

文章编号: 1001-6112(2008)05-0456-04

渤海湾盆地东营凹陷古近系碎屑岩储层成岩研究

路慎强^{1,2}

(1. 中国地质大学 资源学院, 武汉 430074; 2. 胜利油田有限公司 物探研究院, 山东 东营 257022)

摘要:应用大量的钻井取心分析测试、薄片、X-衍射等资料,对渤海湾盆地东营凹陷古近系碎屑岩储层成岩序列和孔隙演化进行了研究。东营凹陷古近系埋深大于 3 000 m 的碎屑岩储层可划分为晚成岩 A、B、C 3 期;储层孔隙演化的影响因素包括原始沉积作用、成岩作用、生物扰动和构造作用,其中沉积物性质、温压条件、水介质性质和流动方式又在一定程度上影响了成岩作用的强度。从晚成岩 A 期到晚成岩 C 期,有机质成熟过程、粘土矿物转化、烃类与硫酸盐矿物的热化学氧化还原反应等造成的酸性地层水介质,使东营凹陷古近系碎屑岩储层在不同构造部位分别发育 3 个次生孔隙发育带。这一结论对该区的油气勘探具有指导作用。

关键词:次生孔隙;成岩作用;碎屑岩;古近系;东营凹陷;渤海湾盆地

中图分类号: TE122.221

文献标识码: A

RESERVOIR DIAGENETIC SEQUENCE AND ITS INFLUENCE ON PORE DEVELOPMENT IN THE PALEOGENE SANDSTONES IN THE DONGYING SAG OF THE BOHAI BAY BASIN

Lu Shenqiang^{1,2}

(1. Faculty of Earth Resources, China University of Geoscience, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. Institute of Geophysic Exploration, Shengli Oilfield Company of SINOPEC, Dongying, Shandong 257022, China)

Abstract: Based on the data of drilling, coring, microscopic analysis and XRD, the diagenetic sequence and secondary pore development of the Paleogene sandstone reservoirs in the Dongying Sag were studied. It was considered that the Paleogene sandstone reservoirs were buried more than 3 000 m and were at the stage of late diagenesis A, B and C. The influence factors of reservoir pores mainly included primary deposition, diagenesis, bioturbation and structural condition, in which sediments characters, temperature, pressure and fluid could affect the diagenesis strength to some extent. Three secondary pores zones were developed in Dongying sag as a result of actions of acid formation liquid caused by the organic matter maturation, clay minerals transformation and thermochemical redox reactions of hydrocarbon and sulfate minerals in the Paleogene sandstones in different tectonic block from late diagenesis A stage to late diagenesis C stage.

Key words: secondary pore, diagenesis, clastic rock; Paleogene, the Dongying Sag; The Bohai Bay Basin

东营凹陷属于渤海湾盆地中的一个三级构造单元,呈北断南超的构造式样;凹陷内新生界地层发育齐全,其中古近系是最主要的生油层系和含油气层系^[1~5]。本次研究对象为埋深大于 3 000 m 的沙三下亚段、沙四段和孔店组。其中孔店组主要发育扇三角洲—湖泊沉积体系、冲积扇—盐湖沉积体系和浅湖—洪水—漫湖沉积体系;沙四段以扇三角洲相为主;沙三下亚段主要发育远岸湖底扇相和(扇)三角洲—滨浅湖—湖底扇沉积体系。

1 古近系深层碎屑岩成岩序列

根据“碎屑岩成岩阶段划分规范”^[6],结合渤海湾盆地东营凹陷古近系孔店组深层的成岩特征,将凹陷内埋深大于 3 000 m 的地层划分为晚成岩 A、B、C 3 期,其中晚成岩 A 期又可划分为 A₁、A₂ 2 个亚期。各成岩阶段与镜质体反射率(R_o)、古地温、粘土矿物和自生矿物的演化特征的综合关系见图 1,考虑到本区孔店组—沙四段地温梯度比沙三段—

