

doi:10.3799/dqkx.2013.082

利津洼陷沙四上亚段深部砂岩的成岩环境演化

唐鑫萍^{1,2}, 黄文辉^{2*}, 李 敏³, 董果果², 吴 刚¹, 王文勇², 姜在兴²

1. 中国石油大港油田公司勘探开发研究院, 天津 300280

2. 中国地质大学海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室, 北京 100083

3. 中国石油大港油田公司第五采油厂, 天津 300280

摘要: 为研究利津洼陷沙四上亚段深部砂岩成岩环境, 对岩心样品进行偏光、荧光、阴极发光显微镜和扫描电镜观察, 辅以粘土矿物含量、元素含量测试。识别出酸性和碱性 2 种成岩环境, 酸性环境以硅质沉淀、碳酸盐矿物溶解、长石溶解或蚀变为高岭石等现象组合为标志, 碱性环境以碳酸盐矿物沉淀、长石次生加大、石英溶解等现象组合为标志。总体演化为: 同生期, 原始沉积流体造成碱性环境; 早成岩期, 未熟有机质演化形成短期的酸性环境, 继承流体形成主体的碱性环境; 中成岩 A1 期(埋深约 2 700~3 200 m), 有机质成熟形成酸性环境; 中成岩 A2 期(埋深约 3 200~4 200 m), 深部断裂活动形成碱性环境; 中成岩 B 期(埋深约 4 200~4 400 m), 第二期充注油气的热演化形成酸性环境。

关键词: 成岩环境; 成岩流体; 深部砂岩; 沙四上亚段; 利津洼陷; 石油地质。

中图分类号: P588.21

文章编号: 1000-2383(2013)04-0843-10

收稿日期: 2012-07-17

Diagenetic Environment Evolution of Deep Sandstones in the Upper Es₄ of the Palaeogene in Lijin Sag

TANG Xin-ping^{1,2}, HUANG Wen-hui^{2*}, LI Min³, DONG Guo-guo²,
WU Gang¹, WANG Wen-yong², JIANG Zai-xing²

1. Research Institute of Exploration and Development, Dagang Oilfield Company, CNPC, Tianjin 300280, China

2. Key Laboratory of Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Accumulation Mechanism, Education Ministry, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3. The Fifth Oil Production Factory, Dagang Oilfield Company, CNPC, Tianjin 300280, China

Abstract: This paper focuses on the diagenetic environments of deep sandstones in the upper Es₄ of the palaeogene in Lijin sag, where core samples are obtained. Microscopic observations, including light, fluorescent, and cathodoluminescence microscopy, as well as scanning electron microscopy, are carried out. The contents of clay mineral and some chemical composition are also detected. 2 types of diagenetic environment are classified. The acidic diagenetic environment is indicated by the dissolution of carbonates and feldspar, the development of kaolinite and autogenic quartz at the same time. The alkaline diagenetic environment is marked by feldspar overgrowth, carbonate cement and the dissolution of quartz at the same time. The evolution of diagenetic environment is discussed. Alkaline environment dominated the syndiagenetic stage, which was formed by the sedimentary salt water. Early diagenetic stage went through temporary acidic environment, formed by early hydrocarbon evolution, and mostly alkaline environment, formed by inherited alkaline fluid. The A1 period of middle diagenetic stage (in the depth of 2 700—3 200 m) was dominated by acidic environment, formed by the organic maturation. The A2 period of middle diagenetic stage was dominated by alkaline environment, formed by the alkaline fluid from the deep fault. The B period of middle diagenetic stage was dominated by acidic environment, formed by the continued evolution of second filled oil.

Key words: diagenetic environment; diagenetic fluid; deep sandstones; upper Es₄; Lijin sag; petroleum geology.

基金项目: 国家科技重大专项(No. 2011ZX05009-002); 中央高校基本科研业务费专项资金资助。

作者简介: 唐鑫萍(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为应用沉积学。E-mail: cugbtxp@126.com

* **通讯作者:** 黄文辉, E-mail: huangwh@cugb.edu.cn

利津洼陷位于渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷的西部,勘探面积近 300 km²(图 1)。深部储层一般指埋深大于 3 500 m 的油气储层(张善文等,2008),2006 年以来,在利津洼陷梁 75 井、滨 436、滨 444 等井区深部砂岩中,发现了高产油流(李国斌等,2008)。洼陷缓坡带的深部砂岩,已成为该区增储上产的重要力量(蔡进功等,2001;李丕龙等,2003)。这些砂岩以滨浅湖滩坝、扇三角洲沉积为主,砂体横向变化大,且控制因素不明确,识别和预测难度很大。目前成岩作用的研究还很薄弱,可作为储层研究的突破点之一。

深部储层的成岩作用研究常以成岩环境的研究作为重点(周瑶琪等,2011;袁静等,2012),这是因为,虽然在埋藏初期储层物性主要受压实作用影响,但埋藏较深之后,压实作用对储层物性影响很小(Bloch *et al.*, 2002),成岩环境所控制的流体-岩石相互作用成为影响储层物性的主要因素(Salem *et al.*, 2000)。因此,本文根据孔隙水介质的 pH 值、离子成份以及各种成岩现象,将利津洼陷沙四上砂岩成岩环境划分为酸性、碱性环境 2 种类型,并分析这 2 种环境控制的成岩作用特征及时空演化。

利津洼陷整个沙四上亚段的砂岩埋深差距较大,为研究垂向上的变化,对 29 口井的沙四上亚段 1 527.25~4 337.18 m 深度段的砂岩岩心进行采样。样品以长石砂岩和岩屑长石砂岩为主,石英含量 42%~59%,平均 51%。对样品进行偏光显微镜、荧光显微镜、阴极发光显微镜、扫描电镜观察,分析其成岩现象;辅以粘土矿物测试、元素测试,综合研究

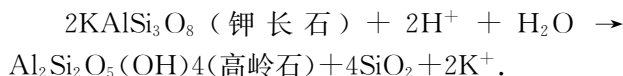
其成岩环境演化。

1 成岩环境的识别

对于东营凹陷沙四段砂体,虽然埋深和温度是成岩环境的宏观主导因素(曾溅辉,2000a;姜在兴,2003),但局部的流体性质的变化可以短时间内使成岩环境发生显著的变化,更为直接地影响和决定成岩演化(周瑶琪等,2011;袁静等,2012)。故将成岩环境划分为酸性和碱性环境。这 2 种成岩环境常表现出宏观尺度上的交替变化,对成岩演化及孔隙发育产生重要影响(魏忠元等,2008)。

