

文章编号: 1000-0747(2018)02-0247-10 DOI: 10.11698/PED.2018.02.07

# 断陷盆地深层优质碎屑岩储集层发育机理 ——以渤海湾盆地饶阳凹陷为例

金凤鸣<sup>1</sup>, 张凯逊<sup>2,3</sup>, 王权<sup>4</sup>, 牛新杰<sup>4</sup>, 于作刚<sup>4</sup>, 白国平<sup>3</sup>, 赵璇<sup>5</sup>

(1. 中国石油大港油田公司, 天津 300280; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 3. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 4. 中国石油华北油田公司, 河北任丘 062552; 5. 渤海钻探第二录井公司, 河北任丘 062552)

基金项目: 国家油气重大科技专项(2011ZX05006-005); 国土资源部油气中心科技项目(2015YQKYQ0401)

**摘要:** 基于岩心观察、显微镜和扫描电镜观察以及岩石物性测试结果, 对渤海湾盆地饶阳凹陷古近系沙河街组三段砂岩储集层的基本特征进行分析, 揭示深层优质碎屑岩储集层发育机理。地层超压、碎屑成分和结构成熟度、早期油气充注和溶蚀作用是控制深层储集层孔隙保存及形成的重要因素。压实作用是孔隙破坏的主要因素, 地层超压作用可以有效地保存原生孔隙, 同时较高的成分成熟度与中等的结构成熟度有助于提高岩石抗压强度, 也有利于保护原生孔隙。早期油气充注可使成岩作用暂时中止, 从而抑制胶结作用对储集层孔隙的破坏。有机酸充注后, 形成了相当数量的次生孔隙, 局部改善储集空间物性。在进行深层勘探有利储集层区评价和预测时, 应综合考虑地层超压、油气充注、沉积物原始组分与结构及成岩作用等多因素的叠合效应。图9参34

**关键词:** 渤海湾盆地; 饶阳凹陷; 断陷盆地; 沙河街组; 成岩作用; 高孔隙带; 溶蚀作用

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

## Formation mechanisms of good-quality clastic reservoirs in deep formations in rifted basins: A case study of Raoyang sag in Bohai Bay Basin, East China

JIN Fengming<sup>1</sup>, ZHANG Kaixun<sup>2,3</sup>, WANG Quan<sup>4</sup>, NIU Xinjie<sup>4</sup>, YU Zuogang<sup>4</sup>, BAI Guoping<sup>3</sup>, ZHAO Xuan<sup>5</sup>

(1. PetroChina Dagang Company, Tianjin 300280, China; 2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China; 3. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 4. PetroChina Huabei Company, Renqiu 062552, China; 5. CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Renqiu 062552, China)

**Abstract:** In order to reveal the development mechanism of deep quality clastic rock reservoir, the basic characteristics of Sha-3 Member of the Shahejie Formation in the Raoyang sag of Bohai Bay Basin are analyzed based on observation of cores, observation of thin sections under microscope and SEM, and test results of petrophysical properties. It is found that high compositional and textural maturity, early oil charging, and dissolution are the main factors controlling the formation and preservation of pores in deep reservoirs. Compaction is the major factor destructing pores, whereas formation overpressure is conducive to the preservation of original pores, high compositional and medium textural maturity can enhance the resistance of the formation to compaction and protect primary pores. Early oil charging could lead to temporary cessation of diagenesis and thus inhibit the destructive impact of cementation on pores. When organic acids entered reservoir formations, considerable amounts of secondary pores were formed, leading to the improvement of petrophysical properties in local parts. When predicting good quality belt in exploration of deep formations, it is recommended that the superimposing effects of the multiple factors (overpressure; early oil charging; compositional and textural maturity; diagenesis) be taken into consideration.

**Key words:** Bohai Bay Basin; Raoyang sag; rifted basin; Shahejie Formation; diagenesis; high porosity zone; dissolution

引用: 金凤鸣, 张凯逊, 王权, 等. 断陷盆地深层优质碎屑岩储集层发育机理: 以渤海湾盆地饶阳凹陷为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(2): 247-256.

JIN Fengming, ZHANG Kaixun, WANG Quan, et al. Formation mechanisms of good-quality clastic reservoirs in deep formations in rifted basins: A case study of Raoyang sag in Bohai Bay Basin, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(2): 247-256.

## 0 引言

深层油气勘探面临的一个重要问题是储集层孔隙

的发育机理<sup>[1-3]</sup>。渤海湾盆地饶阳凹陷深层(埋深超过3 500 m, 古地温超过100 °C)仍普遍发育有效储集层, 目前亟需阐明储集层成因机制与优质储集层形成与分

布控制因素<sup>[4-5]</sup>。前人针对深层优质砂岩储集层的成因机理取得诸多认识<sup>[6-17]</sup>，如东营凹陷深层储集层形成过程中，砂岩厚度对于储集层物性有至关重要的影响，而长石等不稳定矿物的溶蚀作用会导致矿物再次分配从而形成微孔，造成渗透率下降，影响储集层物性<sup>[6]</sup>。在研究优质储集层的成因机理时，不能仅考虑溶蚀作用增加孔隙度、改善储集层物性这一单一因素，应对多种因素及其综合控制效应进行研究。

本文选取饶阳凹陷古近系沙河街组三段现今埋深超过 3 500 m、古地温大于 100 ℃ 的砂岩储集层为研究对象，对研究区内 25 口取心井 193 件样品进行普通薄片鉴定，精选其中典型样品进行扫描电镜观察、X-射线衍射分析、阴极发光测试与物性测试，基于实验结

果，系统分析研究区古近系砂岩成岩作用，揭示深部储集层低孔低渗背景下优质砂岩储集层的形成机理与主控因素。

### 1 研究区地质概况

位于渤海湾盆地西部的冀中拗陷是中、新生代沉积拗陷。冀中拗陷可划分出 12 个凹陷和 7 个凸起。其中，饶阳凹陷位于冀中拗陷中部（见图 1），凹陷内普遍发育北北东向大型正断层<sup>[18-20]</sup>。

饶阳凹陷古近系、新近系和第四系地层发育齐全，且沉积厚度大。钻遇地层自下而上可划分为古近系孔店组、沙河街组、东营组和馆陶组，以及第四系（见图 1）。古近系—新近系总体表现为

