

# 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<sup>①</sup>

马奔奔 操应长 王艳忠 贾艳聪 张少敏

(中国石油大学地球科学与技术学院 山东青岛 266580)

**摘要** 综合利用岩芯观察、岩石铸体薄片、流体包裹体、岩芯实测物性并结合埋藏史分析,对渤南洼陷北部陡坡带沙四上亚段砂砾岩储层的成岩演化和物性演化特征进行了研究。结果表明:储层经历了强烈压实、碳酸盐灰泥重结晶、多期胶结和溶解以及复杂交代等成岩演化过程。结合成岩环境演化特征,认为储层经历了多期酸碱交替的流体演化,在同一成岩环境演化背景下,由于近岸水下扇不同亚(微)相沉积特征差异性,控制了不同亚(微)相成岩演化特征的差异性,并决定了其物性演化的差异性。采用反演回剥的方法对地史时期近岸水下扇砂砾岩储层的物性进行了恢复,可知对储层物性演化起到重要影响的有压实作用、碳酸盐胶结、碳酸盐灰泥重结晶作用、酸性溶解及油气充注,并建立了近岸水下扇不同亚(微)相储层物性演化模式:扇根砾岩在埋藏过程中成岩作用以压实作用和灰泥杂基重结晶作用为主,溶解作用微弱,物性持续降低,在中深层灰泥杂基的重结晶作用使扇根砾岩物性快速降低,现今物性极差,主要发育干层。扇中辫状水道距泥岩层较远的储层,由于两期酸性溶解对储层的改造以及油气充注对胶结作用的抑制,中深层仍发育大量原生孔隙和次生孔隙,储层物性较好,可作为良好的油气储集层。扇中辫状水道距泥岩层较近的储层、扇中水道间和扇缘储层成岩作用以强烈胶结作用和交代作用为主要特征,现今物性差,主要发育干层。

**关键词** 成岩演化 物性演化 近岸水下扇 沙四上亚段 渤南洼陷

**第一作者简介** 马奔奔 男 1988年出生 博士研究生 储层地质学 E-mail: mabenbenupc@163.com

**通讯作者** 操应长 男 教授 E-mail: cyc8391680@163.com

**中图分类号** TE122.2 **文献标识码** A

## 1 地质概况

渤南洼陷是沾化凹陷最大的次级洼陷,它北起埕南断层,南至罗家断层,东达孤西断层,西邻义和庄凸起,面积约为600 km<sup>2</sup><sup>[1]</sup>(图1)。沙四上亚段沉积时期,物源供应充足,在构造作用和古地貌特征的控制下,在洼陷北部陡坡带埕南断层下降盘沉积了多期的近岸水下扇砂砾岩体<sup>[2-3]</sup>。这些砂砾岩扇体紧邻生油中心,非常有利成藏,是渤南洼陷北部陡坡带增储上产的重要领域。目前,针对渤南北部陡坡带的砂砾岩体油气勘探取得了较大突破,多口钻遇沙四上亚段的开发井都获得了高产工业油流<sup>[1]</sup>。

但是,渤南洼陷北部陡坡带沙四上亚段近岸水下扇砂砾岩在埋藏演化过程中经历了多期胶结—溶解序列和多期油气充注过程<sup>[4-5]</sup>,导致储层物性经历了复杂的演化过程。目前针对渤南洼陷北带沙四上亚段储层的成岩演化缺乏深入研究,且对成岩演化序列

的判断也没给出足够的证据<sup>[1,6-8]</sup>。笔者以渤南洼陷北部陡坡带沙四上亚段近岸水下扇为例,从储层成岩作用特征分析入手,依据流体包裹均一温度、埋藏史及热史分析,恢复沙四上亚段近岸水下扇储层成岩演化过程,并探讨近岸水下扇不同部位成岩作用对储层物性演化的影响。

## 2 储层特征

### 2.1 沉积特征

根据沉积特征和水动力条件特征的差异性,近岸水下扇可划分为扇根、扇中和扇缘三个亚相<sup>[9]</sup>。扇根亚相主要为大套块状杂基支撑砾岩相,单层厚度大,砾石多为棱角状—次棱角状,杂基含量高,杂基多为灰质,少量为泥质,分选差,垂向递变不明显,由于冲刷侵蚀作用,扇根往往缺失泥岩沉积;扇中亚相主要包括辫状水道和水道间微相,辫状水道微相主要发育叠覆递变或夹有薄层泥岩的正递变砂砾岩,分选中

<sup>①</sup>国家油气重大专项(编号:2011ZX05006-003)、国家自然科学基金(批准号:41102058)、国家自然科学基金石油化工石油化工联合基金重点项目(编号:U1262203)与中国石油大学(华东)优秀博士学位论文培育计划项目(编号:LW140101A)联合资助  
收稿日期:2013-08-05;收修改稿日期:2014-06-04

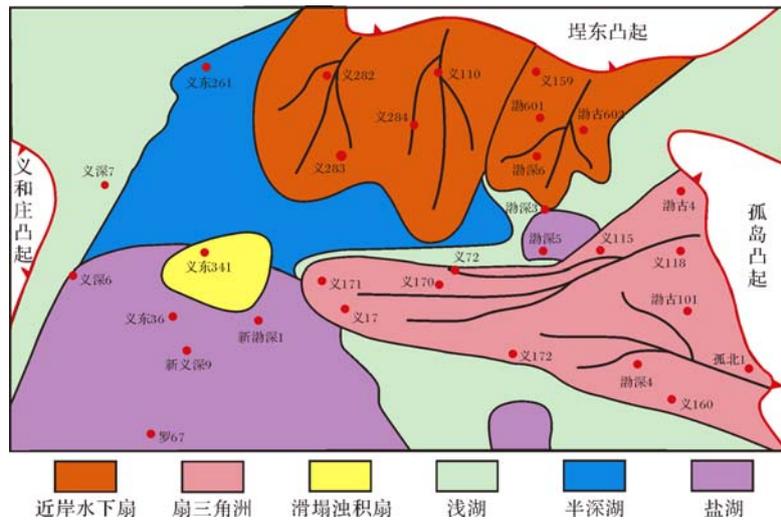


图 1 渤南洼陷沙四上亚段沉积时期砂体平面展布(据仲维萃等<sup>[2]</sup>,修改)