1.1 酸性成岩环境特征

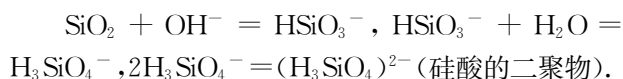
在研究区样品中,代表酸性成岩作用并反映酸性成岩环境特征的有方解石溶蚀、长石溶蚀、自生石英、石英次生加大等现象(图 2)组合。方解石和长石在酸性环境下易发生溶解,形成的长石溶蚀孔、钙质溶蚀孔常常是砂体主要的次生孔隙类型(Hansley and Nuccio, 1992; Heydari and Wade, 2002; 李德勇等, 2013)。常见的化学反应有:



在钾长石与酸的反应中,一个单位体积的钾长石可产生 0.43 个单位体积的 SiO₂。这也是长石的溶蚀经常与硅质沉淀共同出现的原因,当孔隙流体中 SiO₂ 含量达到过饱和而在孔隙中发生沉淀时,发生石英次生加大或硅质胶结作用。

1.2 碱性成岩环境特征

代表碱性成岩作用、反映碱性成岩环境特征的有钙质胶结、长石次生加大、硅质胶结物溶解、石英溶解等现象的组合(图 3)。随着次生孔隙研究的深入,碱性成岩作用形成的石英溶蚀孔也受到了广泛关注(Dove, 1999; 王京等, 2006; 于振峰等, 2012)。研究表明,流体 pH=8.5 值可以作为石英溶解度快速变化的分界点,当 pH 为 2.0~8.5 时,石英溶解度基本不变,处于稳定状态,当 pH 值大于 8.5 时,由于溶解度的快速增大,石英溶蚀(Dove, 1999);其中发生的一系列复杂的化学反应主要有:



1.3 成岩现象的垂向分布

研究表明,高岭石可由酸性环境下的长石蚀变产生(蒋恕等,2007),在油气充注形成的惰性成岩场中

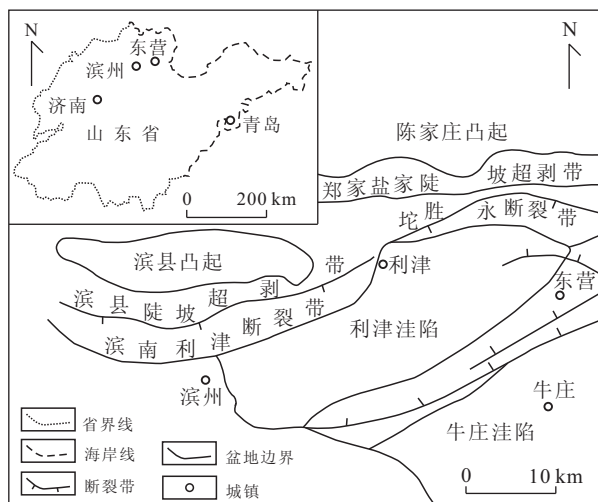


图 1 利津洼陷位置示意

Fig. 1 Sketch map showing the position of Lijin sag

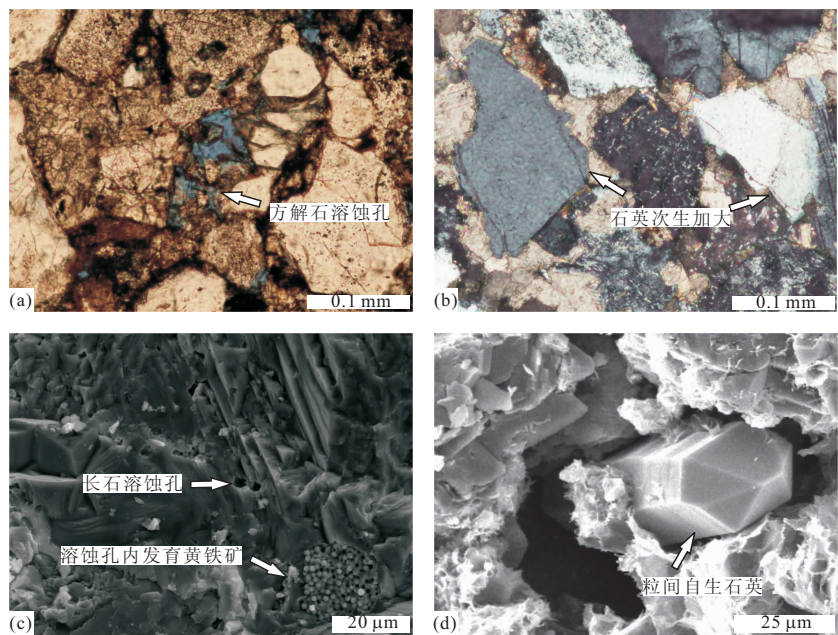


图 2 利津洼陷沙四上亚段砂岩的酸性成岩环境特征

Fig. 2 Characteristics of acidic diagenetic environment in sandstones of the upper Es₄ in Lijin sag

a. 方解石溶蚀孔, 滨 660 井, 2 813.9 m, 正交偏光 200 倍; b. 石英次生加大, 梁 756 井, 3 067.5 m, 正交偏光 200 倍; c. 长石溶蚀, 溶蚀孔内发育黄铁矿, 滨 660 井, 2 813.9 m, 扫描电镜 2 120 倍; d. 自生石英, 梁 756 井, 3 067.5 m, 扫描电镜 2 080 倍

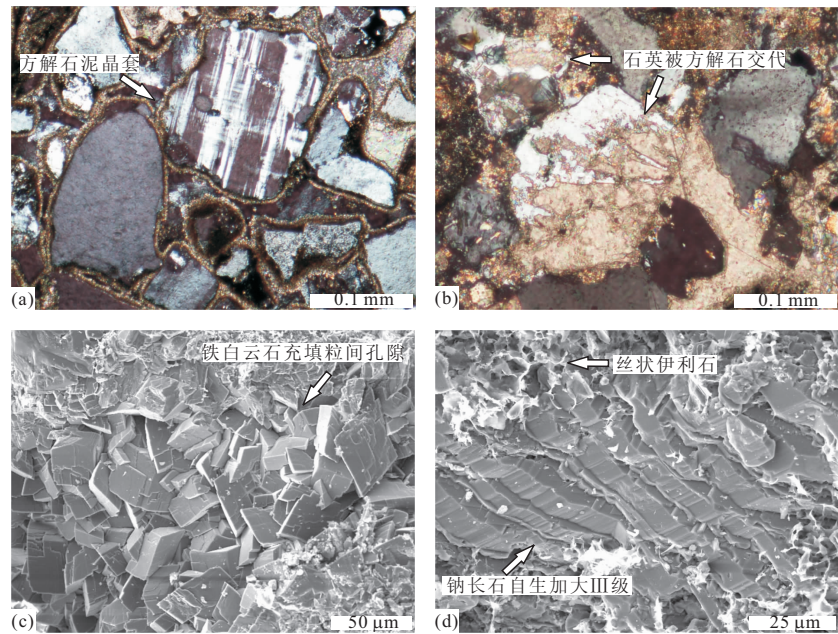


图 3 利津洼陷沙四上亚段砂岩的碱性成岩环境特征

Fig. 3 Characteristics of alkaline diagenetic environment in sandstones of the upper Es₄ in Lijin sag