收稿日期:2008-04-07;修订日期:2008-08-25。

作者简介:路慎强(1967—),男,高级工程师,博士生,从事沉积学及油气勘探研究。E-mail: sloflusq@163.com。

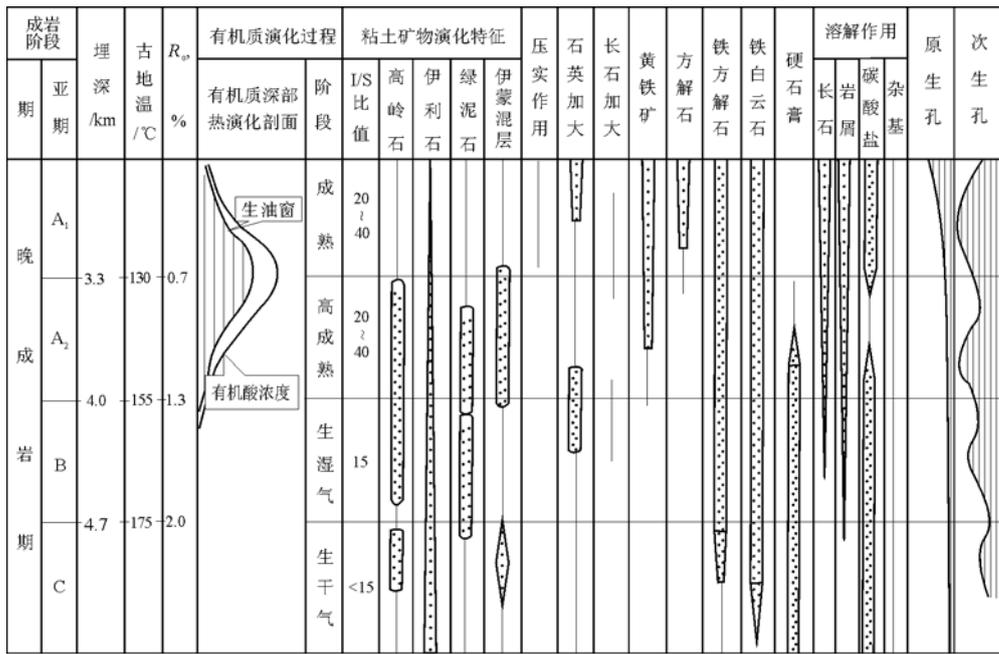


图 1 渤海湾盆地东营凹陷古近系碎屑岩储层成岩阶段划分及成岩作用演化^[7]

Fig. 1 Diagenetic stages classification and diagenesis of Paleogene clastic rock reservoir in the Dongying Sag, the Bohai Bay Basin

东营组和新近系偏低,将研究成果中涉及区块的平均地温梯度 3.45 °C/hm 作为东营凹陷孔店组的平均地温梯度,年平均地表温度取 14 °C。

1.1 晚成岩 A 期

1.1.1 晚成岩 A₁ 亚期

埋深小于 3 200~3 500 m,古地温低于 125~130 °C, R_o 为 0.5%~0.7%,相当于有机质热演化的“液态窗”阶段;粘土矿物中 I/S 混层比值降到 20%左右。此阶段有机质成熟,油气开始大量生成,同时产生大量羧酸(此时有机酸浓度最大)和 CO₂,使流体为酸性,促成铝硅酸盐和在此之前出现的方解石溶解,形成第一个次生孔隙发育带。同时由于 I/S 向伊利石转化,使溶液中 Fe²⁺, Mg²⁺ 增加,因此发生(含)铁方解石、白云石、(含)铁白云石交代方解石和其它碎屑颗粒的现象。

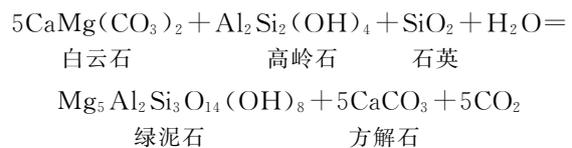
1.1.2 晚成岩 A₂ 亚期

埋深小于 3 700~4 000 m,古地温低于 145~155 °C, R_o 为 0.7%~1.3%,相当于有机质热演化的成熟期。根据地化资料,可初步认为东营凹陷古近系的生油终止门限深度(即石油开始裂解形成凝析油和裂解气的深度)为 4 050 m 左右^[8]。由地温—深度关系可知,东营凹陷深层的广大范围内,石油裂解破坏的临界温度大致为 155 °C。对地温梯度低至 3.0 °C/hm 以下的深洼陷地区(如永安镇),推算的石油裂解破坏深度会大于 5 000 m。