Fig.1 The distribution of sandbodies of Es<sub>4</sub> in the Bonan sag

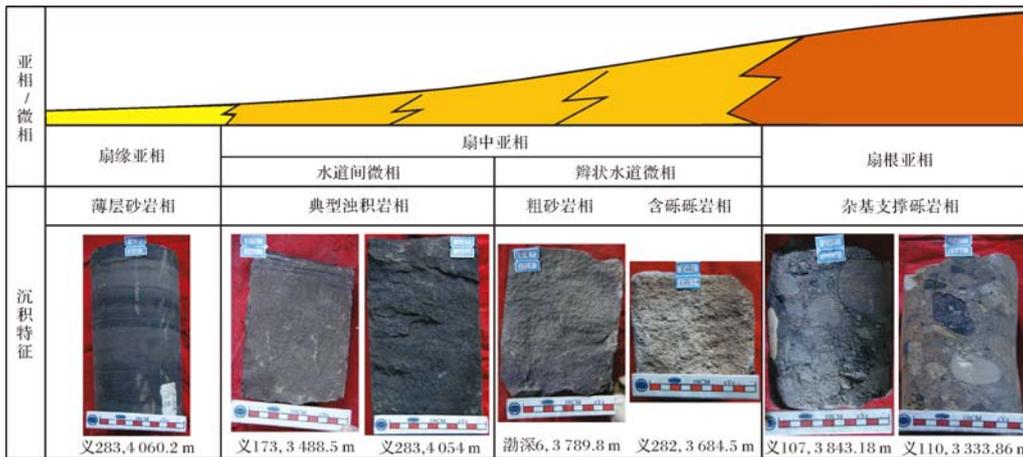


图 2 近岸水下扇不同亚相(微相)沉积特征

Fig.2 Sedimentary characteristics of different sub/micro-facies in the nearshore subaqueous fan

等、杂基含量较低,颗粒支撑等;水道间微相由于水动力条件的减弱和物源供给的不足,导致泥质夹层增多,主要发育典型浊积岩,厚度薄,粒度较细;扇缘以发育厚层暗色泥岩夹有薄层砂岩为特征(图 2)。

### 2.2 储集特征

通过对渤南洼陷北部陡坡带沙四上亚段近岸水下扇砂砾岩储层 220 余块样品的孔隙类型统计显示,沙四上亚段储集空间类型以次生孔隙为主,局部发育少量原生孔隙和裂缝,次生孔隙主要包括长石颗粒和碳酸盐胶结物的溶蚀孔隙。通过统计渤南洼陷北部陡坡带沙四上亚段近岸水下扇不同沉积微相的储层物性与深度关系(图 3),可知沙四上亚段砂砾岩储层埋藏较深,在 3 000~4 500 m 之间,孔隙度在 0.7%~

15.7%,平均 5.4%,储层物性较差。扇根整体上物性差,孔隙度在 0.7%~7.8%,平均 4.5%,随埋深的增加,孔隙度持续降低,4 000 m 以下孔隙度基本在 5% 以下;扇中辫状水道物性变化范围大,孔隙度在 1.7%~15.7%,平均 8.6%,同一深度孔隙度横向分布区间较大,说明扇中辫状水道既有较好的储层,也有较差的储层,随埋深的增加,孔隙度有降低的趋势,但由于扇中辫状水道深层次生孔隙的发育,在一定程度上改善了储层物性,深层仍然存在优质储层;扇中辫状水道间孔隙度在 1.6%~9.8%,平均 4.7%,扇缘孔隙度在 1.4%~8.3%,平均在 3.7%,两者物性较差,随埋深的增加,物性整体上有降低的趋势。整体上,同一深度下,扇中辫状水道储层孔隙度好于扇根、扇中辫状

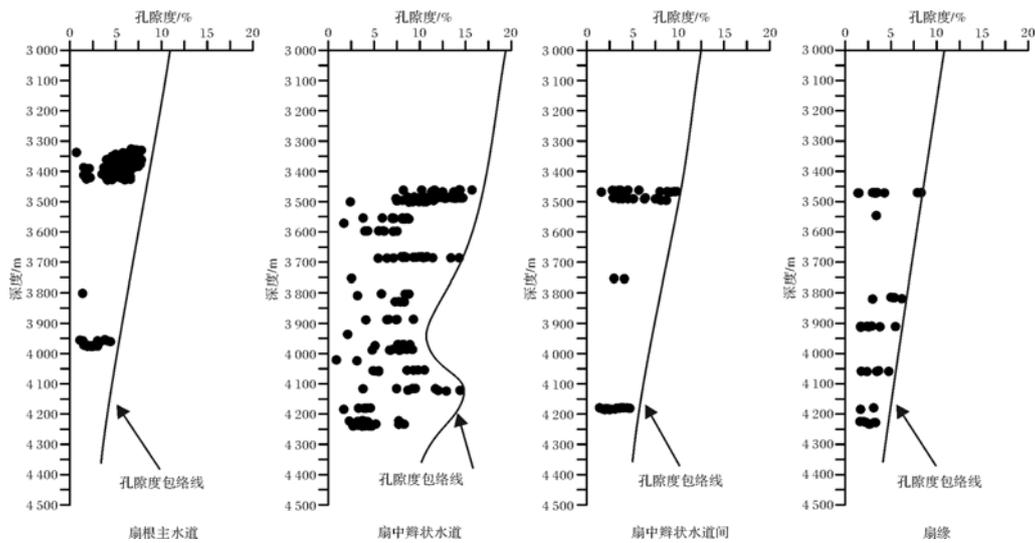


图3 不同沉积微相储层孔隙度与深度关系

Fig.3 Plots of porosity versus depth of different sedimentary micro-facies reservoirs

