

渤海湾盆地东营凹陷东段红层储层成岩环境 时空演化及成岩孔隙演化

李继岩^{1,2}

(1. 中国石化 胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257000; 2. 中国石化 胜利油田分公司 博士后流动工作站, 山东 东营 257000)

摘要:成岩环境是控制红层储层孔隙类型及演化过程的重要因素之一。在大量镜下薄片鉴定的基础上,利用“元素地球化学指标正演”与“成岩产物类型及数量反演”相结合的研究方法,定性分析了渤海湾盆地东营凹陷东段红层储层成岩环境时空演化规律,定量表征了成岩改造孔隙量,分带建立了多重成岩环境控制下的红层储层孔隙演化模式。结果表明:时间上,由于原始沉积环境、有机酸和烃类注入时期的控制,红层储层成岩环境可划分为原始碱性和埋藏酸性两个变化阶段;平面上,由于盐湖区释放碱性水及有机酸浓度随运移距离的变化,自湖盆区向凹陷边缘可划分为4个成岩环境变化带:中强碱性-弱酸性带、中强碱性-强酸性带、弱碱性-中强酸性带、弱碱性-弱酸性带。受控于成岩环境平面变化规律,在不同构造部位原生孔隙降低和次生孔隙增加的幅度具有明显差异,从而导致东营凹陷东段红层储层储集空间类型多样、孔隙度差异明显。

关键词:成岩孔隙改造量;孔隙演化;成岩环境;红层;东营凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Temporal-spatial evolution of diagenetic environment and diagenesis pore evolutionary process of red beds in the eastern Dongying Sag, Bohai Bay Basin

Li Jiyan^{1,2}

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China;
2. Working Stations for Post Doctors, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China)

Abstract: Diagenetic environment is one of the vital factors to control pore types and evolutionary process of the red beds. On the basis of a great amount of microscopic thin section combining with ‘elemental geochemical index quantifiable forward modeling’ and ‘diagenetic product type and quantifiable inversion’, Temporal-spatial evolution of diagenetic environments are qualitatively analyzed in red beds of the eastern Dongying Sag, and diagenetically reformed pore volumes are quantitatively described. Additionally, pore evolution models under the control of multiple diagenetic environments are established in red beds. The results show that diagenetic environments in red beds can be divided into original alkaline environment and burial acidic environment owing to primary depositional environment, organic acid and hydrocarbon injection period at temporal dimension. On the plane view, with alkaline water released by saline lake areas and changes of organic acid concentration along with the migration distance, diagenetic environment can be divided into four parts from lake area to sag margin: moderate strong alkalinity-weak acidity, moderate-strong alkalinity-weak acidity, weak alkalinity-moderate-strong acidity, weak alkalinity-weak acidity. Due to the spatial variation of diagenetic environment, the degree of original pore reduction and secondary pore generation are obviously different in different tectonic positions, which in turn leads to diversified reservoir space types and significant porosity difference red beds in the eastern Dongying Sag.

Key words: diagenetic reformed pore volume, pore evolution, diagenetic environment, red bed, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

收稿日期:2016-03-07;修订日期:2016-09-23。

第一作者简介:李继岩(1987—),男,博士后,油气资源勘探理论与技术。E-mail:ljy19870817@163.com。

基金项目:国家油气科技重大专项(2011ZX05006-003)。

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^[1-4]。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^[5-7]。前人以成岩环境演化为出发点,针对渤海湾盆地东营凹陷北部陡坡带砂砾岩体、洼陷带滩坝砂等不同类型储层成岩作用进行了研究^[8-10],利用现今成岩产物类型“反演”了碱性和酸性成岩环境时间上交替变化规律,从而建立了多重成岩环境变化控制下的储层成岩演化模式。另外,针对东营凹陷红层储层成岩作用研究表明,东营凹陷红层储层具有碱性成岩环境和酸性成岩环境交替变化的特征,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明显^[11-12]。但东营凹陷始新统红层沉积时期具有“北部干旱蒸发湖盆的范围小、以膏盐岩和石膏沉积为主,南部水上与水下沉积交替、以红层沉积为主”的典型特征。受控于原始湖盆碱性水的渗滤范围和不同构造带红层本身沉积环境的控制,原始碱性成岩环境在不同构造位置具有较大差异性。另外,由于红层本身不具备生油能力,埋藏成岩过程中外来有机酸浓度随着运移距离长短会大大降低,导致不同构造带有有机酸浓度

存在分异。前人研究成果未考虑红层原始碱性和埋藏酸性成岩环境在平面上的变化规律,从而没有分带建立东营凹陷成岩环境演化控制下的红层储层成岩孔隙演化模式,导致对储层孔隙成岩演化过程的分析比较笼统,影响了对红层有利储层分布区带的预测。本文以成岩环境时空演化规律为主线,采用“定性与定量、正演与反演、动态与静态”相结合的研究思路,恢复了红层储层成岩环境时空演化规律,分区带建立了红层储层成岩演化模式,确定了不同区带成岩孔隙演化过程,从而为红层有效储层预测奠定了坚实基础。

1 区域地质概况

东营凹陷是一个位于渤海湾盆地济阳坳陷东南部的中、新生代断陷复合盆地,呈北东东走向(图1)。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—沙四段(沙河街组四段)的初始断陷期、沙三段—沙二下亚段的断陷深陷期、沙二上亚段—东营组的断陷萎缩期。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。孔一段—沙

