

文章编号:1000-0550(2014)05-0957-09

渤海海域旅大 21 构造沙四段水体环境对储层成岩作用及物性的影响^①

赵国祥 王清斌 杨波 刘丰 王飞龙

(中海石油(中国)有限公司天津分公司勘探开发研究院 天津 300452)

摘要 通过普通薄片、铸体薄片、扫描电镜、微量元素等分析对渤海海域旅大 21 构造水体环境及对储层成岩作用及物性的影响进行分析,分析认为研究区沙四段水体环境为半咸水背景下的淡水充注;岩石类型主要为岩屑长石砂岩,易溶组分较多。作为半咸水为主体的沉积环境导致其成岩流体主要为碱性流体,表现为发育石英溶解、长石加大、自生绿泥石等典型碱性成岩作用;此外不同时期的淡水注入使得发育高岭石等少量酸性流体的成岩现象;成岩流体演化经历了从碱性到酸性再到碱性的多期过程;对储层影响主要表现为碱性流体对储层的影响具有双重性,而酸性流体造成的溶蚀是物性改善的主要原因。

关键词 旅大构造 沙河街组四段 水体环境 成岩作用 储层

第一作者简介 赵国祥 男 1986 年出生 硕士 工程师 沉积岩石学 E-mail: zhaogx@cnooc.com.cn

中图分类号 TE122.2 **文献标识码** A

0 引言

次生孔隙(发育带)的发现与成岩作用结合之后,有关储层成岩作用研究迅速发展,越来越多的人开始通过成岩作用的研究来寻找影响储层物性的原因^[1,2]。作为影响储层孔隙演化的主要因素,成岩流体决定了矿物的沉淀和溶解情况。大多数学者认为溶蚀型次生孔隙主要是有机酸溶解矿物所形成^[3,4],但近几年部分学者提出碱性成岩作用^[5,6]认为在大量碱层或者膏盐层发育区存在碱性流体对储层的改造。渤海海域沙四段发育几套石膏岩,故其成岩过程中一定存在碱性流体对储层的改造;本文以渤海海域旅大 21 构造沙四段作为研究对象,通过微量元素确定了沙四段水体环境,通过普通薄片、铸体薄片及实验数据分析了水体环境对储层的影响,对渤海海域中深部储层预测具有一定的借鉴意义。

1 地质背景

古新世中期,渤海湾盆地在区域隆起背景上开始形成新生代裂陷,裂陷发育过程中,沿北北东—北东向断裂和北西—北北西向断陷带形成一系列断陷湖盆,并有较强烈的基性火山岩喷发^[7]。这种构造背景导致了海域内辽东湾地区古近纪北东走向的凸

起一凹陷相间的构造格局。构造演化方面古新世—始新世早期,形成控制辽东湾半地堑的主断裂。在断裂下降盘为辽西凹陷、辽中凹陷的雏形,上升盘形成夹于两凹之间的高地,即辽西凸起的雏形^[8]。其充填的孔店组和沙四段展布受盆地形态控制,具有多沉积中心、岩性及厚度变化大并发育局部不整合等特点^[9]。在凹陷边缘主要发育小规模扇三角洲和近岸水下扇沉积,中部为滨浅湖、浅湖沉积。

渤海海域沙四段划分为沙四上亚段和沙四下亚段,钻遇厚度最大分别为 309 m 和 340 m,典型剖面见于青东凹陷和莱州湾凹陷。沙四下亚段为紫红色泥岩、透明或白色硬石膏岩,毛发状石膏,暗灰色含膏泥岩,夹薄层~中厚层紫红色粉砂岩,发育一套在全区都可对比的膏盐岩标志层,为间歇性盐湖沉积。沙四段上亚段为蓝灰色泥岩、深灰色泥岩、薄层油页岩夹灰色薄层粉砂岩,是一套区域标志层。

2 岩石学特征

通过对旅大 21 构造两口井 13 块壁芯薄片镜下观察及统计(表 1)得出构造区沙四段储集层岩石类型以长石岩屑砂岩为主,其次为少量岩屑长石砂岩(图 1)。岩屑主要为火山岩岩屑,少量变质岩岩屑,其中火山岩岩屑以酸性喷出岩岩屑为主,变质岩岩屑

^①“十二五”国家科技重大专项(编号:2011ZX05023-002)资助
收稿日期:2013-06-27;收修改稿日期:2013-09-23

主要为石英岩岩屑。长石以斜长石为主,碱性长石次之,表面风化较强。整体易溶组分较多。胶结物以方解石及白云石为主,有少量的铁方解石、铁白云石、硬石膏及次生加大发育。粒度以中—粗粒为主,分选中等到好,次圆状—次棱角状,颗粒间接触关系以线接触为主,少量凹凸接触,说明埋藏过程中压实作用较强。

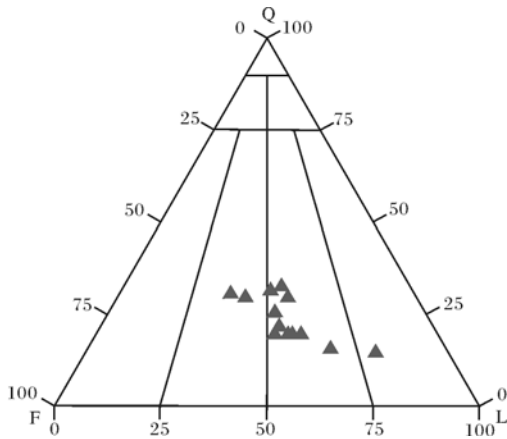


图1 旅大21构造沙四段砂岩分类图

Fig.1 Classifications diagram of sandstone in the Forth Member of Shahejie Formation in LD21 Structure

