

文章编号: 1000-0550(2007) 01-0099-11

山东省牛庄洼陷古近系沙河街组沙三中亚段 储集层成岩作用研究

漆滨汶¹ 林春明¹ 邱桂强² 李艳丽¹ 刘惠民² 高永进² 茅永强³

(1. 南京大学 成矿作用国家重点实验室 地球科学系 南京 210093 2 胜利油田有限公司地质科学研究院 山东东营 257015;
3. 中国科学院南京地质古生物研究所现代古生物学和地层学国家重点实验室 南京 210008)

摘要 山东省牛庄洼陷古近系沙河街组沙三中亚段储集层岩石类型以长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩为主, 岩石结构成熟度和成分成熟度均较低。砂岩成岩作用包括压实作用、胶结作用、交代作用、溶解作用等。压实作用主要有刚性颗粒发生脆性破裂、颗粒之间呈线接触和凹凸接触、岩石碎屑颗粒呈明显的定向排列、塑性颗粒挤压变形或刚性颗粒嵌入变形颗粒中、粘土质碎屑被挤压变形发生假杂基化等五种表现形式。胶结物主要有泥质胶结物、碳酸盐胶结物、自生粘土矿物和自生石英、长石。交代作用主要有石英交代长石颗粒、碳酸盐胶结物交代石英、长石及岩屑颗粒、碳酸盐胶结物之间的相互交代。发生溶解作用的主要是石英、长石和岩屑颗粒, 胶结物中主要是碳酸盐矿物。目前研究区沙三中亚段储集层成岩演化处于晚成岩 A 期。影响成岩作用的主要因素为岩石成分、沉积环境、孔隙流体性质等。成岩作用对储集物性的影响主要表现在孔隙度和渗透率的变化, 其中压实作用和胶结作用使储层原生孔隙迅速减少、渗透率降低, 使得储集物性变差; 而溶解作用是次生孔隙发育的主要因素, 从而改善砂岩的储集性能。

关键词 储集层 成岩作用 储集物性 沙三中亚段 古近系 牛庄洼陷 山东

第一作者简介 漆滨汶 男 1981 年出生 硕士研究生 沉积学与石油地质学

中图分类号 TE122.2 **文献标识码** A

成岩作用在砂岩的埋藏演化过程中对其孔隙度和渗透率的产生、破坏和改造起着关键作用^[1, 2]。对山东省东营凹陷及其内部的牛庄洼陷的储层特征前人已做了一些研究^[3-6], 但对成岩作用类型及其表现、影响成岩作用的因素、成岩作用对储集物性的影响等方面的研究尚嫌不足。随着地层—岩性油气藏勘探和开发的深入, 钻 测井等资料的积累, 深入研究储集层的成岩作用, 找出影响储层发育的主要因素, 对有利储集层的预测有着重要意义。牛庄洼陷发育典型的岩性、透镜体砂岩油藏, 砂体主要分布于沙三中亚段, 埋深大约在 2800~3400 m, 其所占储量为全洼陷总储量的 80% 以上, 所以深入系统地探讨这些砂体的储层特征及其影响因素, 对于油田的勘探开发具有指导意义。本文在前人研究基础上, 对牛 35、牛 42、牛 110、牛 872、史 10、史 128、史斜 137、王斜 543 等 8 口取心井(图 1)的岩心进行了系统观察和描述, 并采集了 127 块沙河街组沙三中亚段的岩心样品, 进行了室内显微镜薄片分析、X-衍射、电子探针及扫描电镜实验, 系统地研究了牛庄洼陷沙河街组沙三中亚段储集层的自生成岩矿物、成岩作用类型、成岩作用阶段、成岩演化序列和影响成岩作用的因素, 以及成

岩作用对储集物性的影响等。冀此希望为勘探开发隐蔽油气藏提供更详细的基础地质资料。

1 地质背景

牛庄洼陷位于济阳坳陷南部次级负向构造单元东营凹陷的东南部, 其北部和西部与一近弧形的东营中央背斜带相接, 南部与凹陷南斜坡的王家岗—陈官庄断裂带相临, 形成一个南北界受东西向或近东西向断裂所控制的似菱形沉积盆地, 盆地东西长 40 km, 南北宽 15 km, 面积约 600 km²(图 1)。

钻井资料显示, 牛庄洼陷的地层自上而下有第四系平原组, 新近系明化镇组、馆陶组, 古近系东营组、沙河街组和孔店组。其中沙河街组为区内沉积厚度最大、分布最稳定 and 最重要的含油气地层单元^[7, 8]。根据其沉积旋回和岩性特征, 将沙河街组自上而下划分为沙四、沙三、沙二、沙一四个层段, 其中沙三又可分为上、中、下三个亚段, 中亚段是本文研究的目标层段, 而中亚段又被分为中一、中二、中三、中四、中五、中六共六个砂层组^[8]。牛庄洼陷沙河街组沙三中亚段厚 600~1000 m, 为厚层块状灰色泥岩夹粉、细砂岩, 属三角洲前缘斜坡相沉积(图 2), 是牛庄洼

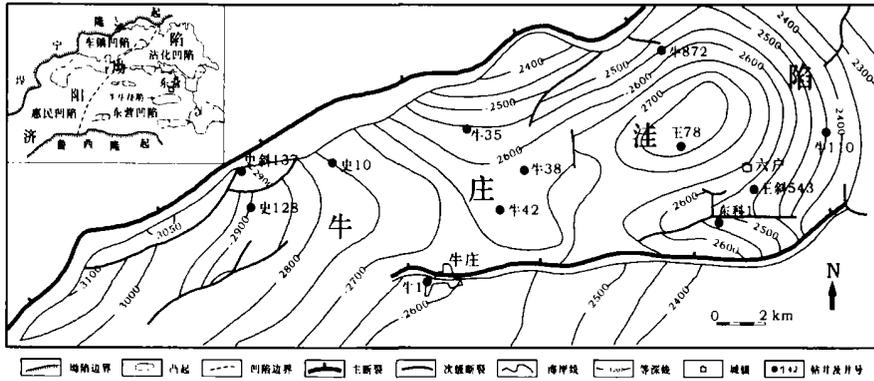


图 1 牛庄洼陷取心井位示意图

Fig 1 Sketch map of locations of the studied wells in Niuzhuang Sub-sag Shandong Province

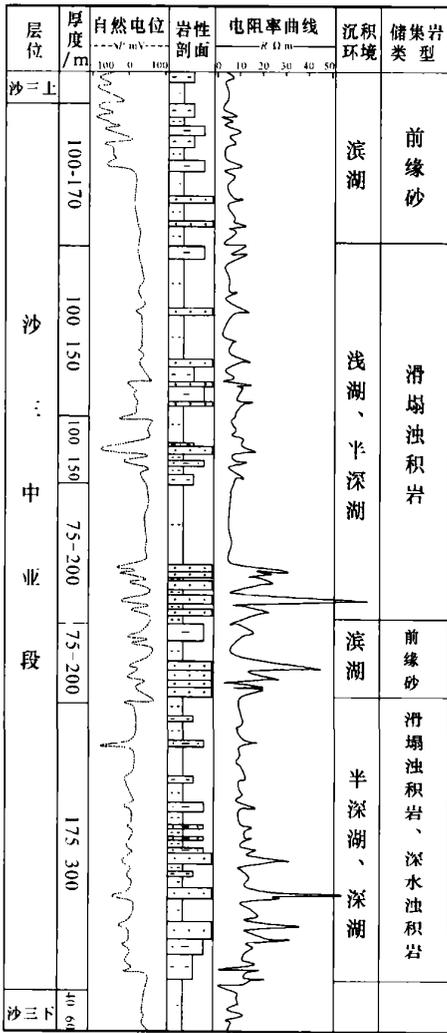


图 2 牛庄洼陷沙河街组沙三中亚段综合柱状图

Fig 2 Generalized column of the intermediate section of Member 3 of Shahejie Formation of Paleogene in Niuzhuang Sub-sag Shandong Province

