

东营凹陷东段始新统红层储层多重成岩环境及演化模式

牛栓文^{1,2}, 李继岩^{3,4}

[1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266555; 2. 中国石化胜利油田分公司鲁明油气勘探开发公司, 山东 东营 257000; 3. 中国石化胜利油田分公司地质科学研究院, 山东 东营 257000; 4. 中国石化胜利油田博士后流动工作站, 山东 东营 257000]

摘要:为了探讨成岩环境对红层储层成岩演化的控制作用,利用埋藏史恢复、薄片鉴定、扫描电镜观察、岩心常规分析等多种技术手段,运用“正演与反演”、“定性与定量”相结合的研究方法,分析了渤海湾盆地东营凹陷东段始新统红层储层成岩环境,表征了成岩作用强度,建立了多重成岩环境控制下的红层储层成岩改造模式。结果表明,根据成岩环境控制因素、影响范围和性质类型的差异性,将东营凹陷东段始新统红层储层成岩环境划分为原始碱性和埋藏酸性两个阶段,分别对应准同生期—早成岩A期、早成岩B期—中成岩A期。受控于成岩环境的差异性,不同成岩阶段成岩产物及强度差异性明显,在定量表征成岩强度的基础上,最终建立了红层储层碱性—弱酸性—中强酸性成岩环境控制的早期强胶结、弱溶蚀—中晚期中等溶蚀、弱压实的储层成岩改造模式,该模式控制下红层储层具有“早期原生孔隙快速下降、次生孔隙缓慢增长,中晚期次生孔隙迅速增大,原生孔隙缓慢下降”的孔隙演化模式。

关键词:红层;成岩环境;成岩演化;东营凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Multiple diagenetic environments and evolutionary patterns of the Eocene red beds in the eastern Dongying Sag

Niu Shuanwen^{1,2}, Li Jiyang^{3,4}

(1. Faculty of Geo-Resources and Information, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266555, China; 2. The Luming Oil and Gas Exploratory Development Ltd of Shengli Oilfield, Dongying, Shandong 257000, China; 3. Geological Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China; 4. Working Stations for Post Doctors, Dongying, Shandong 257000, China)

Abstract: In order to investigate the control of diagenetic environment on diagenetic evolution of red-beds reservoir, we studied the diagenetic environments of the Eocene red-beds in the eastern Dongying Sag Bohai Bay Basin through burial history reconstruction, thin section analysis, scanning electron microscopic observation, routine core analyses. On this basis, we described intensity of diagenesis and established evolutionary patterns of red-bed reservoirs under the control of diagenetic environment. The diagenetic environment of the Eocene red-beds in the eastern Dongying Sag is divided into two types according to the differences of control factor, range of influence and property types, namely original alkaline environment and burial acidic environment, which correspond to penecontemporaneous period-early diagenetic stage A, early diagenetic stage B-middle diagenetic stage A respectively. The diversity in diagenetic products and intensity is sharp due to the differences of diagenetic environment. A diagenetic modification model of the Eocene red-beds reservoir was established based on quantitative description of diagenetic intensity, namely “early strong cementation and weak dissolution-middle and late moderate dissolution and weak compaction” under the control of diagenetic environment with alkalinity to weak acidity-moderate-strong acidity. Red bed reservoirs under the control of this model feature in a pore evolutionary pattern of “rapid-decreasing of primary porosity, slow-growing of secondary porosity in early stage; slow-decreasing of primary porosity, rapid-growing of secondary porosity in middle and later stages”.

Key words: red-bed, diagenetic environment, diagenetic evolutionary process, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

近几年,东营凹陷东段始新统红层勘探成果丰硕,累计上报探明储量 $2\ 263 \times 10^4$ t, 预测储量 $10\ 365.73 \times 10^4$ t, 展示出研究区红层良好的勘探前景和潜力。东

营凹陷东段始新统红层储层物性较好,但其具有“埋藏深度大、颗粒分选磨圆差—中等、远离烃源岩”等多种不利储层物性的因素^[1-4]。成岩作用在红层储层埋藏

过程中对其孔隙度和渗透率的改造起着关键作用^[1-2]。现今观察到的成岩作用特征是长期地质历史演化过程中成岩环境不断变化的产物^[5-7]。成岩环境控制储层成岩作用类型,并进一步影响成岩孔隙演化过程^[7-10]。前人对东营凹陷孔店组储层成岩演化和成岩环境进行过相关的研究,认为储层经历了碱性—酸性—弱碱性的演化过程^[11-13],但前人并未将由于成岩环境改变造成的成岩改造强度及孔隙的演化过程考虑其中。本文深入剖析红层储层成岩环境,研究成岩孔隙演化动态过程,对分析红层储层孔隙演化规律具有重要的意义。在综合应用和分析研究区内20口取心井的全岩、粘土矿物、物性、薄片鉴定等多种资料的基础上,运用“成岩产物反演法和控制因素正演法”,对东营凹陷东段始新统红层储层成岩环境进行研究,对成岩现象的垂向分布特征进行定性分析,利用“定性定量相结合”的方法,表征红层储层成岩作用强度,恢复红层储层成岩孔隙演化过程。

1 地质概况

东营凹陷是一个位于济阳坳陷东南部的中、新生代断陷复合盆地,呈北东东走向,其东段主要位于广饶凸起以北(图1)。研究区新生代盆地受喜马拉雅运动控制,经历了3个断陷期,即孔店组—沙河街四段沉积的初始断陷期、沙三段—沙二下亚段沉积的断陷深陷期和沙二上亚段—东营组沉积的断陷萎缩期。其中初始断陷期发育了孔(孔店组)二段、孔一段、沙四下亚

段和沙四上亚段,而孔一段—沙四下亚段以冲积扇、冲积平原相的红色泥岩、砂岩和灰色砂岩为特征,俗称“始新统红层”。

2 成岩环境特征识别

本文利用正演法和反演法相互验证的研究思路,确定东营凹陷东段始新统红层储层成岩环境变化特征。正演法通过对影响红层储层成岩环境的主要因素进行定性分析,如有机酸和烃类注入、粘土矿物互相转化以及成岩矿物的蚀变等^[14-17],从而确定成岩环境特征。反演法则主要利用成岩作用类型反推、验证红层储层经历的成岩环境信息。

2.1 正演法

目前将储层成岩作用置于“成岩场”中进行研究是比较热点的趋势^[18-19]。本文根据红层沉积物沉积、成岩演化过程中原始水介质性质、埋藏成岩过程中温压条件变化造成的储层流体性质改变,将红层储层成岩环境分为原始成岩环境和埋藏成岩环境两个阶段来进行正演。