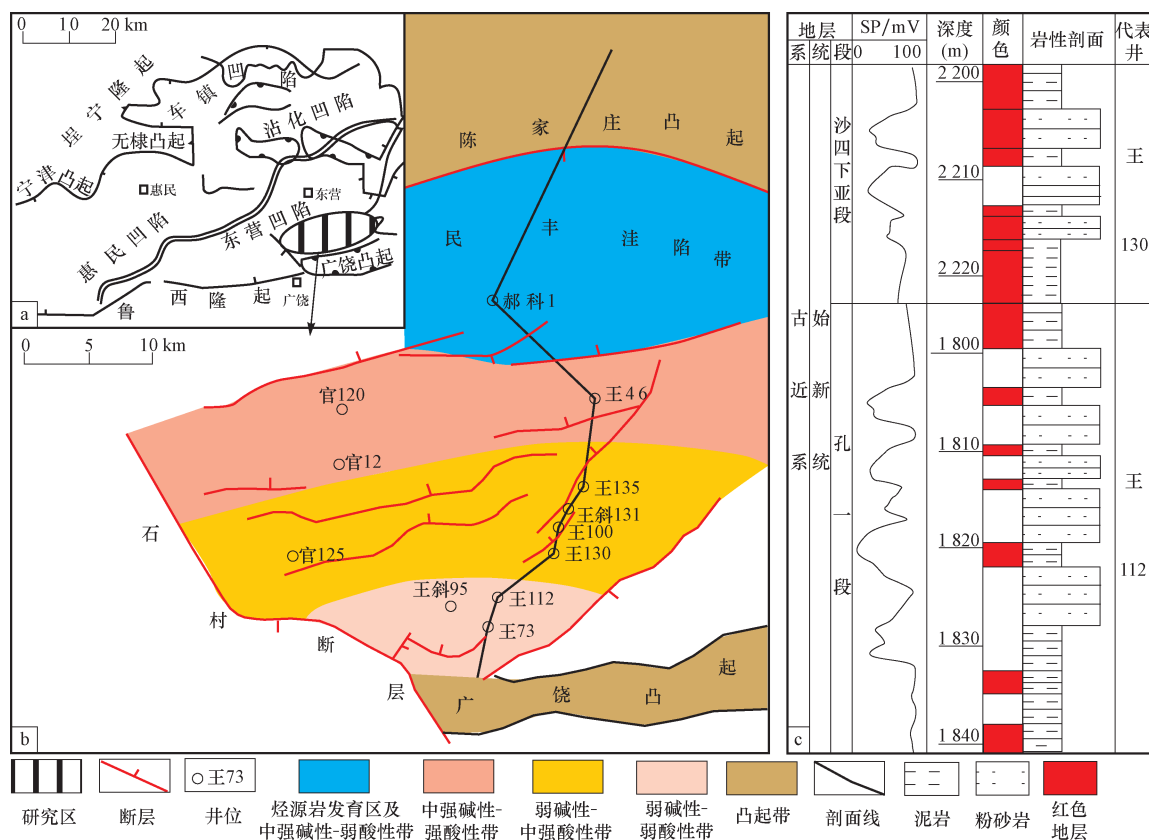


图1 东营凹陷东段构造地层及成岩环境分区

Fig. 1 Stratigraphic column and diagenetic environment zonation in the eastern Dongying Sag

a. 研究区构造位置; b. 研究区成岩环境划分; c. 地层综合柱状图

四下亚段发育紫红色或灰色泥岩以及灰色或棕红色砂岩为特征,俗称“始新统红层”。这套地层在整个渤海湾盆地均有分布。随着渤海湾盆地勘探程度的不断提高,红层逐渐进入了勘探工作者的视野,而东营凹陷作为渤海湾盆地最典型的断陷湖盆,其红层勘探已经取得了较大突破,上报了2 000多万吨的地质储量。东营凹陷东段钻遇红层的探井相对较多,钻井取心资料丰富,因此将东段红层储层选作研究对象具有重要的现实意义,并可以为渤海湾盆地其它凹陷红层勘探提供可借鉴依据。

2 样品与方法

为了研究东营凹陷东段红层储层成岩环境的时空演化规律,系统观察了20余口井的岩心,并磨制薄片进一步观察和鉴定了成岩产物类型及数量,重点观察能够反映酸性成岩环境的长石和早期碳酸盐岩胶结物溶蚀面孔率、能够代表碱性成岩环境的石英溶蚀强度,从而达到利用成岩产物与数量多少反演成岩环境的目的。在岩心观察的过程中,挑选了红层中泥岩样品进行了ICP-AES元素分析。因为泥岩中元素含量受后期成岩作用影响较小,可以忽略不计,能够很好的反映原始沉积环境。样品分析化验数据由中国石化胜利油田分公司地质科学研究院石油地质测试中心地层室完成,检测仪器为电感耦合离子体发射光谱仪,选取对酸碱度比较敏感的Ca恢复pH值,从而利用元素地球化学指标定量正演酸性成岩环境。

为了表征不同构造带成岩环境差异导致的成岩孔隙改造量大小,利用不同构造带典型井镜下薄片观察结果、粒度分析资料和储层常规物性分析等资料,对成岩孔隙改造量进行了恢复。首先利用D C Beard (1973)提出的原始孔隙度(Φ_0 ,%)与分选系数(S_0 ,无量纲)之间的经验公式^[13]:

$$\Phi_0 = 20.91 + 22.9/S_0 \quad (1)$$

式中: $S_0 = P_{25}/P_{75}$, P_{25} 、 P_{75} 分别代表累积曲线上颗粒含量25%和75%处所对应的颗粒直径,mm。以16个原始粒度资料为基础,做出各个样品的粒度概率曲线,然后读取累积曲线上对应的 P_{25} 和 P_{75} 值,计算分选系数 S_0 ,最终得到研究区红层原始孔隙度为27.5%~35.6%。其中,冲积扇砂体的原始孔隙度平均取值为28%(王斜95和王112井),其他砂体均取原始孔隙度为35%。在成岩演化过程中,胶结作用和压实作用是减孔的成岩作用,溶蚀作用是增孔的成岩作用。对于破坏性成岩作用对储层物性的影响,笔者运用House-knecht