水道间和扇缘,深埋藏条件下,只有扇中辫状水道具有较好的物性,可成为优质储层,扇根、扇中水道间及扇缘物性均较差,不能成为优质储层。试油资料统计表明,扇根、扇中辫状水道间和扇缘以发育干层为主,扇中辫状水道间可发育少量油层和油水同层,扇中辫状水道主要发育油层、油水同层和水层,少量发育干层。

### 3 成岩作用特征

渤南洼陷北部陡坡带沙四上亚段近岸水下扇砂砾岩储层成岩作用具有强烈压实、碳酸盐灰泥重结晶,多期溶解—胶结以及复杂交代的特征。

#### 3.1 压实作用

渤南洼陷北部陡坡带沙四上亚段近岸水下扇砂砾岩储层埋深在3 000~4 500 m,整体上储层压实作用强烈,镜下薄片观察可以看到:①扇根杂基支撑砾岩由于杂基含量高造成强烈的压实作用(图版 I-A);②普遍可见云母等塑性颗粒压实变形强烈(图版 I-B);③颗粒主要以线接触—凹凸接触(图版 I-C);④颗粒压裂缝发育,部分被后期碳酸盐胶结物充填(图版 I-D)。

#### 3.2 胶结作用

胶结作用是后期影响储层物性的关键成岩作用类型。研究区胶结作用类型多样,主要为碳酸盐胶结,其次为硅质胶结,可见少量的黄铁矿胶结和自生黏土矿物胶结等。

碳酸盐胶结物主要为铁方解石和铁白云石,局部

可见菱铁矿胶结物。菱铁矿主要以团块状充填粒间,由于强烈压实常表现为假杂基(图版 I-E),为早期成岩矿物<sup>[10]</sup>。由于储层埋藏较深,铁方解石和铁白云石普遍发育,含量较高。研究发现,距砂泥接触面距离较近的储层碳酸盐胶结较强,溶解微弱;距砂泥接触面距离较远的储层碳酸盐胶结较弱,溶解强烈(图4)。前人研究表明,我国大多数含油气盆地在一些砂—泥岩界面存在着不同程度碳酸盐溶解或沉淀作用,在砂岩中形成“底钙”和/或“顶钙”现象<sup>[11-14]</sup>。造成这种现象的原因是泥岩中有机质在热成熟演化过程中除了释放出有机酸、CO<sub>2</sub>和烃类,同时也要释放出一定量的金属阳离子<sup>[15]</sup>;厚层泥岩在成岩作用中晚期通过黏土矿物脱水转化可释放出大量的Ca<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup>等金属阳离子<sup>[11]</sup>。这些金属阳离子在砂泥接触面处浓度最大,在碱性环境条件下,形成晚期铁方解石和铁白云石的强烈胶结。

硅质胶结主要是以石英次生加大边的方式存在,并可见两期石英次生加大(图版 I-F)。黄铁矿胶结也可见两期,一期黄铁矿胶结主要表现为球粒状(图版 I-G)充填粒间,另一期黄铁矿胶结主要为团块状分布粒间(图版 I-H、图版 II-A)。

渤南洼陷沙四上亚段黏土矿物类型主要为绿泥石和伊利石(图5),可见绿泥石包壳。储层在埋藏过程中,随着温度压力的升高,在碱性地层水条件下,高岭石主要向绿泥石和伊利石转化,蒙脱石通过伊/蒙混层的中间状态转变为伊利石<sup>[16]</sup>。渤南洼陷北带沙四上亚段储层伊/蒙间层比在20%左右,说明蒙脱石

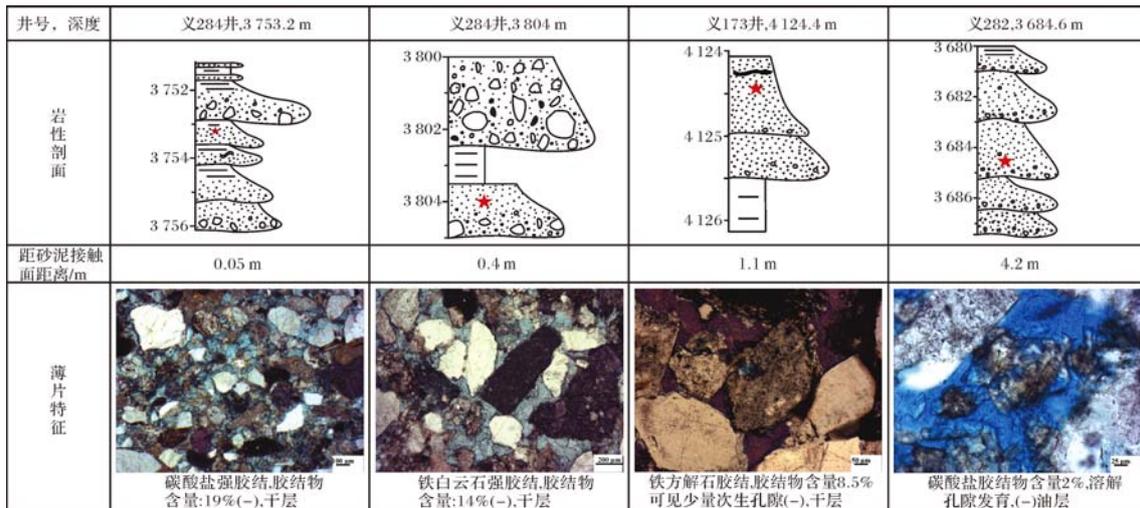


图 4 渤南洼陷北带沙四上亚段近岸水下扇扇中及扇缘储层碳酸盐胶结作用特征

Fig.4 The characteristics of carbonate cementation in middle and outer fan reservoirs of Es<sub>4</sub><sup>s</sup> in the north zone of Bonan sag