a. 方解石泥晶套, 滨 660 井, 2 764.4 m, 正交偏光 200 倍; b. 钙质胶结较紧密, 可见方解石交代石英, 滨 442 井, 3 928 m, 正交偏光 200 倍; c. 铁白云石晶体充填孔隙, 自生铁白云石胶结物一般大量出现于中成岩阶段 A 期之后, 利 672 井, 4 014.35 m, 扫描电镜 532 倍; d. 钠长石加大Ⅲ级, 丝状伊利石, 滨 440 井, 3 851.8 m, 扫描电镜 875 倍

保存(Surdam *et al.*, 1989; Emery *et al.*, 1990),在碱性条件下则产生蚀变,富钾时转化为伊利石,富铁、镁时转化为绿泥石(Giles and Boer,1990)。

研究区样品的 XRD 测试表明,1 650~3 200 m 高岭石明显增多(图 4),总体保持较高值;镜下观察也发现该层段常见长石的溶蚀与自生高岭石同时出

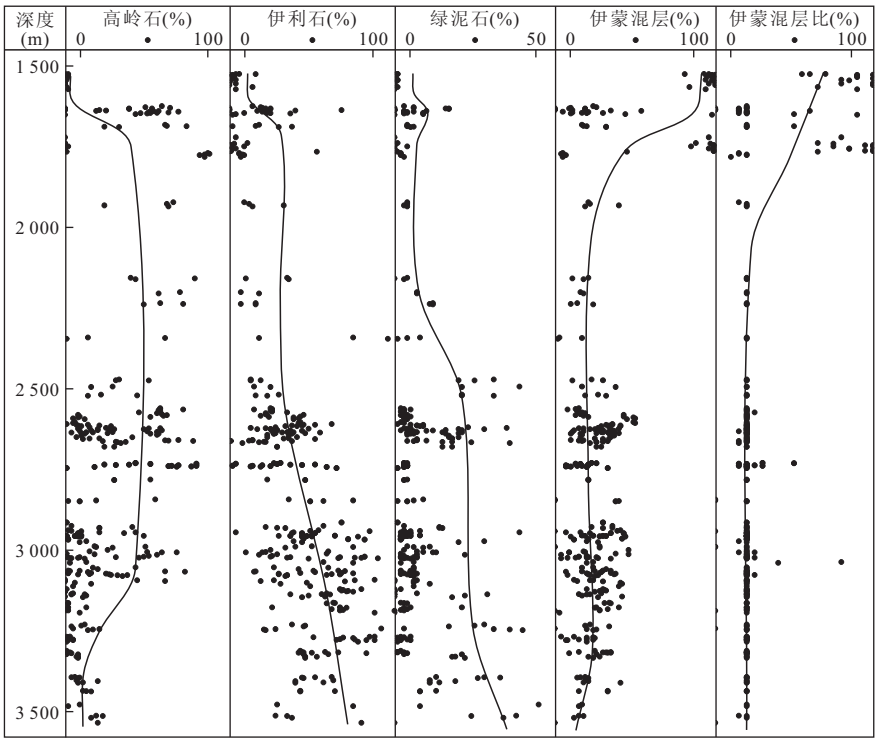


图 4 利津洼陷沙四上亚段砂岩粘土矿物含量的垂向分布图(根据 21 口井的 357 个样品的 XRD 测试统计)

Fig. 4 Vertical distribution for the relative contents of clay of sandstones in the upper Es₄ in Lijin sag

高岭石、伊利石、绿泥石、伊蒙混层的含量,分别指其在样品粘土矿物总量中的百分含量;“伊蒙混层比”为蒙脱石层在伊蒙混层中的百分含量

现,说明其成岩环境以酸性为主. 3 200~3 600m 的 XRD 测试表明高岭石迅速减少,而伊利石迅速升高;镜下观察也发现较多的自生伊利石(图 3d),说明该深度段内酸性开始减弱,碱性加强.

样品的次生孔隙观察发现,在 2 700~3 200 m 深度段内的样品中,长石溶蚀孔、碳酸盐岩溶蚀孔广泛发育,长石溶蚀孔中还常见球粒状黄铁矿,说明该段主要为酸性成岩环境. 3 200~4 200 m,钙质胶结紧密,孔隙中开始出现许多铁方解石、铁白云石胶结物,说明成岩环境以碱性为主. 4 200~4 400 m,方解石溶蚀孔隙变多,孔隙中常见自生石英,说明成岩环境以酸性为主.

2 酸性成岩环境的形成

前文提到,长石溶解形成的 SiO₂ 可以作为硅质沉淀的来源,也就是说酸性成岩环境的形成与成岩作用过程中不断富集的酸性离子有关. 除此之外,酸性环境还与有机质的演化、油气充注的影响关系密切.

2.1 有机质热演化

利津洼陷是东营凹陷最大的生油洼陷. 沙四上

亚段烃源岩在距今约 38 Ma 时(沙二段沉积时期)开始生油,生油门限深度 2 700 m 左右;到约 28 Ma 时,埋深达 3 300 m 左右,R_o 值增大到 0.7%. 此后,持续约 8 Ma 的整体抬升,生烃作用一度停止. 到距今约 8 Ma 时(明化镇组),烃源岩埋深 4 200 m 左右,R_o 值增大到 1.3%. 目前,在洼陷中心附近,埋深在 4 400 m 以下,处于高成熟热演化阶段(周建林,2004).

有机质在热演化、降解生烃的同时,可生成有机酸和 CO₂,尽管这些酸性流体对储层的确切影响还存在争议,但地质学家们已普遍认为有机酸性热流体可以有效地溶蚀储层中的长石类和碳酸盐类矿物,形成次生孔隙(Surdam *et al.*, 1989; Heydari and Wade,2002;张莉等,2007). 对研究区的分析表明,在生油窗、生油高峰等时期,大量有机酸的产生时期一般对应着酸性成岩作用阶段,也是酸性次生溶孔发育的阶段.