(1987)提出的计算公式^[14]:

$$Copl = (OP - IGV) \quad (2)$$

$$Cepl = (OP - Copl) \times CEM/IGV \quad (3)$$

式中: $Copl$ 为压实减孔量,%; $Cepl$ 为胶结减孔量,%; OP 为原始孔隙度,%; IGV 为粒间体积,%; CEM 为粒间胶结物总量,%。溶蚀作用对储层物性的影响,主要利用镜下薄片进行溶蚀面孔率的观察。

3 成岩环境时空变化规律

3.1 时间变化规律

笔者专门对成岩环境时间变化规律进行过分析^[12,15],在此进行简单阐述。东营凹陷始新统红层沉积时期,古气候干旱,水介质古盐度呈微咸水性质,水介质pH值大部分在8.0~8.7,呈弱碱性-碱性。大约从沙三段沉积时期(42.4Ma)开始,受控于北部民丰洼陷不同层系烃源岩排有机酸和烃类的影响,储层流体性质逐渐呈现酸性,埋藏成岩过程中红层储层基本以持续弱酸性-酸性环境为主。

3.2 平面变化规律

受控于原始湖盆碱性水渗滤范围和不同构造带红层本身沉积环境的控制,原始碱性成岩环境在不同构造位置具有较大差异性。另外,埋藏成岩过程中外来有机酸浓度随着运移距离的增加会大大降低,导致离烃源岩越远有机酸浓度越低。通过对东营凹陷东段多口钻遇红层探井进行古水介质酸碱性(pH值)定量计算,并对大量镜下薄片鉴定统计早期碳酸盐胶结物和硬石膏含量,恢复了原始碱性成岩环境平面变化规律。同时,结合烃源岩排有机酸的研究成果,通过对不同构造带溶蚀孔隙的统计,定性确定了埋藏酸性成岩环境的平面变化规律。

3.2.1 原始碱性成岩环境平面变化规律

1) 成岩产物数量变化规律

胶结物类型可以指示成岩环境。早期碳酸盐胶结物和硬石膏对原始碱性成岩环境具有一定的指示意义,石英的溶蚀现象也可以很好的反映碱性成岩环境。通过对东营凹陷红层储层镜下薄片进行鉴定,发现自湖盆区向凹陷边缘早期碳酸盐胶结物和硬石膏的含量逐渐减少,石英的溶蚀现象逐渐减少,至凹陷边缘几乎观察不到石英溶蚀现象(图2a,e,i-k,m-o)。从铸体薄片看,石英的港湾状溶蚀特征比较显著,溶蚀孔隙比较干净。另外,在石英溶蚀附近的碳酸盐胶结物未