表1 旅大21构造碎屑物含量薄片镜下统计表

Table 1 Statistics of debris content in LD21 Structure

井名	深度 /m	碎屑物含量/%			岩屑含量细分/%		
		石英	长石	岩屑	火山岩岩屑	变质岩岩屑	沉积岩岩屑
A1井	3 628.0	30	40	30	20	10	0
A1井	3 676.0	20	35	45	32	13	0
A1井	3 704.0	20	38	42	28	14	0
A1井	3 735.5	32	33	35	25	10	0
A1井	3 744.0	26	35	39	29	10	0
A1井	3 752.0	30	30	40	26	14	0
A1井	3 783.5	31	43	26	14	12	0
A1井	3 806.0	16	27	57	45	12	0
A1井	3 811.5	20	32	48	38	10	0
A1井	3 839.0	33	30	37	27	10	0
A1井	3 873.0	15	17	68	60	8	0
A2井	3 386.0	20	34	46	20	26	0
A2井	3 588.0	22	36	42	14	28	0

3 沙四段原始水体环境判别

水体环境判别和测定方法众多,如应用古生物^[10]、岩矿和古地理资料^[11]定性描述水体盐度;应用常量和微量元素地球化学方法^[12]半定量划分水体

盐度;应用间隙流体或液相包裹体^[13]、沉积磷酸盐或硼和黏土矿物资料^[14]定量计算古盐度等方法。本次研究中水体环境的确定标准采用微量元素地球化学方法。

微量元素中的硼(B)含量^[15,16]、锶(Sr)含量^[17]、锶钡比(Sr/Ba)^[18]、硼镓比(B/Ga)^[19]及科奇公式古盐度^[20]等指标是古盐度的判别指标,可作为判别沉积环境的依据。

硼元素对沉积环境及各种地质作用具有明显的指示意义,常用来指示古盐度,一般在海相环境下,硼含量为 $80 \times 10^{-6} \sim 125 \times 10^{-6}$,淡水环境中硼含量 $< 60 \times 10^{-6}$ 。研究区硼含量最高值为 100.1×10^{-6} ,最小值为 24.75×10^{-6} ,平均值为 70.34×10^{-6} (表2),说明研究区沙四段地层形成于过渡环境(表3)。

锶含量也可以定性地判别沉积介质的古盐度,锶元素在咸水中含量为 $800 \times 10^{-6} \sim 1\,000 \times 10^{-6}$,在淡水中的含量为 $100 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$ 。构造区沙四段的锶含量为 $239.8 \times 10^{-6} \sim 315.8 \times 10^{-6}$,平均值为 299.3×10^{-6} ,从表1中可以看出整体锶含量处于 300×10^{-6} 附近,说明研究区沙四段属于偏淡水环境(表3)。

锶钡比和硼镓比同样是古盐度的良好判别指标,用其可以判断海陆相环境。当 $Sr/Ba > 1$ 时,为海相环境;当 Sr/Ba 介于 $1 \sim 0.5$ 时,为半咸水环境;当 $Sr/Ba < 0.5$ 时,为淡水环境。当 $B/Ga > 4.5$ 时,属于海相环境;当 B/Ga 为 $3.3 \sim 4.5$ 时,属于过渡环境; $B/Ga < 3.3$ 时,属于陆相环境。旅大21构造沙四段的 Sr/Ba 为 $0.42 \sim 0.85$,平均为 0.54 (表2),介于 $1 \sim 0.5$ 之间,说明沙四段整体属于半咸水环境。 B/Ga 为 $3.76 \sim 6.48$,平均为 4.78 ,整体 > 4.5 (表2),说明沙四段属于咸水环境(表3)。

科奇公式适用于复杂黏土矿物成分的泥岩样品。其公式为 $S_p = (\lg B^* - 0.11) / 1.28$,其中 $B^* = B$ 样品/ $(4X_i + 2X_m + X_k)$,其中 B^* 指“校正硼含量”, X_i 、 X_m 、 X_k 分别代表样品中实测伊利石、蒙脱石和高岭石的质量分数,系数代表各类黏土矿物对硼的吸收强度,以系数越大为越强。其数值 < 0.5 属于淡水环境, $0.5 \sim 30$ 属于混盐水, > 30 属于咸水。构造区科奇公式计算结果范围为 $0.60 \sim 1.073$,均值为 0.947 ,说明研究区为混盐水的水体环境(表3)。

综合以上几个方面的证据最终确定旅大21构造沙四段水体环境为半咸水背景下的淡水充注环境(表3),即在主体为半咸水的环境下部分时期有淡水的注入。

表2 旅大21构造微量元素分析数据($\times 10^{-6}$)

Table 2 Trace element analysis data in LD21 Structure

编号	井深	岩性	B	Sr	Ba	Ga	Sr/Ba	B/Ga	科奇公式古盐度
1	3 628.85	泥岩	24.75	239.80	282.70	6.58	0.85	3.76	0.60
2	3 631.56	泥岩	52.64	271.40	643.50	13.53	0.42	3.89	0.86
3	3 674.72	泥岩	66.96	304.60	559.00	12.64	0.54	5.30	0.94
4	3 675.47	泥岩	58.75	313.40	580.80	12.46	0.54	4.72	0.89
5	3 676.60	泥岩	64.81	298.10	559.30	13.57	0.53	4.78	0.93
6	3 677.10	泥岩	100.10	315.80	638.40	15.44	0.49	6.48	1.07
7	3 678.00	泥岩	78.70	285.70	649.30	16.23	0.44	4.85	0.99
8	3 678.71	泥岩	70.41	305.80	580.00	15.63	0.53	4.50	0.95
	均值		64.64	291.82	561.62	13.26	0.54	4.78	0.95