2.2 油气充注的影响

本文通过荧光显微镜观察表明,研究区埋深 4 200 m 以下的样品有明显的两期沥青充填,说明发生过两期油气充注(图 5). 前人通过包裹体测试(邱楠生等,2001)、有机地球化学分析(解习农和刘晓

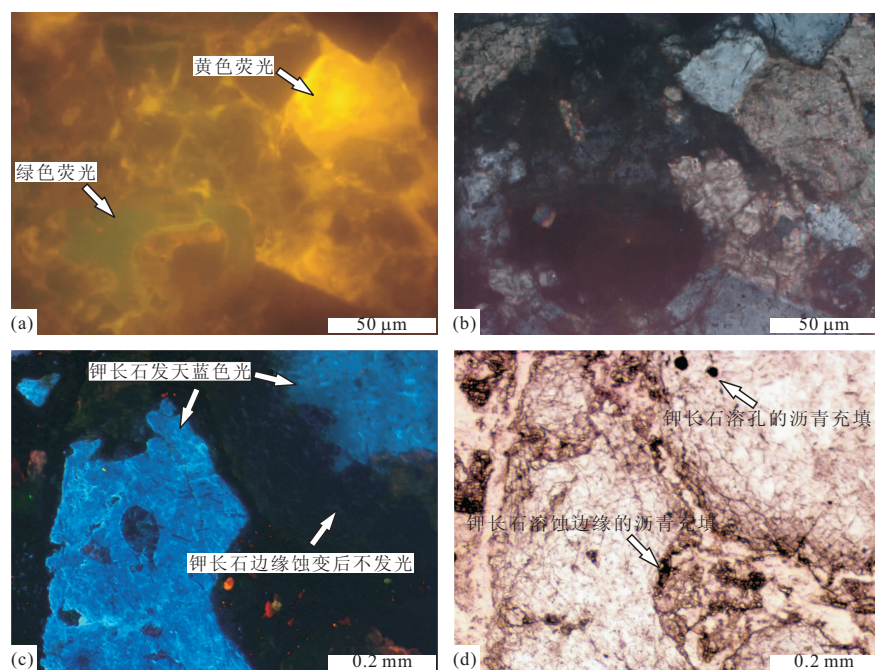


图5 利津洼陷沙四上亚段砂岩的阴极发光、荧光以及偏光显微照片——烃类流体的充注与长石溶蚀伴生

Fig. 5 Fluorescent and cathodoluminescence photomicrographs of sandstones in the upper Es₄ in Lijin Sag

a. 荧光显微照片中,有两种颜色的荧光显示,分别为基质溶孔中的绿色光、方解石胶结物的黄色光,因有机质的荧光颜色会随其成分和含量而变化,可初步判别出两期油气聚集;b. 结合对应的正交偏光显微照片可知,基质溶蚀后发生第一期油气聚集,方解石沉淀之后第二期聚集;c. 阴极发光中钾长石因富钾而发亮蓝色光,亮蓝色的钾长石边缘已被不发光的蚀变产物取代,而且蚀变接触面呈现港湾状;d. 结合对应的单偏光照片可看出,钾长石颗粒边缘有蚀变的痕迹,可知是钾长石被溶蚀所致,而在钾长石溶蚀边缘和钾长石粒内溶孔中,均有沥青质的分布. 滨442井,4 228.75 m;a, b. 400倍;c, d. 100倍

峰,2000;曾溅辉,2000b)和油气运移成藏期次研究(陈书平等,1999;朱光有等,2004),也认为东营凹陷沙四段的储层有两期油气充注. 第一期为沙三段—沙二段沉积时期,此时沙四段的烃源岩逐渐成熟;第二期为馆陶组至明化镇组沉积时期,沙三段作为全盆地主力烃源岩生成的油气可运移至沙四段中. 然而,东营凹陷沙四段成岩作用的研究中,一般只关注第一期油气充注,第二期油气充注对成岩作用的影响往往被忽略(张善文等,2008;周瑶琪等,2011).

有机质转化产生的油气,可沿着孔缝通道运移、注入到储层中,形成油气包裹的惰性成岩场,导致成岩作用的终止(Marchand *et al.*, 2002). 但在这暂时的惰性成岩场之后,随着这些充注的油气的进一步演化,成岩环境随之发生变化. Kharaka *et al.* (1993)对干酪根高温热解和原油热解实验以及同位素分析结果表明,进入储层中的原油在热解作用下仍能形成大量有机酸. 因此,第二期充注油气的演化也可形成酸性成岩环境,产生长石和方解石溶解等现象.

3 碱性成岩环境的形成

3.1 原始沉积流体

早期成岩作用主要受原始成岩流体的控制(Kim *et al.*, 2007). 前人研究表明,沙四段沉积时期为碱性环境的咸水湖泊. 沙四段沉积期构造活动性强,处于裂谷盆地的形成时期,岩浆活动较强烈. 沙四段上亚段沉积时主要为干旱—半干旱气候,水体比较封闭,陆地剥蚀作用较强烈,该时期的水型主要为CaCl₂、NaHCO₃型,为典型的咸水湖泊(赵澄林等,1999).

本文选取了研究区沙四上的一些粒度较细的隐晶灰(云)岩、灰(云)质粉砂岩和粉砂质隐晶灰(云)岩样品进行了特征元素测试. 研究表明,这些岩石类型能够代表原始沉积环境特征,可以较真实地反映沉积时期水体的性质(Flügel, 2004). 这几种岩类的Sr/Ba和Sr/Ca都较高,代表了盐度较高的原始沉积流体. 因此,确定沙四上亚段早期的成岩环境为碱性.