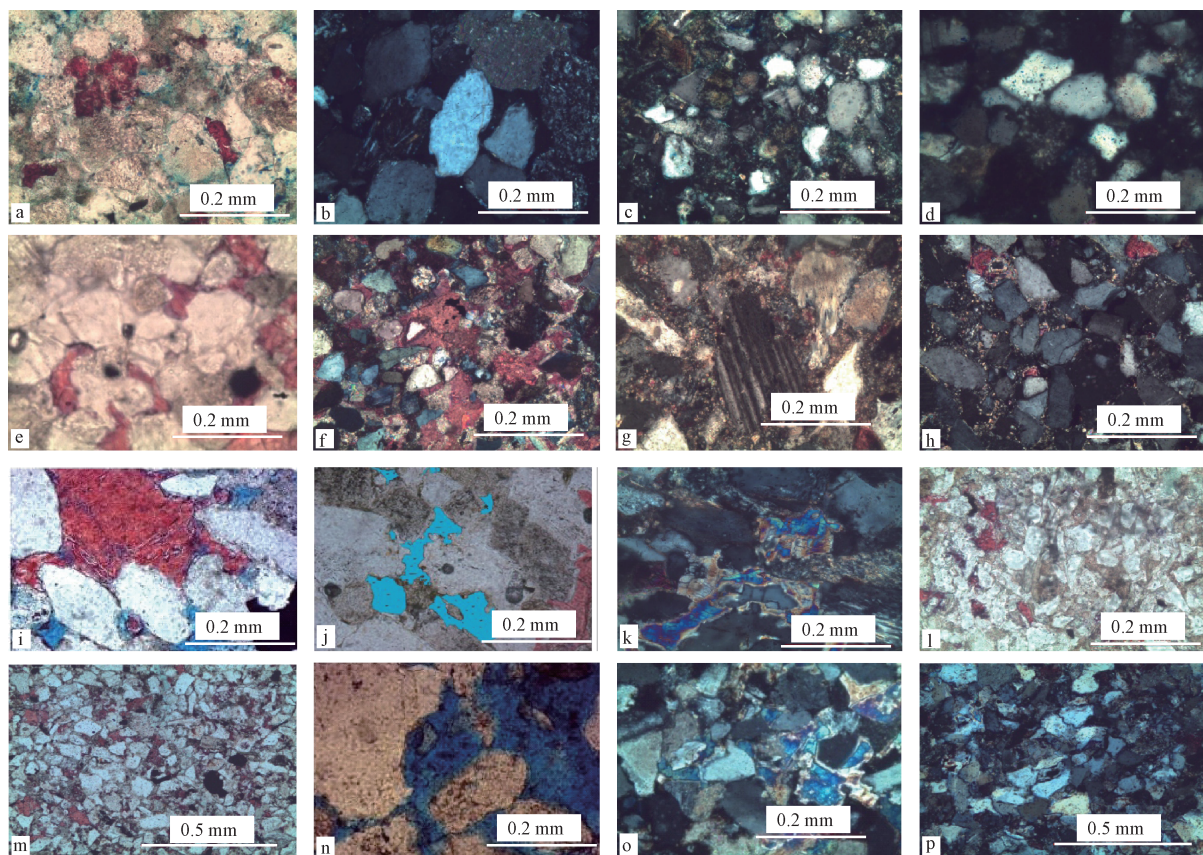


图 2 东营凹陷东段不同构造带成岩产物类型

Fig. 2 Diagenetic products types of different structural belts in the eastern Dongying Sag

a. 王 112 井, 埋深 1 682.41 m, 铁白云石和方解石胶结物; b. 王斜 95 井, 埋深 1 801.92 m, 石英次生加大边; c. 王 112 井, 埋深 1 683.2 m, 长石被溶蚀; d. 王 112 井, 埋深 1 687.91 m, 颗粒间点/点-线接触; e. 王 135 井, 埋深 2 843.3 m, 早期方解石胶结物; f. 王斜 131 井, 埋深 2 254.76 m, 方解石被溶蚀; g. 王 135 井, 埋深 2 843.3 m, 长石锯齿状溶蚀现象; h. 王斜 131 井, 埋深 2 368.9 m, 颗粒间呈线-点接触; i. 官 120 井, 埋深 3 191.42 m, 早期碳酸盐岩胶结物大量发育和石英次生加大边溶蚀; j. 官 12 井, 埋深 3 323.7 m, 石英被溶蚀现象; k. 官 12 井, 埋深 3 320.6 m, 硬石膏胶结物发育; l. 官 12 井, 埋深 3 323.5 m, 颗粒定向排列, 呈线接触; m. 郝科 1 井, 埋深 4 781 m, 早期碳酸盐岩胶结物; n. 郝科 1 井, 埋深 4 787 m, 石英被溶蚀现象; o. 郝科 1 井, 埋深 4 921 m, 硬石膏胶结物; p. 郝科 1 井, 埋深 4 787.2 m, 颗粒间凹凸接触

发生酸性溶蚀(图 2i), 这样以便排除所观察到的不是真正的石英溶蚀。

2) 元素地球化学指标定量正演

酸碱度反映比较敏感的为碳酸钙沉淀, pH 值指标与岩石中 Ca 含量具有很强的相关性。一般情况下, Ca 在酸性介质中发生溶解, 易在碱性溶液中沉淀, 因此可以用 Ca 含量反映水介质的 pH 值。通过统计现代不同湖泊的 pH 值与 Ca 含量的关系, 进行多项式与对数拟合后得到公式(4)和(5)。其中对数拟合的相关系数最高(图 3), 完全可以为研究所利用, 本次研究笔者定量计算过程采用公式(5)。

多项式拟合结果为:

$$y = 0.0001x^4 - 0.0006x^3 - 0.0236x^2 + 0.3139x + 7.7594$$

$$R^2 = 0.9362 (R \text{ 为拟合相关系数}) \quad (4)$$

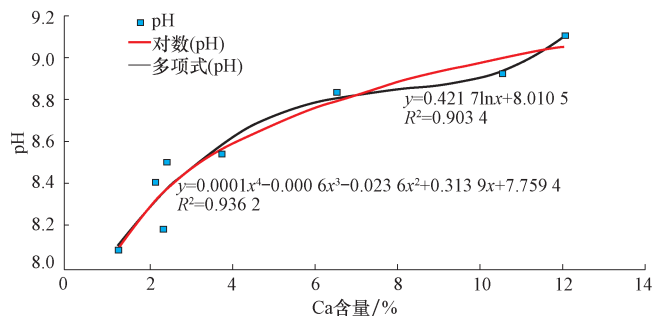


图 3 pH 值多项式及对数拟合曲线

Fig. 3 The pH value of polynomial and Logarithmic fitting curves

(图中数据来源: 青海湖, pH 值为 9.1, Ca 含量为 12%; 尕斯库勒湖, pH 值为 8.93, Ca 含量为 10.5%; 尕斯库勒湖, pH 值为 8.83, Ca 含量为 6.5%; 黄河, pH 值为 8.54, Ca 含量为 3.71%; 黄河, pH 值为 8.4, Ca 含量为 2.09%; 黄河, pH 值为 8.18, Ca 含量为 2.29%; 黄河, pH 值为 8.5, Ca 含量为 2.37%; 洱海, pH 值为 8.08, Ca 含量为 1.21%。)

对数拟合结果为:

$$y = 0.4217 \ln x + 8.0105$$

$$R^2 = 0.9304 \quad (5)$$

利用公式(5)对多口探井进行 pH 值定量恢复,结果表明:东营凹陷始新统红层沉积时期,古水介质 pH 值分布在 8.1~8.9,整体呈现弱碱性-碱性。但平面上原始碱性成岩环境具有分带性,自北向南 pH 值具有逐渐降低的趋势,即郝科 1(9.09)—王 46(8.81)—王 135(8.69)—王 100(8.67)—王 130(8.64)—王 112(8.445)(图 4b)。这充分说明离湖盆区越近,受湖盆中膏盐层脱水的影响,原始水介质呈中强碱性,远离湖盆区逐渐过渡为弱碱性。