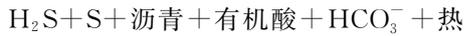
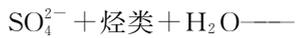
这一时期粘土矿物中 I/S 混层比值在 20%左右,高岭石有一个高含量带,该段底部出现深层粘土矿物的第一个迅速转化带,绿泥石含量增加。此时期由于有机质成烃能力减弱,产生的有机酸有所减少,因此溶解和溶蚀作用都有所减弱,但流体仍为弱酸性;晚期绿泥石含量增加,流体偏碱性,同时白云石、(含)铁白云石作为主要胶结物充填孔隙,形成晚期碳酸盐胶结成岩相。鉴于以上因素,该阶段继续发育或形成一个较弱的次生孔隙带,其深度在不同井位有所差别。

1.2 晚成岩 B 期

埋深小于 4 600~4 800 m,古地温小于 170~175 °C, R_o 为 1.3%~2.0%,相当于有机质热演化的生湿气阶段;粘土矿物中 I/S 混层比值降到 15%,底部出现粘土矿物第二个迅速转化带。此时期有机酸消耗殆尽,但无机反应也可产生 CO₂^[9]:



王新洲等认为,150~250 °C 是东营凹陷硫酸盐热化学反应大量生成中高含硫天然气的阶段^[10]。此时,烃类与硫酸盐矿物间的热化学氧化还原反应也可生成有机酸,其总反应方程式可表示为^[11]:



由该反应产生的酸性地层水,可对长石、碳酸盐和硫酸盐矿物产生溶解,使孔隙度增加,并形成晚期伊利石、绿泥石和黄铁矿等成岩矿物。Schmidt^[12]认为由硫酸盐热化学反应导致的溶解作用可使孔隙度增加 5%~10%。CO₂ 使孔隙水保持较低的 pH 值,引起部分碎屑颗粒和胶结物的溶蚀,使局部地区在该时期仍有较弱的次生孔隙发育,如东营凹陷新东风 10 井。

1.3 晚成岩 C 期

埋深大于 4 600~4 800 m,古地温高于 170~175 °C, R₀ 大于 2.0%,相当于有机质热演化的生干气阶段;粘土矿物中 I/S 混层比值降到 15% 以下。同时,硫酸盐热化学反应仍在继续。但是,这一阶段仅能产生极少量的次生孔隙。

2 古近系碎屑岩成岩作用的影响因素

在影响东营凹陷古近系深部碎屑岩储层成岩作用的主要因素中,原始沉积物的成分、结构等是成岩变化的内因,是决定性的因素;而温度、压力、流体、生物扰动、构造等是外因,是发生成岩作用的必要条件。

2.1 沉积作用的影响

2.1.1 原始沉积物的成分

颗粒:东营凹陷孔店组各类砂、粉砂岩中含较多的绢云母化斜长石以及各类岩石碎屑等塑性颗粒,在埋深到 3 000 m 前即受到较强的压实,视压实率普遍大于 50%(图 2)。

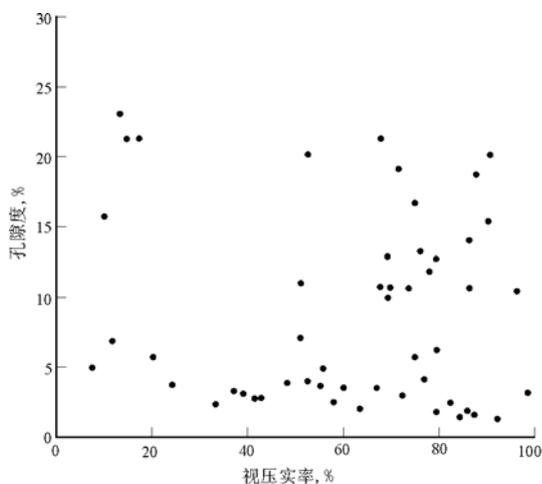


图 2 渤海湾盆地东营凹陷古近系视压实率与孔隙度关系

Fig. 2 Relationship between apparent compacting rate and porosity of Paleogene in the Dongying Sag, the Bohai Bay Basin