3.2 深部断层活动

断层活动,尤其是贯穿沙四上地层与深部古老

表 1 利津洼陷沙四上亚段岩心特征元素含量测试值

Table 1 Part of the chemical composition data of sandstones in the upper Es₄ in Lijin sag

井位	深度(m)	岩性	CaO(%)	Sr(10 ⁻⁶)	Ba(10 ⁻⁶)	Sr/Ca	Sr/Ba
滨 666	3 075.09	白云质粉砂岩	7.92	659.30	286.00	102.32	2.14
滨 666	3 106.52	白云质粉砂岩	10.17	748.15	2 482.00	93.26	1.16
滨 667	2 925.43	灰质粉砂岩	13.24	1 317.58	1 495.80	118.98	2.43
滨 667	2 922.90	隐晶白云岩	14.29	2 013.29	811.20	169.79	11.91
利 935	3 065.40	灰质粉砂岩	15.77	1 759.64	570.15	139.46	8.25
利 935	3 139.40	灰质粉砂岩	15.82	1 700.32	509.02	134.34	5.95
利 95	2 619.35	隐晶白云岩	14.36	1 554.66	457.31	135.50	4.71
利 95	2 738.70	白云质粉砂岩	9.37	1 033.48	331.01	140.73	3.61
梁 218	3 238.70	白云质粉砂岩	13.64	1 511.74	313.90	139.80	5.16
梁 218	3 236.20	白云质粉砂岩	11.15	1 251.15	250.75	142.41	4.60

注:CaO 含量采用 x 射线荧光(XRF)测试,最低检测限为 0.001%;Sr、Ba 值由电感耦合等离子体质谱(ICP-MS),最低检测限为 0.001 μg/g;实验由中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室完成。



图 6 利津洼陷沙四上砂岩岩心照片(利 672 井,4 019.8 m)
Fig. 6 Photographs of core samples of sandstones in the upper Es₄ in Lijin sag

地层的断层活动,在沙四上成岩环境的演化中扮演重要角色(袁静,2003;邱楠生等,2006).沙四段沉积之后,到东营组晚期,与深部古生界地层相连的断层开始频繁活动,可将深部古老地层的碱性流体带入沙四段地层(袁静等,2000;张善文等,2008).岩心观察发现,早期沉积的砂岩中发育一些后期的方解石脉(图 6)、石膏脉,也指示了碱性流体侵入的痕迹.

3.3 成岩过程中碱性离子的富集

与酸性环境类似,碱性成岩环境的形成也与成岩作用过程中不断富集的碱性离子有关.王生朗等(2003)通过煤样加热实验证实,水溶液酸碱度在 R_o 为 1.0%~1.3%时产生了由酸性到碱性的变化.此时的烃源岩中有机质演化程度升高,大量生成凝析

油和湿气,有机酸被破坏,来源于有机酸的 CO₂ 减少,加上各种成岩蚀变反应对有机酸的消耗,碱性阳离子逐渐增多,会导致孔隙流体性质逐渐由酸性向碱性演变.研究区该演化阶段对应的埋深为 4 000 m 左右,此时,CO₂ 与 Ca²⁺、Mg²⁺、Fe²⁺ 等碱离子相结合形成晚期含铁碳酸盐矿物(图 3c),长石出现次生加大边(图 3d).

4 成岩环境的演化史

4.1 不同深度段的成岩演化阶段

参照《碎屑岩成岩阶段划分标准》(编号 SY/T 5477-2003),将成岩阶段划分为同生成岩阶段、早成岩阶段、中成岩阶段、晚成岩阶段和表生成岩阶段.研究区不同井位的沙四上亚段地层埋深跨度很大(总体上盆地边缘较浅,中央地带较深),故应当考虑不同深度的有机质演化阶段以及相应的成岩演化阶段的差异.

前人对研究区沙四上亚段泥岩镜质体反射率的统计表明,有机质热成熟度差别较大,且与深度呈正相关(谭丽娟等,2002;周建林,2004).与有机质演化对应的成岩演化阶段,也在垂向上呈现明显差别.例如,埋深约 2 700 m 时,有机质低成熟(R_o 为 0.5%),砂岩进入中成岩 A1 期;部分砂体埋深约 4 200 m,有机质高成熟(R_o 为 2.0%),进入中成岩 B 期(图 7).

4.2 成岩环境的总体演化

(1)同生成岩阶段.受沉积水体影响,为碱性成岩环境,许多颗粒周围形成碳酸盐泥晶包壳(图 2c).利津洼陷沙四上砂体以砂泥岩薄互层为主要沉积特点,泥质沉积物可在上覆地层压力下快速脱水,使地层水淡化,因此随着埋深增大,碱性可能会逐渐

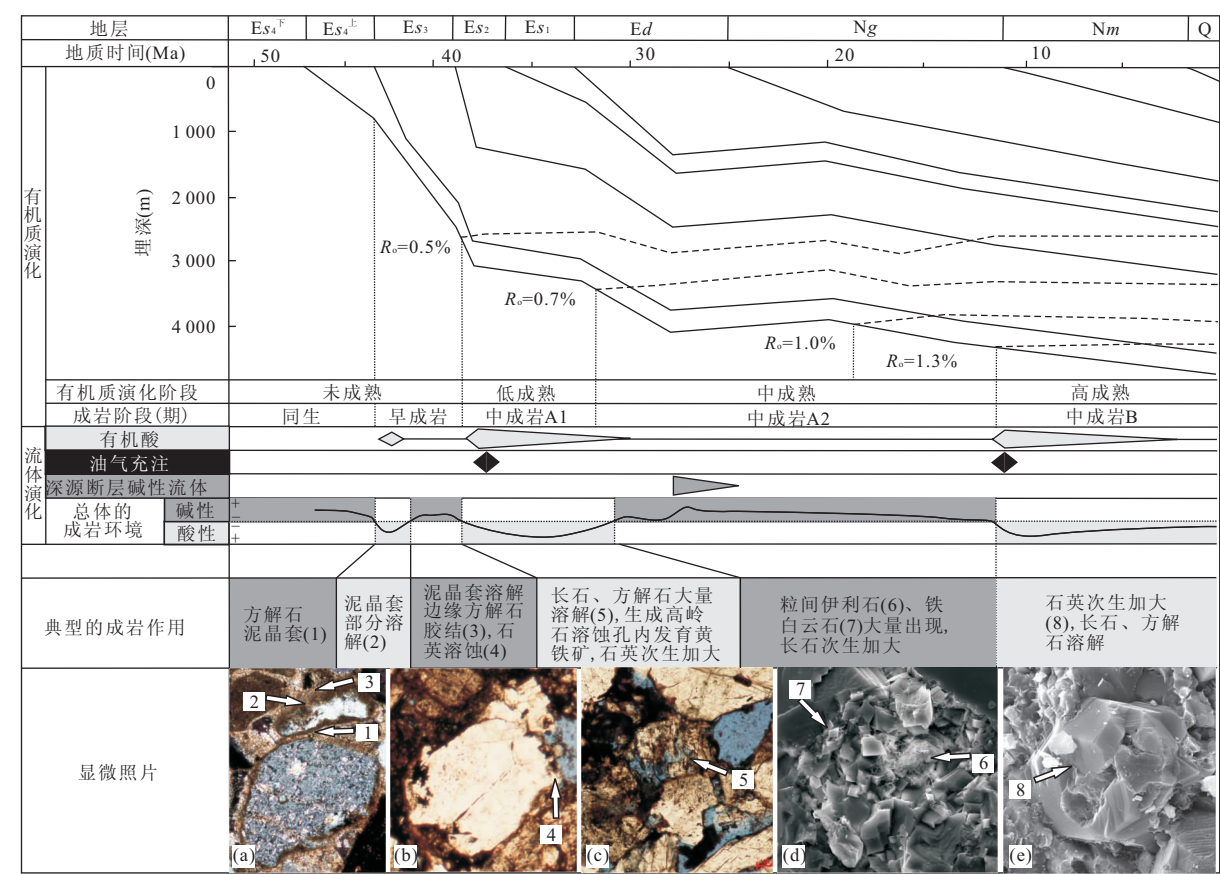


图 7 利津洼陷沙四上砂体成岩环境演化模式

Fig. 7 Evolution model for diagenetic environment of sandstones in the upper Es₄ in Lijin Sag