集层的类型按成因可分为四种^[10], 即三角洲砂岩、滑塌浊积岩、深水浊积砂岩和冲积扇砂岩等。

2 储集层岩石学特征

牛庄洼陷古近系沙河街组沙三中亚段储集层由碎屑砂岩组成, 按照 Folk 的砂岩分类^[11], 研究区碎屑砂岩以长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩为主, 岩屑砂岩次之 (图 3), 含少量粗砂岩和泥质粉砂岩。碎屑颗粒为细—中粒, 次棱角—次圆状, 分选中等—差。碎屑组分中, 石英含量为 17% ~ 74%, 平均为 46.3%, 主要为单晶石英; 长石含量变化较大, 为 5% ~ 55%, 平均为 25.7%, 包括正长石、条纹长石、微斜长石和斜长石; 岩屑含量的变化也比较大, 为 11% ~ 46%, 平均为 28.0%, 多为泥质岩屑和硅质岩屑; 另可见少量的重矿物, 如锆石、电气石、普通角闪石、石榴

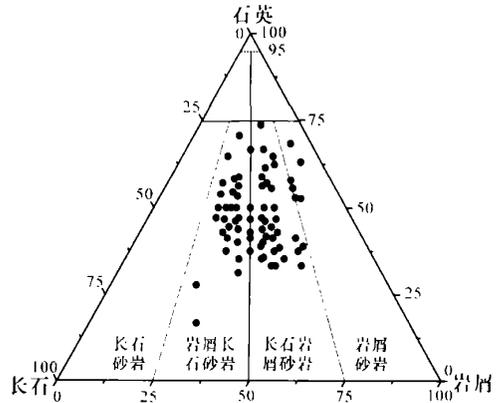


图 3 牛庄洼陷沙河街组沙三中亚段砂岩成分分类

● 牛 35、牛 42、牛 110、牛 872、史 10、史 128、史 137、王斜 543 等 8 口取心井沙三中亚段样品点

Fig 3 Composition of sandstones plotted on the classification triangle of Folk (1968) of the intermediate section of Member 3 of Shahejie Formation of Paleogene in Niuzhuang Sub-sag Shandong Province

陷主要生油和主力含油层序^[8-9]。牛庄洼陷储

子石等。砂岩孔隙中杂基填隙与胶结物充填共存, 胶结物包括碳酸盐、自生的石英、长石及粘土矿物等。部分井段杂基含量高, 普遍发育碳酸盐胶结物, 泥质胶结物含量较低, 使得岩石的成分及结构成熟度均不高。

3 自生成岩矿物特征

综合薄片观察、X-衍射、电子探针等多种分析手段, 对牛庄洼陷古近系沙河街组沙三中亚段储集层中出现的各种成岩矿物进行研究, 确定了各种自生矿物的类型及特征。沙三中亚段储集层主要的自生成岩矿物有粘土矿物、碳酸盐矿物、石英和长石等。

3.1 粘土矿物

牛庄洼陷沙河街组沙三中亚段砂岩中常见自生粘土矿物和粘土杂基。粘土杂基大部分是以陆源碎屑物的形式随碎屑颗粒一起搬运并沉积的; 也有一部分是在搬运介质中或沉积环境中因胶体溶液的凝聚作用与碎屑物同时沉积下来的; 此外, 在成岩过程中由于孔隙水的运动, 在局部孔隙中, 也充填有一些粘土杂基。自生粘土矿物和粘土杂基的区分可以根据以下几点:

① 结晶形态是区分自生粘土与粘土杂基的明显标志。粘土杂基由于经过介质的搬运, 晶形一般保存较差, 有磨损和溶蚀等现象, 而自生粘土常呈完好的晶体形态, 晶体轮廓清晰, 表面光洁, 常常形成理想的结晶体, 晶体粗大。

② 自生粘土的产状明显受控于储集层的孔隙空间条件。最常见的自生粘土矿物的产状有孔隙衬边、孔隙桥接和孔隙充填等。伊利石、绿泥石和伊/蒙混

层可形成孔隙衬边, 孔隙桥接状粘土多为伊利石, 高岭石多呈散点状充填孔隙。

③ 某些自生粘土可由其它矿物转化而来(如长石的高岭石化), 因此可根据新生粘土矿物集合体的外形及残余结构进行分析判断。

X-衍射及扫描电镜实验表明, 研究区的自生粘土矿物主要发育有高岭石、绿泥石、伊利石和伊/蒙混层等(表 1)。自生粘土矿物来源于孔隙水的沉淀作用、碎屑岩中不稳定组分的蚀变作用和上覆粘土矿物的转化^[12]。在扫描电镜下, 高岭石以书页状充填于粒间, 晶体形态完整(图 4A); 绿泥石以叶片状胶结于颗粒表面和孔隙中(图 4B); 伊利石以片状, 丝状充填于孔隙中(图 4C); 伊/蒙混层是蒙脱石向伊利石过渡的矿物, 呈棉絮状或片状充填于孔隙中(图 4D)。

粘土矿物的演化对储集层有重要的影响。一方面, 它可以充填粒间孔隙, 减少孔隙空间; 另一方面, 粘土矿物是造成储层敏感性的主要因素之一, 可降低储层的渗透率^[4, 13]。

因此, 粘土矿物的演化对储集层研究具有重要意义。研究区各粘土矿物相对含量变化在纵向上的分布规律较为明显, 如牛 35 井(图 5), 各粘土矿物相对含量在 2930~3000 m 的深度内几经变化, 高岭石的含量是先增加再减少, 然后呈增加趋势; 绿泥石与高岭石类似, 只是多了一个增加再减少旋回; 伊利石和伊/蒙混层含量分布趋势与高岭石、绿泥石相反, 先是随着深度的增加而减少, 然后有一个增加的区间, 最后呈较快的减少趋势; 伊/蒙混层的混层比是随着深度的增加而减小的, 也就是混层中蒙脱石的含量是逐渐减少的。

表 1 牛庄洼陷沙河街组沙三中亚段砂岩粘土矿物组成

Table 1 Composition of clay minerals in sandstones of the intermediate section, Member 3 of Shahejie Formation (Paleogene) in Nuzhuang Sub-sag, Shandong Province