2.1.1 原始成岩环境

原始成岩环境受沉积时期原始水介质条件控制。前人曾对东营凹陷东段始新统红层沉积时期的原始水介质条件进行过详细研究。结果表明,红层沉积时期,古气候干旱,水介质的古盐度呈微咸水性质,水介质pH值大部分分布在8.0~8.7,说明东营凹陷东段始新统红层储层的原始成岩环境呈碱性特征^[1]。

2.1.2 埋藏成岩环境

沉积物埋藏过程中,成岩环境演化受控于温度和压力等条件的变化,导致有机酸注入、粘土矿物和早期成岩胶结物互相转变,从而使得储层流体酸碱性在时空上发生变化。东营凹陷东段始新统红层储层埋藏成岩环境主要受有机酸和烃类注入控制,粘土矿物及早期胶结物转化对其影响较小,不予讨论。有机质在75~90℃时开始大量生成有机酸,而在90~120℃时,有机酸浓度开始降低。该时期地层水性质明显受控于有机酸浓度大小,呈现酸性^[20]。

东营凹陷东段红层储层流体主要来源于北部洼陷中孔二段和沙四下亚段烃源岩生成的有机酸和烃类^[21]。本文分别选取钻穿该层系烃源岩的两口代表性探井,即王46和郝科1井。利用BasinMod 1-D软件对烃源岩埋藏史进行恢复(图2),从而确定烃源岩排有机酸时期。结合构造发育史和前人研究成