3.2.2 埋藏酸性成岩环境平面变化规律

一般来说,离烃源岩越近的构造带内由于有机酸和烃类的溶蚀导致长石和早期碳酸盐胶结物溶蚀越强,形成的溶蚀孔隙越多。为了表征不同构造带埋藏酸性成岩环境的强弱,笔者观察并统计薄片中长石和早期碳酸盐胶结物溶蚀面孔率。考虑两者溶蚀面孔率的变化规律,将埋藏酸性成岩环境自南向北划分为 4

个带(图 4c):①弱酸性带。位于烃源岩中心发育区,郝科 1 井两者溶蚀面孔率非常低,一般小于 1%,分析原因为该类储层缺乏与烃源岩沟通的断层(图 4a),导致有机酸和烃类进入储层的难度较大;②强酸性带。紧邻烃源岩发育的王 46 井区,由于发育盆倾的有效油源断层(图 4a),有机酸和烃类呈阶梯式运移至红层储层中,使得靠近烃源岩区的王 46 和官 12 等井区中长石和早期碳酸盐胶结物的溶蚀面孔率迅速增大,平均值在 2.117% 左右;③中强酸性带。向南至王 130、王 100、王斜 131 等井区中长石和早期碳酸盐胶结物溶蚀面孔率有所降低,分布在 1.207%~1.627%;④弱酸性带。随着有机酸运移距离的不断增大,其浓度大大降低,导致最南部的王 112、王斜 95 等井区长石和早期碳酸盐岩胶结物溶蚀面孔率大幅度降低,平均值为 0.833%。

综合原始碱性和埋藏酸性成岩环境平面变化规律,将东营凹陷东段红层储层成岩环境自湖盆区向凹陷边缘分为 4 个带:中强碱性-弱酸性带、中强碱性-强酸性带、弱碱性-中强酸性带及弱碱性-弱酸性带(图 1)。

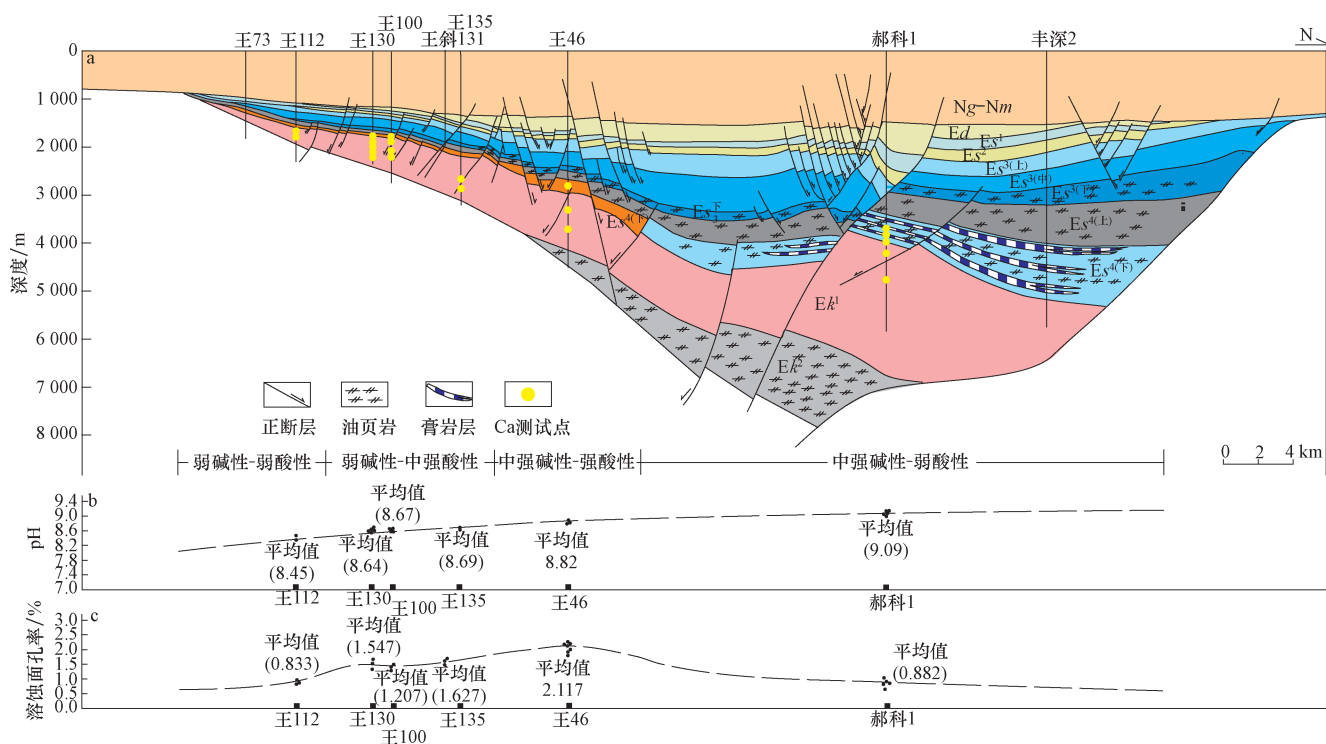


图 4 东营凹陷东段成岩环境平面变化规律定性表征

Fig.4 Qualitative characterization of diagenetic environment variation on the plane view in the eastern Dongying Sag

a. 成岩环境变化规律及 Ca 元素测试点位置; b. pH 值变化规律; c. 溶蚀面孔率的变化规律

Ng-Nm. 馆陶组-明化镇组; Ed. 东营组; Es¹. 沙河街组一段; Es². 沙河街组二段; Es^{3(上)}. 沙河街组三段上亚段; Es^{3(中)}. 沙河街组三段中亚段; Es^{3(下)}. 沙河街组三段下亚段; Es^{4(上)}. 沙河街组四段上亚段; Es^{4(下)}. 沙河街组四段下亚段; Ek¹. 孔店组一段; Ek². 孔店组二段