井号	井段 /m	样品数 /个	粘土总量 /%	高岭石 /%	绿泥石 /%	伊利石 /%	伊/蒙混层 /%	混层比 /%
牛 35	2937.1~2994.9	20	8.5	42.5	27.7	12.8	17.0	24.8
牛 42	3262.4~3272.0	5	7.4	10.0	57.2	12.2	20.6	18.5
牛 110	3001.0~3019.2	7	8.7	12.0	59.9	13.3	14.9	20.0
牛 872	2915.0~3047.4	14	10.9	47.1	21.3	11.9	19.8	22.6
史 10	3034.7~3226.0	30	8.7	37.2	21.8	14.9	26.0	20.2
王斜 543	3097.5~3228.6	26	10.8	51.9	22.2	11.6	14.3	19.6

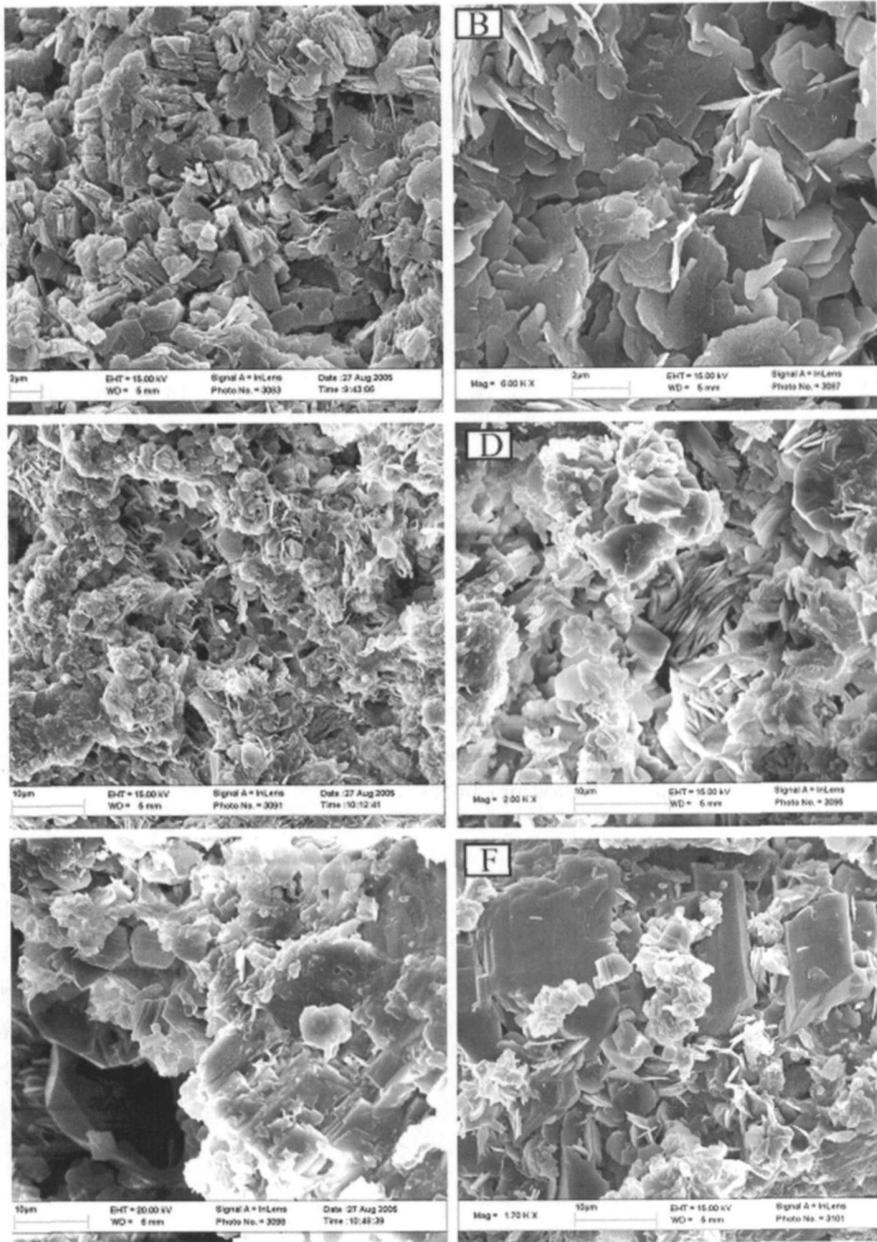


图 4 牛庄洼陷沙河街组沙三中亚段砂岩扫描电镜照片

A. 高岭石的形貌, 史 10 井, 埋深 3178.02 m, $\times 3270$; B. 绿泥石的形貌, 史 10 井, 埋深 3178.02 m, $\times 6000$; C. 伊利石的形貌, 史 10 井, 埋深 3178.02 m, $\times 1500$; D. 伊蒙混层的形貌, 牛 872 井, 埋深 3044.30 m, $\times 2000$; E. 孔隙中的自生石英, 牛 872 井, 埋深 3044.30 m, $\times 1530$; F. 再沉淀的自生长石, 牛 872 井, 埋深 3044.30 m, $\times 1700$.

Fig 4 SEM photomicrographs of sandstones of the intermediate section of Member 3 of Shahejie Formation of Paleogene in Nizhuang Sub-sag Shandong Province

3.2 碳酸盐矿物

研究区碳酸盐胶结物十分普遍, 常见的有方解石、含铁方解石、白云石、铁白云石、菱铁矿和褐铁矿等(表 2)。

碳酸盐胶结方式主要有以下类型: ① 基底式胶结, 碎屑颗粒漂浮在碳酸盐胶结物之间(图 6A); ②

孔隙式胶结, 碳酸盐胶结物分布在颗粒之间的孔隙内, 碎屑颗粒之间以点线接触为主(图 6B)。

方解石胶结作用期次主要分为早期和晚期两种, 即早期的泥晶方解石和晚期的粒状方解石胶结作用^[14-15]。泥晶方解石胶结物颗粒细小, Fe 含量低, 呈基底式胶结, 这种胶结物形成早, 是从湖水中直接

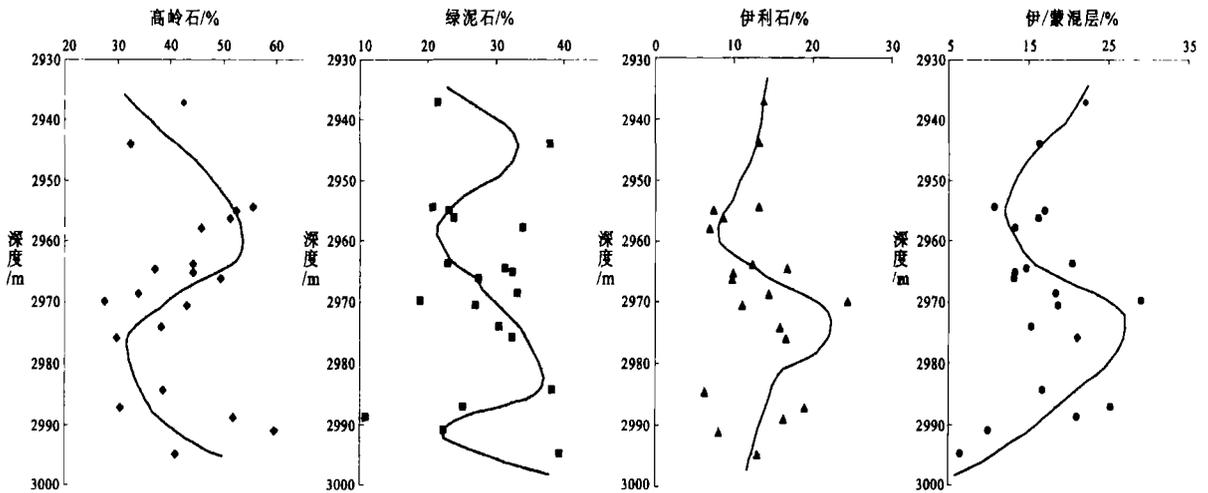


图 5 牛庄洼陷牛 35 井沙河街组沙三中亚段砂岩粘土矿物剖面

Fig 5 Plot of the clay minerals sections in sandstones of Well Niu 35, the intermediate section of Member 3 of Shahejie Formation (Paleogene) in Niuzhuang Sub-sag Shandong Province