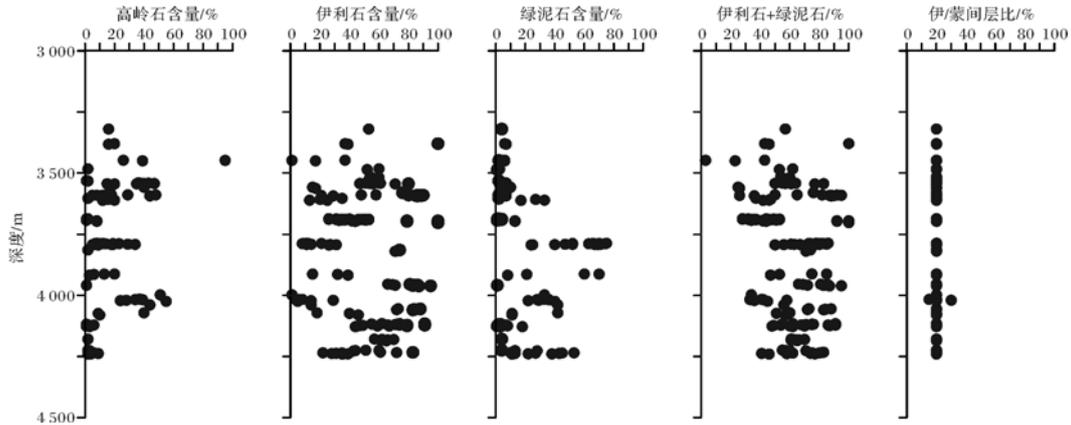


图 5 渤南洼陷北带沙四上亚段黏土矿物特征

Fig.5 The characteristics of clay minerals of Es<sub>4</sub><sup>s</sup> in the north zone of Bonan sag

已基本全部转化为伊利石。

### 3.3 灰泥重结晶作用

渤南洼陷北带沙四上亚段近岸水下扇扇根主要为杂基支撑砾岩, 杂基以碳酸盐灰泥为主, 当达到一定的温度压力条件, 会发生碳酸盐灰泥杂基重结晶作用, 而且随着温度压力的增加, 碳酸盐灰泥重结晶程度增加, 重结晶晶体变得更加粗大明亮(图版 II-B, C)。

### 3.4 交代作用

研究区交代作用类型复杂多样, 主要包括碳酸盐之间交代、碳酸盐矿物交代颗粒及其他自生矿物(图版 II-D)、晚期黄铁矿交代碳酸盐矿物及石英加大(图版 I-H、图版 II-A)。

### 3.5 溶蚀作用

溶蚀作用作为建设性成岩作用, 对研究区深层储

层的物性改善具有重要影响。研究区储层溶蚀作用主要为酸性溶蚀作用, 包括长石和不稳定颗粒的溶蚀, 也可见碳酸盐胶结物的溶蚀; 局部发育碱性溶蚀作用, 主要为石英颗粒及其次生加大边的溶蚀。

研究区目的层长石溶解普遍发育, 主要沿颗粒边缘或解理缝选择性溶解, 溶蚀孔呈港湾状、蜂窝状等, 也可见长石粒内溶蚀, 被后期碳酸盐胶结物或沥青充填(图版 II-E, F)。碳酸盐胶结物整体溶解不强, 主要是胶结物内溶解(图版 II-G); 石英溶解主要是石英颗粒边缘和次生加大的溶解(图版 II-H), 溶解程度较弱。

## 4 成岩演化序列

### 4.1 成岩作用序列

依据不同类型胶结物的交代关系、溶解和溶解充

填序列,并在流体包裹体均一温度和埋藏史综合分析的基础上,精细厘定了渤南洼陷北部陡坡带沙四上亚段成岩演化序列。

由长石溶蚀孔隙部分被沥青(图版 II-E),说明早期酸性溶蚀发生的时间应早于早期油气充注。由油气充满度高储层中铁白云石胶结物自形生长且含量少(图 6a, b),说明早期油气充注应早于铁白云石胶结。通过铁方解石充填长石粒内溶孔(图版 II-E)及铁白云石胶结物的溶解(图版 II-G)现象,推测储层经历了早期以长石溶蚀为主和晚期以碳酸盐胶结物溶蚀为主的两期酸性溶解。长石发生酸性溶蚀作用的产物之一是  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$  在合适条件下会以次生加大边的形式沉淀在碎屑石英颗粒周围。石英具有两期加大的现象(图版 I-F),第一期石英加大发育普遍,而第二期石英加大仅局部发育。由铁方解石和铁白云石仅交代第一期石英加大边(图版 II-D),可以推断铁方解石和铁白云石为同期形成,并且铁方解石和铁白云石胶结要晚于第一期石英次生加大,而早于第二期石英次生加大。由石英溶蚀和铁方解石以及铁白云石胶结均需要碱性环境,可推断石英溶蚀与铁方解石以及铁白云石胶结为同期形成。由渤深 5 井和义 173 井石英加大边中盐水包裹体平均均一温度分别为  $101.3^\circ\text{C}$  和  $119.9^\circ\text{C}$ <sup>[17]</sup>,通过埋藏史图分析可知,与其对应的两期酸性溶蚀时间分别为距今 40 Ma 和距今 14 Ma。

前人研究表明,碳酸盐灰泥重结晶作用需要两个条件:①达到一定的温度和压力条件<sup>[18-23]</sup>;②需要有外来碱性高钙热液流体参与<sup>[18,24-26]</sup>。扇根砾岩灰泥杂基含量高,原始物性差,在早期快速压实过程中孔隙水在浅层已基本排出殆尽,因此,认为扇根灰泥杂基重结晶作用与扇中储层碳酸盐胶结作用属于同期,也是在有外来碱性热液流体进入的条件下发生的。储层中可见部分黄铁矿呈球粒状(图版 I-G),应为早期成岩阶段形成的矿物,前人研究亦表明,在早成岩阶段,温度相对较低,由于细菌还原硫酸盐作用的减弱,导致球粒状黄铁矿胶结<sup>[27]</sup>;通过团块状黄铁矿交代碳酸盐胶结物和石英次生加大边的现象(图版 I-H、图版 II-A),可推断部分团块状黄铁矿属于晚成岩阶段胶结物。