表 1 东营凹陷东段红层储层不同成岩环境控制下的成岩孔隙改造量

Table 1 Diagenetic reformed pore volume under the control of different diagenetic environment of red beds in the eastern Dongying Sag

成岩环境	井号	深度/m	溶蚀 增孔量/ %	压实 减孔量/ %	胶结 减孔量/ %	现今 孔隙度/ %
弱碱性－ 弱酸性带	王斜 95	1801.92	2.30	5.35	8.20	16.75
		1 682.41	2.40	5.62	8.90	15.88
	王 112	1 685.32	2.15	5.89	8.35	15.91
		1 687.90	1.80	5.70	7.23	16.87
弱碱性－中强 酸性带	王斜 131	2 249.36	6.70	8.65	11.20	21.85
		2 255.26	6.20	9.12	12.10	19.98
		2 268.50	6.40	9.21	11.10	21.09
	王 130	1 744.25	6.32	8.15	10.50	22.67
		1 748.25	6.30	8.25	10.90	22.15
		1 752.73	6.90	8.65	11.80	21.45
		1 780.60	6.50	7.65	12.10	21.75
	王 100	1 782.30	6.20	8.69	11.70	20.81
		1 792.10	7.10	7.65	10.80	23.65
	中强碱性－ 强酸性带	王 46	2 852.00	8.10	19.50	12.10
2 952.29			8.50	19.80	12.50	11.20
2 955.50			8.60	20.10	12.90	10.60
2 997.80			8.80	20.40	12.10	11.30
官 120		3 320.60	8.15	22.10	10.20	10.85
		3 323.70	8.20	22.80	10.30	10.10
官 12		2 945.69	8.10	19.60	13.10	10.40
		2 948.25	8.25	20.10	11.50	11.65
中强碱性－ 弱酸性带		3 969.90	2.10	28.20	6.50	2.40
		3 974.90	2.30	27.60	7.10	2.60
	郝科 1	3 982.50	2.05	27.90	6.90	2.25
		3 995.30	1.75	28.10	6.70	1.95
		4 016.30	1.90	28.80	6.20	1.90

注:弱碱性 - 弱酸性的成岩环境中储层原始孔隙度取 28%;其他成岩环境中储层原始孔隙度取 35%。

4 成岩孔隙改造量定量计算

利用前面提出的成岩孔隙量定量计算公式,对东营凹陷东段不同成岩环境控制下的压实减孔量和胶结减孔量进行了计算(表 1)。结果表明,压实减孔量明显受控于埋藏深度,胶结减孔量主要受控于原始碱性成岩环境,碱性越强,以早期碳酸盐胶结物和硬石膏胶结物最为发育。另外,研究区不同成岩环境带整体溶

蚀增孔量差异明显,主要发生了埋藏酸性成岩环境控制下的早期碳酸盐岩胶结物、长石溶蚀,而原始碱性成岩环境控制下不同构造带石英溶蚀增孔量分布在 0.8% ~ 1.7% 范围内。

5 成岩环境控制下的成岩演化孔隙演化模式

成岩环境是控制储层成岩作用特征的主观因素,不同类型成岩环境中发生不同的成岩事件,形成不同的成岩矿物序列,从而导致储层孔隙类型和结构特征具有一定的差异。东营凹陷东段红层储层原始碱性和埋藏酸性成岩环境时空演化规律具有很强的分带性。本文综合考虑不同构造带成岩环境的差异性,分带建立了不同成岩环境控制下的红层储层成岩孔隙演化模式。其中假定原生孔隙度的减少主要受控于原始成岩阶段压实作用和胶结作用,这是由于一般情况下压实作用在早期成岩阶段最为强烈,而在埋藏酸性环境中含铁类碳酸盐胶结物较少,对原生孔隙影响可忽略不计。次生孔隙增加主要受控于埋藏阶段流体性质变化之后导致长石和碳酸盐岩胶结物的溶蚀而形成,原始碱性成岩环境控制下石英溶蚀增孔量在 0.8% ~ 1.7% 范围内。

1) 弱碱性 - 弱酸性成岩环境

主要分布于凹陷边缘,原始成岩环境呈弱碱性,该阶段成岩改造孔隙量如下:①由于储层埋藏浅且冲积扇岩石中粘土杂基大量存在使得压实作用强度明显降低,三角状颗粒间呈点、点 - 线接触,压实减孔量平均为 5.64%(图 2d);②胶结作用偏弱,早 D 期泥晶碳酸盐胶结物呈环带状分布在碎屑颗粒之间,以方解石为主(图 2a),胶结减孔量平均为 8.17%。压实作用和胶结作用使得原生孔隙度持续降低至 14.19%,石英溶蚀次生孔隙度鲜有增加(图 5)。至沙三段沉积时期(42.5 Ma),成岩环境逐渐呈现弱酸性特征,压实作用弱,部分早期碳酸盐胶结物被溶蚀成孔,偶见有长石发生溶蚀,石英次生加大边出现(图 2b,c),从而形成少量的次生孔隙,溶蚀增孔量平均为 2.16%(图 5),最终使得现今孔隙度恢复到 16.35%。这种成岩环境变化类型控制下储层孔隙以原生孔隙为主,碱性流体和有机酸溶蚀的次生孔隙非常少(图 5)。