表3 旅大21构造沉积环境判别数据表

Table 3 Data for distinguishing sedimentary environment of LD 21 Structure

判别方法	判别标准		测试数据	判别结果
	范围	沉积环境		
B/ 10^{-6}	80~125	海相	$\frac{24.75 \sim 100.1}{64.64(8)}$	过渡环境
	<60	淡水环境		
Sr/ 10^{-6}	800~1 000	咸水环境	$\frac{239.80 \sim 315.80}{291.82(8)}$	淡水环境
	100~300	淡水环境		
Sr/Ba	>1	海相环境	$\frac{0.42 \sim 0.85}{0.54(8)}$	半咸水环境
	1~0.5	半咸水环境		
B/Ga	<0.5	淡水环境	$\frac{3.76 \sim 6.48}{4.78(8)}$	咸水环境
	>4.5	海相		
	3.3~4.5	过渡环境		
	<3.3	陆相		
科奇公式古盐度	<0.5	淡水环境	$\frac{0.60 \sim 1.07}{0.95(8)}$	混盐水环境
	0.5~30	混盐水环境		
	>30	咸水环境		

注: $(24.75 \sim 100.1) / 64.64(8) = (\text{最小值} \sim \text{最大值}) / \text{平均值}(\text{样品数})$ 。

4 成岩作用类型

研究区半咸水为主体的水体环境,导致其成岩作用存在碱性成岩流体活动的证据,同时部分时期淡水注入及研究区中成岩阶段A期的成岩阶段,意味着在碱性成岩活动中也存在有酸性流体活动的现象。

4.1 碱性成岩现象

研究区碱性成岩现象主要表现为:石英溶解;长石加大现象;碳酸盐矿物胶结;绿泥石发育。其中:

(1) 石英溶解:近几年关于碱性环境下成岩作用的研究越来越多^[5,6,21],认为在碱性流体下,碳酸盐矿物、长石及部分黏土矿物以更稳定的形式存在且易沉淀,而石英颗粒却变得容易溶蚀。研究区沙四段扫描电镜下见到石英颗粒表面发生溶蚀的现象(图2A),证实其成岩流体为碱性。

(2) 长石加大:长石作为一种酸不稳定矿物,会在碱性环境中稳定存在,若溶液中组分浓度合适,会发生自生加大现象^[22]。构造区沙四段普通薄片下见明显的长石加大的现象(图2B),加大边厚度从0.04~0.22 mm之间,一般介于0.1~0.2 mm之间,这种大幅度的加大边厚度意味着长时间碱性流体的作用。

(3) 碳酸盐矿物胶结:构造区碳酸盐矿物明显分为早期和晚期,其中早期碳酸盐矿物表现为泥晶碳酸盐矿物、方解石矿物胶结;而晚期碳酸盐矿物则主要为铁方解石及铁白云石矿物胶结。早期碳酸盐矿物中见大面积的方解石胶结(图2C)也意味着存在碱性流体活动。

(4) 绿泥石发育:构造区沙四段发育有大量绿泥石矿物,在扫描电镜下对绿泥石进行观察发现,研究区绿泥石发育有两种产状,一种是颗粒表面贴附式

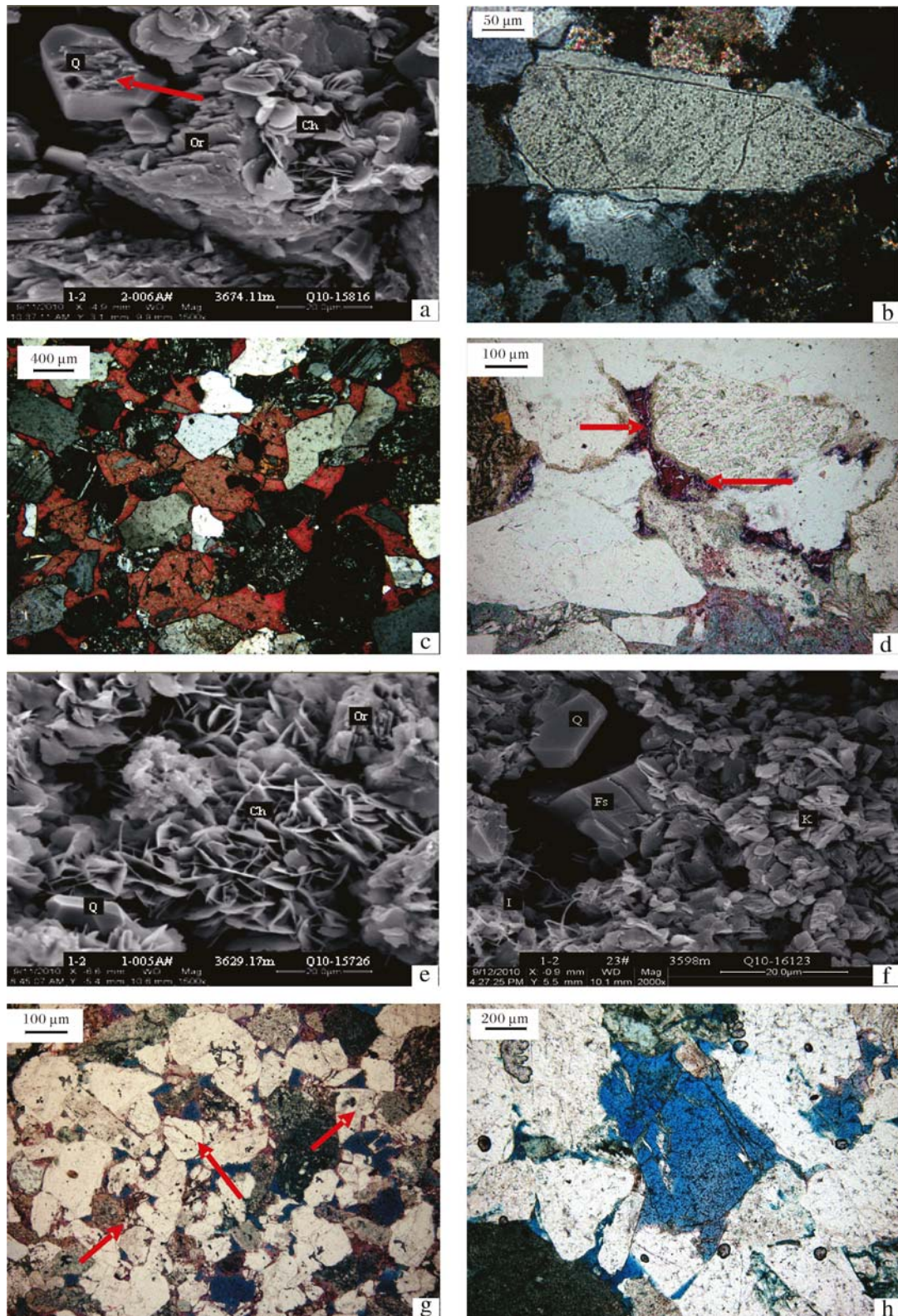
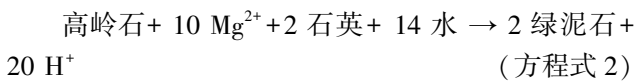
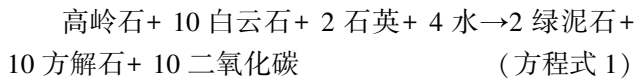