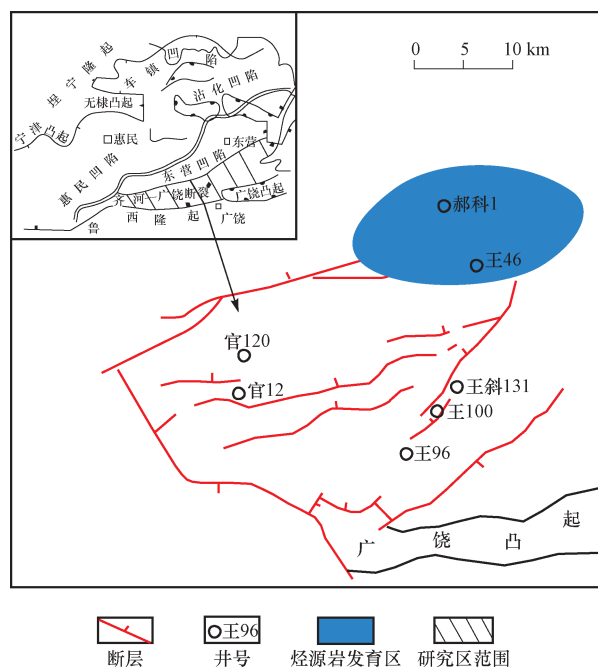


图1 东营凹陷缓坡带构造格局

Fig. 1 Structural framework of gentle slope belt in Dongying Sag

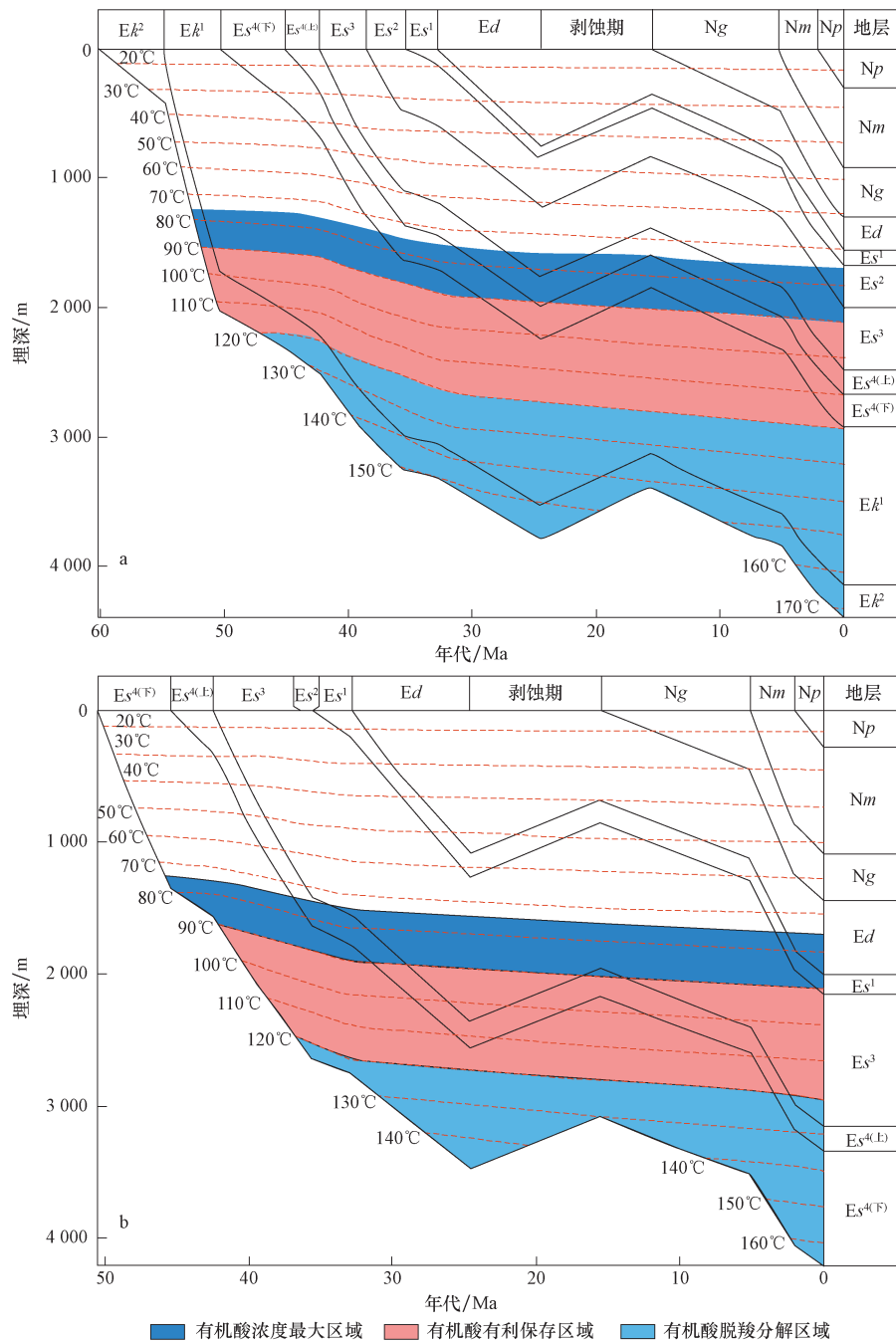


图2 东营凹陷东段王46井(a)和郝科1井(b)埋藏史

Fig. 2 Burial history of Wells Wang 46 and Haoke 1 in the eastern Dongying Sag

果^[22-23],认为孔店组沉积末期地温梯度为49.5℃/km,沙四段末期为46℃/km,沙三段沉积末期为43℃/km,沙二段沉积末期为42℃/km,沙一段沉积末期为41℃/km,东营组沉积末期为38.5℃/km,到馆陶组沉积末期为36.5℃/km,明化镇组沉积期至第四纪地温梯度又普遍下降至35℃/km左右。

以王46井为代表的孔二段烃源岩具有以下排有机酸过程:孔一段沉积中期(52.7 Ma),烃源岩底部温度达到75℃,开始生成有机酸;至沙三段沉积早期(41.6 Ma),烃源岩顶部温度达到120℃,此时孔二段烃源岩生成的有

机酸开始大量分解。孔一段沉积中期到沙三段沉积早期的长时间范围内,烃源岩所受温度处于75~120℃,该阶段孔二段烃源岩排出大量有机酸^①(图2a)。

以郝科1井为代表的沙四下亚段烃源岩排酸过程如下:沙四下亚段沉积末期(45.7 Ma),烃源岩底部温度已达到75℃,开始生成有机酸;至明化镇组沉积中期(4.8 Ma),烃源岩底部温度达到120℃,沙四下亚段烃源岩生成的有机酸开始大量分解;沙四下亚段沉积末期至明化镇组沉积中期的长时间范围内,烃源岩所受温度处于75~120℃之间,该阶段沙四下亚段烃

① 刘书会,高永进,贾光华,等. 东营南坡红层基本地质特征与油气成藏. 胜利油田地质科学研究院,2010.

源岩排出大量有机酸(图2b)。

另外,孔二段烃源岩原油充注形成油气藏的主要时期为沙三段沉积末期至东营组沉积中后期,而沙四下亚段烃源岩原油充注时期主要发生在馆陶组-明化镇组沉积时期^[21]。

基于上述分析,由于受孔二段和沙四下亚段烃源岩双重控制,大约从孔一段沉积中期(52.7 Ma)开始,东营凹陷东段红层储层受有机酸和烃类影响,储层流体性质呈现酸性。因此,埋藏成岩过程中红层储层基本以持续的弱酸性-酸性环境为主。

2.2 反演法

以东营凹陷东段始新统红层为目的层段,对20余口单井的150余张岩石薄片进行了系统的观察鉴定。结果表明,东营凹陷东段始新统红层储层中主要发生压实作用、胶结作用、溶解作用以及交代作用4种成岩作用类型。其中,胶结作用和溶解作用能够很好地反映红层储层原始碱性和埋藏酸性成岩环境信息。

2.2.1 原始碱性成岩环境产物

1) 石英溶蚀

石英溶蚀是碱性成岩环境的重要特征^[8],东营凹陷东段始新统红层储层中石英溶蚀现象较为普遍。可见石英颗粒边缘被溶蚀的港湾状现象以及石英溶蚀缝(图3e,f)。石英溶蚀边缘常与早期碳酸盐胶结物共生,反映了石英溶蚀现象发生时间早(图3e)。

2) 早期碳酸盐胶结物

早期碳酸盐胶结物是直接由偏碱性的原始沉积物孔隙水中沉淀形成的,反映原始水介质偏碱性^[24-25]。通过大量的镜下薄片观察,东营凹陷东段始新统红层储层中大量的碳酸盐胶结物呈环带状结构分布在碎屑颗粒周围(图3b,c),表明碳酸盐胶结物形成时间早,是在大规模压实作用发生之前形成的。早期碳酸盐胶结物中方解石含量一般在10%~15%,白云石含量在3%~5%,晶形呈现隐晶、显晶、显微-微晶、微晶和微-细晶等结构。

3) 硬石膏胶结物

硬石膏是早期碱性水介质中形成的石膏胶结物,随着地层埋藏深度的增加,在一定温度条件下(大约90~110℃)脱水形成的产物。东营凹陷东段始新统红层储层中发育一定数量的硬石膏(图3d),主要分布在200 m以下的深度范围内(对应地层温度大于90℃)。硬石膏胶结物的存在说明在红层沉积时期,原始水介质呈弱碱性-碱性。

2.2.2 埋藏酸性成岩环境产物

1) 长石溶蚀和石英次生加大边

长石在酸性介质中发生溶解,沿着解理面可以发生破裂形成溶蚀缝,其溶蚀的产物主要是高岭石和SiO₂,为石英的次生加大提供了重要的物质基础。东营凹陷东段始新统红层储层中长石溶蚀现象非常普遍,形成溶蚀缝和港湾状边缘等(图4a,b),石英次生加大现象明显(图4c,d)。

