

牛庄洼陷沙三中亚段浊积岩储层 成岩作用及主控因素分析

饶孟余, 张遂安, 李秀生

(中国石油大学 石油与天然气工程学院, 北京 102200)

摘 要: 东营凹陷牛庄洼陷沙三中亚段浊积岩储层以长石细砂岩、岩屑细砂岩及粉砂岩为主, 结构成熟度及成分成熟度均较低。浊积岩样品的显微特征及成岩矿物的组合关系分析结果表明: 该区的浊积岩储层目前主要处于晚成岩 A 期到 B 期的过渡阶段, 成岩现象包括压实压溶作用、石英的次生加大作用、碳酸盐矿物胶结作用、溶解作用和粘土矿物转化作用等, 这些作用过程受矿物与孔隙流体之间的相互作用控制。影响成岩作用的主要因素是岩石性质、沉积微相、水介质的性质、超压、高温以及烃类的早期注入。

关键词: 牛庄洼陷; 浊积岩; 成岩作用; 主控因素; 次生孔; 山东省

中图分类号: P618.130.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2007)01-0066-05

发具有指导意义, 而且对陆相湖盆中-深部储层成岩演化的研究也具有一定的参考价值。

1 概况

牛庄洼陷位于山东省济阳坳陷东营凹陷的东南部, 面积约 600 km² (图 1)。其新生界自上而下发育有第四系平原组, 新近系明化镇组、馆陶组, 古近系东营组和沙河街组。根据沉积旋回和岩性组合特征沙河街组自上而下可划分为沙一、沙二、沙三和沙四共 4 个层段, 其中沙三段又可分为上、中、下 3 个亚段。沙三中亚段沉积时期, 东营凹陷构造运动强烈、湖盆深陷扩张, 同时碎屑物质供应充足, 沿东营凹陷长轴方向发育的进积型东营复合三角洲达到鼎盛时期, 并在三角洲前缘半深湖-深湖地带发育了许多滑塌浊积砂体^[1-5]。这些浊积砂体主要分布于牛庄洼陷, 是该区的油气主要储集体, 储量约占整个油田的 80% 以上。其主要特点是: 被烃源岩包裹, 埋深较大(大约在 2 900~3 400 m), 处于异常高温高压的封闭体系中。与开放环境的浅层相比, 浊积岩的成岩作用具有一定的特殊性。所以对其成岩现象及其主控因素进行深入分析, 不仅对该区油气勘探开

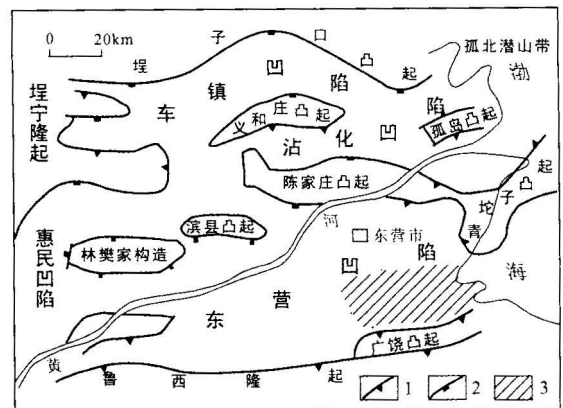


图 1 牛庄洼陷构造位置图

Fig 1 Tectonic location map of the Niuzhuang sag

1. 剥蚀线 2. 超覆线 3. 研究区

2 储层岩石学特征

根据薄片岩石学分析, 沙三中亚段的浊积岩岩性较混杂, 以长石细砂岩和岩屑细砂岩为主, 粉砂岩

收稿日期: 2005-12-06; 改回日期: 2006-01-26

基金项目: 中国石化集团公司“十五”科技攻关项目(P01013)部分成果。

作者简介: 饶孟余(1967-), 男, 安徽全椒人, 博士, 现在中国石油大学(北京)石油与天然气工程学院博士后站工作, 从事油气地质学及煤层气开发方面的研究工作。