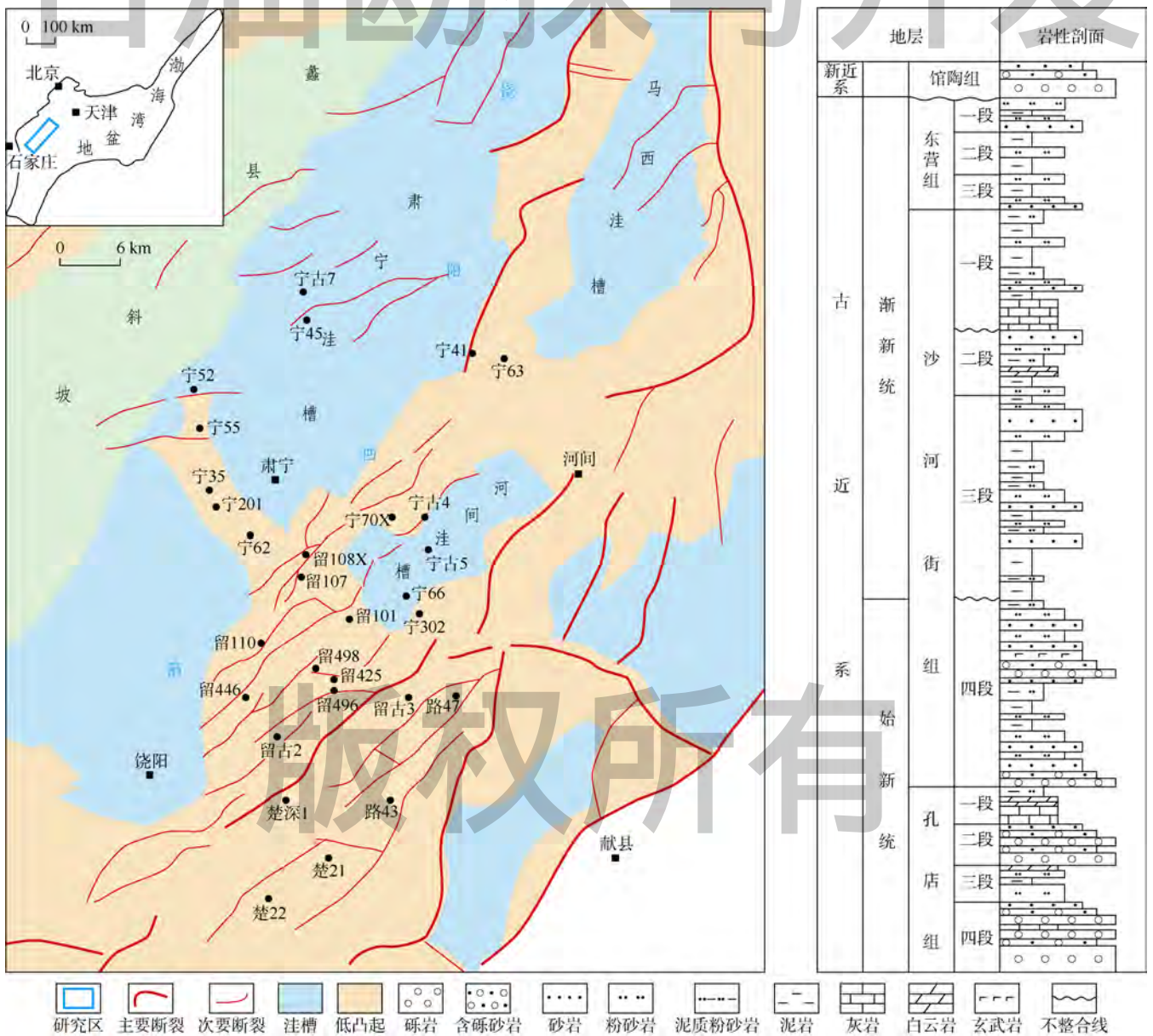


图 1 研究区位置及地层柱状图

粗—细—粗的旋回特征，其沉积体系下部以湖盆初始形成期的河流相为主；中部以深凹陷期湖相泥质沉积为特征，湖水面积大；而上部地层沉积时期，湖水收缩，以河流或洪积相沉积为主<sup>[20-21]</sup>。

## 2 深层储集层岩石学及储集空间特征

### 2.1 岩石学特征

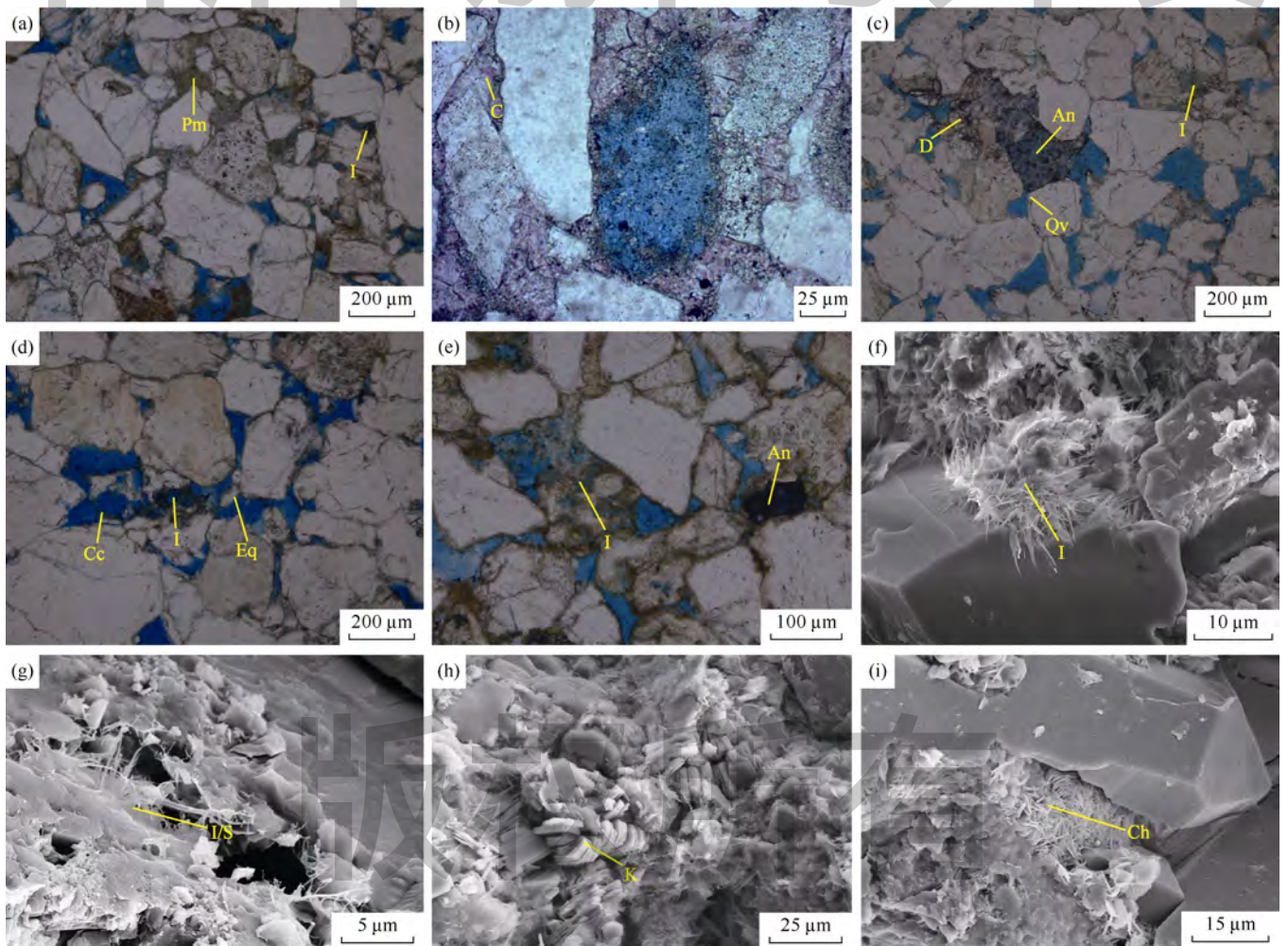
饶阳凹陷沙河街组三段砂岩岩性主要为岩屑长石砂岩及长石砂岩，成分成熟度高，而结构成熟度中等。其岩石矿物组成包括石英（含量平均值为46.50%）、长石（含量平均值为38.24%）和少量岩屑（含量平均值为15.26%），粒度以细砂、中砂为主，颗粒之间主要为点—线接触，分选性中等—好，磨圆类型以次圆状为主，多呈孔隙式胶结。填隙物中，杂基含量为1.33%~

