均具有重要意义。裂缝的重要性在于: 一是为页岩气提供了重要的聚集空间; 二是为页岩气提供了运移通道; 三是有助于吸附气的解析。因为泥页岩的原始渗透率非常低, 如果裂缝不发育, 就需要进行压裂来产生更多裂缝, 为天然气解析提供更大的压降和面积。所以, 裂缝是控制页岩气储量和产量的重要因素。研究发现, 裂缝不仅决定了北美地区页岩气藏的品质, 而且决定了其产量, 已开发的页岩气藏多分布于裂缝带, 尤其是高产区裂缝更为发育<sup>[2]</sup>。

泥页岩中裂缝成因比较复杂, 概括起来可分为内因和外因两个方面, 其中内因主要取决于泥页岩的脆性(即脆性矿物含量), 而外因主要是地应力、温度和流体压力等<sup>[5, 6]</sup>。

北美学者在页岩气储层研究中将石英/(石英+碳酸盐+黏土矿物)代表泥岩脆度, 其原因是这些地区属于海相沉积, 泥岩中的石英含量很高, 而其它脆性矿物很少。相比之下, 由于东营凹陷  $E_{S_{4s}}$  和  $E_{S_{3x}}$  泥岩中石英和碳酸盐含量较高, 所以这些泥岩的脆性分析必须考虑石英和碳酸盐。本文将石英/(石英+碳酸盐+黏土矿物)定名为石英脆度, 将碳酸盐/(石英+碳酸盐+黏土矿物)定名为碳酸盐脆度, 将(石英+碳酸盐)/(石英+碳酸盐+黏土矿物)定名为总脆度。

根据全岩分析数据分别计算出  $E_{S_{4s}}$  和  $E_{S_{3x}}$  泥页岩的石英脆度、碳酸盐岩脆度与总脆度。结果发现,

碳酸盐岩脆度与泥页岩总脆度正相关性很好, 而石英脆度一般低于 0.6, 与总脆度的相关性较差(图 3, 图 4)。这表明碳酸盐岩是影响  $E_{S_{4s}}$  和  $E_{S_{3x}}$  两套泥页岩总脆度的关键因素。

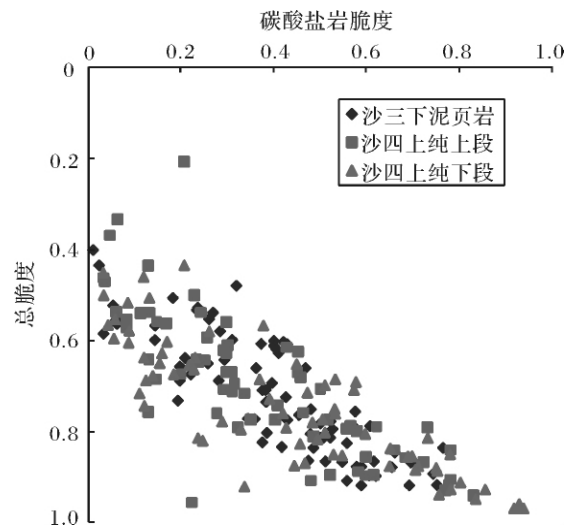


图 3 东营凹陷  $E_{S_{4s}}$  和  $E_{S_{3x}}$  泥页岩的碳酸盐脆度与总脆度关系

Fig. 3 Relations between carbonate crispness and total crispness of  $E_{S_{4s}}$  and  $E_{S_{3x}}$  shale in Dongying Sag