a. 滨 660 井, 2 764. 4 m, 铸体薄片正交偏光 200 倍; b. 滨 440 井, 3 851. 2 m, 铸体薄片正交偏光 200 倍; c. 梁 756 井, 3 070. 1 m, 铸体薄片正交偏光 200 倍; d. 滨 440 井, 3 852. 5 m, 扫描电镜 6 260 倍; e. 滨 442 井, 4 228. 75 m, 扫描电镜倍 7 850

减弱。

(2)早成岩阶段. 包括早成岩 A、B 期. 在早成岩 A 期, 即沙三段沉积早期, 沙四上埋深约 1 500 m 时, 未熟有机质的演化生成部分有机酸、CO₂, 使孔隙水短暂偏酸性, 造成方解石泥晶包壳、长石的早期溶解和石英加大. 但这样的酸性环境维持时间不长, 因为当时地温低于 80 °C, 细菌等微生物非常活跃, 生成的有机酸很快被细菌消耗(蔡春芳等, 1997). 早成岩 B 期, 碱性逐渐增强, 石英及其加大边发生溶解, 方解石呈不规则粒状沿孔隙边缘生长。

(3)中成岩 A1 期. 到沙二段沉积时期, 地层埋深约 2 700 m, 沙四段生油岩进入生油门限, 大量有机酸、CO₂ 进入流体介质中, 溶解碳酸盐岩、长石和酸性岩屑, 产生高岭石等矿物, 长石溶蚀产生 SO₂ 形成自生石英和石英次生加大边. 近乎同时, 成熟的油气沿着溶蚀孔缝进入砂岩储层中, 形成第一次烃类注入. 酸性成岩环境一直持续到沙一段末期(埋深约 3 200 m), 随着与岩石反应过程中酸的消耗, 酸性逐渐减弱, 成岩环境已趋于碱性, 大量高岭石转化为伊利石。

(4)中成岩 A2 期. 到东营组沉积晚期, 埋深约 3 800 m 时, 与深部古生界地层相连的断层开始频繁活动, 可将深部古老地层的碱性流体带入沙四段地层(袁静等, 2000; 张善文等, 2008), 形成碱性成岩环境, CO₂ 与 Ca²⁺、Mg²⁺ 和 Fe²⁺ 等碱离子相结合形成含铁碳酸盐矿物, 长石出现次生加大边, 石英发生溶解. 随着与岩石反应中碱离子的消耗, 碱性逐渐减弱。

(5)中成岩 B 期. 明化镇组沉积早期, 储层埋深至 4 200 m 左右, 沙三段的烃源岩开始成熟, 沙四上砂体发生第二次油气充注. 烃类注入产生短暂的惰性环境. 然后随着注入的油气进一步演化产生有机酸、CO₂, 成岩环境趋于酸性, 形成石英次生加大边, 产生粒间方解石溶孔、基质溶孔. 随着与岩石反应中酸的消耗, 酸性逐渐减弱。

应当指出, 本文只是讨论重大的流体事件, 为研

究区成岩环境演化建立一个总体参考模式。更小区域的情况可能需要更细致的分析,例如:中成岩 A2 期的有机质尚处于中成熟阶段,有机质的演化仍不断产生有机酸、 CO_2 ,此时的成岩环境可能存在频繁的变化,并因断层的分布情况,形成局部复杂的成岩特征;而中成岩 B 期,也因涉及到油气充注的具体区域,同样会变得复杂。

5 小结

(1)酸性成岩环境以硅质沉淀、碳酸盐矿物溶解、长石溶解或蚀变为高岭石等现象组合为标志,碱性成岩环境以碳酸盐矿物沉淀、长石次生加大、石英溶解等现象组合为标志。

(2)酸性环境的流体来源有:有机质演化过程中形成的有机酸、 CO_2 ,以及成岩过程中富集的酸性离子。碱性环境的流体来源有:继承自沉积环境的碱性水体,深部断裂活动期从古老地层中带来的碱性流体,以及成岩过程中富集的碱性离子。

(3)利津洼陷沙四上砂岩成岩环境的总体演化为:(a)同生期为碱性环境,形成方解石泥晶套等;(b)早成岩期经历总体碱性、短期酸性环境,未熟有机质演化产生的酸性流体使泥晶套部分溶解,继承性碱性流体形成粒缘方解石沉淀、少量石英溶解;(c)中成岩 A1 期(埋深约 2 700~3 200 m)为酸性,有机质成熟形成的酸性流体,使方解石和长石溶解,产生大量次生孔;(d)中成岩 A2 期(埋深约 3 200~4 200 m)为碱性,深部断裂带来的碱性流体,发生高岭石向伊利石转化、含铁碳酸盐岩胶结、长石次生加大等;(e)中成岩 B 期(埋深约 4 200~4 400 m)为酸性,第二期充注油气的热演化形成酸性流体,发生方解石和长石溶解、石英次生加大等。