粘土杂基含量:粘土杂基含量对碎屑岩储层成岩作用有多方面的影响。对东营凹陷古近系孔店组碎屑岩储层的研究结果表明,孔隙度与泥质含量成负相关关系,这是因为粘土杂基具可塑性,受压后挤入粒间孔,使原生孔隙迅速减少。另一方面,大量的粘土杂基抑制了地下流体的活动,减少了自生矿物的沉淀。

2.1.2 原始沉积物的结构

从理论上说,等大球体堆积的碎屑岩储层的孔隙度和粒度无关,但实际上碎屑颗粒不可能都是球体,且大小也不可能是均匀的。因此,粒度和分选系数影响储层性质。据统计,粒度中值与孔隙度呈正相关关系,分选系数同孔隙度呈明显的负相关关系。

2.2 温压条件的影响

2.2.1 温度

地层温度对各类成岩作用具有重要的影响。温度控制了地层水与矿物之间的化学反应;同时温度还可控制其它影响成岩作用的因素的变化,例如,若水被渗透率低的沉积物所封闭,随温度升高会稍微膨胀,致使地层压力增大。

黄思静等^[13]的热模拟实验结果表明,长石的有效溶蚀作用应发生在地温低于 95 °C 的成岩阶段。东营凹陷古近系地层在埋深 2 250 m 左右,温度即达到 95 °C,这时长石的有效溶蚀已基本完成,石英次生加大有了充足的物源。因此东营凹陷孔店组在埋深 3 500 m 以下的深部地层中,主要发生硅质加大的溶蚀和溶解作用,而不是本身次生加大作用。

2.2.2 压力

压力对碎屑岩储层成岩作用的影响是毋庸置疑的。随埋深增加,在颗粒的接触处,压力和直接的应力都会增加,引起强烈的机械压实作用和压溶作用。杨绪充^[8]在研究济阳拗陷沙河街组区域地层压力时指出,济阳拗陷沙河街组地层压力按其形成机制在纵向上大致分为 3 带:上部的静水压力带(相当于正常压实带),底界大致位于 2 100 m 附近;中部的过渡压力带(相当于混合压实带),分布深度大致为 2 100~3 400 m;深部的高异常压力带(相当于欠压实带),分布深度在 3 400 m 以下。也就是说,对于埋深大于 3 500 m 的孔店组地层大多处于高异常压力带,个别属于压力过渡带。

2.3 流体性质及流动方式的影响

2.3.1 流体化学性质

有机质热演化造成的水溶液性质变化强烈影响深部储层成岩作用。Surdam 等^[14]的实验研究

结果和实际资料表明:在埋藏成岩过程中,碎屑岩储层的无机成岩作用与生油岩的有机质的演化密切相关;在80~120℃之间,泥岩中的干酪根会脱去含氧官能团,形成羧酸阴离子和酚,羧酸的类型很多,有机酸可以增加铝的活度,并形成有机络合物带走,同时有机酸对溶液的pH值有缓冲作用,使之保持在5~6之间。根据Meshric^[15]研究结果,有机酸提供H⁺的能力是碳酸的6~350倍,有机酸钙的溶解度比碳酸钙大约高3个数量级。因此,有机质和无机质相互反应的结果可以使邻近储层的铝硅酸盐颗粒和碳酸盐溶解度增加,产生溶蚀作用,促使储层次生孔隙的形成。

从东营凹陷沙四一孔一段泥岩有机质热演化曲线(图1)中可以看出,在埋深3000~3500m的地层中,R_o为0.5%~0.7%,是有机质成熟期,烃类、羧酸和CO₂大量生成,是溶蚀、溶解作用发生的有利时期,与东营凹陷古近系深层第一个次生孔隙发育带的深度相吻合。该次生孔隙发育带是普遍存在的,是东营凹陷古近系中的主要储集带。在3500~4700m还存在另外2个次生孔隙发育带,地层温度为130~170℃,不同井位有所差别。主要溶蚀对象是长石,显微镜下见去白云化作用,方解石类胶结物含量明显增高。前一个次生孔隙发育带是深层第一个次生孔隙发育带的继续,普遍存在且孔隙度较高,孔隙度为14%~28%;第3个次生孔隙发育带物性较差,孔隙度主要分布在10%~24%。以上3个次生孔隙发育带的存在对东营凹陷深层天然气勘探具有重要意义。