21.67%（见图2a），平均值为3.23%，成分以黏土矿物为主。胶结物含量变化较大，为1.63%~38.37%，类型以碳酸盐（见图2b—图2c）、硅质（石英加大及自形石英，见图2c—图2d）和次生黏土矿物为主。黏土矿物类型以伊利石为主（见图2d—2f），可见少量伊蒙混层（见图2g），粒间孔隙内可见高岭石充填（见图2h），部分样品中可见绿泥石（见图2i）。扫描电镜观察发现部分黏土矿物以环边或薄膜形态发育于颗粒表面，而大部分黏土矿物形态以充填孔隙为主（见图2d—2i）。

研究区沙三段砂岩储集层目前处于中成岩阶段A期<sup>[21-24]</sup>，先后经历了压实作用、胶结作用和溶蚀作用的综合改造。

### 2.2 储集层物性特征

岩心样品的物性分析结果表明，饶阳凹陷古近系



(a) 留101井, 3697.04 m, 假杂基(Pm)及自生伊利石(I), 铸体薄片;(b) 路43井, 3570.25 m, 方解石(C)致密胶结, 铸体薄片;(c) 留101井, 3695.44 m, 石英次生加大(Qv)、白云石(D)及铁白云石(An), 铸体薄片;(d) 留101井, 3696.64 m, 颗粒表面存在绿泥石包壳(Cc), 自生石英(Eq), 铸体薄片;(e) 留101井, 3642.02 m, 长石溶孔中发育的丝状伊利石(I), 铸体薄片;(f) 留107井, 3674.50 m, 长石砂岩, 伊利石(I), 扫描电镜;(g) 留498井, 3778.50 m, 长石砂岩, 伊蒙混层(I/S), 扫描电镜;(h) 留101井, 3572.50 m, 长石砂岩, 高岭石(K), 扫描电镜;(i) 留107井, 3775.50 m, 岩屑长石砂岩, 绿泥石(Ch), 扫描电镜

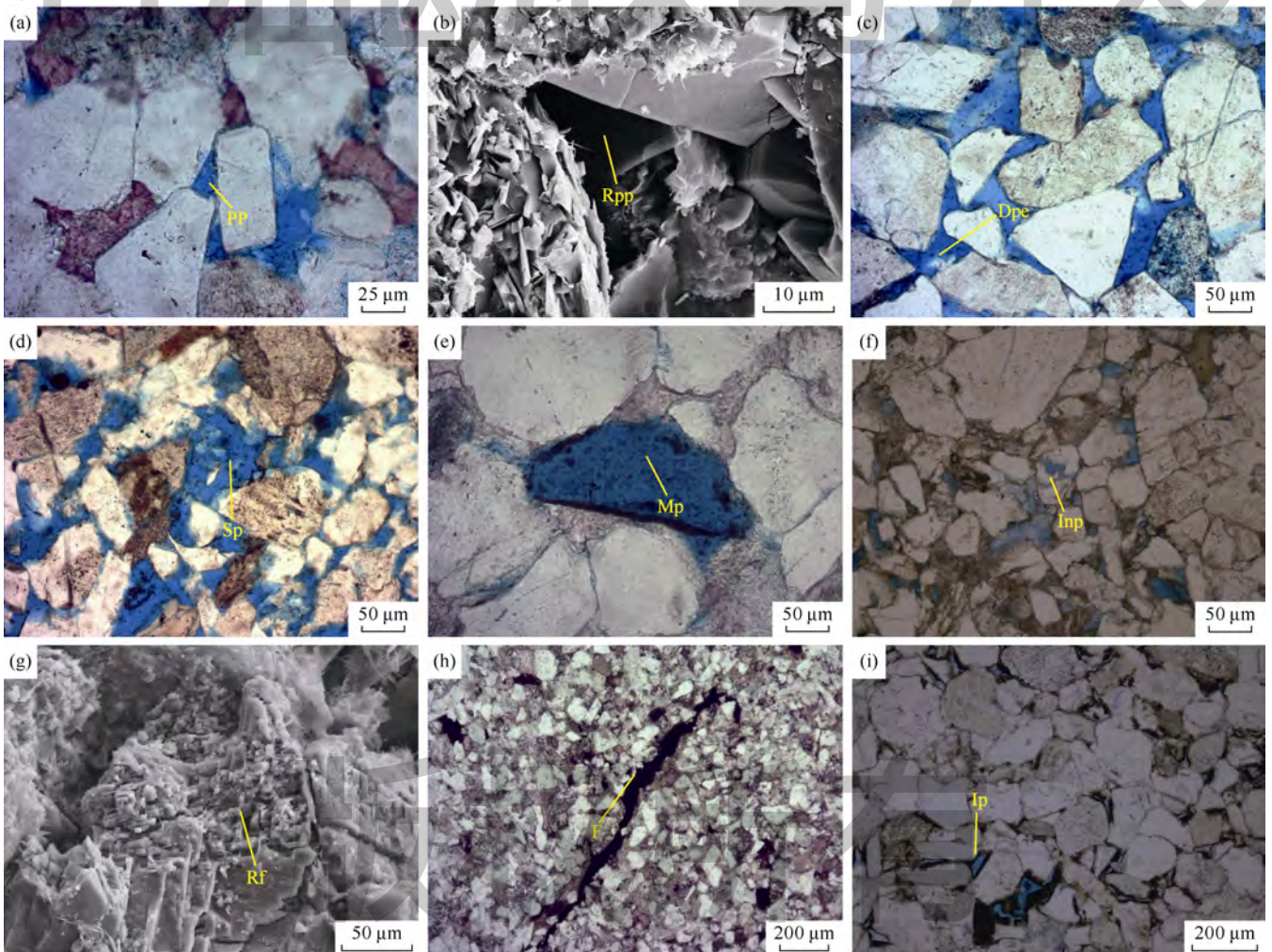
图2 饶阳凹陷古近系沙三段储集层成岩矿物照片

沙三段砂岩孔隙度与渗透率变化范围较大,总体表现为低孔低渗(孔隙度小于15%),储集层非均质特征显著。孔隙度为15.00%~25.00%的中孔储集层占9.11%,孔隙度为10.00%~15.00%的低孔储集层占55.86%,孔隙度为5.00%~10.00%的特低孔储集层占24.75%,孔隙度小于5%的超低孔储集层占10.13%,总体上以低孔和特低孔储集层为主。渗透率变化范围较大,为 $(0.01\sim 267.00)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,平均值为 $9.60\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ,渗透率为 $(50.00\sim 500.00)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的中渗储集层占3.37%,渗透率为 $(10\sim 50)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的低渗储集层占15.84%,渗透率为 $(1\sim 10)\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的特低渗储集层占39.30%,小于 $1.00\times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ 的超低渗储集层占33.00%,孔渗相关性较好。

### 2.3 孔隙类型

在饶阳凹陷深层储集层中,可见原生孔隙(见图3a—图3b)、次生孔隙(见图3c—图3g)及少量微裂缝(见图3h)。

次生溶蚀孔隙(长石以及岩屑溶蚀)以粒内溶孔及粒间溶孔为主,此外,还可见少量的填隙物溶解孔隙。研究区粒内和粒间溶孔是主要的储集空间,长石和岩屑的溶蚀是次生孔隙形成的主要因素,可见铸模孔(见图3e)。高孔隙度区域可见沥青充填(见图3i),主要发育于石英次生加大与石英颗粒之间,部分炭质沥青发育于自形石英颗粒表面,该现象为发生两期油气运移或储集的直接证据<sup>[21-22]</sup>。