次之,有少量中砂岩和不等粒长石砂岩。

砂岩碎屑成分中石英含量为 36%~50%;长石含量为 19%~40%,一般在 30% 左右,以斜长石为主;岩屑含量为 16%~29%,碎屑颗粒多呈次棱状至次圆状,结构成熟度中等,分选中等-差,矿物成分成熟度较低。填隙物包括杂基和胶结物,其成分主要为鳞片状泥质、星点状高岭石、细微晶铁白云岩以及含铁方解石等。胶结方式以接触式或孔隙式为主。砂岩平均粒径为 2.1~3.4,反映了沉积物粒级处于比较活跃的沉积组分范围内,标准偏差为 1.11~1.80,属于分选较差类;偏度在 0.29~0.41 间,为极正偏态型。

3 成岩作用类型

通过岩芯、铸体薄片、X-衍射、扫描电镜等观察分析表明,牛庄洼陷沙三中亚段浊积岩的成岩作用类型多,现象也较为复杂。主要经历了压实压溶作用、胶结作用、溶解作用和粘土矿物的转化等成岩作用的变化。

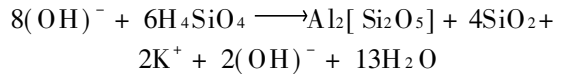
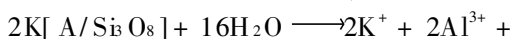
3.1 压实压溶作用

浊积岩一方面埋藏较深,另一方面岩石组分中塑性成分较多,因此,岩石对压实比较敏感。表现为:①研究区 80% 样品视压实率大于 50%;②碎屑颗粒的成岩呈定向组构;③塑性颗粒发生揉皱变形,如粘土、泥砾和一些泥晶碳酸盐受压实作用影响发生假杂基化,云母等片状矿物发生变形并顺层排列;④刚性碎屑颗粒被压碎、压裂,如长石、石英以及岩屑由于压实而产生脆裂,长石沿解理缝张开等;⑤碎屑颗粒表现为线接触、凹凸接触甚至缝合线接触等形式。

3.2 胶结作用

3.2.1 硅质胶结作用

硅质胶结的主要形式为石英的次生加大;在显微镜下可见到连续和不连续的石英加大边。在本区促使这一作用发生的 SiO_2 孔隙水主要来自于蒙脱石向伊利石转化过程中产生的酸性水以及长石被有机水溶液溶解而生成的 SiO_2 。另外,石英次生加大常与长石等矿物溶解作用相伴生,且存在溶解作用越强硅质交代作用越强的现象,这表明石英的自生加大和长石的溶解是同步进行的。长石的溶解提供了石英加大所必需的物质来源,这个反应式为:



在荧光显微镜下可见到 SiO_2 填隙物、石英次生加大边及石英颗粒中大量存在液态烃包裹体。含油砂岩样品的包裹体分析表明^[6],处于石英加大边的油气包裹体均一温度大多在 138~158℃。

3.2.2 碳酸盐胶结作用

本区碳酸盐胶结物主要为铁白云石、(含)铁方解石和方解石。根据它们出现的时间可以分为早期碳酸盐胶结物和晚期碳酸盐胶结物两种类型。前者主要为方解石和(含)铁方解石,而后者则主要以铁白云石为主,是由方解石和铁方解石发生白云石化形成,晶形从半自形细到中晶均有,形态继承原方解石和铁方解石的晶形,常与残余方解石共存,普遍交代颗粒。据牛 38 井氧同位素资料估算,铁方解石形成的温度为 103~107℃,形成深度一般大于 2 300 m;铁白云石形成温度大于 129℃,形成深度一般大于 2 900 m。