综合分析认为,渤南洼陷北部陡坡带沙四上亚段近岸水下扇砂砾岩储层成岩作用演化序列为:早期黄铁矿胶结→早期石英加大/长石溶蚀→早期油气充注→碳酸盐胶结/碳酸盐灰泥重结晶/石英溶蚀→晚期

石英加大/碳酸盐溶蚀→晚期黄铁矿胶结。

#### 4.2 成岩环境演化特征及差异性

操应长等<sup>[28]</sup>通过埋藏过程中有机质热演化、膏盐层脱水并结合油气成藏史等综合分析,认为渤南洼陷北带沙四上亚段经历了酸碱交替的成岩环境演化:沙四上亚段沉积初期气候干旱,原始地层水呈弱碱性;开始沉积至距今 42.5 Ma,温度相对较低,有机质未成熟,地层流体仍保持弱碱性;距今 42.5~30 Ma,随着温度升高,有机质成熟并释放大量有机酸,此阶段为有机酸控制的酸性地层水;距今 30~24.6 Ma,有机酸发生脱羧,同时沙四上亚段顶部膏盐层脱出大量碱性水,地层水呈碱性,其中距今 32.8~24.6 Ma,发生第一期油气充注;距今 24.6~6 Ma,地层经历抬升及再沉降,在抬升过程中有机质再次生成有机酸,地层水呈酸性,此阶段发生第二期油气充注;距今 6 Ma 至现今,沙四上膏盐层发生脱水,地层流体呈弱碱性<sup>[28]</sup>。

油气充注可以改变孔隙流体的性质,减缓或抑制胶结作用<sup>[29-31]</sup>。随着储层含油级别增高,储层碳酸盐胶结物的含量呈明显的减小趋势,并且油气充满度高的储层碳酸盐胶结物呈自形生长(图 6a, b),说明油气充注对碳酸盐胶结具有明显的抑制作用;而早期油气未充注或油气充满度低的储层往往发育强烈的碳酸盐胶结(图 6c)。

结合该成岩环境研究成果分析发现,在同一成岩环境背景下,由于近岸水下扇不同亚(微)相沉积特征的差异性,导致其成岩作用演化序列的程度存在明显差异性(图 7)。

近岸水下扇扇根亚相分选差,杂基含量高,原始物性差,距今 42.5 Ma 之前,以压实作用为主;距今 42.5~30 Ma,由于扇根原始物性较差,特别是经历早期快速压实后损失了大量的储集空间,导致有机酸很难大量进入,阻碍了溶解作用的进行;距今 30~24.6 Ma,沙四上亚段顶部膏盐层脱出大量碱性水、使地层水 PH 值呈碱性,该时期的地层高温和外来碱性流体的注入促使扇根砾岩灰泥杂基发生重结晶作用,导致碳酸钙含量增加并交代颗粒;距今 24.6 Ma 至现今,持续的压实和灰泥重结晶作用增加了储层的致密性,后期溶解作用微弱。

扇中辫状水道距泥岩较远部位储层原始物性较好,距今 42.5 Ma 之前,主要发生压实作用;距今 42.5~30 Ma,由于储层原始物性较好而且抗压实能力增强,有机酸可以大量进入储层发生长石的强烈溶解及

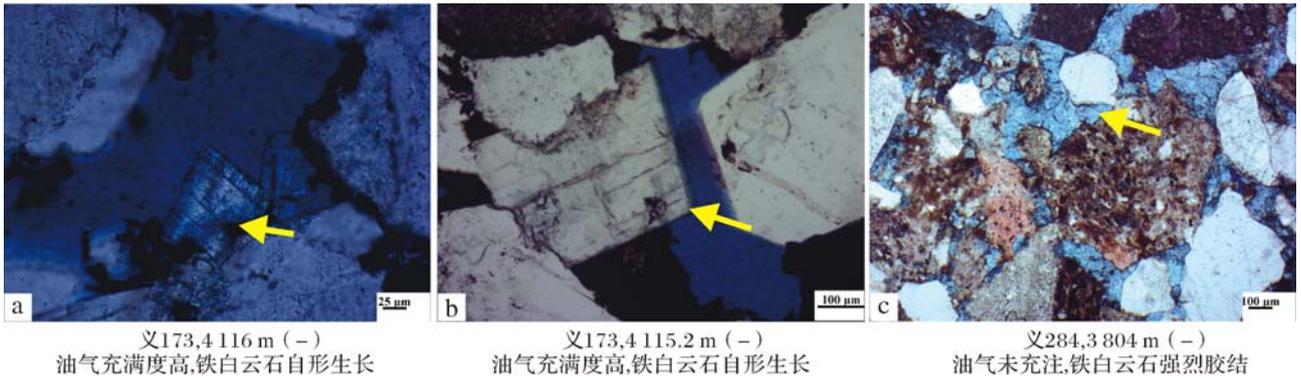


图 6 不同含油性储层碳酸盐胶结特征

Fig.6 The characteristics of carbonate cementation in different oil-bearing reservoirs