2.3.2 深部储层流体的循环热对流

在东营凹陷深部(大于3500m),古近系碎屑岩成岩作用强烈,储层变得致密,且进入超压带,地层中流体向构造高部位的运移受到抑制,此时流体的主要运动方式为循环热对流^[16,17]。热对流是由不同构造位置上地层温度的差异和地层压力的差异形成,因此需要一定的地层倾角。溶蚀作用往往发生在构造翼部,这种溶蚀作用虽局部发生,溶蚀量也少,但对深部储层次生孔隙发育带的形成意义重大。

2.4 生物扰动

生物扰动可以改变碎屑岩储层的原始物性,影响其成岩演化过程。东营凹陷南斜坡和中央隆起带沙四下亚段一孔一段泥质粉砂岩中生物扰动构造发育,显微镜下生物扰动部分(如生物潜穴、生物介壳)胶结物含量高,达30%~40%,一般为硅质(玉髓),其余部分则被溶解,形成不规则孔、洞。如

王斜131井2369.10m灰绿色粉砂质泥岩中,生物扰动可达5级,扰动面积达到80%。

2.5 构造

构造背景、地壳升降和断裂活动等对东营凹陷深部碎屑岩储层的成岩作用具有重要的影响。以断裂活动为例:它使碎屑岩储层发生不同程度的破裂和裂缝,这些裂缝与开启的断层配合,可以成为雨水向地层深处渗滤的通道,从而改变地下流体的化学性质,由于雨水往往偏酸性,因此它的溶入能导致矿物溶解或沉淀,可能造成次生孔隙广泛发育,从而改善储层的储集性能。

3 结论

东营凹陷古近系碎屑岩储层成岩作用是受诸多因素综合影响的复杂的物理化学过程,从而使储层物性具有复杂性。从晚成岩A期到晚成岩C期,由有机质成熟过程、粘土矿物转化、烃类与硫酸盐矿物间的热化学氧化还原反应等产生的酸性地层水环境均可形成数量不等、程度不一的次生孔隙发育带。进一步分析孔隙发育与油气运聚史的匹配关系,对该区油气勘探具有重要的指导意义。

参考文献:

- 1 朱桂林. 渤海湾盆地东营凹陷第三纪同沉积构造控砂控油作用[J]. 石油实验地质, 2007, 29(6): 545~548
- 2 卓勤功, 隋风贵. 东营凹陷砂岩透镜体油藏油源新认识及其石油地质意义[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(5): 12~15
- 3 庄丽. 东营凹陷永安镇三角洲层序地层与沉积体系[J]. 石油实验地质, 2006, 28(6): 544~548
- 4 孙永壮. 东营凹陷南斜坡地层油藏成藏规律[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(4): 58~60
- 5 王文林. 东营凹陷古近系深层凝析气藏形成条件[J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(3): 63~65
- 6 应凤祥. 中华人民共和国石油天然气行业标准并碎屑岩成岩阶段划分规范(SY/T5477~92)[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993. 1~5
- 7 袁静. 东营凹陷深层成岩作用[D]: [学位论文]. 北京: 中国石油大学, 1999. 1~50
- 8 杨绪光. 济阳坳陷沙河街组区域地层压力及水动力特征探讨[J]. 石油勘探与开发, 1985, (40): 13~19
- 9 Hutcheon I A, Oldershaw A, Ghent E D. Diagenesis of Cretaceous sandstones of the Kootenay Formation at Elk Valley (Southeastern British Columbia) [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1981, 44: 1425~1435
- 10 袁彩萍, 徐思煌, 贾霍甫等. 渤海湾盆地东营凹陷孔店组烃源岩特征研究[J]. 石油实验地质, 2006, 28(2): 177~181
- 11 王世谦, 何生. 有机质在沉积物成岩中的作用[J]. 地质科技信息, 1993, 12(4): 27~33