3.3 溶解作用

溶解作用是牛庄洼陷浊积岩储层中重要的成岩作用类型之一,发育普遍,溶蚀现象丰富。其中长石颗粒的溶解是最常见的现象。主要有下面几种形式:①不稳定组分边缘被溶蚀呈不规则状或港湾状,残留物具溶蚀外貌;②不稳定组分内部被溶解形成组分内孔;③不稳定组分、胶结物或交代物被完全溶解,保留了原颗粒形貌而形成铸模孔。研究表明,次生孔隙是该区浊积岩的主要孔隙类型,发育了粒间溶孔、粒内溶孔、铸模孔和微裂缝等次生孔隙^[7]。

3.4 粘土矿物的转化

本区自生粘土矿物类型多、含量丰富,主要有伊/蒙混层矿物、自生高岭石、绿泥石和伊利石(表 1)。①伊/蒙混层属有序混层,蒙脱石已大量转化为伊利石,其矿物晶形较差,多以不规则片状存在于粒间孔隙之中;②自生高岭石含量占粘土矿物的 30%~40%,局部可达 60%,其自形程度较高,晶粒大小不一,多呈星点-鳞片状或蠕虫状充填孔隙;③自生绿泥石一般占 10% 以上,其晶体为细小的花瓣状,多生长于碎屑颗粒表面而使孔隙度减小;④自生伊利石在扫描电镜下呈丝发状、纤维状桥式结构,容易堵塞孔喉。

4 成岩阶段分析

根据中华人民共和国能源部行业标准“碎屑岩

成岩阶段划分规范”,结合牛庄洼陷沙三中亚段自生矿物分布、形成顺序及自生矿物中包裹体的均一温度、岩石的孔隙类型、有机质成熟度,可以确定沙三

中亚段浊积岩的成岩演化已经经历了早成岩期,目前主要处于晚成岩 A 期至晚成岩 B 期过渡阶段。其成岩演化模式如图 2 所示。

表 1 牛庄洼陷沙三中浊积岩粘土矿物 X-衍射分析表

Tab 1 X-diffraction data of clay minerals from turbidite in sub-middle member of the third member of Shahejie formation in Niuzhuang sag

井号	深度 (m)	层位	粘土矿物相对含量(%)				混层比 (%)
			伊/蒙混层	伊利石	高岭石	绿泥石	
牛 116	3097.70	E ₃ Δ ⁺	42	13	31	14	20
牛 116	3098.10	E ₃ Δ ⁺	34	10	43	14	20
牛 116	3098.35	E ₃ Δ ⁺	23	18	40	19	20
牛 116	3099.10	E ₃ Δ ⁺	33	14	33	20	20
牛 116	3099.35	E ₃ Δ ⁺	27	18	40	15	20
牛 116	3109.50	E ₃ Δ ⁺	48	10	35	7	20
牛 116	3110.90	E ₃ Δ ⁺	24	18	42	16	20
牛 116	3111.30	E ₃ Δ ⁺	22	8	52	18	20
牛 116	3111.80	E ₃ Δ ⁺	33	17	31	19	20
史 136	3076.80	E ₃ Δ ⁺	19	10	45	26	20
史 136	3078.30	E ₃ Δ ^中	13	9	52	26	20
史 136	3079.10	E ₃ Δ ^中	8	4	61	27	20
史 136	3086.60	E ₃ Δ ^中	57	22	13	8	20

30%,且填充物中铁方解石、铁白云石、碳酸盐、硅质岩等胶结结构亦有近 10% 的含量,这些不稳定成分的存在对溶解作用的发生是非常有利的。由于浊流沉积在纵向上存在不同的岩性段,其成分、结构及其组合关系均存在明显的差别,因此不同岩性段的成岩作用和次生孔隙的发育程度不同。鲍玛序列的 B(或 B+C)段以细砂岩为主,砂岩中长石、岩屑以及胶结物的溶蚀现象普遍,粒间溶孔及粒内溶孔发育;而 D(或 D+E)段为粉砂质泥岩、泥岩,其孔渗条件很差。