表 2 牛庄洼陷沙河街组沙三中亚段砂岩胶结物电子探针成分分析数据

Table 2 Microprobe analysis of sandstone cements of the intermediate section of Member 3, Shahejie Formation (Paleogene) in Niuzhuang Sub-sag Shandong Province

井号	井深 /m	点号	氧化物含量 /%									分析结果	
			N ₂ O	K ₂ O	MnO	MgO	CaO	FeO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SiO ₂		Total
牛 35	2941.50	1	0.003	0.004	0.288	0.594	53.227	2.163	0.008	0.015	-	56.302	含铁方解石
		2	0.028	-	0.400	0.769	54.307	2.197	0.106	0.025	0.320	58.241	含铁方解石
		3	0.019	0.012	0.411	0.514	54.377	1.859	-	0.025	0.040	57.257	含铁方解石
		4	-	-	0.311	0.606	54.851	1.900	0.024	-	0.032	57.724	含铁方解石
		5	0.012	0.023	0.349	0.575	54.020	1.837	0.117	-	0.234	57.167	含铁方解石
		6	0.015	-	0.358	0.582	48.539	2.094	2.484	-	2.774	56.875	含铁方解石
牛 42	3259.80	1	0.037	0.006	0.162	0.539	52.679	2.728	0.050	0.003	0.098	56.302	含铁方解石
		2	-	-	0.182	0.594	51.695	2.832	0.018	-	0.023	55.344	含铁方解石
		3	0.019	-	0.154	0.526	53.323	2.181	0.023	0.010	0.002	56.533	含铁方解石
		4	-	0.018	0.152	0.732	48.207	3.156	0.922	0.009	1.382	54.578	含铁方解石
		5	0.031	-	0.165	0.632	52.497	2.508	-	-	0.063	56.014	含铁方解石
		6	0.365	16.797	-	-	0.073	0.104	17.148	0.033	63.778	99.307	钾长石
		7	-	0.031	0.032	8.781	30.484	14.190	0.044	0.010	0.032	53.609	铁白云石

沉淀的。粒状方解石胶结物常常呈不均匀的斑点状分布于孔隙中,晶粒较粗,多为细到中晶,少数可达粗晶,Fe含量较高^[13]。碳酸盐胶结物充填在颗粒之间的孔隙内,起到良好的胶结作用,而碳酸盐胶结物本身又呈现环带现象,如晚期粒状含铁方解石,在正交偏光显微镜下呈绿蓝-紫红色环带包围在泥晶方解石胶结物的边缘(图 6C)。

3.3 自生石英和长石

自生石英以次生加大边形式存在,加大边尽管比较常见,但强度较小,在普通显微镜下不易识别,仅在电子显微镜下才容易观察到(图 4E),而且也是在一个

别碎屑颗粒上发育加大边,且多分布于碎屑颗粒的棱角上。石英加大边不完整且多在石英颗粒边缘局部发育,这主要是因为研究区砂岩表面通常发育一层粘土膜,粘土膜能够阻止石英压溶作用的进行,故石英加大只能生长在粘土膜不发育的部位^[2, 6]。

自生加大长石为 Na₂O 含量很低的纯净钾长石,其形成需要较高的温度和压力以及孔隙溶液中高的 K⁺/H⁺ 离子活度比值条件,由稳定性差的中间组分长石的溶解和再沉淀形成^[2, 6](图 4F)。研究区砂岩多为岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩,长石含量高且多具高岭土化,为自生长石的形成提供了物质来源。