References

- Bloch, S., Lander, R. H., Bonnell, L., 2002. Anomalously High Porosity and Permeability in Deeply Buried Sandstone Reservoirs: Origin and Predictability. *AAPG Bulletin*, 86(2): 301—328.
- Cai, C. F., Mei, B. W., Ma, T., 1997. The Source, Distribution of Organic Acids in Oil-Field Waters and Their Effects on Mineral Diagenesis in Tarim Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 15(3): 103—109 (in Chinese with English abstract).
- Cai, J. G., Xie, Z. H., Liu, B. J., et al., 2001. Type and Characteristics of Deep Sandstone Reservoirs in Shengli Petroleum Province. *Acta Petrolei Sinica*, 22(5): 34—37 (in Chinese with English abstract).
- Chen, S. P., Dai, J. S., Li, L., 1999. Tectonic Features of Huimin-Dongying Basin and Its Control over Oil. *Oil and Gas Geology*, 20(4): 344—348 (in Chinese with English abstract).
- Dove, P. M., 1999. The Dissolution Kinetics of Quartz in Aqueous Mixed Cation Solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(22): 3715—3728. doi: 10. 1016/S0016-7037(99)00218-5
- Emery, D., Myers, K. J., Young, R., 1990. Ancient Subaerial Exposure and Freshwater Leaching in Sandstones. *Geology*, 18(12): 1178—1181. doi: 10. 1130/ 0091-7613(1990)018<1178:ASEAFL>2. 3. CO;2
- Flügel, E., 2004. Microfacies of Carbonate Rocks—Analysis, Interpretation and Application. Springer-Verlag, Heidelberg, 165—171.
- Giles, M. R., Boer, R. B., 1990. Origin and Significance of Redist Ributional Secondary Porosity. *Marine and Petroleum Geology*, 7(4): 379—397. doi: 10. 1016/ 0264-8172(90)90016-A
- Hansley, P. L., Nuccio, V. F., 1992. Upper Cretaceous Shannon Sandstone Reservoirs, Powder River Basin, Wyoming: Evidence for Organic Acid Diagenesis. *AAPG Bulletin*, 76(6): 781—791.
- Heydari, E., Wade, W. J., 2002. Massive Recrystallization of Low-Mg Calcite At High Temperatures in Hydrocarbon Source Rocks: Implications for Organic Acids as Factors in Diagenesis. *AAPG Bulletin*, 86(7): 1285—1303. doi: 10. 1306/ 61EEDC7E-173E-11D7-8645000102C1865D
- Jiang, S., Cai, D. S., Zhu, X. M., et al., 2007. Mechanism of the Pore Evolution in Liaodong Bay Area. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(3): 366—372 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, Z. X., 2003. Sedimentology. Petroleum Industry Press, Beijing, 141—169 (in Chinese).
- Kim, J. C., Lee, Y. I., Hisada, K., 2007. Depositional and Compositional Controls on Sandstone Diagenesis, the Tetori Group (Middle Jurassic-Early Cretaceous), Central Japan. *Sedimentary Geology*, 195(3—4): 183—202. doi: org/10. 1016/ j. sedgeo. 2006. 08. 011
- Kharaka, Y. K., Lundegard, P. D., Ambats, G., et al., 1993. Generation of Acid Anions and Carbon Dioxide by Hydrothermal Pyrolysis of Crude Oil. *Applied Geochemistry*, 8(4): 317—324. doi: org/10. 1016/ 0883-2927(93)90001-W
- Li, D. Y., Zhang, J. L., Jiang, X. D., 2013. Diagenesis and Its

- Effect on Dainan Sandstone Reservoir in Zhenwu-Caozhuang Region of Southern Slope of Gaoyou Depression. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 38(1): 130—142 (in Chinese with English abstract).
- Li, G. B., Jiang, Z. X., Chen, S. W., et al., 2008. The Sedimentary Characteristics and Their Controlling Factors of Beach-Bar Sandstones in the Upper Es₄ of the Palaeogene in Lijin Sag. *Geology in China*, 35(5): 911—916 (in Chinese with English abstract).
- Li, P. L., Jin, Z. J., Zhang, S. W., et al., 2003. The Present Research Status and Progress of Petroleum Exploration in the Jiyang Depression. *Petroleum Exploration and Development*, 30(3): 1—4 (in Chinese with English abstract).
- Marchand, A. M. E., Smalley, P. C., Haszeldine, R. S., et al., 2002. Note on the Importance of Hydrocarbon Fill for Reservoir Quality Prediction in Sandstones. *AAPG Bulletin*, 86(9): 1561—1571.
- Qiu, N. S., Zhang, S. W., Jin, Z. J., 2001. Migration Models of Hydrocarbon Fluids in the Dongying Depression—Evidence from Boiling Fluid Inclusions. *Petroleum Geology & Experiment*, 23(4): 403—407 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, N. S., Su, X. G., Li, Z. Y., et al., 2006. The Cenozoic Tectonic Thermal Evolution of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, East China. *Chinese Journal of Geophysics*, 49(4): 1127—1135 (in Chinese with English abstract).
- Salem, A. M., Morad, S., Mato, L. F., et al., 2000. Diagenesis and Reservoir-Quality Evolution of Fluvial Sandstones During Progressive Burial and Uplift: Evidence from the Upper Jurassic Boipeba Member, Reconcavo Basin, Northeastern Brazil. *AAPG Bulletin*, 84(7): 1015—1040.
- Surdam, R. C., Heasler, H. P., Crossey, L. J., et al., 1989. Organic-Inorganic Interactions and Sandstone Diagenesis. *AAPG Bulletin*, 73(1): 1—23.
- Tan, L. J., Jiang, Y. L., Su, C. Y., et al., 2002. Characteristics of Hydrocarbon Source Rock and Oil Source Correlation in Boxing Area of Dongying Depression. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 26(5): 1—4 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. L., Ren, L. Y., Wang, Y., et al., 2003. Characteristics of Diagenesis Saline Lake Environment and Its Effect to High-Porosity Zones. *Petroleum Exploration and Development*, 30(5): 47—49. (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Zhao, Y. C., Liu, K., et al., 2006. Super Imposing Controls of Acidic and Alkaline Dissolutions on Sandstone Reservoir Quality of the Paleozoic Xiashihezi and Shanxi Formations in Tabamiao Area, Ordos Basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(2): 221—228 (in Chinese with English abstract).
- Wei, Z. Y., Yao, G. Q., He, S., 2008. Diagenetic Evolution and Mode in the Chaluhe Faulted Depression Reservoir Yitong Craben. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(2): 227—232. (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. N., Liu, X. F., 2000. Related to Black Shale Series Fluid Dynamic System and Relationship with Accumulation of Hydrocarbon in over Pressed Basin. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 19(2): 103—108 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Z. F., Cheng, R. H., Zhao, X. Q., et al., 2012. Types and Succession of Pyroclastic Rocks Diagenesis in Lower Cretaceous of Wuerxun and Bei'er Depression in Hailaer Basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 37(4): 851—859 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, J., Zhao, C. L., Zhang, S. W., 2000. Genetic Model of the Deep Water Salt Lake of the Paleogene Sha-4 Member in Dongying Sag. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(1): 114—118 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, J., 2003. Diagenesis and Secondary Pore Development in Paleogene Deep Formation in Dongying Sag. *Coal Geology & Exploration*, 31(3): 20—22 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, J., Yuan, L. R., Yang, X. J., et al., 2012. Diagenetic Evolution Modes of the Paleogene Deep Formation of Jiyang Sub-Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30(2): 231—239 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, J. H., 2000a. Thermal Fluid Activities and Their Effects on Water-Rock Interaction in Dongying Sag. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(2): 133—136 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, J. H., 2000b. Fluid Physicochemical Field and Its Evolution in Tertiary System, Dongying Sag. *Geological Review*, 46(2): 212—219 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L., Zhu, X. M., Zhong, D. K., et al., 2007. Vertical Distribution of Secondary Pores in Paleogene Sandstones in Huimin Depression and Its Genesis Analysis. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(2): 221—228 (in Chinese with English abstract).