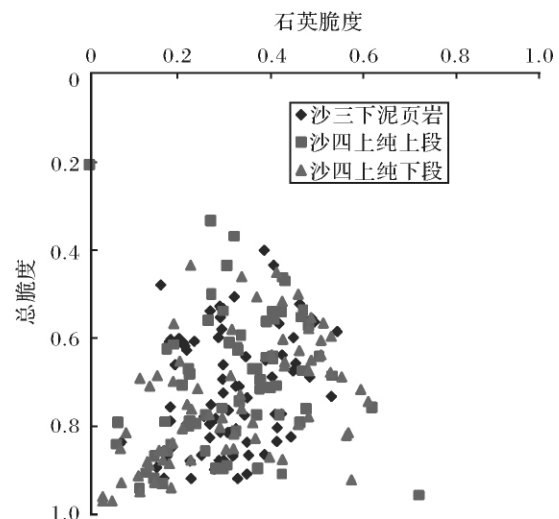


图 4 东营凹陷  $E_{S_{4s}}$  和  $E_{S_{3x}}$  泥页岩的石英脆度与总脆度关系

Fig. 4 Relations between quartz crispness and total crispness of the  $E_{S_{4s}}$  and  $E_{S_{3x}}$  shale in Dongying Sag

另外, 对比发现, 研究区泥岩的石英—碳酸盐矿物—黏土矿物三角图与北美地区泥盆系的 Macellus 和 New Albany、中生界的 Haynesville 和 Eagleford 含气页岩落在同一个区域, 表明它们具有较好的可比

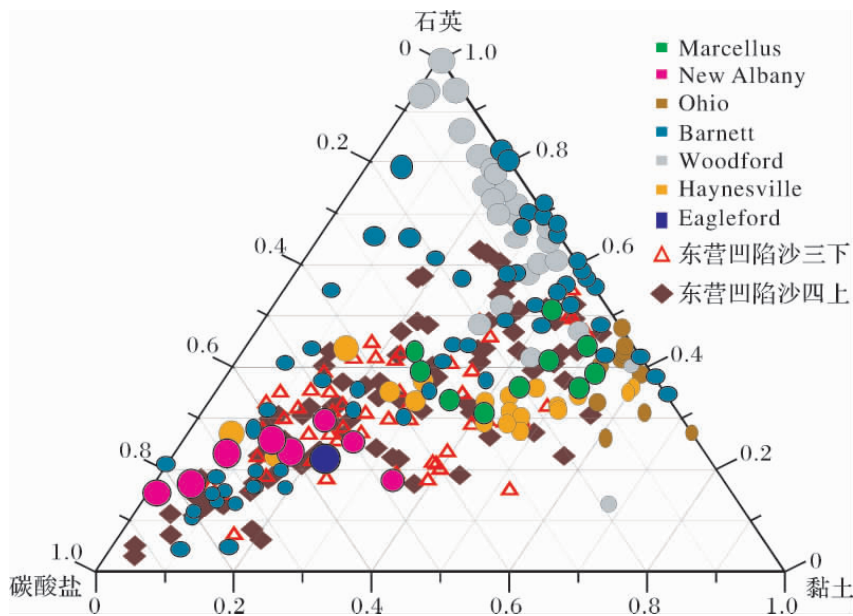


图 5 东营凹陷  $E_{s_{4s}}$  和  $E_{s_{3x}}$  泥页岩的碳酸盐—石英—黏土矿物与北美页岩对比  
 Fig. 5 Contrast between the carbonate-quartz-clay minerals of the  $E_{s_{4s}}$  and  $E_{s_{3x}}$  shale in Dongying Sag and that of the North American Shale

性,而与密西西比系的 Barnett 和 Woodford 页岩有一定差异(图 5)。

根据“X”衍射全岩显微组分鉴定结果编制了研究区  $E_{s_{4s}}$  和  $E_{s_{3x}}$  泥页岩 ( $E_{s_{3x}}$  13 块和  $E_{s_{4s}}$  55 块样品) 矿物所占体积图(图 6)。从中看出,矿物组成随泥页岩深度变化较大,石英与方解石之和主要在 40% ~ 70% 之间 ( $E_{s_{4s}}$  个别样品在 90% 以上) (图 7),与北美中生界的 Haynesville 和 Eagleford 含气页岩相近;与北美泥盆系和密西西比系泥页岩相比,研究区泥页岩中的石英含量较低而方解石含量较高(图 8)。

综上所述,东营凹陷  $E_{s_{4s}}$  和  $E_{s_{3x}}$  泥页岩中碳酸盐岩含量高、脆性好,易于形成天然裂缝(如在背斜轴部或向斜核部等构造应力集中带),有利于太裂和页岩油气开采。