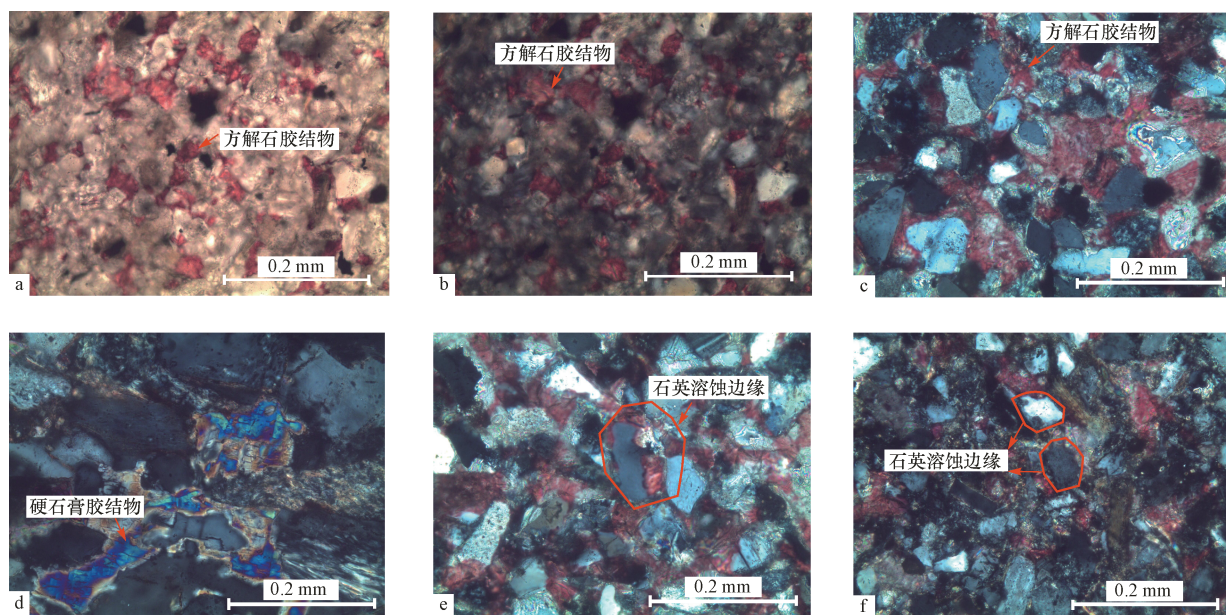


图3 东营凹陷东段碱性环境中的成岩产物

Fig. 3 Diagenetic products of the alkaline environment in the eastern Dongying Sag

- a. 早期晶形较小的方解石胶结物呈环带状分布在碎屑颗粒周围(单偏光镜下),王斜131,埋深2 251.36 m;b. 早期晶形较小的方解石胶结物呈环带状分布在碎屑颗粒周围(正交光镜下),王100,埋深2 130.2 m;c. 早期晶形较小的方解石胶结物呈悬浮状分布在碎屑颗粒周围(正交光镜下),王100,埋深2 120.2 m;d. 硬石膏胶结物(正交光下),官12,埋深3 320.6 m;e. 石英溶蚀锯齿状边缘,红色标注为石英颗粒(正交光下),王100,埋深1 806.5 m;f. 石英被溶蚀的锯齿状边缘,红色标注为石英颗粒(正交光下),官12,埋深3 323.5 m

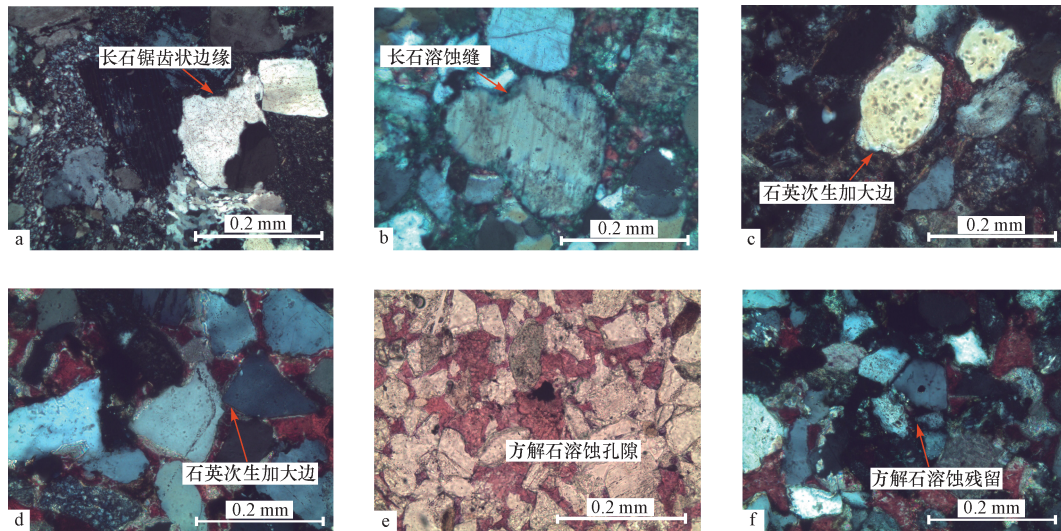


图4 东营凹陷东段酸性环境中的成岩产物

Fig. 4 Diagenetic products of the acidic environment in the eastern Dongying Sag

- a. 长石被溶蚀的锯齿状边缘(正交光下),王113,埋深2 295.72 m;b. 长石沿着解理面被溶蚀的裂缝和锯齿状边缘(正交光镜下),王斜99,埋深2 098.18 m;
c. 石英次生加大边(正交光镜下),官111,埋深2 113.65 m;d. 石英次生加大边(正交光下),王斜99,埋深2 096.18 m;e. 方解石被溶蚀的孔洞(单偏光下),王斜131,埋深2 254.76 m;f. 方解石和长石被溶蚀,孔隙中隐约见方解石颗粒(正交光下),王100,埋深1 780.6 m

2) 早期碳酸盐胶结物溶解

早期碳酸盐胶结物在酸性环境中发生溶解,可形成大量的次生孔隙。东营凹陷东段始新统红层储层中早期碳酸盐胶结物溶蚀现象普遍,可见溶蚀的港湾状边缘以及被溶蚀后残余晶形较小的碳酸盐胶结物(图4e,f)。

石英的次生加大向来被看作是酸性流体活动的直接证据,而碳酸盐胶结物及长石的溶解和蚀变进一步证实了研究区酸性流体活动的存在^[26]。

3 东段红层储层成岩现象垂向特征

东营凹陷东段红层储层中具有酸性和碱性交替变化的成岩环境,发生了酸性成岩作用和碱性成岩作用。通过统计东营凹陷东段红层储层大约20口井的近

550个方解石和粘土矿物含量数据点,做出其垂向分布特征图。如图5所示,在深度大于2 200 m的储层中,高岭石含量总体较高(一般大于15%),暗示了偏酸性环境的存在,相对应的方解石含量总体较低,但有少数样品含量较高,说明了局部碱性流体的活动;蒙脱石含量与伊利石和绿泥石含量具有此消彼长的关系,说明了蒙脱石逐渐向绿泥石和伊利石转化的过程。当深度小于2 200 m时,高岭石和绿泥石含量迅速降低,同时方解石含量迅速增大,这充分说明了在富钾碱性水环境下,高岭石向伊利石转化,并发生方解石胶结物沉淀。东营凹陷东段始新统红层储层中方解石和粘土矿物含量以2 200 m为界,具有明显的变化特征。分析原因为深度小于2 200 m的储层位于凹陷边缘,远离烃源岩,受后期有机酸注入影响较小,整体环境以碱性为主;反之,当深度大于2 200 m时,离凹陷烃源岩