(a) 楚22井,4119.18m,原生孔隙(PP),孔隙边缘呈棱角状,铸体薄片;(b) 留101井,3643.62m,残余原生孔隙(Rpp),扫描电镜;(c) 留412井,3397.00m,长石溶蚀孔隙(Dpe),铸体薄片;(d) 楚22井,4119.63m,长石溶蚀形成超大孔隙(Sp),岩屑内易溶成分溶蚀,铸体薄片;(e) 楚22井,4119.18m,长石溶蚀形成的铸模孔(Mp),铸体薄片;(f) 留101井,3760.08m,长石粒内溶孔(Inp),铸体薄片;(g) 留101井,3643.62m,长石沿解理缝溶蚀,扫描电镜;(h) 宁70X井,3753.50m,裂缝(F),为沥青充填,铸体薄片;(i) 留101井,3811.54m,粒间孔隙(Ip),部分孔隙空间为沥青充填,铸体薄片

图3 饶阳凹陷深层储集层空间特征照片

### 3 饶阳凹陷优质储集层发育机理

随着埋藏深度的增加，深层储集层演化特征及物性分布特征也愈发复杂，研究深层优质储集层的发育机理为分析有利储集层的发育规律提供依据<sup>[23-24]</sup>。饶阳凹陷砂岩样品的岩心物性实测数据表明，沙河街组总体上发育2个异常高孔隙带，深度分别为3 500~3 700 m、4 000~4 100 m（见图4a）。这些异常高孔隙带的出现，主要是成岩作用垂向差异演化所致。综合前人研究成果<sup>[11,13,15,18-19,25]</sup>，结合饶阳凹陷油气勘探实践，认为研究区优质储集层主要受早期地层超压、早期油气充注、岩石原始组分与结构成熟度、成岩作用等多因素控制。

#### 3.1 超压作用对优质储集层的控制

饶阳凹陷深层储集层以弱—中超压为主，局部层

段发育强超压<sup>[25-26]</sup>。异常高压表现出由中部向外部减弱的趋势。异常高压有利于减缓上覆地层压力对孔隙的破坏，因而储集层物性与地层压力之间存在着对应关系（见图4a—图4b）。

饶阳凹陷深部储集层（埋深大于3 500 m）普遍为常压—超压，超过一半（样品数为92）的储集层发育超压（压力系数大于1.1）（见图4c）。3 300 m以深的储集体不仅普遍发育超压，而且此深度范围内同时也发育多个异常高的孔隙发育带（见图4a）。饶阳凹陷储集层超压的成因主要归结于快速沉积导致的欠压实作用，该凹陷古近纪的沉积速率达到140 m/Ma，新近纪的沉积速率为129 m/Ma，到第四纪沉积时期沉积速率甚至可达260 m/Ma<sup>[25-26]</sup>，较高的沉积速率可导致欠压实作用的发生，形成异常高压，从而减缓压实作用，保护孔隙。

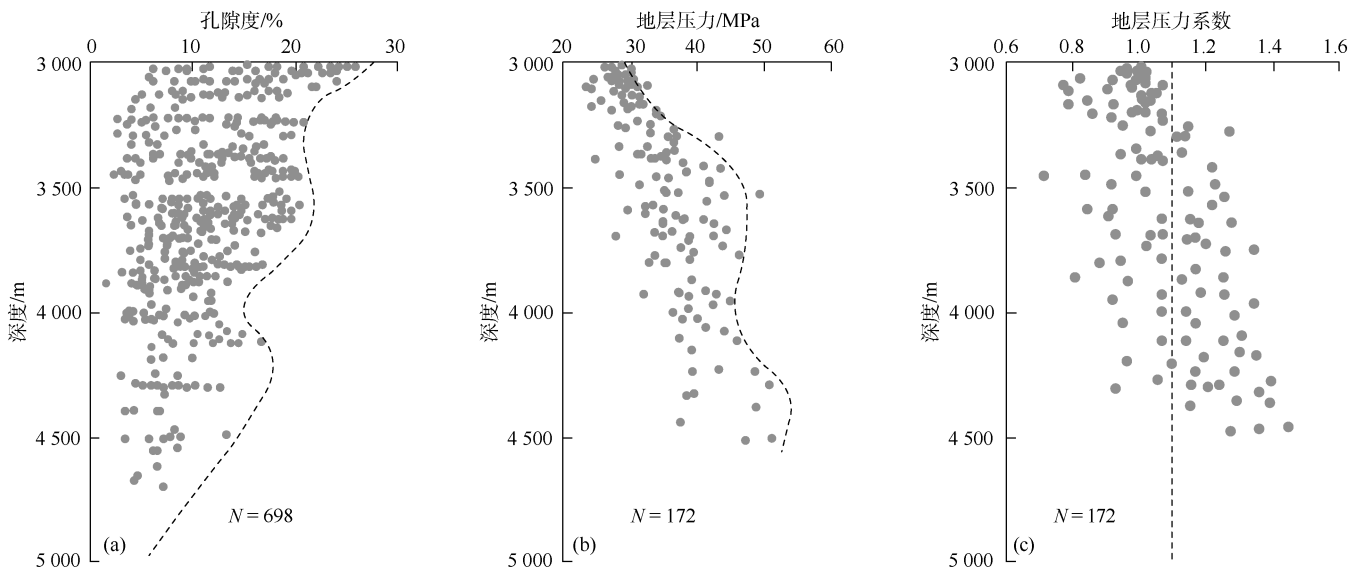


图4 饶阳凹陷南部深层储集层物性分布与地层压力分布

薄片分析表明，压实作用对研究区孔隙的破坏最强（见图5）。因此部分压实作用较弱的层段即为优质储集层发育段。异常高压保存了原生孔隙，并为后期溶蚀作用创造条件。异常高压欠发育区压实作用较强，颗粒间普遍呈凹凸接触，原生孔隙保存较差，后期溶蚀改造也不明显（见图5a）。欠压实作用导致饶阳凹陷中部注槽普遍存在早期异常高压，异常高压的存在抑制了压实作用，使得原生孔隙得到一定程度的保存，有利于后期的有机酸等酸性流体对储集层的溶蚀改造（见图5b）。

#### 3.2 早期油气充注对优质储集层的控制

早期油气充注一方面使得含水饱和度降低，使胶

结作用所需的离子供给困难，延缓胶结作用的发生；另一方面使得岩石从水润湿变为油润湿，为后期油气的再次充注提供便利通道<sup>[27]</sup>。

饶阳凹陷沙三段砂岩发育2期沥青质，第1期发育于石英次生加大与石英颗粒之间，第2期发育于自形石英颗粒内部及表面，由此表明研究区发生2期油气充注。与含烃包裹体共生的盐水包裹体均一温度的测量结果（见图6）也表明研究区存在2期较为明显的烃类流体活动过程，第1期包裹体均一温度峰值为100℃，第2期包裹体均一温度峰值为120℃，与地层埋深的加大以及烃源岩有机质热演化有关。