图2 旅大21构造沙四段特征成岩作用照片

a. 石英颗粒溶解现象(A2井,3 674.1 m,扫描电镜);b.长石次生加大(A1井,3 001.5 m,正交显微镜);c.大量碳酸盐矿物胶结(A2井,3 629.84 m,正交显微镜);d.绿泥石包壳(A2井,3 629.17 m,偏光显微镜);e.绿泥石充填孔隙(A2井,3 629.17 m,扫描电镜);f.高岭石充填孔隙(A2井,3 598 m,扫描电镜);g.碳酸盐矿物溶蚀(A2井,3 680.68 m,偏光显微镜);h.长石颗粒溶解形成铸模孔(A2井,3 674.51 m,偏光显微镜)。

Fig.2 The photos of typical diagenesis in the Fourth Member of Shahejie Formation in LD21 Structure

(图 2D), 另一种是孔隙充填式(图 2E), 其中以孔隙充填式为主。前人^[23,24]研究认为绿泥石形成于碱性的成岩环境, 且孔隙充填式绿泥石一般为后期由高岭石、伊利石及蒙脱石转化而来(方程式 1, 2)^[23], 分布于水动力较强的环境, 而作为一种从溶液中结晶的矿物, 其形成需要大量流体的活动, 构造区充注的水体环境刚好满足绿泥石形成需要大量流体活动的前提。



4.2 酸性成岩现象

研究区酸性成岩现象则主要表现为高岭石充填孔隙和碳酸盐矿物的溶蚀。其中:

(1) 高岭石充填孔隙: 在普通薄片及扫描电镜下均可见到大量发育的高岭石充填孔隙, 其中充填高岭石镜下呈小米粒状, 扫描电镜下呈书页状(图 2F), 而高岭石是酸性流体与含 Al^{3+} 的矿物相互反应的产物, 表征构造区有酸性流体活动。

(2) 碳酸盐矿物溶蚀: 碳酸盐胶结物及岩屑在酸性及弱碱性环境中是不稳定的, 随酸性程度不同, 其溶解的速度也是不一样的, 在埋藏成岩作用中更容易受地层水中 H^+ 的影响而发生溶蚀。普通薄片下见到早期胶结的碳酸盐矿物后期被溶蚀的现象(图 2G)。

而酸来源则主要为: ①后期有机质生烃排出有机酸; ②高岭石向绿泥石转化中产生的酸性流体。

5 成岩流体演化

根据成岩共生序列的判别原则结合普通薄片、铸

体薄片、扫描电镜观察, 旅大 21 构造沙四段成岩共生序列为: 贴附式绿泥石—早期隐晶质碳酸盐—方解石、长石次生加大—石英次生加大、长石溶蚀、白云石—铁白云石、石英溶蚀—高岭石, 碳酸盐溶蚀—充填式绿泥石—伊利石、铁方解石(图 3)。

根据成岩共生序列可以看出旅大 21 构造沙四段流体演化经历了由碱性到酸性再到碱性的过程。具体表现为早期贴附式绿泥石发育在未经压实的原生孔隙中、大量发育的方解石胶结及长石次生加大都意味着有碱性流体的活动; 其后石英次生加大及长石颗粒的溶解说明有酸性流体活动; 其次晚期铁白云石的存在及石英颗粒的溶解又证实有碱性流体的存在; 自生高岭石发育及碳酸盐矿物的溶蚀又表征存在酸性流体; 而充填式绿泥石、伊利石及铁方解石的形成说明成岩流体又为碱性。