### 3 结论

(1) 东营凹陷  $E_{s_{4s}}$  和  $E_{s_{3x}}$  泥页岩形成于陆相湖盆、距物源区较近,以至于其中的黏土矿物含量较低,而陆源碎屑矿物和自生的碳酸盐岩矿物含量较高,矿物组成变化较大。

(2) 碳酸盐矿物是影响东营凹陷  $E_{s_{4s}}$  和  $E_{s_{3x}}$  泥页岩脆度的主要因素。 $E_{s_{4s}}$  和  $E_{s_{3x}}$  泥页岩的脆度均较高,易于形成天然裂缝和被压裂,是页岩油气潜在的

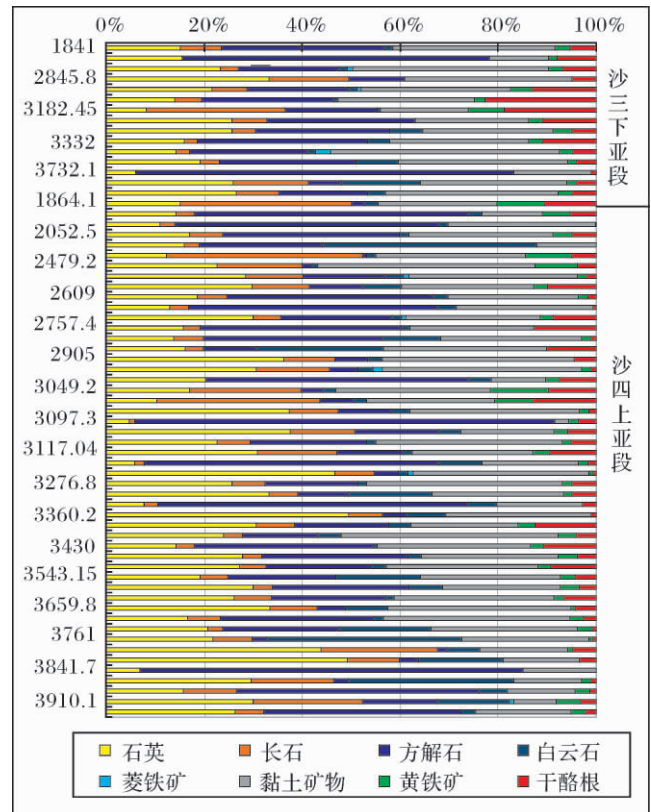


图 6 东营凹陷  $E_{s_{4s}}$  和  $E_{s_{3x}}$  泥页岩全岩矿物组成分布图  
 Fig. 6 Distribution of the mineral composition of the  $E_{s_{4s}}$  and  $E_{s_{3x}}$  shale in Dongying Sag

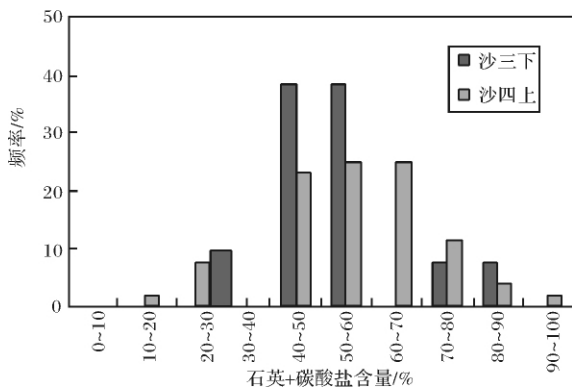


图7 东营凹陷 Es<sub>4s</sub>和 Es<sub>3x</sub>泥页岩的石英+碳酸盐含量频率分布

Fig.7 Frequency distribution of quartz and carbonate content of the Es<sub>4s</sub> and Es<sub>3x</sub> shale in Dongying Sag