根据渤海湾盆地的古热流值及相关岩石热导率参

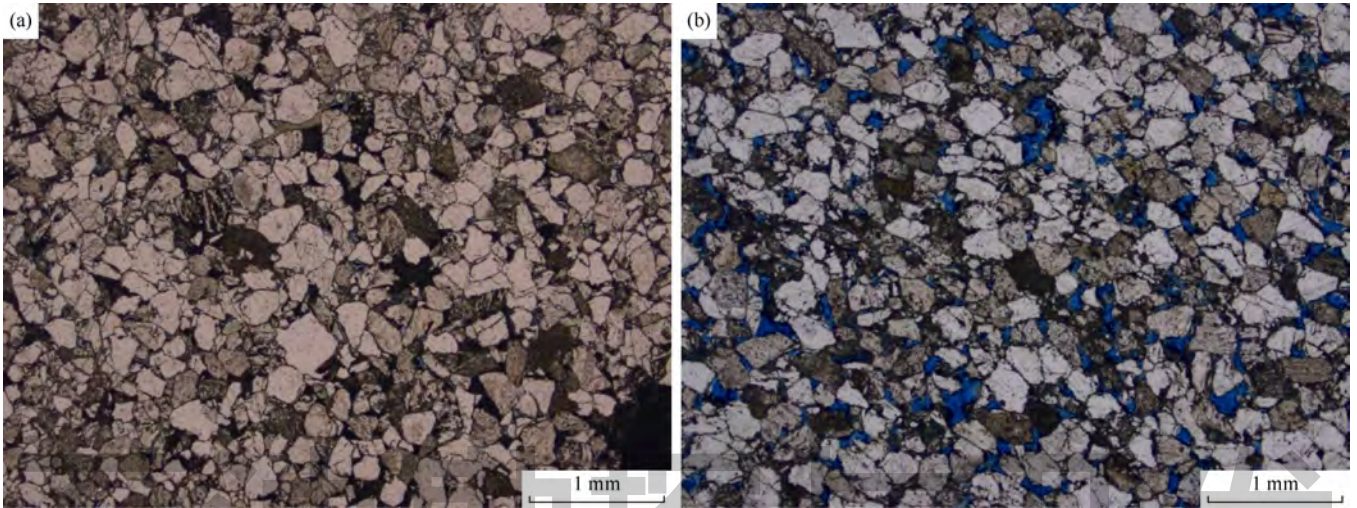


图5 饶阳凹陷异常高压发育带内和欠发育区砂岩孔隙结构铸体薄片  
(a) 留101井, 3 900.20 m, 异常高压欠发育区, 压实作用强烈, 原生孔隙损失殆尽; (b) 留101井, 3 547.78 m, 异常高压发育区, 原生孔隙保存条件好, 后期次生溶蚀孔隙发育

图5 饶阳凹陷异常高压发育带内和欠发育区砂岩孔隙结构铸体薄片

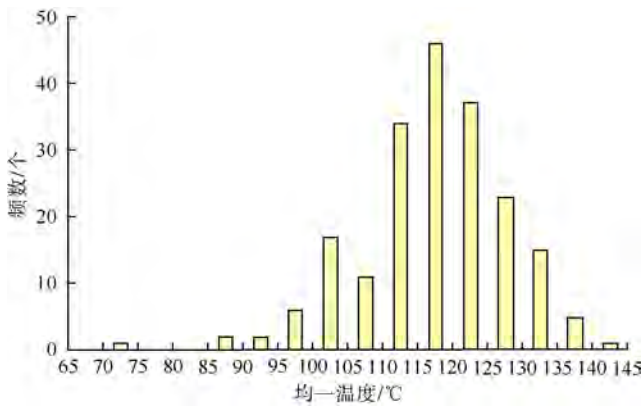


图6 饶阳凹陷沙三段盐水包裹体均一温度直方图

数<sup>[28-31]</sup>, 同时测量了留425井现今井底温度, 并以留101井参数为基准, 建立饶阳凹陷成岩演化模式图(见图7)。

饶阳凹陷储集体内碎屑颗粒在同生—准同生早期未受到成岩作用改造, 主要为点-悬浮接触, 随后发育绿泥石包壳、早期碳酸盐胶结(见图7a—图7b), 以泥晶、亮晶方解石为主的碳酸盐胶结物充填原生孔隙(见图2b); 随着埋深的增加, 压实作用不断增强, 导致储集层孔隙减少, 颗粒主要为点-线接触(见图7c); 由于超压作用和刚性颗粒的支撑作用, 部分原生孔隙得到了保留, 同时有机质生成并排出大量有机酸, 有机酸进入储集体导致长石颗粒沿解理缝发生大规模的溶蚀(见图7d), 部分溶解物质以高岭石的形式沉淀于原生孔隙及长石溶孔中, 同时局部出现石英次生加大(见图2d)。

第1期油气充注部分炭质沥青填充于石英次生加大边或原生孔隙表面(见图3i)。该过程中, 由于断层

活动, 带来富含铁镁离子的流体, 导致研究区普遍出现晚期铁白云石胶结, 该期碳酸盐胶结物充填原生孔隙及长石溶孔(见图2e)。最后, 研究区发生了第2期油气充注, 部分炭质沥青填充于自形石英颗粒表面或裂缝中(见图3h)。

饶阳凹陷沙河街组第1期油气充注主要集中在距今27 Ma左右, 属于早期充注。第2期油气充注主要集中在距今3 Ma之内。前述炭质沥青(见图3h、图3i)显示, 第1期流体活动期间可能发生了规模性油气充注, 降低了含水饱和度, 使得胶结作用暂时停止, 保护了孔隙。反之, 当孔隙内未被油气充注时, 铁方解石及铁白云石等晚期胶结作用堵塞了大量的孔隙, 导致储集层致密化(见图7e)。早期油气的充注对优质储集层的发育起明显控制作用, 因此早期油气充注是控制饶阳凹陷深层有效储集层的因素之一。

### 3.3 岩石原始组分和结构对优质储集层的控制

#### 3.3.1 岩石原始组分

储集层物性受岩石原始组分约束, 一般刚性的石英含量较高时, 岩石抗压实能力较强, 抗压实作用使得减孔效应减弱, 从而使得原生孔得到保存; 而当以塑性碎屑或杂基为主时, 压实作用使得减孔效应加强, 从而导致储集层物性变差(见图8a)。

#### 3.3.2 分选与磨圆

随分选系数的增大, 储集层的抗压实能力变弱(见图8b), 表明研究区储集体抗压实能力还受控于原始组分与分选性。深层优质储集层评价与预测需考虑碎屑组分(石英含量)和结构(分选与磨圆等), 这样有助于多种优势因素叠加, 从而达到预测有利区的目的。