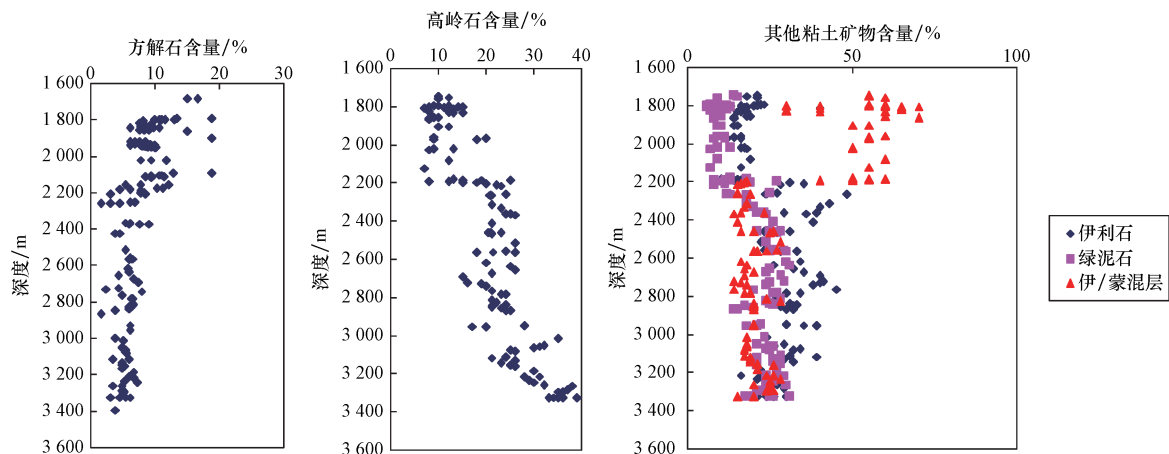


图5 东营凹陷东段始新统红层储层中方解石和粘土矿物含量垂向分布

Fig. 5 Vertical distribution of calcite and clay contents in the Eocene red-bed reservoir in the eastern Dongying Sag

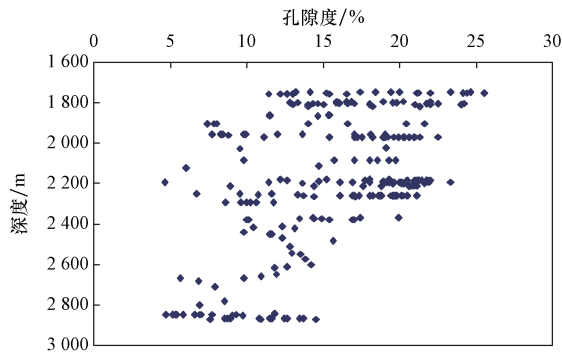


图 6 东营凹陷东段始新统红层储层孔隙度与深度关系
Fig. 6 Relation between porosity and depth of the Eocene red-bed reservoir in the eastern Dongying Sag

近,受后期有机酸影响范围大,成岩环境呈酸性。这说明东营凹陷东段始新统红层储层存在由碱性成岩环境向酸性成岩环境的演变。

东营凹陷东段始新统红层储层中,成岩作用特点在垂向上规律性比较明显,孔隙度整体较大,具有自浅至深逐渐降低的趋势(图 6)。当地层埋深小于 2 200 m 时,储层孔隙发育,以原生孔隙为主,少量次生溶孔。形成的早期碳酸盐胶结物抑制了压实作用大规模发生,且由于远离烃源岩,有机酸溶蚀作用弱,但可见石英的溶蚀现象以及长石次生加大边。当储层埋深大于 2 200 m 时,次生孔隙发育,原生孔保存较少,早期碳酸盐胶结物和长石发生大规模溶蚀,产生了大量次生孔隙,含铁碳酸盐胶结物和硬石膏胶结物出现。通过对东营凹陷东段始新统红层储层成岩现象的统计分析,认为红层储层成岩环境由浅至深表现为碱性(局部酸性)—酸性。

4 成岩环境控制下储层成岩演化模式

4.1 成岩作用强度定量表征

东营凹陷东段始新统红层储层主要发生了压实作用、胶结作用、溶蚀作用以及交代作用等 4 种成岩作用。前两种成岩作用类型破坏红层储层物性,降低原生孔隙度。第 3 种成岩作用对储层物性具有一定的建设性,产生次生孔隙。交代作用对储层孔隙度贡献可忽略不计。本文选择对储层物性有影响的成岩作用类型,进行成岩强度定量计算。选取视胶结率、视溶蚀率、视压实率 3 个参数^[27-29],对成岩作用强度进行定量表征,公式如下:

$$\text{视胶结率}(\beta) = \frac{\text{胶结物体积}}{(\text{杂基体积} + \text{粒间体积})} \times 100\%$$

(1)

$$\text{视压实率}(\alpha) = \frac{(\text{原始孔隙度} - \text{粒间体积})}{\text{原始孔隙度}} \times 100\%$$

(2)

$$\text{视溶蚀率}(\gamma) = \frac{\text{次生溶孔面孔率}}{\text{总面孔率}} \times 100\% \quad (3)$$

通过对东营凹陷东段始新统红层砂岩铸体薄片、普通薄片、全岩矿物 X-衍射和岩心常规分析等大量基础资料进行统计、筛选及归位。砂岩中胶结物平均体积为 15.1%,杂基含量较少,体积约为 3.5%,粒间平均体积为 27.2%,次生溶孔面孔率为 5.37%,总面孔率为 13.47%。选取砂岩的原始孔隙度为 35%,对 3 个成岩强度参数进行计算,视胶结率为 49.2%,视压实率为 22.3%,视溶蚀率为 39.9%。参考陈春强(2006 年)对东营凹陷古近系成岩强度定量表征参数划分标准^[30],认为东营凹陷始新统红层储层经历了中等胶结、弱压实及中等溶蚀的成岩过程(表 1)。

4.2 东营凹陷东段始新统红层储层成岩演化

砂岩储层的成岩演化是一个复杂的物理化学变化过程,东营凹陷始新统红层储层已达到中成岩 A 期,期间经历了准同生期和早成岩 A 期、早成岩 B 期以及中成岩 A 期。在对东营凹陷东段始新统红层储层成岩环境特征、成岩事件序列、成岩作用强度定量表征的基础上,综合考虑地层埋藏史和成岩阶段划分等因素,深入分析每个阶段影响红层储层孔隙度变化的主要成岩作用类型,建立了东营凹陷东段始新统红层储层多重成岩环境演化与储层孔隙演化模式,即碱性—弱酸性—中、强酸性成岩环境控制的早期中等胶结、弱溶蚀—中、晚期中等溶蚀、弱压实的储层成岩改造模式(图 7)。