5.2 沉积微相的影响

不同的相带发育不同的岩相,不同的岩相具有不同的岩矿组成和不同的岩石结构^[8,9],因而对后期的成岩演化产生重要的影响。牛庄洼陷规模较大的扇形滑塌浊积砂体可分为内扇、中扇、外扇^[10],物性最好的是中扇辫状水道砂体,物性最差的是外扇微相;而分布范围较小的透镜状滑塌浊积砂体可分为中心微相和边缘微相,中心微相的孔渗性明显好于边缘微相。分析其原因主要是粗相带易受有机酸的影响,易形成酸性成岩环境,有利于溶解作用的进行;而细相带由于杂基含量高,不仅经受的压实作用强,而且由于水流不畅,粗相带的碳酸盐等

5 成岩作用的影响因素

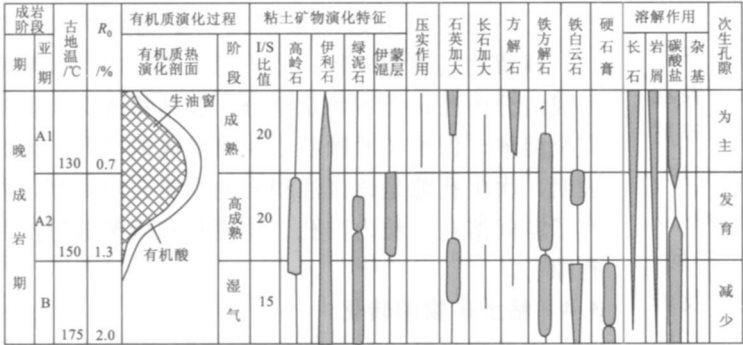
影响储层成岩作用的因素非常复杂,由于牛庄洼陷沙三中亚段浊积岩储层所处的特殊地质环境,其成岩作用的影响因素主要有以下几个方面。

5.1 岩石性质的影响

本区浊积岩的岩石类型以长石细砂岩和岩屑细砂岩为主,骨架颗粒中长石或岩屑的含量为 20%~

图 2 牛庄洼陷沙三中浊积岩成岩作用演化模式图

Fig.2 Model Showing diagenesis evolution of middle Sha3 turbidite rocks in Niuzhuang Sag



溶解物也容易在此沉淀,堵塞粒间孔隙。

5.3 水介质性质的影响

在晚成岩阶段,储层孔隙水基本上处于封闭、半封闭状态,如果没有外界流体的注入,不可能有矿物的转化和新矿物的形成^[11]。牛庄洼陷沙三中亚段的中下部的烃源岩已经处于成熟—高成熟阶段,泥质岩中的成熟有机质向烃类转化时,可产生大量的有机酸,形成溶解能力很强的酸性水,在压实作用影响下能够进入砂岩孔隙,改变了孔隙水的 pH 值,从而影响矿物的稳定性。在受有机酸影响较强的部位,砂岩处于酸性成岩环境,促进了铝硅酸盐和碳酸盐矿物的溶解作用。长石矿物的溶解作用使孔隙水中的 SiO_2 浓度增加,促进硅质增生的形成,从而在弱酸性—弱碱性环境的部位, SiO_2 缓慢结晶形成石英次生加大边。同时产生 K^+ 和 Ca^{2+} 等,进一步促进粘土矿物的形成与转化。

5.4 超压、高温以及烃类的早期注入的影响

牛庄洼陷大约在 2 700 m 以下的地层中广泛存在异常高压^[12],压力系数为 1.3~1.68。异常高压是由于差异压实、粘土矿物大量脱水、高的地温和烃类的大量生成所致。超压对成岩作用的影响主要表现在两个方面:①超孔隙流体压力可以通过降低有效应力的方式来减缓甚至抑制压实作用的进行;②异常高压带为封闭或准封闭的温压和流体体系,随着烃类的生成和粘土矿物的大量脱水,酸性组分释放出来并溶于孔隙水中,降低了孔隙水的 pH 值,导致各种可溶组分的溶解作用增强。