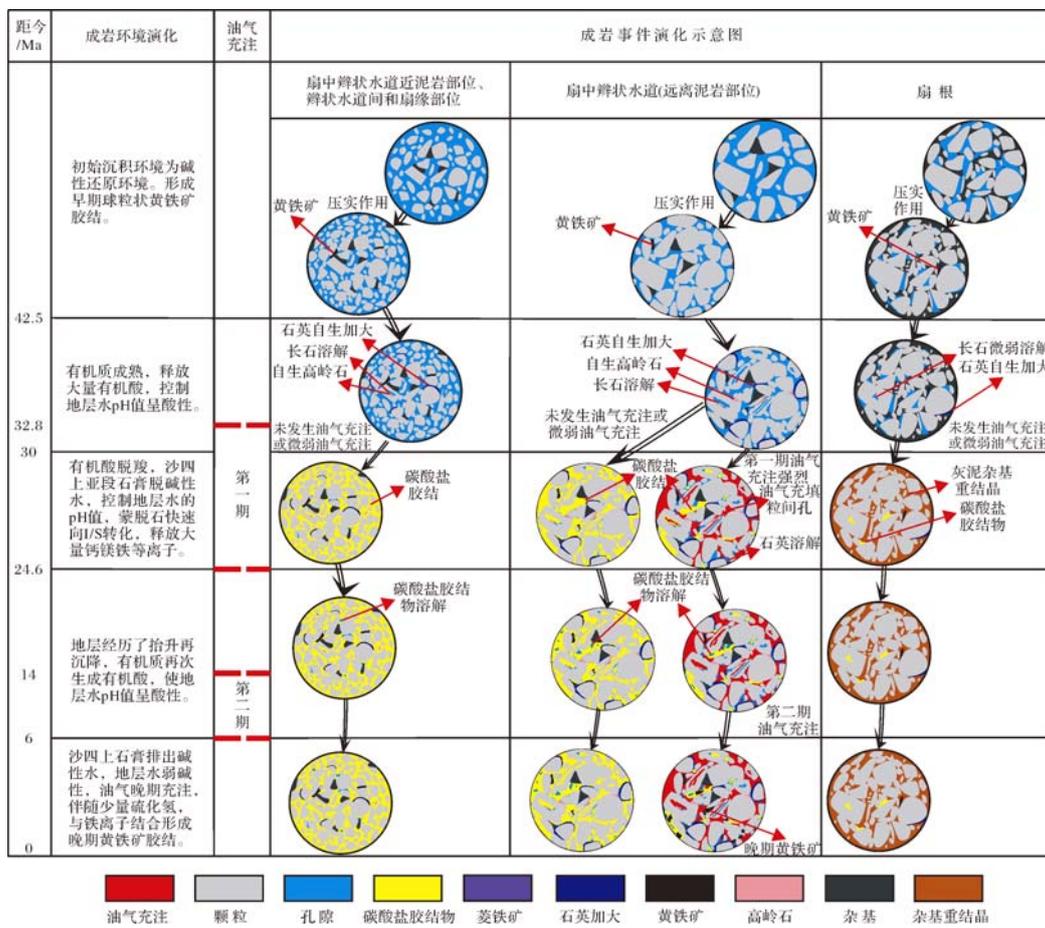


图 7 近岸水下扇不同亚(微)相储层成岩演化及流体演化示意图

Fig.7 Diagenetic evolution and fluid evolution in different sub/micro-facies reservoirs of the nearshore subaqueous fan

石英的次生加大;距今 30~24.6 Ma,在碱性环境下发生碳酸盐胶结和石英溶解作用,但是,该时期发生早期油气充注,早期油气优先充注这些物性较好并处于构造高部位的扇中辫状水道距泥岩较远部位储层,该类储层油气充注量大而且含油饱和度高,有效抑制了后期的胶结作用(图 6a,b),储层受到较好的保护;距今 24.6~6 Ma 发生第二期酸性溶解和第二期油气充

注;距今 6 Ma 至现今,主要为晚期少量的黄铁矿胶结。

扇中辫状水道距泥岩层较近储层、扇中水道间和扇缘储层原始物性中等,在距今 42.5 Ma 之前主要发生压实作用;距今 42.5~30 Ma,发生长石溶解及石英次生加大;距今 30~24.6 Ma,发生碳酸盐胶结物的强烈胶结,该时期发生早期油气充注。由于扇中辫状水

道距泥岩较近部位、扇中水道间薄层砂和扇缘部位原始物性偏差并且主要处于构造低部位,导致这些部位储层油气充注量有限,含油饱和度低。前人研究表明,油气充注对后期胶结作用的抑制与含油饱和度有密切关系,只有在储层的孔隙完全或大部分被油气所占据,造成孔隙水呈孤立滞留状态,才可扼制后期胶结作用的继续进行<sup>[32]</sup>。因此,扇中辫状水道距泥岩较近部位、扇中水道间薄层砂和扇缘部位储层油气充注对后期胶结作用的抑制较弱。在后期碱性环境下,形成碳酸盐的致密胶结;距今 24.6~6 Ma,经历了酸性地层水环境,但由于先前碳酸盐的强烈胶结作用,导致酸性流体难以进入,影响了溶解作用的进行;距今 6 Ma 至现今由于晚期碱性流体无法进入,主要发生压实作用。

综上所述认为,渤南洼陷北带沙四上亚段近岸水下扇砂砾岩储层整体上经历了“弱碱性—酸性—碱性—酸性—碱性”酸碱交替的成岩环境演化,在同一成岩环境背景下,由于近岸水下扇不同亚(微)相沉积特征的差异性,导致其成岩环境演化亦存在差异性,甚至在某一地质历史时期在扇体的不同部位存在酸碱流体共存的成岩环境。如扇中辫状水道距泥岩较远部位储层原始物性较好,在距今 30~24.6 Ma,在碱性环境下发生碳酸盐胶结和石英溶解作用,但是,该时期发生早期油气充注,油气优先充注这些物性较好的储层且充注油气充注量相对较大,储层含油饱和度高。由于油气充注一方面降低了地层流体的 pH 值,有利于酸溶性矿物的溶解,另一方面油气充注抑制了碱性环境下的胶结作用,储层受到良好的保护,此时储层应该仍处于有机酸控制下的酸性环境。在同一时期,扇中辫状水道距泥岩层较近储层原始物性中等,油气充注过程中充注量有限,含油饱和度低,对后期的胶结作用抑制较弱,因此,在碱性环境下形成碳酸盐的致密胶结。

## 5 成岩演化对物性演化的影响

以成岩演化序列约束下的反演回剥方法<sup>[33]</sup>为指导恢复地质时期储层物性,以铸体薄片为基础,依据储层埋藏史及成岩演化序列,精确求取不同成岩事件对储层孔隙度的贡献值,采用反演回剥方法恢复地质历史时期各主要成岩作用时期储层的孔隙度,从而精细分析各成岩作用对储层物性的影响。