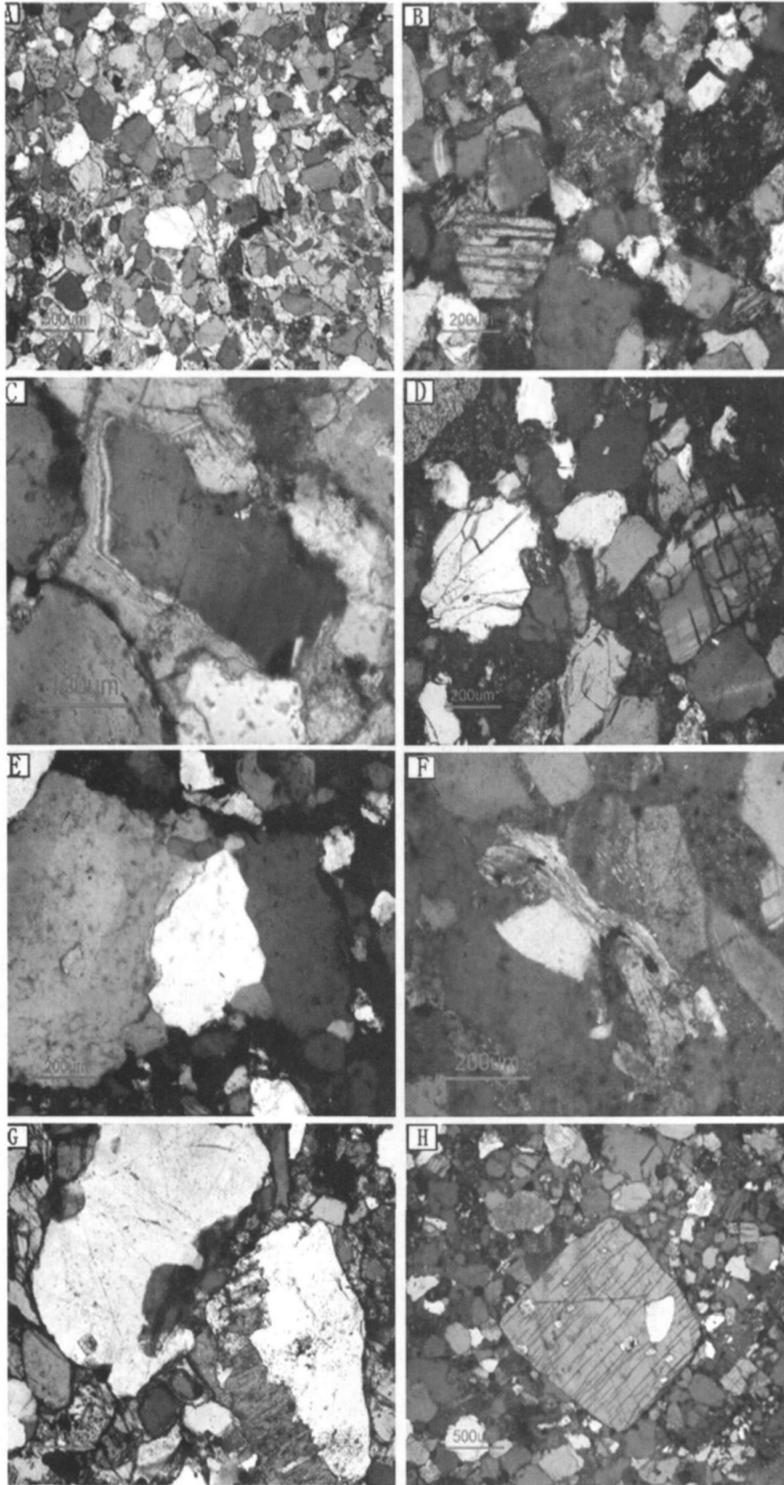


图 6 牛庄洼陷沙河街组沙三中亚段砂岩显微照片

A. 碳酸盐的基底式胶结, 碎屑颗粒漂浮在碳酸盐胶结物之间, 碳酸盐含量高, 牛 35 井, 埋深 2977.97 m, 正交光, 4×10 ; B 碳酸盐的孔隙式胶结, 碳酸盐胶结物处在碎屑颗粒之间的孔隙内, 颗粒之间呈点线接触, 牛 42 井, 埋深 3273.00 m, 正交光, 10×10 ; C. 碳酸盐胶结物的环带, 碎屑颗粒边缘被溶蚀, 长石颗粒局部被碳酸盐胶结物交代, 颗粒之间呈点接触, 牛 872 井, 埋深 2920.50 m, 正交光, 20×10 ; D. 左边石英颗粒破碎和不规则溶蚀边, 右边破碎的长石颗粒, 碎屑颗粒之间呈线接触到凹凸接触, 牛 35 井, 埋深 2986.37 m, 正交光, 10×10 ; E. 碎屑颗粒间的凹凸接触, 颗粒边缘见溶蚀现象, 中间白色石英颗粒有次生加大边, 牛 42 井, 埋深 3259.80 m, 正交光, 10×10 ; F. 扭曲的云母颗粒, 长石和岩屑颗粒有不同程度的蚀变, 碎屑颗粒之间呈线接触, 牛 110 井, 埋深 3014.56 m, 正交光, 10×10 ; G. 左上方石英颗粒边缘被溶蚀成不规则状, 右下方钾长石颗粒局部被石英交代, 并保留有钾长石颗粒假象, 颗粒之间呈点线接触, 牛 35 井, 埋深 2956.36 m, 正交光, 10×10 ; H. 钾长石颗粒的破碎和内部的溶蚀孔, 后期被石英交代, 颗粒之间呈点线接触, 史 10 井, 埋深 3038.52 m, 正交光, 4×10 .

Fig 6 Optical photomicrographs of sandstones of the intermediate section of Member 3, Shahejè Formation

4 成岩作用

4.1 成岩作用类型

本文通过大量的薄片观察、X-衍射、电子探针等分析手段,对牛庄洼陷沙河街组沙三中亚段砂岩储层的主要成岩作用进行了研究分析。本区砂岩储层经历的成岩作用类型较多,主要包括压实作用、胶结作用、交代作用、溶解作用等。其主要特征如下:① 地层温度一般在 100~130℃,有机质已成熟;② 砂岩粘土矿物伊/蒙混层中混层比多为 20% 左右,蒙脱石已大量转化为伊利石(表 1);③ 砂岩粘土矿物成分主要为自生高岭石和伊/蒙混层,其次为自生伊利石和绿泥石(表 1);④ 见晚期碳酸盐胶结物铁方解石和铁白云石以交代、加大、胶结等形式存在;⑤ 砂岩中碎屑石英的次生加大普遍而且较强;⑥ 长石等碎屑颗粒及碳酸盐组分常被溶解,可见溶解残余,次生孔隙较发育。

(1) 压实作用

牛庄洼陷沙河街组沙三中亚段砂岩储集层经历了较强的压实作用,是本区储集层中最普遍、最典型的一种成岩作用,也是导致储层物性变差的主要因素之一。压实作用可以发育于成岩作用的各阶段中,机械压实意味着碎屑岩孔隙度不可逆地降低,渗透率变差,体积缩小。研究区压实作用主要表现有:① 刚性颗粒发生脆性破裂,如石英、长石、部分岩屑等刚性颗粒的破碎(图 6D);② 颗粒之间呈线接触、凹凸接触(图 6E);③ 岩石碎屑颗粒呈明显的定向排列;④ 塑性颗粒挤压变形,如云母颗粒的变形(图 6F),或刚性颗粒(石英或长石颗粒)嵌入变形颗粒中;⑤ 粘土质碎屑被挤压变形,位于其它碎屑之间,而似杂基一样,即发生假杂基化等。

由于研究区储集岩体埋藏深度差别较大,所以承受的压实程度也各不相同。薄片分析表明,区内储层主要以点一线接触为主,多数薄片可观察到点接触和线接触,也见凹凸接触及缝合线接触(图 6D、6E、6F)。线接触以短线接触为主,长线接触少,主要见于塑性变形颗粒和刚性颗粒接触部位。

(2) 胶结作用

研究区砂岩储层中胶结作用普遍,胶结物类型多样,胶结物主要有泥质胶结物、碳酸盐胶结物(方解石、菱铁矿、褐铁矿、白云石)、自生粘土矿物和自生石英、长石。

研究区碳酸盐矿物胶结作用期次多,出现的类型也多,主要有方解石或含铁方解石胶结,白云石或含

铁白云石胶结等(表 2)。

(3) 交代作用

牛庄洼陷沙河街组沙三中亚段不同程度的发育交代作用,常见的交代作用以下几种:

① 石英交代长石颗粒,使长石颗粒边缘呈不规则状。如石英颗粒的溶蚀及石英交代钾长石(图 6G),或钾长石内部溶蚀被石英交代(图 6H)。

② 碳酸盐胶结物交代石英、长石及岩屑颗粒,使颗粒边缘呈不规则状(图 6C)。

③ 碳酸盐胶结物之间的相互交代:方解石交代白云石、白云石交代方解石、不同成分的方解石和白云石之间的交代。

(4) 溶解作用

牛庄洼陷沙河街组沙三中亚段砂岩被溶解的主要是石英、长石和岩屑颗粒。石英、长石和岩屑压溶可形成颗粒间凹凸接触或缝合线接触。胶结物中主要溶解对象是碳酸盐矿物。

石英、长石和岩屑颗粒溶解在整个埋藏过程中均可发生,只是溶解程度不同。一般溶解现象主要分布在中、深层碎屑岩中,有的石英、长石和岩屑颗粒普遍被溶蚀且很强烈,被溶的石英、长石和岩屑边缘往往呈不规则的港湾状或锯齿状、颗粒内部呈蜂窝状和骨架状,溶蚀严重的呈残核状或铸模孔。研究区石英、长石和岩屑颗粒普遍被溶蚀(图 6C、6D、6E、6G),胶结类型多为溶蚀一点接触式胶结或凹凸一线接触式胶结。