2) 弱碱性 - 中强酸性成岩环境

该模式主要发育在王 130、王 135、王 100 等井区,弱碱性的原始成岩环境控制下成岩孔隙改造量如下:①压实作用快速发生,碎屑颗粒呈线 - 点、线接触(图

2h), 压实减孔量平均为 8.45%; ②胶结作用中等, 早期碳酸盐胶结物大量形成, 呈环带状分布在碎屑颗粒之间, 以方解石为主(图 2e), 胶结减孔量平均为 11.36%, 压实作用和胶结作用使得储层原始孔隙度降低至 15.19%, 石英溶蚀次生孔隙度略有增加(图 5)。至沙三段沉积时期开始, 有机酸大量进入储层中, 长石和早期碳酸盐胶结物溶蚀程度增强(图 2f, g), 次生孔隙度大量增加至 6.51%(图 5), 最终储层孔隙度可达到 21.7%。这种成岩环境变化类型控制下储层孔隙主要以原生孔隙为主, 但次生孔隙明显增加, 储层物性好, 可成为目前红层勘探中最为有效的储层, 现阶段已发现的油气大部分集中在该类储层中。

3) 中强碱性-强酸性成岩环境

该模式主要发育在王 46 和官 120 等湖盆边缘区, 中强碱性的原始成岩环境控制下成岩孔隙改造量如下: ①压实作用强烈, 由于该带埋藏深度加大且石英和长石等脆性颗粒含量增加, 压实作用强度加强, 碎屑颗粒呈线接触, 甚至缝合接触(图 2l); ②胶结作用较强, 早期碳酸盐胶结物大量形成, 呈分散环带状分布在碎屑颗粒之间, 部分甚至包围碎屑颗粒生长, 尤以方解石为主, 另外由于古盐度较大, 离湖盆中心距离较近, 石膏胶结物大量出现, 有的以团块状围绕碎屑颗粒生长,

部分以细粒形式分散在颗粒之间(图 2i, k); ③溶蚀作用较弱, 见少量石英锯齿状边缘(图 2j), 石英溶蚀增孔量平均为 1.1%。该阶段胶结减孔量平均为 11.84%, 压实减孔量平均为 20.55%, 储层原生孔隙度降低至 2.61%(图 5)。至沙三段沉积时期开始, 储层成岩环境逐渐呈现强酸性, 长石颗粒和早期碳酸盐胶结物发生大规模溶蚀, 形成大量次生孔隙, 溶蚀增孔量平均为 7.24%(图 5), 最终储层孔隙度可达到 10.95%。这种成岩环境变化类型控制下储层孔隙度整体较低, 储集空间类型以次生孔隙为主, 少量原生孔隙。

4) 中强碱性-弱酸性成岩环境

该模式主要发育湖盆中心区, 在强碱性的原始成岩环境控制下, 储层中形成了大量早期碳酸盐胶结物和硬石膏胶结物(图 2m, o), 胶结减孔量平均值为 6.56%。另外, 由于埋藏深度非常大, 压实减孔量平均为 28.18%, 导致储层原生孔隙度几乎消失殆尽(图 5), 另外由于石英大量溶蚀(图 2n), 使得次生孔隙增加至 1.7%(图 5)。至沙三段沉积时期, 储层流体性质逐渐过渡为弱酸性, 长石和早期碳酸盐胶结物的极少量溶蚀, 溶蚀增孔量约 0.32%(图 5), 最终储层孔隙度平均在 2%左右。这种成岩环境变化类型控制下储层孔隙度整体较低, 储集空间类型以次生孔隙为主, 少量原生孔隙。由于整体孔隙度非常低, 该类储层对于油气勘探的意义不大。

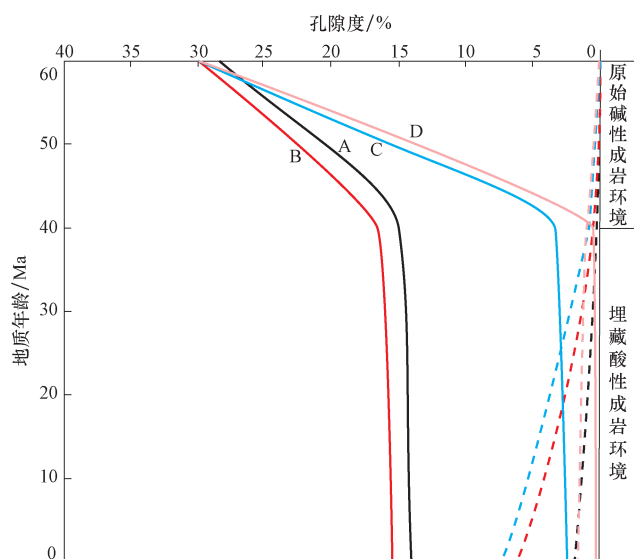


图 5 东营凹陷东段红层储层多重成岩环境控制下的成岩孔隙演化模式

Fig. 5 Diagenesis pore evolutionary model under the control of multiple diagenetic environments of red beds in the eastern Dongying Sag

A. 弱碱性-弱酸性成岩环境控制下的孔隙演化模式; B. 弱碱性-中强酸性成岩环境控制下的孔隙演化模式; C. 中强碱性-强酸性成岩环境控制下的孔隙演化模式; D. 中强碱性-弱酸性成岩环境控制下的孔隙演化模式

6 结论

1) 时间上, 由于原始沉积环境、有机酸和烃类注入时期的控制, 红层储层成岩环境可划分为原始碱性和埋藏酸性 2 个变化阶段, 至沙三段沉积时期, 储层流体逐渐过渡为酸性环境; 平面上, 由于盐湖区释放碱性水及有机酸浓度变化的影响, 自湖盆区向凹陷边缘可划分为 4 个成岩环境变化带: 中强碱性-弱酸性带、中强碱性-强酸性带、弱碱性-中强酸性带及弱碱性-弱酸性带。