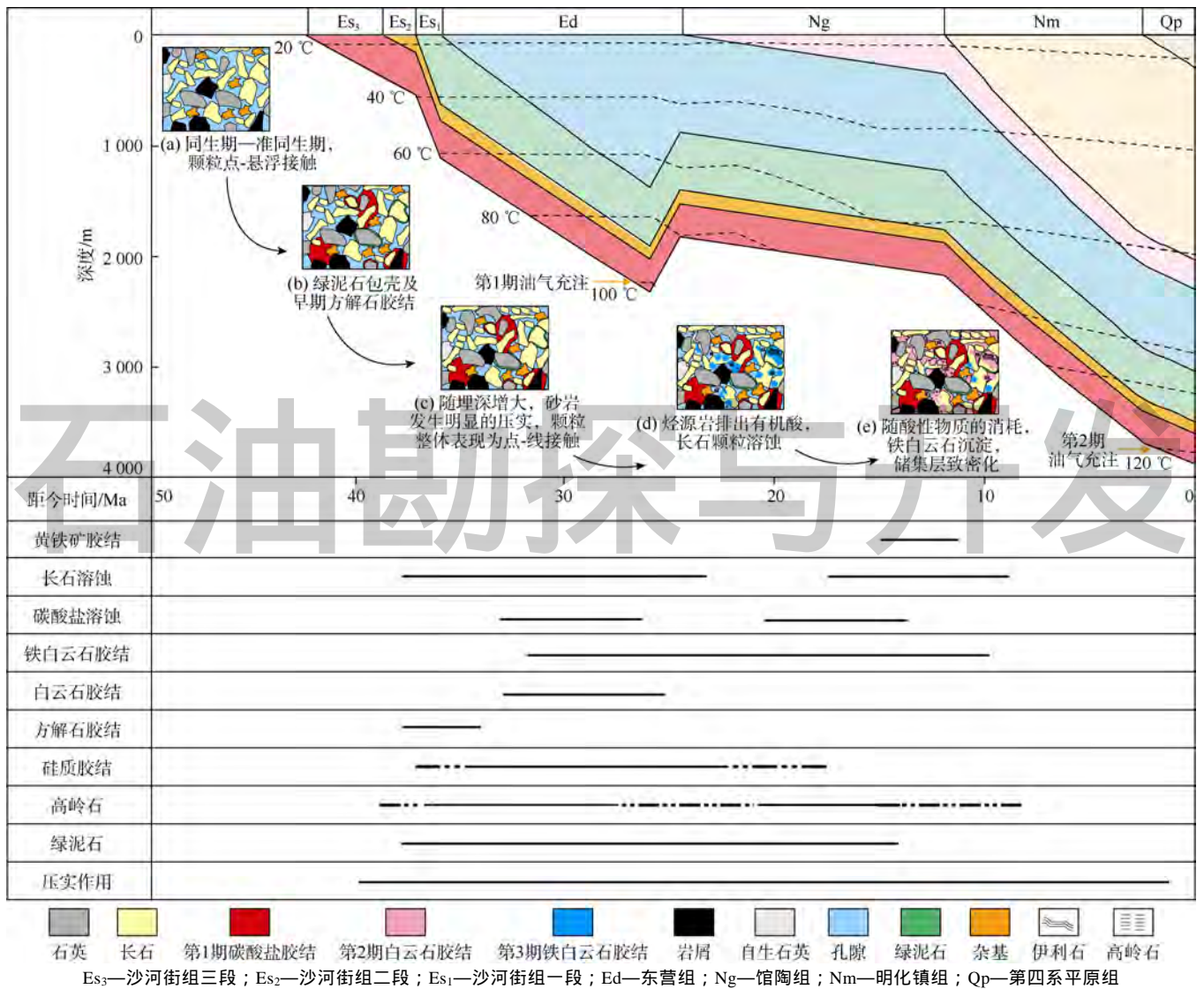


图7 饶阳凹陷沙河街组砂岩成岩演化序列和孔隙演化模式图

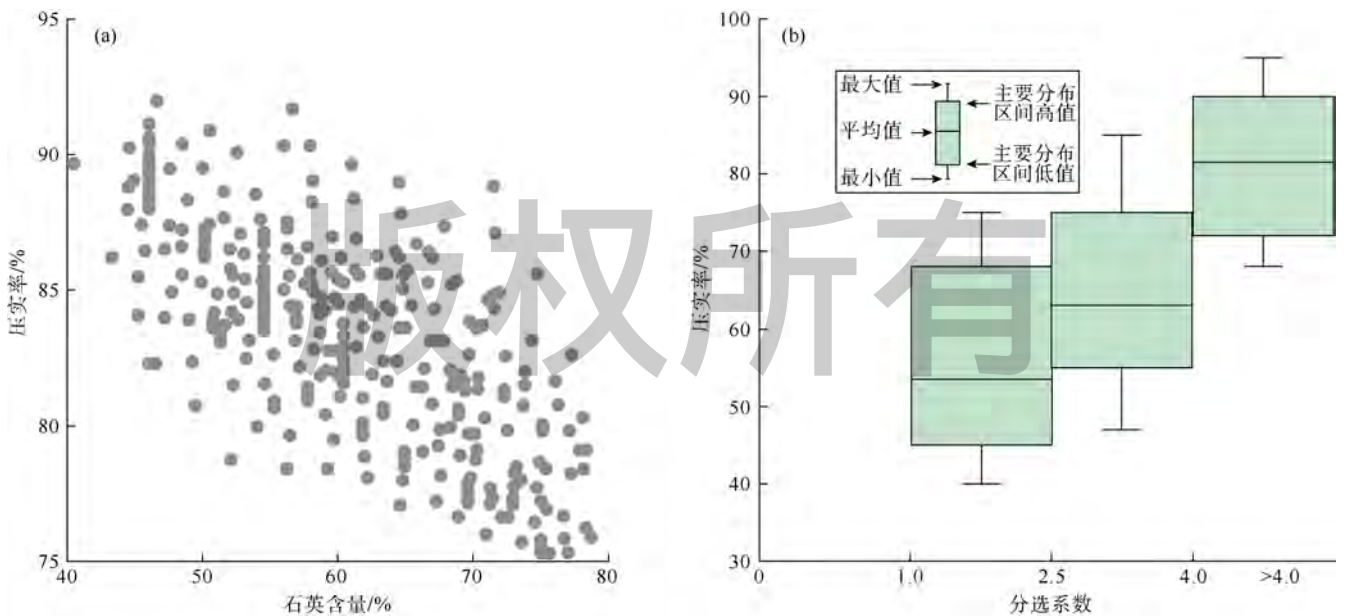


图8 岩石原始组分与结构分异图(样品数为298个)

### 3.4 成岩改造作用对储集层物性的控制

成岩作用直接控制深层储集层物性的优劣<sup>[32]</sup>。其中压实作用是减孔的最主要因素,不同成岩时期发育的胶结作用使储集层致密化,而溶蚀作用对储集层主要起建设性作用<sup>[33]</sup>。

#### 3.4.1 压实作用对储集层物性的影响

研究区深层储集层具有埋藏深度大、埋藏速度快的特征。由于距物源较近,岩石中刚性组分含量较低,增强了压实作用对储集层致密化的影响。通过储集层压实和胶结作用减孔率图版<sup>[34]</sup>(见图9),可知压实作用导致的减孔率可达25%~70%,因此压实减孔应该被视作本区孔隙减少的主要因素,抗压实就成为饶阳凹陷优质储集层发育的先决条件。

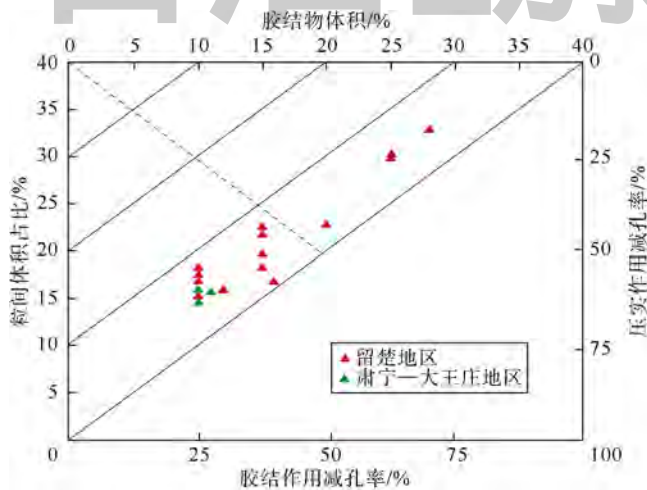


图9 饶阳凹陷减孔率交会图<sup>[32]</sup>

#### 3.4.2 胶结作用对储集层物性的影响

不同时期的胶结物对孔隙均表现出破坏作用,特别是晚期碳酸盐胶结物的形成更是导致储集层致密化的重要因素。以细—粗晶颗粒赋存于粒间孔隙的碳酸盐胶结物(方解石、白云石和铁白云石)会明显破坏储集层原生、次生孔隙。沙河街组碳酸盐胶结物可划分为3期:第1期为早期泥晶方解石,以基底式胶结、孔隙式胶结为主。第2期为中—粗晶白云石或含铁白云石。随着成岩演化过程的进行,早期方解石溶解,同时硅质矿物沉淀,之后随着地层水向碱性转变,新的粗晶白云石、铁白云石矿物沉淀并占据了早期方解石溶蚀形成的孔隙。第3期主要为孔隙式胶结的晚期铁白云石,常强烈交代岩石骨架颗粒。晚期胶结作用的发育决定现今储集层的物性,由于有机酸的充注往往早于晚期胶结物的胶结,使得晚期胶结物难以被溶