4.2.1 准同生期和早成岩 A 期(54.9~52.7 Ma)

该阶段成岩作用受控于原始碱性水介质条件,发生碱性成岩作用。主要表现为:早期碳酸盐胶结物大量形成,呈环带状分布在碎屑颗粒周围,以方解石、白云石为主,石膏、方沸石胶结物少量出现。部分石英颗粒边缘发生溶蚀,形成锯齿状边缘及裂缝。可见早期碳酸盐胶结物交代石英和长石颗粒现象。早期碳酸盐胶结物的大量存在抑制了压实作用的大规模发生。该阶段红层储层孔隙度演化主要受控于胶结作用,导致沉积物原生孔隙度大幅度降低,胶结物平均体积大约为 15.1%,原生孔隙度降低至 19.9%。溶蚀产生的次生孔隙较少,计算过程中忽略不计。

表 1 成岩作用强度划分标准

Tab. 1 Standards for division of diagenetic intensity

成岩参数	划分标准/%	强度标准
	0~30	弱
视胶结率(β)	30~50	中等
视压实率(α)	50~70	较强
视溶蚀率(γ)	70~100	强

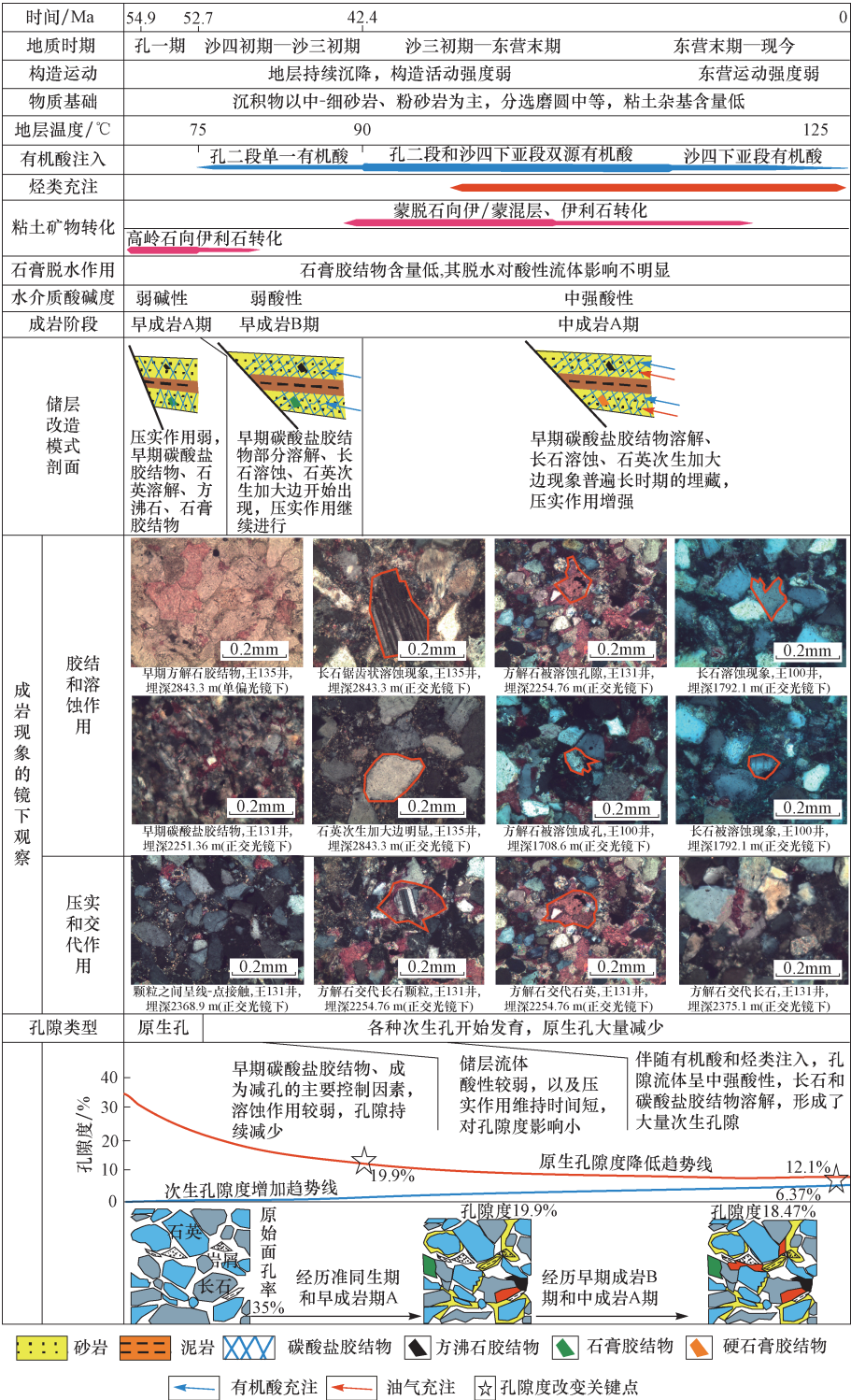


图 7 东营凹陷东段始新统红层储层成岩改造模式

Fig. 7 Diagenetic modification models of the Eocene red-bed reservoir in the eastern Dongying Sag

4.2.2 早成岩 B 期(52.7 ~42.4 Ma)

该阶段孔二段烃源岩开始大量生成有机酸,运移至红层储层中,使得孔隙流体发生改变,呈现弱酸性特征,以酸性成岩作用为主。长石颗粒和早期碳酸盐胶结物发生一定程度的溶蚀,溶蚀规模不强烈,石英次生加大边也开始出现(图 7)。该阶段受控于压实和溶蚀作用强度低,红层储层孔隙度降低速度缓慢,可以忽略不计。

4.2.3 中成岩 A 期(42.4 ~0 Ma)

该阶段受控于孔二段和沙四下亚段两个层系烃源岩排有机酸和烃类影响,红层储层孔隙流体酸性增强,呈现中强酸性特征。在该成岩环境控制下,红层储层主要发生了以下成岩现象:长石颗粒溶蚀程度增强,溶蚀形成大量的孔缝,石英次生加大边大规模出现,早期碳酸盐胶结物溶解作用加强,其溶蚀孔比率增多。压