6 对储层物性的影响

6.1 碱性流体对储层的影响具有多重性

6.1.1 碱性流体下的强胶结作用降低储层物性

前面对成岩作用的研究已经得出在早期碱性流体作用下会发育碳酸盐矿物胶结和长石加大, 这种大面积胶结作用对储层的影响是不言而喻的。通过对旅大 21 构造沙四段取芯段孔隙度与碳酸盐相对应的数据进行统计并进行相关性分析(图 4)发现碳酸盐含量与孔隙度大致呈负相关关系。主要为碳酸盐胶结物以孔隙式或者嵌晶式胶结为主(图 2C), 对孔隙起堵塞作用, 碳酸盐胶结物相对发育势必导致储层的孔隙度降低。此外构造区发育的长石次生加大同样胶结孔隙, 降低孔隙度。

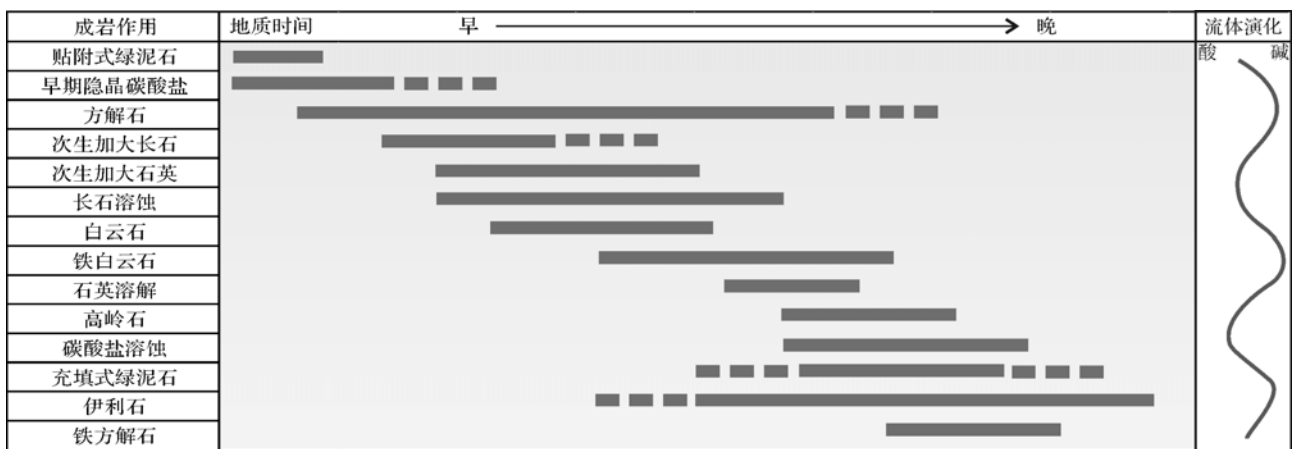


图 3 旅大 21 构造成岩共生序列及流体演化图

Fig.3 The diagenetic sequence and fluid evolution in LD 21 Structure

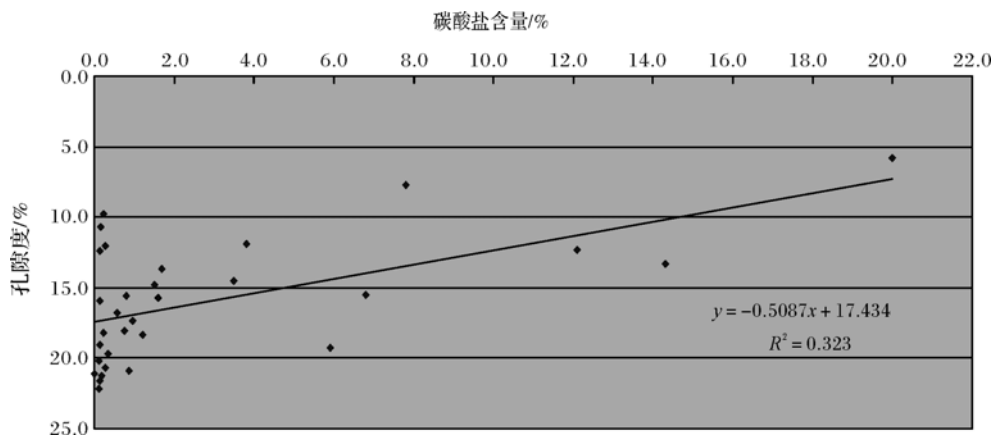


图 4 旅大 21 构造沙四段碳酸盐含量与孔隙度相关性图

Fig.4 The correlation between carbonate content and porosity in the Forth Member of Shahejie Formation in LD21 Structure

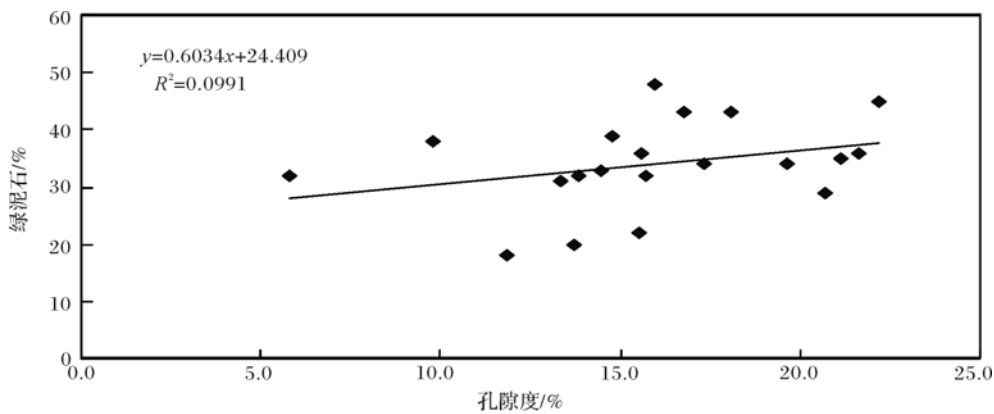


图 5 旅大 21 构造沙四段孔隙度与绿泥石相关性图

Fig.5 The correlation between porosity and chlorite in the Forth Member of Shahejie Formation in LD21 Structure