蚀改造。另外,晚期胶结物往往充填于狭小的孔隙喉道间,将大大降低储集层的渗透率。饶阳凹陷胶结作用减孔率可达25%~75%(见图9)。可见饶阳凹陷胶结作用是储集层致密化的关键因素。

#### 3.4.3 溶蚀作用对储集层物性的影响

沙河街组三段储集层溶蚀现象较为普遍,成岩演化中期的烃源岩成熟之后的酸性流体充注是促进溶蚀作用发生的主要因素(见图2、图3)。由于残余原生孔隙可以为溶蚀流体提供通道,进而促进次生溶蚀孔隙的发育,所以原生孔隙的保存对次生溶蚀孔隙的发育也有一定促进作用。

镜下薄片和扫描电镜观察表明,饶阳凹陷早期大气淡水淋滤沿解理溶蚀长石,并形成高岭石,之后高岭石在埋藏过程中逐渐转化为伊利石。包裹体测温等显示饶阳凹陷深层地层温度主要处于95~130℃(见图6)。有机酸的酸性在温度相对较低时可有效保持,而随温度上升,有机酸分解为CO<sub>2</sub>,富CO<sub>2</sub>地层水可继续保持酸性和溶解能力,使得溶蚀增孔作用得以持续发生。

## 4 结论

饶阳凹陷古近系深层(埋深超过3500m)储集层以碎屑岩为主,主要为灰色、灰白色的中、细粒岩屑长石砂岩及长石砂岩。储集层以低孔低渗型为主。孔隙类型主要为粒内溶孔、粒间溶孔、残余原生孔隙,以次生孔隙为主。优质储集层的形成主要受超压作用、较高的成分成熟度与中等的结构成熟度、早期油气充注和溶蚀作用的控制。超压作用对压实作用的抑制,以及沉积作用控制下的粗粒高成分成熟度、中等结构成熟度砂体有利于孔隙保存;油气充注抑制胶结作用,保护孔隙;有机酸的充注导致次生孔隙的形成,因而改善储集层物性。

#### 参考文献:

- [1] 丁晓琪, 韩玫梅, 张峭楠, 等. 大气淡水在碎屑岩次生孔隙中的作用[J]. 地质论评, 2014, 60(1): 145-158.  
DING Xiaoqi, HAN Meimei, ZHANG Shaonan, et al. Roles of meteoric water on secondary porosity of siliciclastic reservoirs[J]. Geological Review, 2014, 60(1): 145-158.
- [2] 张之一. 更新勘探观念, 开拓深层油气新领域[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 193-196.  
ZHANG Zhiyi. Renew exploration concept and open up frontiers in deep strata[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(2): 193-196.



- [3] 朱光有, 张水昌. 中国深层油气成藏条件与勘探潜力[J]. 石油学报, 2009, 30(6): 793-802.  
ZHU Guangyou, ZHANG Shuichang. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential of deep reservoirs in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(6): 793-802.
- [4] 王权, 金凤鸣, 王素卿, 等. 饶阳凹陷岩性地层油藏控制因素与成藏模式[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(5): 595-598.  
WNAG Quan, JIN Fengming, WANG Suqing, et al. Control factor and reservoir-forming pattern of lithologic-stratigraphic reservoirs in Raoyang Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(5): 595-598.
- [5] 谢晓军, 邓宏文. 冀中拗陷霸县凹陷横向调节带对物源体系的控制作用[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(3): 334-338.  
XIE Xiaojun, DENG Hongwen. Controls of the transverse accommodation zones on the Provenance system in Baxian Sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(3): 334-338.
- [6] YUAN G, CAO Y, GLUYAS J, et al. Feldspar dissolution, authigenic clays, and quartz cements in open and closed sandstone geochemical systems during diagenesis: Typical examples from two sags in Bohai Bay Basin, East China[J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(11): 2121-2154.
- [7] MORK M B. Diagenesis and quartz cement distribution of low-permeability Upper Triassic-Middle Jurassic reservoir sandstones, Longyearbyen CO<sub>2</sub> lab well site in Svalbard, Norway[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(4): 577-596.
- [8] BLOCH S, LANDER R H, BONNELL L. Anomalously high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: Origin and predictability[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(2): 301-328.
- [9] TAYLOR T R, GILES M R, HATHON L A, et al. Sandstone diagenesis and reservoir quality prediction: Models, myths, and reality[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(8): 1093-1132.
- [10] 蒯克来, 操应长, 赵贤正, 等. 霸县凹陷古近系中深层有效储层成因机制[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(8): 1144-1155.  
XI Kelai, CAO Yingchang, ZHAO Xianzheng, et al. Genetic mechanism of paleogene middle-deep effective reservoirs in Baxian Sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(8): 1144-1155.
- [11] 薛宗安, 赵玉宏, 吴义平, 等. 渤海湾盆地歧北斜坡沙河街组储层特征及形成机理[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(2): 280-287.  
XUE Zong'an, ZHAO Yuhong, WU Yiping, et al. Characteristics and forming mechanisms of reservoirs in the Shahejie Formation of Qibei slope, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(2): 280-287.
- [12] 朱筱敏, 刘芬, 谈明轩, 等. 济阳拗陷沾化凹陷陡坡带始新统沙三段扇三角洲储层成岩作用与有利储层成因[J]. 地质论评, 2015, 61(4): 843-851.  
ZHU Xiaomin, LIU Fen, TAN Mingxuan, et al. Diagenesis and genesis of favorable reservoir of fan delta in Eocene Shahejie Fm., Zhanhua Sag Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Geological Review, 2015, 61(4): 843-851.
- [13] 史超群, 王云龙, 秦智, 等. 松辽盆地大安油田下白垩统泉头组四段特低渗-超低渗储集层成岩作用定量研究[J]. 古地理学报, 2016, 18(2): 251-264.  
SHI Chaoqun, WANG Yunlong, QIN Zhi, et al. Quantitative study on diagenesis in reservoirs with extra-low to ultra-low permeability in the Member 4 of Lower Cretaceous Quantou Formation in Da'an Oilfield, Songliao Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 18(2): 251-264.
- [14] 徐宁宁, 邱隆伟, 杨生超, 等. 渤南断阶带沙四上亚段储层成岩演化研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(1): 104-115.  
XU Ningning, QIU Longwei, YANG Shengchao, et al. Research on the diagenetic evolution of the upper fourth member of Shahejie formation reservoir in Bonan step-fault zone[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(1): 104-115.
- [15] 孙龙德, 邹才能, 朱如凯, 等. 中国深层油气形成、分布与潜力分析[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(6): 641-649.  
SUN Longde, ZOU Caineng, ZHU Rukai, et al. Formation, distribution and potential of deep hydrocarbon resources in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 641-649.
- [16] 胡文瑞, 鲍敬伟, 胡滨. 全球油气勘探进展与趋势[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(4): 409-413.  
HU Wenrui, BAO Jingwei, HU Bin. Trend and progress in global oil and gas exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(4): 409-413.
- [17] 孟元林, 李斌, 王志国, 等. 黄骅拗陷中区超压对有机酸生成和溶解作用的抑制[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(1): 40-43.  
MENG Yuanlin, LI Bin, WANG Zhiguo, et al. Overpressure retardation of organic acid generation and clastic reservoirs dissolution in central Huanghua Depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2008, 35(1): 40-43.
- [18] 杨剑萍, 杨君, 邓爱居, 等. 河北饶阳凹陷中央隆起带古近系沙三上亚段上部碳酸盐岩沉积模式研究[J]. 沉积学报, 2010, 28(4): 682-687.  
YANG Jianping, YANG Jun, DENG Aiju, et al. Carbonate rock facies model of the upper third member of Shahejie Formation of Paleogene in the central uplift belt of Raoyang Depression, Hebei Province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(4): 682-687.
- [19] 张大智, 纪友亮, 张瑞峰, 等. 饶阳凹陷古近系层序地层研究[J]. 地质调查与研究, 2008, 31(1): 33-42.  
ZHANG Dazhi, JI Youliang, ZHANG Ruifeng, et al. Research on the sequence stratigraphy of Eogene in Raoyang Depression[J]. Geological Survey and Research, 2008, 31(1): 33-42.
- [20] 倪超, 纪友亮. 饶阳凹陷古近系沙河街组层序地层分析及沉积体系研究[J]. 中国地质, 2006, 33(1): 193-200.  
NI Chao, JI Youliang. Sequence stratigraphy and sedimentary system of the Paleogene Shahejie Formation in the Raoyang sub-basin[J]. Geology in China, 2006, 33(1): 193-200.
- [21] 张凯逊, 白国平, 王权, 等. 致密砂岩储集层成岩相的测井识别