实作用进一步发生,但强度较弱,碎屑颗粒之间呈点、点-线、线-点接触。红层储层孔隙受控于压实作用和溶蚀作用,原生孔隙度继续降低,次生孔隙迅速增加。通过上述数据分析,压实减孔量大约7.8%,溶蚀次生孔大约6.37%。因此,东营凹陷东段始新统红层储层孔隙度表现为现今的18.47%。该阶段考虑了压实作用的减孔量,是由于前2个阶段沉积物虽然也遭受了一定程度的压实,但该阶段压实作用历史长、强度相对较大,因此,将压实作用作为这个阶段最重要的减孔因素是合理的。

5 结论

1) 根据控制因素、影响范围以及性质类型,将东营凹陷东段始新统红层储层成岩环境分为原始碱性和埋藏酸性两种类型。早成岩阶段A期继承了沉积期的地球化学环境,而早成岩B期至中成岩阶段,随着埋藏深度的加深及烃源岩排除的富含有机酸流体的影响,储层流体逐渐过渡为酸性。红层储层的成岩作用(特别是胶结作用)、成岩序列及孔隙演化特征正是上述成岩环境演化的综合反映。

2) 建立了东营凹陷东段“碱性-弱酸性-中强酸性成岩环境控制的早期中等胶结、弱溶蚀-中晚期中等溶蚀、弱压实”的红层储层成岩改造模式。早成岩阶段A期,红层储层受原始碱性成岩环境控制,形成了大量的早期碳酸盐胶结物,导致原生孔隙大量减少,从35%降低至19.9%;早成岩阶段B期至中成岩A期,红层储层流体性质逐渐过渡为酸性,早期碳酸盐胶结物和长石发生溶蚀,形成了部分的溶蚀孔隙。另外,压实作用使得原生孔隙继续降低。这两个过程此消彼长,使得红层储层孔隙度恢复至现今的18.47%。

参 考 文 献

- [1] 刘俊海,胡芬,宋文君,等. 东营凹陷南斜坡储集层成岩作用及对储集性能的影响[J]. 新疆石油学院学报,2003,15(3):21-28.
- Liu Junhai, Hu Fen, Song Wenjun, et al. Diagenesis and its influence on property of reservoirs in southern slope of Dongying Depression [J]. Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2003, 15(3): 21-28.
- [2] 吕明才,张立强,史文东,等. 东营凹陷南斜坡孔店组冲积体系碎屑岩储层特征及评价[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2004, 19(6): 5-11.
- lv Mingcai, Zhang Liqiang, Shi Wendong, et al. Characteristics and evaluation of the clastic reservoirs in Kongdian Formation in the southern slope belt of Dongying Sag [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2004, 19(6): 5-11.
- [3] 徐磊,操应长,王艳忠,等. 东营凹陷古近系膏盐岩成因模式及其与油气藏的关系[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2008, 32(3): 30-36.
- Xu Lei, Cao Yingchang, Wang Yanzhong, et al. Genetic model of salt-gypsum rock of Paleogene in Dongying Depression and its relationship with hydrocarbon reservoir [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Sciences), 2008, 32(3): 30-36.
- [4] 朱筱敏,王英国,钟大康,等. 济阳坳陷古近系储层孔隙类型与次生孔隙成因[J]. 地质学报, 2007, 81(2): 197-205.
- Zhu Xiaomin, Wang Yingguo, Zhong Dakang, et al. Pore types and secondary pore evolution of Paleogene reservoir in the Jiyang Sag [J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(2): 197-205.
- [5] Dove P M. The dissolution kinetics of quartz in aqueous mixed cation solutions [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(22): 3715-3728.
- [6] 王琪,褚喜准,陈国俊,等. 鄂尔多斯西部长6砂岩成岩演化与优质储层[J]. 石油学报, 2005, 26(5): 17-23.
- Wang Qi, Gao Xizhun, Chen Guojun, et al. Diagenetic evolution and high-quality reservoir in Chang 6 sandstone in the western Ordos Basin [J]. Acta Petroleum Sinica, 2005, 26(5): 17-23.
- [7] 邱隆伟,姜在兴,操应长,等. 泌阳凹陷碱性成岩作用及其对储层的影响[J]. 中国科学(D辑地球科学), 2001, 31(9): 752-759.
- Qiu Longwei, Jiang Zaixing, Cao Yingchang, et al. Alkaline diagenesis and its influence on a reservoir in the Biyang Depression [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2001, 31(9): 752-759.
- [8] 谭先锋,田景春,李祖兵,等. 碱性沉积环境下碎屑岩的成岩演化——以山东东营凹陷陡坡带沙河街组四段为例[J]. 地质通报, 2010, 29(4): 535-543.
- Tan Xianfeng, Tian Jingchun, Li Zubing, et al. Diagenesis evolution of fragmental reservoir in alkali sediment environment—taking the member 4 of Shahejie Formation of steep-slope zone in Dongying Sag, Shandong, China for example [J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(4): 535-543.
- [9] 王琪,张晓宝,肖立新,等. 塔西南坳陷碎屑储集层成岩环境及成岩作用类型[J]. 新疆地质, 1999, 17(1): 33-40.
- Wang Qi, Zhang Xiaobao, Xiao Lixin, et al. Characteristics of diagenetic environments in clastic reservoir of southwest Tarim Depression and its controlled diagenesis types [J]. Xinjiang Geology, 1999, 17(1): 33-40.
- [10] Qiu Longwei, Jiang Zaixing, Cao Yingchang, et al. Alkaline diagenesis and its influence on a reservoir in Biyang Depression [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2002, 45(7): 643-653.
- [11] 谭先锋,田景春,李祖兵,等. 东营凹陷古近系孔店组成岩特征及对储层的控制[J]. 煤田地质与勘探, 2010, 17(6): 33-40.
- Tan Xianfeng, Tian Jingchun, Li Zubing, et al. Diagenetic character and controlling factor of reservoir of Kongdian Formation of Paleogene in Dongying Basin. [J]. Coal Geology and Exploration, 2010, 17(6): 33-40.
- [12] 谭先锋,田景春,林小兵,等. 陆相断陷盆地深部碎屑岩成岩演化及控制因素:以东营断陷盆地古近系孔店组为例[J]. 现代地质, 2010, 24(5): 934-944.
- Tan Xianfeng, Tian Jingchun, Lin Xiaobing, et al. Diagenetic evolution and controlling factors of deep seated clastic rocks in Terrestrial fault-depressed basin: taking the Kongdian Formation of Dongying fault-depressed Basin for example [J]. Geoscience, 2010, 24(5): 934-944.
- [13] Hansley P L, Nuccio V F. Upper Cretaceous shannon sandstone reservoirs, Powder River Basin, Wyoming: evidence for organic acid diagen-