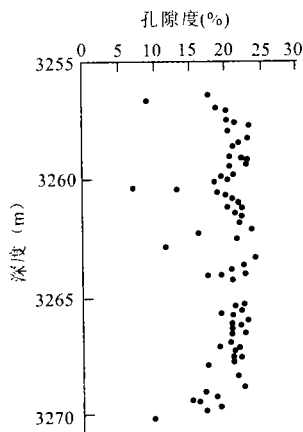


图 3 牛 42 井部分井段深度和孔隙度的关系

Fig 3 Relationship of depth and porosity of N42 well

地温对有机质演化、地下流体与岩石的相互作用有显著的制约作用。一方面温度决定了有机质生

烃、排烃和有机酸大量生成的时间;另一方面温度升高可改变矿物的稳定性和孔隙水的化学性质,从而影响各种成岩矿物的形成和转化;因此,地温的高低对成岩演变速率具有控制作用。牛庄洼陷地温梯度较高(约为 $3.49^\circ\text{C}/100\text{ m}$),加速了有机质演化速率,降低了生、排烃门限,使有机酸和二氧化碳能及早地进入临近的砂体中,加速了砂岩中水—岩反应速度,有利于溶蚀作用的进行。再者,高温也有利于形成的油气进入储层,对成岩作用具有抑制作用。

孔隙流体流动是影响成岩作用的关键因素^[13],胶结作用充填孔隙与溶解作用产生孔隙是一对相互对立又彼此关联的成岩作用类型,它们都需要孔隙水的参与,只有孔隙水流动带入或带出离子物质,这两种成岩作用才能持续进行。烃类的早期侵入使储层中孔隙水的流动受到抑制,甚至停止,阻碍了胶结物质的来源,从而使成岩作用减慢^[14]。因为抑制作用一方面阻止了大规模胶结作用的发生,另一方面小规模胶结、次生加大使砂岩的固结程度大大提高,有效地延缓了深埋期间砂岩孔隙的损失。牛庄洼陷沙三段巨厚的烃源岩中干酪根类型(I, II)优良,再加上高的地温梯度,早期生排烃容易进入储层,有利于孔隙的保存^[7]。

牛 42 井发育的滑塌浊积砂体埋深在 3 255~3 270 m,其含油部位孔隙度仍可达 25% 以上(图 3),不仅与异常高压对孔隙的保存有关,而且与油气对孔隙的占据也有关。

6 结论

(1)牛庄洼陷沙三中亚段的浊积岩主要为东营三角洲前缘的滑塌浊积岩,处于异常高温高压的封闭体系中,岩石类型主要为长石细砂岩、岩屑细砂岩,结构成熟度及成分成熟度均较低;根据成岩作用的矿物岩石学标志、有机质成熟度及古温度等资料,可以确定这些浊积砂体主要处于晚成岩 A 期到 B 期的过渡阶段,其成岩现象包括压实压溶作用、石英的次生加大作用、碳酸盐矿物胶结作用、溶解作用和粘土矿物转化作用等。

(2)由于该类砂体所处的特殊地质环境,因此其成岩作用的影响因素更加复杂,包括岩石性质、沉积微相、水介质的性质、超压、高温以及烃类的早期注入等。从地球物理化学的角度分析,这些因素归根到底取决于地层水中 pH 值等物理化学条件的变

化,其中包裹浊积岩的烃源岩向烃类转化过程中产生大量有机酸,并不断向储层充注则起决定性作用。

(3)牛庄洼陷沙三中的浊积岩尽管埋藏深(大约在2 900~ 3 400m),经受了较强的埋藏成岩作用,但是由于被优良成熟的烃源岩包裹、处于异常高压封闭的环境以及被早期烃类注入等有利于孔隙保存条件的影响,所以仍然有比较高的孔隙度。这对于成岩条件相似的其他地区来说,中-深部储层完全可能存在良好的油气储集空间。