以沙四上亚段近岸水下扇义 284 井 3 750 m 细砂岩为例(图 8),通过地质历史时期储层物性的恢

复,可知对沙四上亚段储层物性演化起到重要影响的有压实作用、碳酸盐胶结和溶解作用。采用上述地史时期物性恢复方法,针对渤南北带沙四上亚段近岸水下扇不同亚(微)相储层恢复其地质历史时期物性,建立各亚(微)相储层物性演化模式(图 9)。

扇根杂基支撑砾岩原始物性差,在浅埋藏过程中以压实作用为主,溶解作用微弱,物性持续降低,在中深层灰泥杂基重结晶作用使扇根砾岩物性快速降低,现今物性极差,主要发育干层,如义 110 井 3 360~3 400 m、义 285 井 3 972~3 975.8 m 以及义 285 井 4 178~4 181.5 m 扇根杂基支撑砾岩等(图 9A)。

扇中辫状水道距泥岩层较远且遭受早期油气强烈充注的储层,整体上压实作用使储层物性降低,但是由于两期酸性溶解对储层的改造以及油气充注对胶结作用的抑制,中深层仍发育大量原生孔隙和次生孔隙,储层物性较好,可作为良好的油气储集层,如义 282 井 3 595~3 600 m、义 282 井 3 680~3 687.4 m 和义 173 井 4 115~4 120.3 m 扇中辫状水道远泥岩砂砾岩储层(图 9B);而对于早期油气未充注或弱充注的储层,其早期酸性溶解程度的减弱和后期胶结作用的增强导致储层物性差于早期油气强烈充注的储层,如义 284 井 4 220.9~4 225.5 m 和渤深 6 井 3 984~3 991.2 m 扇中辫状水道远泥岩砂砾岩储层(图 9C)。

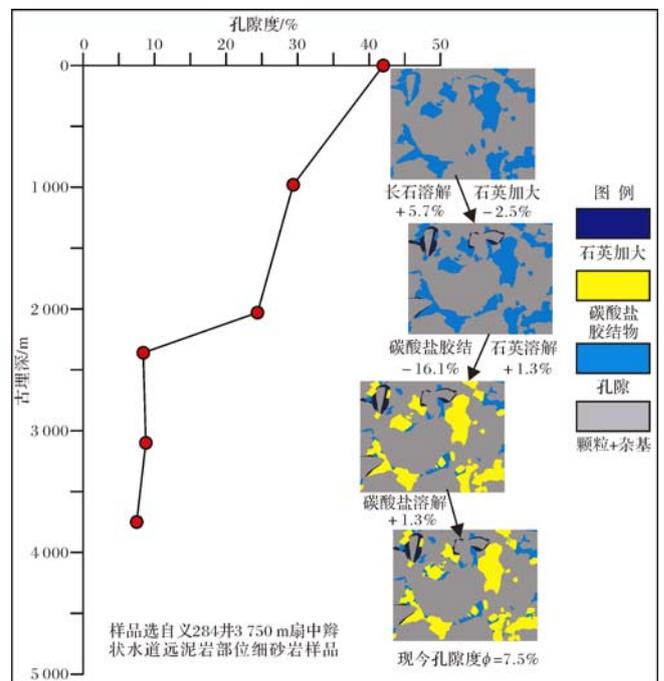


图 8 近岸水下扇储层孔隙度演化反演回剥结果

Fig.8 The inversion and back stripping results of porosity of the nearshore subaqueous fan