- 与评价:以冀中坳陷饶阳凹陷古近系沙河街组三段为例[J]. 古地理学报, 2016, 18(6): 921-938.
- ZHANG Kaixun, BAI Guoping, WANG Quan, et al. Wireline log response-based recognition and evaluation of diagenetic facies in tight sandstone reservoirs: A case study of the Member 3 of Paleogene Shahejie Formation in Raoyang sag of Jizhong Depression[J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 18(6): 921-938.
- [22] ZHANG L, BAI G, LUO X, et al. Diagenetic history of tight sandstones and gas entrapment in the Yulin Gas Field in the central area of the Ordos Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(6): 974-989.
- [23] 张刘平, 罗晓容, 马新华, 等. 深盆地-成岩圈闭:以鄂尔多斯盆地榆林气田为例[J]. 科学通报, 2007, 52(6): 679-687.
- ZHANG Liuping, LUO Xiaorong, MA Xinhua, et al. From deep basin gas to diagenetic trap: An example from the Yulin Gas Field in the Ordos Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(21): 2973-2983.
- [24] 马奔奔, 操应长, 王艳忠, 等. 渤南洼陷北部陡坡带沙四上亚段成岩演化及其对储层物性的影响[J]. 沉积学报, 2015, 33(1): 170-182.
- MA Benben, CAO Yingchang, WANG Yanzhong, et al. Diagenetic evolution and its influence on physical properties of Es<sub>4</sub> reservoir in the Northern Steep Zone of the Bonan Sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(1): 170-182.
- [25] 王志宏, 李建明. 饶阳凹陷异常高压与油气成藏关系[J]. 岩性油气藏, 2014, 26(6): 15-19.
- WANG Zhihong, LI Jianming. Abnormal high pressure and its relation to hydrocarbon accumulation in Raoyang Sag[J]. Lithologic Reservoirs, 2014, 26(6): 15-19.
- [26] 高长海, 查明, 葛盛权, 等. 冀中富油凹陷弱构造带油气成藏主控因素及模式[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5): 595-600.
- GAO Changhai, ZHA Ming, GE Shengquan, et al. Main controlling factors and models of hydrocarbon accumulation in weak structural belts of oil-rich sags, the Jizhong Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 595-600.
- [27] WORDEN R H, OXTOBY N H, SMALLEY P C. Can oil emplacement prevent quartz cementation in sandstones?[J]. Petroleum Geoscience, 1998, 4(2): 129-137.
- [28] 左银辉, 邱楠生, 常健, 等. 渤海湾盆地中、新生代岩石圈热结构研究[J]. 地质学报, 2013, 87(2): 145-153.
- ZUO Yinhui, QIU Nansheng, CHANG Jian, et al. Meso-Cenozoic lithospheric thermal structure in the Bohai Bay Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(2): 145-153.
- [29] 张恺. 渤海湾盆地深部壳-幔结构和大地热流场对油气分布、富集规律控制的探讨[J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(6): 1-7.
- ZHANG Kai. A study on the control of deep crust-mantle structure and heat flow on petroleum distribution and accumulation in Bohaiwan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(6): 1-7.
- [30] 李文正, 焦亚先, 左银辉, 等. 沉积速率对渤中坳陷大地热流的影响[J]. 地球物理学报, 2014, 57(5): 1568-1577.
- LI Wenzheng, JIAO Yaxian, ZUO Yinhui, et al. Effect of deposition rate on geothermal field in Bozhong Depression, Bohai Bay Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(5): 1568-1577.
- [31] 操应长, 张会娜, 蕙克来, 等. 饶阳凹陷南部古近系中深层有效储层物性下限及控制因素[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(6): 1567-1579.
- CAO Yingchang, ZHANG Huina, XI Kelai, et al. Petriphysical parameter cutoff and controlling factors of medium-deep effective reservoirs of Paleogene in Southern Raoyang Sag[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(6): 1567-1579.
- [32] 孟元林, 张磊, 曲国辉, 等. 异常低压背景下储集层成岩特征:以渤海湾盆地辽河坳陷西部凹陷南段古近系为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 669-674.
- MENG Yuanlin, ZHANG Lei, QU Guohui, et al. Diagenetic characteristics under abnormally low pressure: A case from the Paleocene of southern Western Sag of Liaohe Depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 669-674.
- [33] 高志勇, 冯佳睿, 崔京钢, 等. 深层储集层长石溶蚀增孔的物理模拟与定量计算[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(3): 359-369.
- GAO Zhiyong, FENG Jiarui, CUI Jinggang, et al. Physical simulation and quantitative calculation of increased feldspar dissolution pores in deep reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(3): 359-369.
- [34] EHRENBERG S N. Assessing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in sandstones: Discussion[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(10): 1274-1276.
- 第一作者简介: 金凤鸣(1964-), 男, 河北冀县人, 博士, 中国石油大港油田公司教授级高级工程师, 主要从事油气勘探地质综合研究工作。地址: 天津市滨海新区, 中国石油大港油田公司, 邮政编码: 300280. E-mail: yjy\_jfm@petrochina.com.cn
- 联系作者简介: 张凯迅(1985-), 男, 北京市人, 博士, 中国地质科学院地质力学研究所助理研究员, 主要从事储集层地质与全球油气资源评价研究工作。地址: 北京市海淀区民族大学南路11号, 中国地质科学院地质力学研究所, 邮政编码: 100081. E-mail: zhangkaixun@126.com
- 收稿日期: 2017-10-25 修回日期: 2018-02-24

(编辑 高日丽 王大锐)