6.1.2 碱性流体对长石的保护有利于抑制压实作用对储层的影响

长石作为研究区碎屑岩中主要的颗粒组分之一,其溶解和转化对储层形成和演化具有非常重要的意义。研究区早期碱性水体环境使得长石颗粒未发生溶蚀现象反而有少量长石加大发育,这就意味着长石作为刚性颗粒可以在成岩早期有效抑制压实作用对储层的影响,保留一定的原生孔隙。这也解释了研究区 3 650 m 的深度在普通薄片下还可以见到原生孔隙的原因。

6.1.3 碱性流体对石英的溶解有限,对储层影响不大

虽然前面讲到在碱性环境下石英颗粒会发生溶解,同时邱隆伟对泌阳凹陷碱性环境储层研究之后认为在较深埋藏条件下石英溶解型孔隙相对含量可以达到 35% 甚至达到 40% 以上,对于中深层储层石英

的溶解型孔隙对物性贡献很大,可以形成以此为主要孔隙成因的储层^[6]。但在本区的研究中发现虽然在碱性环境下会对石英颗粒造成溶解但溶解的程度不强,仅颗粒表面少量溶解,对储层物性影响不大。

6.1.4 碱性流体下发育的绿泥石对储层影响具有双面性

前已涉及研究区绿泥石存在两种形态,分别为孔隙充填式(或玫瑰花状)和颗粒表面贴附式,而不同的绿泥石形态对储层物性影响不同,其中孔隙充填式绿泥石对储层物性的影响主要表现在:由于其形成需要大量流体活动,所以高的自生绿泥石含量表明孔隙连通性好,孔隙度高^[24];此外高岭石在向绿泥石转化过程中,生成的 CO_2 和 H^+ ,使水体呈弱酸性,可以作为不稳定矿物发生溶解作用的酸的来源之一;但其充填孔隙降低储层孔隙度;而颗粒表面贴附式绿泥石对储层孔隙的作用表现在其可以有效抗压实,保护储层

的孔隙^[25],但由于其贴附颗粒表面,对渗透率的影响十分巨大。故对研究区沙四段绿泥石与孔隙度做相关性图(图 5)之后发现两者呈弱正相关性。

整体上碱性流体对储层的作用主要表现为碳酸盐矿物、孔隙充填式绿泥石及长石加大等胶结作用降低储层物性,对储层不利;而早期对长石的保护及贴附式绿泥石的发育抑制成岩早期压实作用对储层的影响,对储层有利。

6.2 酸性流体溶蚀改善储层物性

由于本区在碱性流体中存在酸性流体活动,所以溶蚀作用在本区也很发育,主要为长石和碳酸盐胶结物的溶蚀,其中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(图 2H)。而长石的溶解和有机酸的存在有着密切的关系。随地层水酸性程度的增加长石溶蚀增强,在中性和弱碱性条件下,长石的溶解度最小,而随溶液逐渐向强碱性过渡,长石的溶解度又有非常轻微的回升趋势^[22]。此外前人^[26]对不同温度下碳酸盐矿物溶蚀做模拟实验得出在 90℃ 左右,深度大约 2 500 ~ 3 000 m 范围内由于有机质生烃排除有机酸碳酸盐矿物最容易发生溶蚀。

因此,在中成岩 A 期阶段,当地层中有机质在较高的温压条件下分解产生的有机酸进入砂岩储集层

后,孔隙介质 pH 值降低,由碱性变为酸性。在酸性介质条件下,长石碎屑和碳酸盐矿物发生溶解,溶蚀作用是导致研究区沙四段在 3 600 m 以下埋深仍具有较高的孔隙度的主要原因(图 6)。而且碱性环境下大量发育的碳酸盐矿物在酸性环境发生的溶蚀形成好储层的先例在渤海油田辽东湾地区及渤中凹陷中深层均有先例。

7 结论

(1) 研究区岩石类型主要为岩屑长石砂岩,易溶组分较多对后期溶蚀作用的发生提供了好的前提。

(2) 根据微量元素分析确定研究区为主体半咸水环境下部分时期有淡水充注的水体环境。半咸水的水体环境导致其成岩作用主体为碱性成岩作用,同时有少量酸性成岩作用发育。

(3) 成岩流体演化经历了由碱性到酸性再到碱性的多期活动。表现为碱性流体环境下贴附式绿泥石、隐晶质碳酸盐、长石次生加大、石英溶解、充填式绿泥石与酸性流体下长石溶解、高岭石充填孔隙及碳酸盐矿物溶蚀在成岩作用过程中交替出现。

(4) 半咸水为主体部分时期淡水注入的水体环境导致研究区成岩流体以碱性为主,碱性流体造成的强胶结对储层不利,但碱性条件下对长石的保护能有效抗压实,保留更多原始孔隙;而后期演化中的酸性流体造成的溶蚀是影响研究区储层物性的主要因素。

参考文献 (References)