(下转第466页)

干断层与伴生断层控制的断块油气藏作为勘探重点,特别是“Y”型构造系统;远离坳陷生油中心的神狐隆起和阳江地区,应作为远景目标,有待进一步研究。

参考文献:

- 1 罗群. 断裂控理理论与油气勘探实践[J]. 地球科学, 2002, 27(6):750~756
- 2 戴俊生,李理. 油区构造分析[M]. 北京:石油工业出版社, 2002. 1~125
- 3 姜华,王华,肖军等. 珠江口盆地珠三坳陷构造反转与油气聚集[J]. 石油学报, 2008, 29(3):372~377
- 4 罗群. 汤原断陷断裂特征与油气成藏的关系[J]. 新疆石油地质, 1999, 20(2):90~96
- 5 龚再升,李思田. 南海北部大陆边缘盆地油气成藏动力学研

- 究[M]. 北京:科技出版社, 2004. 289~298
- 6 季洪泉,王新海. 珠江口盆地西部文昌 A 凹陷油气勘探潜力分析与预测[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(3):239~243
- 7 龚再升. 中国近海大油气田[M]. 北京:石油工业出版社, 1997. 7~63
- 8 朱伟林,黎明碧,吴培康. 珠江口盆地珠三坳陷石油体系[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(6):21~26
- 9 张志杰,于兴河,侯国伟等. 张性边缘海的成因演化特征及沉积充填模式[J]. 现代地质, 2004, 18(3):284~289
- 10 王春修,张群英. 珠三坳陷典型油气藏及成藏条件分析[J]. 中国海上油气(地质), 1999, 13(4):248~254
- 11 朱俊章,施和生,舒誉等. 珠江口盆地烃源岩有机显微组分特征与生烃潜力分析[J]. 石油实验地质, 2007, 29(3): 301~305
- 12 郭小文,何生. 珠江口盆地白云凹陷烃源岩热史及成熟史模拟[J]. 石油实验地质, 2007, 29(4):420~424

(编辑 韩 或)



(上接第 459 页)

- 12 Schmidt V, MoDonald D A. The role of secondary porosity in the course of sandstone diagenesis [A]. In: Scholle P A, Schluger P R, eds. Aspects of diagenesis;SEPM special publication[G]. Tulsa: SEPM, 1979. 175~207
- 13 黄思静,杨俊杰,张文正等. 不同温度条件下乙酸对长石溶蚀过程的实验研究[J]. 沉积学报, 1995, 13(1):7~17
- 14 Surdam R C, Crossey L J, Hagen E S. Organic-inorganic and

- sandstone diagenesis[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(1):1~23
- 15 Meshric I D. 论碳酸和有机酸的反应能力和次生孔隙的形成[A]. 见:储层地球化学(译文集)[G]. 西安:西北大学出版社, 1992. 134~144
- 16 马丽娟,郑和荣. 渤海湾盆地东营凹陷中央隆起带构造特征[J]. 石油实验地质, 2006, 28(2):103~108
- 17 袁静. 东营凹陷下第三系深层成岩作用及次生孔隙发育特征[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 21(3):20~22

(编辑 徐文明)



《石油实验地质》期刊 首批通过国家期刊出版形式规范检查

日前,国家新闻出版总署公布了我国首批“出版形式规范检查”合格期刊名单,《石油实验地质》期刊榜上有名。

2007年4月,国家新闻出版总署颁布了《期刊出版形式规范》,对全国7300余种期刊进行初检、复检等工作,并公布了首批通过检查的3305种合格期刊名单。江苏省有163种期刊检查合格,占全省期刊总数的37.13%。

该刊由中国石化石油勘探开发研究院、中国地质学会石油地质专业委员会主办,中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所承办。近几年来,该刊严格执行《出版管理条例》、《期刊出版形式规范》等国家出版规定和标准,一手抓期刊的学术质量,一手抓期刊的出版质量,做到内容与形式两翼齐飞,编辑水平日益提高,是我国地学界享有声誉的中文核心期刊之一。

(杨建超)