4.2 成岩阶段划分

根据 A laa 等^[1]成岩阶段划分方案及其标志对研究区成岩阶段进行了划分。成岩阶段的划分不仅考虑了岩石中镜质体反射率(R_o),并考虑了自生矿物的成分、形态、产状、生成顺序和组合特征以及岩石颗粒接触特征和孔隙组合类型,因为前者主要受控于温度、压力、孔隙流体组分和酸碱度特征,是反映成岩环境的重要证据,后者不仅是成岩演化阶段最直接的反映,而且是比较容易观察到的成岩现象。牛庄洼陷沙河街组沙三中亚段砂岩的镜质体反射率通常在 0.6%~1.2% 之间,砂岩普遍经受了较强的压实作用改造,碎屑颗粒大都以线接触为主,砂岩中原生孔隙已大量丧失,次生孔隙普遍发育,铁方解石、铁白云石等晚期碳酸盐胶结物大量出现,长石、岩屑以及碳酸盐碎屑等常发生明显的溶蚀作用,高岭石、伊利石、绿泥石、伊/蒙混层等自生粘土矿物比较常见。这些特征充分说明,研究区沙河街组沙三中亚段储层砂岩已经历了早成岩期,目前主要处于晚成岩 A 期(图 7)。

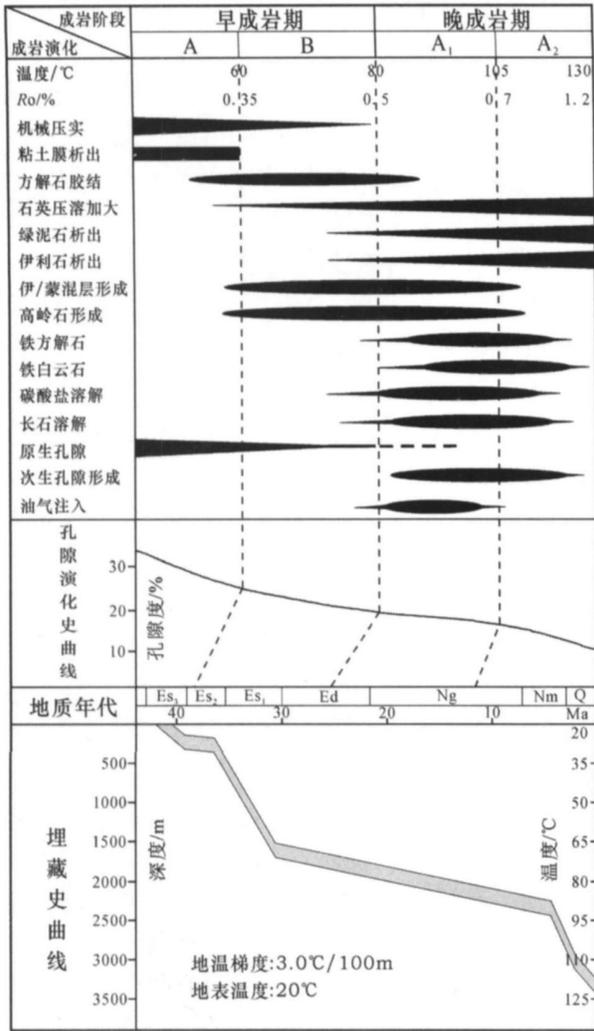


图 7 牛庄洼陷沙河街组沙三中亚段储层成岩演化模式
Fig 7 Diagenetic evolution of reservoir of the intermediate section of Member 3 of Shahejie Formation of Paleogene in Nizhuang Sub-sag, Shandong Province

4.3 成岩演化序列

根据以上对成岩作用及自生矿物的分析,结合镜下的各类成岩现象,确定研究区沙河街组沙三中亚段储层的成岩演化序列为:早期粘土膜形成→机械压实→石英次生加大→方解石沉淀→有机流体注入→长石颗粒溶解→自生高岭石形成→方解石溶解→石油侵位→晚期铁方解石充填→晚期白云石充填或交代碎屑颗粒(图 7)。由于自生矿物的形成需要一定时间完成,因此上述各成岩作用必然会出现重叠的情况^[17]。

4.4 成岩作用的影响因素

(1) 岩石成分

岩石成分是影响成岩作用最主要的因素。大量

薄片、扫描电镜、“X”射线衍射和电子探针资料研究结果表明,长石岩屑砂岩与岩屑长石砂岩是牛庄洼陷沙河街组沙三中亚段储集层的主要岩石类型;长石颗粒在机械性能上具有刚性颗粒的特点,能抗御机械压实作用。胶结物主要为碳酸盐,早期方解石沉淀抑制了岩石压实作用的进行,而岩屑和长石等不稳定成分的存在有利于溶解作用的发生。

(2) 沉积环境

牛庄洼陷沙河街组沙三中亚段形成于洼陷的断拗期,属三角洲一半深湖区沉积,物源主要来自东营凹陷的东部及东南部。由于东营三角洲自东向西推进,牛庄洼陷逐渐纳入前三三角洲和三角洲前缘斜坡的沉积体系中^[8-10]。因储集层多为浊流沉积,岩石成分成熟度和结构成熟度较低,沉积物普遍含有基质,基质以粘土为主,而且部分粘土呈粘土膜的形式裹在碎屑颗粒表面,从而抑制了石英加大边的生长^[2-16]。

(3) 孔隙流体性质

在晚成岩阶段,牛庄洼陷沙河街组沙三中亚段的泥质烃源岩中的有机质在低—中成熟阶段可释放出大量的有机酸和 CO₂,在压实作用影响下,随孔隙水流动而进入砂岩孔隙。在受有机酸影响较强的部位,砂岩处于酸性成岩环境,长石受溶蚀形成粒内孔隙,早期形成的泥粉晶方解石胶结物也受到溶蚀作用的影响^[18-20]。有机酸与碱性原生孔隙水中和形成弱酸性—弱碱性环境的部位, SiO₂缓慢结晶形成石英次生加大边^[11]。

4.5 成岩作用对储集物性的影响

本次研究表明,牛庄洼陷沙河街组沙三中亚段砂岩储集空间有粒间溶孔、晶间孔、粒内溶孔、粒缘孔、微裂缝等五种类型,以粒间溶孔、粒内孔为主,孔隙度一般 15%~20%,孔隙直径 20~40 μm。粒间溶孔主要发生在原生的粒间孔隙中,溶蚀作用沿碎屑边缘发育,溶蚀碎屑之间的胶结物杂基等,形成次生的扩大粒间溶孔。粒内溶孔是溶蚀作用在晶体内部沿解理裂隙和其他薄弱部位发生而造成的。除原始沉积作用外,成岩作用是影响储层物性的一个重要原因^[1, 21]。

根据成岩作用对储层物性的改善和破坏结果,可划分为建设性成岩作用和破坏性成岩作用。破坏性成岩作用主要是通过占据孔隙空间而达到破坏储层的目的,在本区破坏性成岩作用包括机械压实作用、石英次生加大、自生高岭石析出作用、方解石胶结物沉淀作用、硅质胶结作用、晚期含铁碳酸盐矿物的沉