参考文献:

- [1] 邱桂强,王居峰,李从先. 东营凹陷沙三中东营三角洲地层格架与油气勘探[J]. 同济大学学报, 2001, 29(10): 1195-1199.
- [2] 范代读,邱桂强,李从先,等. 东营三角洲的古流向研究[J]. 石油学报, 2000, 21(1): 29-33.
- [3] 侯明才,田景春,陈洪德,等. 东营凹陷牛庄洼陷沙三中段浊积扇特征研究[J]. 成都理工学院学报, 2002, 29(5): 506-510.
- [4] 严进荣,陈东,郭勤涛,等. 洼陷中浊积岩沉积特征及油气富集规律研究[J]. 沉积与特提斯地质, 2002, 22(3): 19-24.
- [5] 赵澄林,张善文,袁静,等. 胜利油区沉积储层与油气[M]. 北京:石油工业出版社, 1999. 89-96.
- [6] 邱楠生,金之钧,胡文喧. 东营凹陷油气充注历史的流体包裹体分析[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2000, 24(4): 95-97.
- [7] 饶孟余,钟建华,王海桥,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[J]. 现代地质, 2004, 18(2): 256-262.
- [8] 袁亦楠,薛叔浩. 油气储层评价技术[M]. 北京:石油工业出版社, 1997.
- [9] 郑茂凌,吴仁龙. 黄骅坳陷砂岩储层的成岩作用与孔隙分带性[J]. 石油与天然气地质, 1996, 17(4): 268-275.
- [10] 饶孟余,钟建华,王夕宾,等. 东营凹陷东部沙三段滑塌浊积砂体沉积特征[J]. 煤田地质与勘探, 2004, 32(3): 15-17.
- [11] 张枝焕,王泽中,李艳霞,等. 黄骅坳陷三马地区中-深部储层成岩作用及主控因素分析[J]. 沉积学报, 2003, 21(4): 593-600.
- [12] 郑和荣,黄永玲,冯有良. 东营凹陷下第三系地层异常高压体系及其石油地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(4): 67-70.
- [13] Lynch F E. Mineral/ water interaction, fluid flow and sandstone diagenesis: evidence from the rocks[J]. AAPG Bulletin, 1996, 80(4): 486-504.
- [14] Osborne M J, Swarbrick R E. Diagenesis in North Sea HPHT clastic reservoirs-consequences for porosity and overpressure prediction[J]. Marine and Petroleum Geology, 1999, 16: 337-353.

DIAGENESIS AND CONTROLLING FACTORS OF THE TURBIDITE RESERVOIR OF SUB-MIDDLE OF THE THIRD MEMBER OF SHAHEJIE FORMATION IN NIUZHUANG SAG

RAO Meng-yu, ZHANG Sui-an, LI Xiu-sheng

(Faculty of Oil and Gas engineering, China University of Petroleum, Beijing 102200, China)

Abstract: Turbidite reservoir of the sub-middle member of the third member of Shahejie formation at the Niuzhuang Sag of Dongying Depression, mainly consist of feldspathic packsand, litharenite and siltstone with low compositional maturity and textural maturity. The micro-characteristics and composite relation between diagenesis minerals of turbidite rock samples has been analyzed. The research result shows that the diagenesis of turbidite rock is in the later diagenetic A and B stage. The diagenesis includes compaction and pressure solution, quartz overgrowth, carbonate mineral cementation, mineral corrosion and clay mineral transformation. The processes of diagenesis are controlled by reciprocity between mineral and porosity fluid. The diagenesis of turbidite rocks were primarily controlled by lithology, sedimentary microfacies, water medium properties, abnormal high pressure, high geothermal field and early hydrocarbon invasion.

Key Words: Niuzhuang sag; turbidite rock; diagenesis; main controlling factor; secondary pores; Shandong province