- sciences, 32(2): 253—259 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. W., Yuan, J., Sui, F. G., et al., 2008. Multiple Diagenetic Environments and Evolvement Model in Deep Formation of the 4th Member, Shahejie Formation in the Northern Dongying Sag. *Chinese Journal of Geology*, 43(3): 576—587 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, C. L., Zhang, S. W., Yuan, J., 1999. Depositional Reservoir and Hydrocarbon of Shengli Oil Region. Petroleum Industry Press, Beijing, 55—56 (in Chinese).
- Zhou, J. L., 2004. History of Hydrocarbon Generation in Shahejie Formation of Lijin Depression and Minfeng Depression. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 26(2): 9—13 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y. Q., Zhou, Z. Z., Chen, Y., et al., 2011. Research on Diagenetic Environmental Changes of Deep Reservoir in Minfeng Area, Dongying Sag. *Earth Science Frontiers*, 18(2): 268—276 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G. Y., Jin, Q., Dai, J. X., et al., 2004. A Study on Periods of Hydrocarbon Accumulation and Distribution Pattern of Oil and Gas Pools in Dongying Depression. *Oil and Gas Geology*, 25(2): 209—215 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 蔡春芳, 梅博文, 马亨, 等, 1997. 塔里木盆地有机酸来源、分布及对成岩作用的影响. *沉积学报*, 15(3): 103—109.
- 蔡进功, 谢忠怀, 刘宝军, 等, 2001. 胜利油区深部砂岩储集层类型及特征. *石油学报*, 22(5): 34—37.
- 陈书平, 戴俊生, 李理, 1999. 惠民—东营盆地构造特征及控油作用. *石油与天然气地质*, 20(4): 344—348.
- 蒋恕, 蔡东升, 朱筱敏, 等, 2007. 辽东湾地区孔隙演化的机理. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(3): 366—372.
- 姜在兴, 2003. *沉积学*. 北京: 石油工业出版社, 141—169.
- 李德勇, 张金亮, 姜效典, 等, 2013. 高邮凹陷南坡真武—曹庄地区戴南组砂岩成岩作用及其对储层性质的影响. *地球科学——中国地质大学学报*, 38(1): 130—142.
- 李国斌, 姜在兴, 陈诗望, 等, 2008. 利津洼陷沙四上亚段滩坝沉积特征及控制因素分析. *中国地质*, 35(5): 911—916.
- 李丕龙, 金之钧, 张善文, 等, 2003. 济阳坳陷油气勘探现状及主要研究进展. *石油勘探与开发*, 30(3): 1—4.
- 邱楠生, 张善文, 金志军, 2001. 东营凹陷油气流体运移模式探讨——来自沸腾包裹体的证据. *石油实验地质*, 23(4): 403—407.
- 邱楠生, 苏向光, 李兆影, 等, 2006. 济阳坳陷新生代构造热演化历史研究. *地球物理学报*, 49(4): 1127—1135.
- 谭丽娟, 蒋有录, 苏成义, 等, 2002. 东营凹陷博兴地区烃源岩和油源特征. *石油大学学报: 自然科学版*, 26(5): 1—4.
- 王京, 赵彦超, 刘琨, 等, 2006. 鄂尔多斯盆地塔巴庙地区上古生界砂岩储层“酸性+碱性”叠加溶蚀作用与储层质量主控因素. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(2): 221—228.
- 王生朗, 任来义, 王英, 等, 2003. 盐湖环境成岩作用特征及其对高孔隙带形成的影响. *石油勘探与开发*, 30(5): 47—49.
- 魏忠元, 姚光庆, 何生, 2008. 伊通地堑岔路河断陷储层成岩演化史与成岩模式. *地球科学——中国地质大学学报*, 33(2): 227—232.
- 解习农, 刘晓峰, 2000. 超压盆地流体动力系统与油气运聚关系. *矿物岩石地球化学通报*, 19(2): 103—108.
- 于振峰, 程日辉, 赵小青, 等, 2012. 海拉尔盆地乌尔逊—贝尔凹陷下白垩统火山碎屑岩成岩作用类型及序列. *地球科学——中国地质大学学报*, 37(4): 851—859.
- 袁静, 赵澄林, 张善文, 2000. 东营凹陷沙四段盐湖的深水成因模式. *沉积学报*, 18(1): 114—118.
- 袁静, 2003. 东营凹陷下第三系深层成岩作用及次生孔隙发育特征. *煤田地质与勘探*, 31(3): 20—22.
- 袁静, 袁凌荣, 杨学君, 等, 2012. 济阳坳陷古近系深部储层成岩演化模式. *沉积学报*, 30(2): 231—239.
- 曾溅辉, 2000a. 东营凹陷热流体活动及其对水—岩相互作用的影响. *地球科学——中国地质大学学报*, 25(2): 133—136.
- 曾溅辉, 2000b. 东营凹陷第三系流体物理化学场及其演化特征. *地质论评*, 46(2): 212—219.
- 张莉, 朱筱敏, 钟大康, 等, 2007. 惠民凹陷古近系碎屑岩次生孔隙纵向分布规律. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(2): 253—259.
- 张善文, 袁静, 隋凤贵, 等, 2008. 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. *地质科学*, 43(3): 576—587.
- 赵澄林, 张善文, 袁静, 1999. 胜利油区沉积储层与油气. 北京: 石油工业出版社, 55—56.
- 周建林, 2004. 利津洼陷和民丰洼陷沙河街组生烃史分析. *江汉石油学院学报*, 26(2): 9—13.
- 周瑶琪, 周振柱, 陈勇, 等, 2011. 东营凹陷民丰地区深部储层成岩环境变化研究. *地学前缘*, 18(2): 268—276.
- 朱光有, 金强, 戴金星, 等, 2004. 东营凹陷油气成藏期次及其分布规律研究. *石油与天然气地质*, 25(2): 209—215.