- 1 游国庆,潘家华,刘淑琴,等. 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,2006,25(3):237-242 [You Guoqing, Pan Jiahua, Liu Shuqin, et al. Diagenesis and pore evolution of Paleogene sandstone reservoir in Dongying depression [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2006, 25(3): 237-242]
- 2 朱筱敏,米立军,钟大康,等. 济阳拗陷古近系成岩作用及其对储层质量的影响[J]. 古地理学报,2006,8(3):295-305 [Zhu Xiaomin, Mi Lijun, Zhong Dakang, et al. Paleogene diagenesis and its control on reservoir quality in Jiyang depression [J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(3): 295-305]
- 3 庄松生,左燕春,黎琼. 苏北溱潼凹陷戴南组二段成岩作用与次生孔隙预测 [J]. 矿物岩石, 1998, 18(4): 64-71 [Zhuang Songsheng, Zuo Yanchun, Li Qiong. Diagenesis and predicting secondary pore for the second member of Dainan Formation in Qintong depression of North Jiangsu province [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1998, 18(4): 64-71]
- 4 张善文,袁静,隋风贵,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, 602 [Zhang Shanwen, Yuan Jing, Sui Fenggui, et al. Multiple diagenetic

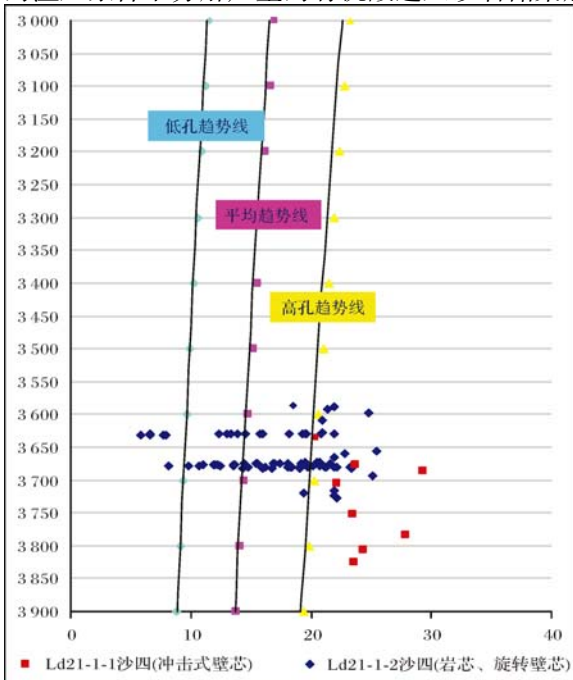


图 6 旅大 21 构造沙四段物性分布图
(底图据王清斌,2010)

Fig.6 The distribution of physical properties in the Forth Member of Shahejie Formation in LD21 Structure