- esis[J]. AAPG Bulletin, 1992, 76: 781–791.
- [14] 周瑶琪, 周振柱, 陈勇, 等. 东营凹陷民丰地区深部储层成岩环境变化研究[J]. 地质学前沿, 2011, 18(3): 268–276.
- Zhou Yaoqi, Zhou Zhenzhu, Chen Yong, et al. Research on diagenetic environmental changes of deep reservoir in Minfeng area, Dongying Sag[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(2): 268–276.
- [15] 张善文, 袁静, 隋凤贵, 等. 东营凹陷北部沙河街组四段深部储层多重成岩环境及演化模式[J]. 地质科学, 2008, 43(3): 576–587.
- Zhang Shanwen, Yuan Jing, Sui Fenggui, et al. Multiple diagenetic environments and evolution model in deep formation of the 4th Member, Shahejie Formation in the northern Dongying Sag[J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43(3): 576–587.
- [16] 王琪, 史基安, 薛莲花, 等. 碎屑储集岩成岩演化过程中流体—岩石相互作用特征——以塔里木盆地西南坳陷地区为例[J]. 沉积学报, 1999, 17(4): 584–590.
- Wang Qi, Shi Jian, Xue Lianhua, et al. Characteristics of fluid-rock interaction in clastic reservoir controlled by evolution of diagenetic environment; taking the southwest depression of Tarim Basin as an example[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(4): 584–590.
- [17] 樊爱萍, 柳益群, 杨仁超, 等. 东胜直罗组砂岩成岩作用过程与古流体运移事件分析[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 694–701.
- Fan Aiping, Liu Yiqun, Yang Renchao, et al. Diagenesis and palaeo-fluid migration events in the Zhiluo Formation in Dongsheng area[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 694–701.
- [18] 李忠, 陈景山, 关平. 含油气盆地成岩作用的科学问题及研究前沿[J]. 岩石学报, 2006, 22(8): 2113–2122.
- Li Zhong, Chen Jingshan, Guan Ping. Scientific problems and frontiers of sedimentary diagenesis research in oil-gas-bearing basins[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(8): 2113–2122.
- [19] 李忠, 韩登林, 寿建峰. 沉积盆地成岩作用系统及其时空属性[J]. 岩石学报, 2006, 22(8): 2151–2164.
- Li Zhong, Han Denglin, Chou Jianfeng. Diagenesis systems and their spatio-temporal attributes in sedimentary basins[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(8): 2151–2164.
- [20] Surdam. R C. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(1): 1–23.
- [21] 李素梅, 庞雄奇, 邱桂强, 等. 东营凹陷王家岗地区孔店组油气成因解析[J]. 沉积学报, 2005, 23(4): 726–733.
- Li Sumei, Pang Xiongqi, Qiu Guiqiang, et al. Origin of the deep oil from Kongdian Formation, Dongying Depression, Bohai Bay Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(4): 726–733.
- [22] 胡圣标, 张容燕, 罗毓辉, 等. 渤海盆地热历史及构造热演化特征[J]. 地球物理学报, 1999, 42(6): 748–755.
- Hu Shengbiao, Zhang Rongyan, Luo Minhui, et al. Thermal history and tectonic-thermal evolution of Bohai Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1999, 42(6): 748–755.
- [23] 邱楠生, 苏向光, 李兆影, 等. 济阳坳陷新生代构造—热演化历史研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(4): 1127–1135.
- Qiu NanSheng, Su Xiangguang, Li Zhaoying, et al. The Cenozoic tectono-thermal evolution of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, East China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(4): 1127–1135.
- [24] 韩元佳, 何生, 宋国奇, 等. 东营凹陷超压顶封层及其附近砂岩中碳酸盐胶结物的成因[J]. 石油学报, 2012, 33(5): 385–393.
- Han Yuanjia, He Sheng, Song Guoqi, et al. Origin of carbonate cements in the overpressured top seal and adjacent sandstones in Dongying Depression [J]. Acta Petroleum Sinica, 2012, 33(5): 385–393.
- [25] 王琪, 郝乐伟, 陈国俊, 等. 白云凹陷珠海组砂岩中碳酸盐胶结物的形成机理[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 553–559.
- Wang Qi, Hao Lewei, Chen Guojun, et al. Forming mechanism of carbonate cements in siliciclastic sandstone of Zhuhai Formation in Baiyun Sag[J]. Acta Petroleum Sinica, 2010, 31(4): 553–559.
- [26] 任拥军, 陈勇. 东营凹陷民丰洼陷深部天然气储层酸性溶蚀作用的流体包裹体证据[J]. 地质学报, 2010, 84(2): 257–262.
- Ren Yongjun, Chenyong. Acid dissolution of deep natural gas reservoirs in Minfeng Sag in Dongying Depression; evidence from fluid inclusions[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(2): 257–262.
- [27] 王瑞飞, 陈明强. 储层沉积—成岩过程中孔隙度参数演化的定量分析——以鄂尔多斯盆地沿25区块、庄40区块为例[J]. 地质学报, 2007, 81(10): 1432–1439.
- Wang Ruifei, Chen Mingqiang. Quantitative analysis of porosity evolution during the reservoir sedimentation-diagenesis; taking the Yan 25 and Zhuang 40 areas in the Ordos Basin as examples[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(10): 1432–1439.
- [28] 郑浚茂, 庞明. 碎屑储集岩的成岩作用研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989: 53–144.
- Zheng Junmao, Pang Ming. Diagenesis study of the clastic rock reservoir[M]. Wu Han: China Geology University Press, 1989: 53–144.
- [29] 应凤祥, 罗平, 何东博, 等. 中国含油气盆地碎屑岩储集层成岩作用与成岩数值模拟[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 10–50.
- Ying Fengxiang, Luo Ping, He Dongbo, et al. Diagenesis and diagenetic numerical modeling of clastic rock reservoir in China petroliferous basins[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 10–50.
- [30] 陈春强. 东营凹陷古近系层序格架内储层成岩作用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006.
- Chen Chunqiang. A study on the diagenesis of Paleogene system based on sequence framework in Dongying Sag[D]. China university of Geoscience(Beijing), 2006.

(编辑 张玉银)