淀和交代作用等。建设性成岩作用主要是溶解作用。

(1) 破坏性成岩作用对储层孔隙的影响

机械压实作用在成岩作用早期, 使碎屑沉积物迅速压实, 粒间孔隙度损失较快。地层随深度的增加, 压实作用增强, 孔隙度逐渐降低。研究区地层纵向上呈现明显的分段结构, 上部正常压实段、下部欠压实段、二者间呈过渡关系。牛庄洼陷沙河街组沙三中亚段砂岩压实作用中等, 颗粒多为线状接触, 保存了一定量的原生孔隙。

研究区砂岩储层中的原生粒间孔隙经成岩后生阶段被碳酸盐、石英及长石自生加大、自生粘土矿物等胶结充填, 使原生孔隙减小, 岩石有效孔隙减少、物性变差。

碳酸盐胶结物的存在对研究区的储层物性有着重要的影响, 总的来说, 它充填孔隙, 降低了储层的孔隙度和渗透率, 但从另一方面来说, 早期碳酸盐胶结物的存在减弱了压实作用对储层物性的影响, 并有可能在成岩作用后期为溶解作用提供物质基础。至于能起多大作用, 则取决于碳酸盐胶结物的含量高低。一般情况下, 如果储层中早期碳酸盐胶结物含量不超过 15%, 其对储层形成一定量的次生孔隙还是有较大作用的^[5, 21]。研究区砂岩中的碳酸盐胶结物含量普遍大于 15%, 因而后期溶解作用能形成的次生孔隙相对有限。粘土矿物的胶结作用一方面加固了岩石骨架增加了其抗压能力, 保护了部分残余粒间孔隙, 对储层的储集性能起了建设性的保护作用; 另一方面, 它的发育堵塞了孔喉, 对储层的储集性能起了破坏性的改造作用。

石英次生加大对孔隙的影响表现为使孔隙的喉道缩小, 但研究区地层硅质胶结物含量普遍在 5% 之下, 不是主要胶结物, 因此对储层物性的影响较小。

(2) 建设性成岩作用对储层孔隙的影响

牛庄洼陷沙河街组沙三中亚段岩石学特征表明, 碎屑岩储层具有次生孔隙发育的先天条件。碎屑岩储层富含长石岩屑等易溶成分, 从而有利于溶蚀孔隙的形成; 长石颗粒在机械性能上具有刚性颗粒的特点, 能抗御机械压实对原生孔隙的破坏; 所以长石和岩屑等成分的存在对早期原生孔隙的保存及晚期次生孔隙的形成具有重要的意义。溶解作用产生的孔隙是牛庄洼陷沙河街组沙三中亚段砂岩次生孔隙的重要类型, 主要为长石、岩屑和方解石溶蚀形成的粒间扩大孔及粒内溶孔。

5 结论

总体来看, 牛庄洼陷古近系沙河街组沙三中亚段储集层岩石类型以长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩为主, 岩石结构成熟度和成分成熟度均较低。研究区目的层主要的自生成岩矿物有粘土矿物、碳酸盐矿物、石英和长石等; 主要的成岩作用有压实作用、胶结作用、交代作用、溶解作用等。研究区沙河街组沙三中亚段储层砂岩已经历了早成岩期, 目前主要处于晚成岩 A 期。影响成岩作用的主要因素有岩石成分、沉积环境、孔隙流体性质等。储集层的质量较好, 但仍有相对致密的储集层段, 它们受成岩作用的影响相当明显。岩石组构对研究区砂体储集层物性有重要影响, 成岩作用是影响砂体储集层性能的主要因素, 主要表现在孔隙度和渗透率的变化, 其中碳酸盐胶结物、硅质胶结物及自生粘土矿物是导致储层物性变差的主要原因, 而有机质的大量生烃以及粘土矿物在转化过程中所释放出的酸性水的溶解作用, 是导致研究区含较多可溶性矿物的透镜体砂岩储层物性变好的重要因素。压实作用和胶结作用使储集物性变差, 而后期的溶解作用可以改善砂岩的储集性能。胶结作用使储层原生孔隙迅速减少, 而溶解作用是次生孔隙发育的主要因素。现存的孔隙特征主要是压实作用、胶结作用和溶蚀作用共同影响的结果。

本文得到胜利油田地质科学研究院东昌惠室等有关单位及人员的大力帮助, 在此表示衷心的感谢!

参考文献 (References)

- 1 A laaM, Salem SM orad *et al.* Diagenesis and reservoir-quality evolution of fluvial sandstones during progressive burial and uplift: Evidence from the Upper Jurassic Boipeba Member Rec n cavo Basin, Northeastern Brazil. *AAPG Bulletin* 2000, 84(7): 1015~ 1040
- 2 Ceriani A, Giulio A Di Gohlstein R H, *et al.* Diagenesis associated with cooling during burial: An example from Lower Cretaceous reservoir sandstones (Sirt Basin, Libya). *AAPG Bulletin* 2002, 86(9): 1573 ~ 1591
- 3 袁静, 王乾泽. 东营凹陷下第三系深部碎屑岩储层次生孔隙垂向分布及成因分析. *矿物岩石*, 2001, 20(1): 43~ 47 [Yuan Jing Wang Qianze Distribution and generation of deep reservoir secondary pores: Paleogene, Dongying Sag. *Journal of Mineral and Petrology*, 2001, 20(1): 43~ 47]
- 4 蔡进功, 张枝焕, 朱敏, 等. 东营凹陷烃类充注与储集层化学成岩作用. *石油勘探与开发*, 2003, 30(3): 79~ 83 [Cai Jingong Zhang Zhihuan Zhu Xiamin *et al.* Hydrocarbon filling and chemical diagenesis evolution of the clastic reservoir of the Paleogene in Dongying Sag. *Petroleum Exploration and Development* 2003, 30(3): 79~ 83]