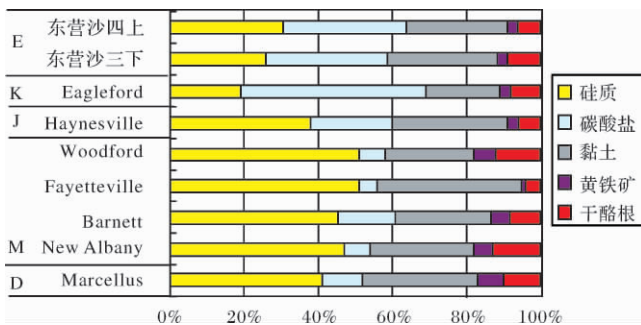


图8 东营凹陷 Es<sub>4s</sub>和 Es<sub>3x</sub>泥页岩矿物组成与北美含气页岩对比

Fig.8 Contrast between the mineral composition of the Es<sub>4s</sub> and Es<sub>3x</sub> shale in Dongying Sag and that of the gas-contained shale in North American

有利储层。

参考文献 (References)

- 李延钧,刘欢,刘家震. 页岩气地质选区及资源潜力评价方法[J]. 西南石油大学学报:自然科学版,2011,33(2):28-34 [Li Yanjun, Liu Huan, Liu Jiaxia. Geologic selection and method of resource potential evaluation of shale gas [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Natural Science Edition, 2011, 33(2): 28-34]
- 李新景,胡素云,程克明. 北美裂缝性页岩气勘探开发的启示[J]. 石油勘探与开发,2007,34(4):392-400 [Li Xinjing, Hu Suyun, Cheng Keming. Suggestions from the development of fractured shale gas in North America [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 392-400]
- 王祥,刘玉华,张敏,等. 页岩气形成条件及成藏影响因素研究[J]. 天然气地球科学,2010(21)2:350-356 [Wang Xiang, Liu Yuhua, Zhang Min, et al. Conditions of formation and accumulation for shale gas [J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(2): 350-356]
- 王新洲,宋一涛,王学军. 石油成因与排油物理模拟—方法、机理及应用[M]. 山东东营: 中国石油大学出版社,1996: 156 [Wang Xinzhou, Song Yitao, Wang Xuejun. Physical Simulation of the Origin and Expulsion of Petroleum: Methods, Mechanism and Application [M]. Dongying Shandong: Petroleum University Press, 1996: 156]
- 谢军,吕国祥,陈超. 探讨影响页岩裂缝发育的几大因素[J]. 内江科技,2011,5:19 [Xie Jun, Lü Guoxiang, Chen Chao. Several factors influencing the development of shale fractures [J]. Neijiang Science and Technology, 2011, 5: 19]
- 龙鹏宇,张金川,唐玄. 泥页岩裂缝发育特征及其对页岩气勘探和开发的影响[J]. 天然气地球科学,2011,22(3):525-532 [Long Pengyu, Zhang Jinchuan, Tang Xuan. Feature of muddy shale fissure and its effect for shale gas exploration and development [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(3): 525-532]

## Analysis on Mineral Components and Frangibility of Shales in Dongying Depression

LI Ju-yuan

(Geological scientific research institute of Shengli oilfield, Dongying, Shandong, 257000)

**Abstracts:** The mineral components and frangibilities of the shales of Es<sub>4s</sub> and Es<sub>3x</sub> of Shahejie Formation in Dongying depression were researched, and were compared with those of North America shales. The results show that those main mineral components include detrital minerals (feldspar and quartz) from land, clay minerals and non-clay minerals (carbonate rocks and pyrite) self-engendered. The average content of clay minerals is only 25%, much lower than marine shale and conventional viewpoint (over 50%). The average content of feldspar is average about 5%, higher than general marine shale. Self-engendered carbonate rocks content is rich, with average value about 37%, and changing dramatically. Short distance from origin deposition and frequently changing sedimentary facies is genesis of above shale mineral component characters. In addition, the enumerated quartz frangibility, Carbonate frangibility and total frangibility was formulated for continental basin shale, and the enumerated quartz frangibilities, carbonate frangibilities and total frangibilities of shales of the Dongying depression were calculated, it was founded that the content of carbonate is mainly affection factor for frangibility of the shales. The results indicate that the shale of the Dongying depression are easily to form natural fractures or easily to be crushed, and are potential reservoirs for shale gas.

**Key words:** shale; mineral component; shale gas; reservoir; frangibility; Dongying depression