- 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, 602]
- 5 邱隆伟, 赵伟, 刘魁元. 碱性成岩作用及其在济阳坳陷的应用展望[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(2): 10-15 [Qiu Longwei, Zhao Wei, Liu Kuiyuan. Alkali diagenesis and its application in Jiyang Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery efficiency, 2007, 14(2): 10-15]
 - 6 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): 752-758 [Qiu Longwei, Jiang Zaixing, Cao Yingchang, *et al.* Alkali diagenesis and its reservoir effects in Biyang depression[J]. Science China (Ser. D): Earth Science, 2001, 31(9): 752-758]
 - 7 翟光明, 宋建国, 靳久强, 等. 板块构造演化与含油气盆地形成和评价[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 3-63 [Zhai Guangming, Song Jianguo, Jin Jiuqiang, *et al.* Plate Tectonic Evolution and Oil-gas Basin Formation and Evaluation [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 3-63]
 - 8 周心怀, 刘震, 李淮莲. 辽东湾断陷油气成藏机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 1-4 [Zhou Xinhui, Liu Zhen, Li Weilian. Accumulation Mechanism of Oil and Gas in Liaodongwan Depression [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 1-4]
 - 9 龚再升, 王善书. 沿海大陆架及毗邻海域油气区: 上册[M]. 北京: 石油工业出版社, 1987: 3-257 [Gong Zaisheng, Wang Shanshu. The Oil and Gas Zones in Continental Shelf and Adjacent Offshore: Volume 1 [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1987: 3-257]
 - 10 羊向东, 王苏民, C.Kamenik, 等. 藏南沉钻钻孔硅藻组合与湖水古盐度定量恢复[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2003, 33(2): 163-169 [Yang Xiangdong, Wang Suming, C.Kamenik, *et al.* Diatom assemblages and quantitatively paleosalinity recovery of lake from drill hole of Chen Co, South Tibet Plateau [J]. Science China (Ser. D): Earth Science, 2003, 33(2): 163-169]
 - 11 王海峰, 俞剑华, 方一亭. 皖南赣北宁国组和胡乐组沉积环境的古盐度特征及其地质意义[J]. 地层学杂志, 1994, 18(1): 9-15 [Wang Haifeng, Yu Jianhua, Fang Yiting. The paleosalinity and its geological significance of the depositional environment of the Ningkuo and Hulo Formations from South Anhui and North Jiangxi [J]. Journal of Stratigraphy, 1994, 18(1): 9-16]
 - 12 赵永胜, 宋振亚, 温景萍, 等. 保山盆地湖相泥岩微量元素分布与古盐度定量评价[J]. 海洋与湖泊, 1998, 29(4): 409-415 [Zhao Yongsheng, Song Zhenya, Wen Jingping, *et al.* Quantitative evaluation of paleosalinities and distribution of trace elements in the lacustrine mudstone of Boshan Basin [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1998, 29(4): 409-415]
 - 13 陈红汉, 龚再升, John Parnell, 等. 碎屑石英颗粒继承性裂纹和空隙胶结物中同生流体包裹体—获取古环境温度和盐度又一新途径[J]. 天然气工业, 2002, 22(1): 9-13 [Chen Honghan, Gong Zaisheng, John Parnell, *et al.* Syngenetic fluid inclusion from inherited cracks and cement voids in detrital quartz grains—another new way to get the ancient environment temperature and salinity [J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(1): 9-13]
 - 14 游海涛, 程日辉, 刘昌岭. 古盐度复原法综述[J]. 世界地质, 2002, 21(2): 111-117 [You Haitao, Cheng Rihui, Liu Changling. Review of paleosalinity recovering methods [J]. World Geology, 2002, 21(2): 111-117]
 - 15 Harder H. Boron content of sediment as a tool in facies analysis [J]. Sedimentary Geology, 1970, 4(2): 153-175
 - 16 叶黎明, 齐天俊, 彭海燕. 鄂尔多斯盆地东部山西组海相沉积环境分析[J]. 沉积学报, 2008, 26(2): 202-210 [Ye Liming, Qi Tianjun, Peng Haiyan. Depositional environment analysis of Shanxi Formation in Eastern Ordos Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26(2): 202-210]
 - 17 郑荣才, 柳梅青. 鄂尔多斯盆地长6油层组古盐度研究[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(1): 20-25 [Zheng Rongcai, Liu Meiqing. Study on palaeosalinity of Chang 6 oil reservoir set in Ordos Basin [J]. Oil and Gas Geology, 1999, 20(1): 20-25]
 - 18 史忠生, 陈开远, 史军, 等. 运用锶钡比判定沉积环境的可行性分析[J]. 断块油气田, 2003, 10(2): 12-16 [Shi Zhongsheng, Chen Kaiyuan, Shi Jun, *et al.* Feasibility analysis of the application of the ratio of strontium to barium on the identifying sedimentary environment [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2003, 10(2): 12-16]
 - 19 Degens E T, Williams E G, Keith M L. Environmental studies of carboniferous sediments (Part I): Geochemical criteria for differentiating marine and fresh water shales [J]. AAPG Bulletin, 1957, 41: 2427-2455
 - 20 李进龙, 陈东敬. 古盐度定量研究方法综述[J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(5): 1-3 [Li Jinlong, Chen Dongjing. Summary of quantified research method on paleosalinity [J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2003, 10(5): 1-3]
 - 21 陈忠, 罗叠潭, 沈明道, 等. 由储层矿物在碱性驱替剂中的化学行为到砂岩储层次生孔隙的形成[J]. 西南石油学报, 1996, 18(2): 15-19 [Chen Zhong, Luo Zhentan, Shen Mingdao, *et al.* Study of secondary pore formation on the basis of chemical behavior of minerals in alkaline-flooding agents [J]. Journal of Southwest-China Petroleum Institute, 1996, 18(2): 15-19]
 - 22 邱隆伟, 姜在兴. 陆源碎屑岩的碱性成岩作用[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 9-14 [Qiu Longwei, Jiang Zaixing. The Alkaline Diagenesis of Terrigenous Clastic Rocks [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 9-14]
 - 23 朱家祥. 应用 TEM/EDAX 研究粘土矿物的结构和成份特征[J]. 同济大学学报, 1994, 22(1): 113-119 [Zhu Jiaxiang. Study on microtextural and compositional characteristics of clay minerals during the late diagenetic stage using TEM/EDAX technique [J]. Journal of Tongji University, 1994, 22(1): 113-119]
 - 24 李会军, 张文才, 朱雷. 苏里格气田优质储层控制因素[J]. 天然气工业, 2007, 27(12): 16-19 [Li Huijun, Zhang Wencai, Zhu Lei. The quality reservoir control factors of Surig gas field [J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(12): 16-19]
 - 25 朱平, 黄思静, 李德敏, 等. 粘土矿物绿泥石对碎屑储集岩孔隙的保护[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2004, 31(2): 153-156 [Zhu Ping, Huang Sijing, Li Demin, *et al.* Effect and protection of chlorite on clastic reservoir rocks [J]. Journal of Chengdu University of

Technology: Science & Technology Edition, 2004, 31(2): 153-156]

26 范明, 蒋小琼, 刘伟新, 等. 不同温度条件下 CO₂ 水溶液对碳酸盐岩的溶蚀作用[J]. 沉积学报, 2007, 25(6): 825-830 [Fan Ming,

Jiang Xiaoqiong, Liu Weixing, *et al.* Dissolution of carbonate rocks in CO₂ solution under the different temperatures [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(6): 825-830]

The Effect of Diagenesis and Reservoir Physical Properties by Water Environment of the Forth Member of Shahejie Formation in Lvda 21 Structure, Bohai Bay

ZHAO Guo-xiang WANG Qing-bin YANG Bo LIU Feng WANG Fei-long

(Research Institute of Exploration and Development, Bohai Oil Field, Tianjin Branch Company, CNOOC, Tianjin 300452)

Abstract: An analysis between the original water environment of Lvda 21-1 Structure, Bohai Oil Field and the impact of reservoir diagenesis and physical properties has been carried out in this paper. According to the result of normal thin-sections, cast thin-sections, scanning electron microscope and trace element analysis, the original water environment of the Forth Member of Shahejie Formation is mainly brackish, mixing with fresh water in certain period. The rock type is dominated by lithic arkose sandstone, in which there are mainly soluble components. Typical alkaline diagenesis caused by brackish environment have been found in this area, such as dissolved quartz, feldspar overgrowth, chlorite, together with small amount of acidic fluids diagenetic phenomenon. Diagenetic fluid has varied from alkaline to acidic. The impact on the reservoir displays that alkaline fluid provided with a dual effect, and the corrosion caused by acidic fluids is the main reason in improving physical properties.

Key words: Lvda 21 Structure; 4th member of the Shahejie Formation (Es⁴); water environment; diagenesis; reservoir