2) 定量表征了不同成岩环境变化带压实减孔量、胶结减孔量、溶蚀增孔量, 原始碱性成岩阶段, 受控于压实作用和胶结作用, 原生孔隙快速减少; 埋藏酸性成岩阶段, 受控于溶蚀作用, 次生孔隙快速增加。在定量分析孔隙变化规律的基础上, 最终明确了不同成岩环境控制下的孔隙演化过程: 中强碱性-弱酸性成岩环境控制下原生孔隙消失殆尽, 次生孔隙略有增加至 2%左右; 中强碱性-强酸性成岩环境控制下原生孔隙降低至 2.61%, 次生孔隙增加至 8.34%; 弱碱性-中

强酸性成岩环境控制下原生孔隙降低至 15.19%, 次生孔隙增加至 6.51%; 弱碱性-弱酸性成岩环境控制下的原生孔隙降低至 14.19%, 次生孔隙增加至 2.16%。

参 考 文 献

- [1] Dove P M. The dissolution kinetics of quartz in aqueous mixed cation solutions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(22): 3715-3728.
- [2] 廖朋, 王琪, 唐俊, 等. 鄂尔多斯盆地环县-华池地区长 8 砂岩储层成岩作用及孔隙演化[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(9): 3200-3210.
Liao Peng, Wang Qi, Tang Jun, et al. Diagenesis and porosity evolution of sandstones reservoir from Chang 8 of Yanchang formation in Huanxian-Huachi region of Ordos Basin [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(9): 3200-3210.
- [3] 牛海青, 陈世悦, 张鹏, 等. 准噶尔盆地乌夏地区二叠系碎屑岩储层成岩作用与孔隙演化[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2010, 41(2): 749-758.
Niu Haiqing, Chen Shiyue, Zhang Peng, et al. Diagenesis and porosity evolution of Permian reservoir in Wu-Xia Area, Junggar Basin [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2010, 41(2): 749-758.
- [4] Hansley P L, Nuccio V F. Upper Cretaceous Shannon Sandstone reservoirs, Powder River basin, Wyoming: Evidence for organic acid diagenesis[J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76: 781-791.
- [5] 张胜斌, 王琪, 李小燕, 等. 川中南河包场须家河组砂岩沉积-成岩作用[J]. *石油学报*, 2009, 32(2): 225-231.
Zhang Shengbin, Wang Qi, Li Xiaoyan, et al. Depositional diagenetic coupling complex of Xujiahe sandstone in Hebaochang Block in the south part of the Central Sichuan Basin [J]. *Acta Petroleologica Sinica*, 2009, 32(2): 225-231.
- [6] 王琪, 白斌, 李小燕, 等. 柴达木盆地北缘深部碎屑岩储层成岩演化特征研究[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(2): 157-164.
Wang Qi, Bai Bin, Li Xiaoyan, et al. Diagenetic Evolution Characteristics of Deeply Buried Clastic Reservoirs, Northern Qaidam Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(2): 157-164.
- [7] 鲜本忠, 吴战, 姜在兴, 等. 早期成岩作用研究进展及发展方向[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 2004, 28(6): 133-139.
Xian Benzong, Wu Zhang, Jiang Zaixing, et al. Research evolution and development direction in the early diagenesis [J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 2004, 28(6): 133-139.
- [8] 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]. *地质前缘(中国地质大学(北京); 北京大学)*, 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.
- [9] 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.
- [10] 赵伟. 东营凹陷古近系沙四上亚段滩坝砂体固-流体相互作用于有效储层预测[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2011: 30-40.
Zhao Wei. Solid-fluid interaction and reservoir prediction of beach-bar sandstone of the upper part of the fourth member of Paleogene Shahejie formation, in Dongying Depression [D]. Beijing: China University of Geosciences; Dissertation submitted of Doctoral, 2011: 30-40.
- [11] 王健, 操应长, 高永进, 等. 东营凹陷古近系红层储层成岩作用特征及形成机制[J]. *石油学报*, 2013, 34(2): 283-292.
Wang Jian, Cao Yingchang, Gao Yongjin, et al. Diagenesis characteristics and formation mechanism of Paleogene red-bed reservoirs in Dongying Sag [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2013, 34(2): 283-292.
- [12] 牛栓文, 李继岩. 东营凹陷东段始新统红层储层多重成岩环境及演化模式[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(5): 661-669.
Niu Shuanwen, Li Jiyan. Multiple diagenetic environments and evolution model of Eocene red beds, in eastern section of Dongying Depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(5): 661-669.
- [13] Beard D C, Weyl P K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand [J]. *AAPG Bulletin*, 1973, 57: 349-369.
- [14] Huoseknecht D W. Assessing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in sandstone [J]. *AAPG Bulletin*, 1987, 71: 633-642.
- [15] 李继岩, 宋国奇, 高永进, 等. 东营凹陷始新统红层古沉积环境恢复及其地质意义[J]. *大庆石油地质与开发*, 2013, 32(2): 43-48.
Li Jiyan, Song Guoqi, Gao Yongjin. The recovery of original sedimentary environment in Eocene red beds of Dongying Sag and its geological significance [J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 2013, 32(2): 43-48.

(编辑 张玉银)