- 5 饶孟余, 钟建华, 王海侨, 等. 山东东营牛庄洼陷沙三中亚段浊积砂体储层特征及影响因素. 现代地质, 2004, 18(2): 256~262 [Rao Mengyu, Zhong Jianhua, Wang Haiqiao, *et al.* Reservoir characteristics and influence factors of the Turbidite sandbody Shasan Intermediate Member in the Niuzhuang Sag, Dongying Depression, Shandong Province. *Geosciences*, 2004, 18(2): 256~262]
- 6 张德武, 冯有良, 邱以钢, 等. 东营凹陷下第三系层序地层研究与隐蔽油气藏预测. 沉积学报, 2004, 22(1): 67~72 [Zhang Dewu, Feng Youliang, Qiu Yigang, *et al.* Lower Tertiary sequence stratigraphy study and the forecast of subtle reservoir in Dongying Depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(1): 67~72]
- 7 李素梅, 李雪, 张庆红, 等. 牛庄洼陷第三系古沉积环境及其控油气作用. 石油与天然气地质, 2003, 24(3): 269~273 [Li Sumei, Li Xue, Zhang Qinghong, *et al.* Paleosimentary environment in Tertiary and its effect on petroleum distribution in Niuzhuang Sub-sag, Dongying Sag. *Oil and Gas Geology*, 2003, 24(3): 269~273]
- 8 王居峰. 东营三角洲—浊积扇高频层序叠加样式与岩性圈闭. 沉积学报, 2005, 23(2): 303~309 [Wang Jufeng. High frequency sequence stacking mode of Dongying delta-turbidite fans and lithological trap. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(2): 303~309]
- 9 李阳, 蔡进功, 刘建民. 东营凹陷下第三系高分辨率层序地层研究. 沉积学报, 2002, 20(2): 210~216 [Li Yang, Cai Jingong, Liu Jianming. High-resolution sequence stratigraphy of Paleogene in Dongying Depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(2): 210~216]
- 10 王金铎, 韩文功, 于建国, 等. 东营凹陷沙三段浊积岩体系及其油气勘探意义. 石油学报, 2003, 24(6): 24~29 [Wang Jinduo, Han Wengong, Yu Jianguo, *et al.* Turbidity system in the third section of Shahejie Formation of Dongying Sag and its implications on petroleum prospecting. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 24(6): 24~29]
- 11 冯增昭主编. 沉积岩石学(第二版). 北京: 石油工业出版社, 1994. 145~151 [Feng Zengzhao (Chief editor). *Sedimentary Petrology* (Second edition). Beijing: Petroleum Industry Press, 1994. 145~151]
- 12 刘林玉, 柳益群, 陈刚. 吐鲁番坳陷中—上侏罗统碎屑岩中的自生粘土矿物特征及其成岩意义. 岩石学报, 1998, 14(2): 258~268 [Liu Linyu, Liu Yiqun, Chen Gang. Property and diagenetic significance of authigenic clay mineral in Upper and Middle Jurassic clastic rock of Tulufan Depression, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 1998, 14(2): 258~268]
- 13 李潇丽, 田成. 山东车镇凹陷东部古近系沙河街组成岩作用. 古地理学报, 2002, 4(4): 70~80 [Li Xiaoli, Tian Cheng. Diagenesis of Shahejie Formation of the Paleogene in the eastern Chechen Depression of Shandong Province. *Journal of Palaeogeography*, 2002, 4(4): 70~80]
- 14 陆现彩, 胡文宣, 符琦, 等. 利用碳酸盐矿物成分研究沉积—成岩过程中流体盐度演化——以东营凹陷沙四段低熟油烃源岩为例. 沉积学报, 1998, 16(1): 120~126 [Lu Xiancai, Hu Wenxuan, Fu Qi, *et al.* Study of salinity evolution of geofluids during syn-genesis and diagenesis using composition of carbonate minerals: an example of the immature source rocks of Shasi Member in Dongying Depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(1): 120~126]
- 15 罗静兰, Morad S, 阎世可, 等. 河流—湖泊三角洲相砂岩成岩作用的重建及其对储层物性演化的影响——以延长油区侏罗系—上三叠统砂岩为例. 中国科学(D辑), 2001, 31(12): 1006~1016 [Luo Jinglan, S. Morad, Yan Shike, *et al.* Reconstruction of the Diagenesis of the fluvial-deltaic sandstones and its impact on reservoir quality evolution: taking an example from the Jurassic-Upper Triassic sandstones in the Yanchang oil field. *Science in China (Series D)*, 2001, 31(12): 1006~1016]
- 16 Caren C, Jack D. Porosity reduction during diagenesis of diatomaceous rocks. *AAPG Bulletin*, 2000, 84(8): 1173~1184
- 17 蔡春芳, 顾家裕, 蔡洪美. 塔中地区志留系烃类侵位对成岩作用的影响. 沉积学报, 2001, 19(1): 60~64 [Cai Chunfang, Gu Jiayu, Cai Hongmei. Effect of hydrocarbon emplacement on diagenesis of Silurian sandstone of Central Tarim Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(1): 60~64]
- 18 张枝焕, 胡文宣, 曾溅辉, 等. 东营凹陷下第三系流体—岩石相互作用研究. 沉积学报, 2000, 18(4): 560~566 [Zhang Zhihuan, Hu Wenxuan, Zeng Jianhui, *et al.* Study of fluid-rock interactions in Eocene Formation in Dongying Depression, Bohai Gulf Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(4): 560~566]
- 19 宫秀梅, 曾溅辉, 金之钧. 渤海洼陷深层(沙三、沙四段)原油—水—岩石相互作用模拟实验研究. 沉积学报, 2005, 23(3): 420~428 [Gong Xiumei, Zeng Jianhui, Jin Zhijun. Experimental simulation on oil-water-rock interaction in the deep Bonan Sub-sag. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(3): 420~428]
- 20 吴富强, 鲜学福, 李后蜀, 等. 胜利油区渤海洼陷沙四上亚段深部储层形成机理. 石油学报, 2003, 24(1): 44~48 [Wu Fuqiang, Xian Xuefu, Li Houshu, *et al.* Deep reservoir forming mechanism in the upper part of the fourth member of Shahejie Formation in Bonan Sub-sag of Shengli Oilfield. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 24(1): 44~48]
- 21 张琴, 朱筱敏, 钟大康, 等. 山东东营凹陷古近系碎屑岩储层特征及控制因素. 古地理学报, 2004, 6(4): 493~502 [Zhang Qin, Zhu Xiaomin, Zhong Dakang, *et al.* Clastic reservoir properties and their controlling factors of the Paleogene in Dongying Sag, Shandong Province. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(4): 493~502]

Reservoir Diagenesis of the Intermediate Section in Member 3 of Shahejie Formation (Paleogene) in Niuzhuang Sub-sag Shandong Province

QI Bin-wen¹ LIN Chun-ming¹ QU Gu-qiang² LI Yan-li¹
 LU Huimin² GAO Yong-jin² MAO Yong-qiang³

(1. State Key Laboratory of Mineral Deposits Research, Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

2. Research Institute of Geosciences, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying Shandong 257015

3. State Key Laboratory of Palaeobiology and Stratigraphy, Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, CAS, Nanjing 210008)

Abstract Reservoir rocks of the intermediate section of Member 3 of Shahejie Formation of Paleogene in Niuzhuang Sub-sag Shandong Province, mainly consists of feldspathic litharenite and litharenite arkose with low compositional maturity and textural maturity. Diagenesis of the sandstones includes compaction, cementation, replacement and dissolution. Compaction includes five occurrences, they are brittle cracking of rigid grains, lined and concavo-convex intergranular contacts, apparently directional arrangement of framework grains, compressional deformation of plastic grains or intercalation of rigid grains in deformational grains, pseudomatrixization of compressional deformed ductile detrital grains. Cements are argilla, carbonates, authigenic clay minerals, quartz and feldspars. Replacement includes quartz replaced feldspars, carbonate cements replaced quartz, feldspars and lithic fragments, and carbonates cements replaced each other. Dissolution of grains mainly are quartz, feldspars and lithic fragments, and of cements of carbonate minerals. The research result shows that the diagenesis of reservoir rock is in A-substage of telodiagenesis. The main factors which affect the diagenesis of the reservoir include rock composition, sedimentary environment and property of pore fluid. The influences of diagenesis on the reservoir physical properties are mainly the change of porosity and permeability. Compaction and cementation of the reservoir rocks makes the primary pores and permeability decreased quickly, which is the main causes of the poor physical properties, but dissolution of the reservoir rocks is the main factor of the development of the secondary pores, which can improve the physical properties of the reservoir sandstones.

Key words reservoir diagenesis, reservoir quality, intermediate section of Member 3 of Shahejie Formation, Paleogene, Niuzhuang Sub-sag, Shandong Province