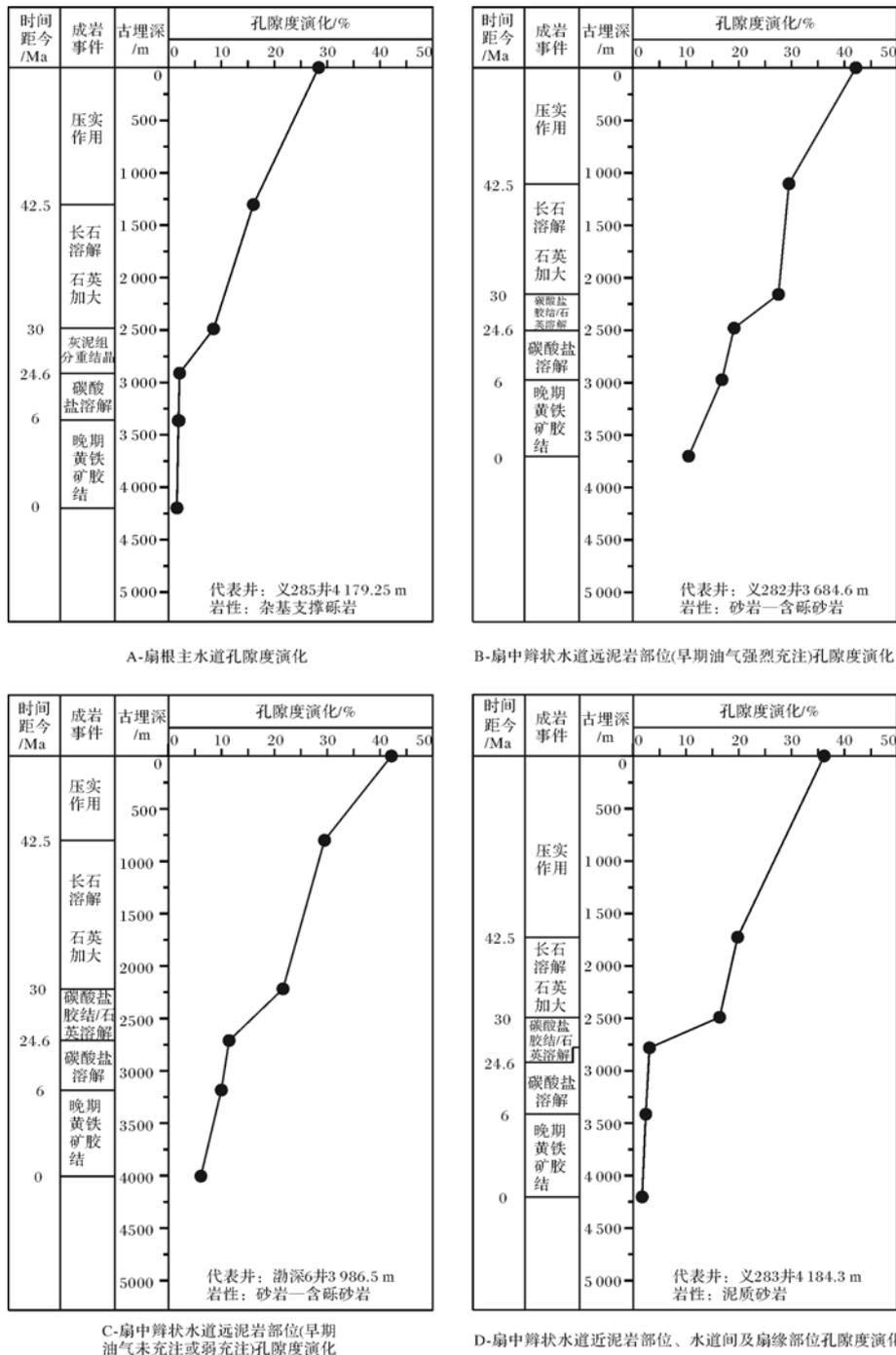


图 9 近岸水下扇不同亚(微)相物性演化史

Fig.9 The property evolution history in different sub/micro-facies of the nearshore subaqueous fan

扇中辫状水道距泥岩层较近的储层、扇中水道间和扇缘储层原始物性中等, 压实作用使储层物性降低, 早期酸性溶解可在一定程度改善储层物性, 但由于后期强烈的碳酸盐胶结作用使储层物性急剧降低, 并导致晚期的酸性溶解对储层的改造微弱, 现今物性极差, 主要发育干层, 如义 284 井 3 802.4~3 805 m 和

义 283 井 4 183.3~4 184.4 m 扇中辫状水道近泥岩储层以及义 285 井 3 909~3 911.3 m 和义 283 井 4 056~4 058.5 m 扇缘薄层砂储层(图 9D)。

### 6 结论

(1) 渤南洼陷北部陡坡带沙四上亚段近岸水下

扇砂砾岩储层孔隙度在0.7%~15.7%,平均5.4%,储层物性较差。同一深度下,扇中辫状水道储层孔隙度好于扇根、扇中辫状水道间和扇缘,深埋藏条件下,只有扇中辫状水道储层具有较好的物性,可成为优质储层。储集空间类型以次生溶蚀孔隙为主。

(2) 渤南洼陷北部陡坡带沙四上亚段近岸水下扇砂砾岩储层整体上压实作用强烈,胶结物类型多样且具有多期次性,酸性溶蚀和碱性溶蚀作用交替进行。

(3) 在同一成岩环境演化背景下,由于近岸水下扇不同亚(微)相沉积特征差异性,控制了不同亚(微)相成岩演化特征的差异性,并决定了其物性演化的差异性。采用反演回剥法对地质历史时期沙四上亚段近岸水下扇储层的物性进行恢复,可知对储层物性演化起到重要影响的有压实作用、灰泥杂基重结晶作用、碳酸盐胶结、酸性溶解和油气充注,并建立了近岸水下扇不同亚(微)相储层物性演化模式:扇根砾岩在埋藏过程中成岩作用以压实作用和灰泥杂基重结晶作用为主,溶解作用微弱,物性持续降低,在中深层灰泥杂基的重结晶作用使扇根砾岩物性快速降低,现今物性极差,主要发育干层。扇中辫状水道距泥岩层较远的储层,由于两期酸性溶解对储层的改造以及油气充注对胶结作用的抑制,中深层仍发育大量原生孔隙和次生孔隙,储层物性较好,可作为良好的油气储集层。扇中辫状水道距泥岩层较近的储层、扇中水道间和扇缘储层成岩作用以强烈胶结作用和交代作用为主要特征,现今物性差,主要发育干层。

### 参考文献(References)

- 1 管灵,张枝焕,王顺华,等. 渤南洼陷北部陡坡带砂砾岩储层成岩作用研究[J]. 天然气地球科学,2011,22(2):299-306. [Zan Ling, Zhang Zhihuan, Wang Shunhua, et al. Diagenesis of sandy conglomerate reservoir in northern steep slope of Bonan subsag[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(2): 299-306.]
- 2 仲维莘,操应长,王艳忠,等. 渤南洼陷沙四段沉积砂体类型及分布[J]. 油气地质与采收率,2010,17(1):48-50. [Zhong Weiping, Cao Yingchang, Wang Yanzhong, et al. The types and distribution of the sandbodies in Sha4 member in Bonan depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(1): 48-50.]
- 3 郭玉新,隋风贵,林会喜,等. 时频分析技术划分砂砾岩沉积期次方法探讨——以渤南洼陷北部陡坡带沙四段-沙三段为例[J]. 油气地质与采收率,2009,16(5):8-12. [Guo Yuxin, Sui Fenggui, Lin Huixi, et al. Discussion on the division and correlation of glutenite sedimentary period by time-frequency analysis—A case study of Sha4 to Sha3 member of northern abrupt slope zone in Bonan depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2009, 16(5): 8-12.]
- 4 郭瑞超,李延钧,王廷栋,等. 胜利油田渤南洼陷古近系油气源与成藏特征[J]. 新疆石油地质,2009,30(6):674-676. [Guo Ruichao, Li Yanjun, Wang Tingdong, et al. Oil-Gas source and accumulation characteristics of paleogene in Bonan sub-sag in Shengli oil field[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 30(6): 674-676.]
- 5 张枝焕,曾艳涛,张学军,等. 渤海湾盆地沾化凹陷渤南洼陷原油地球化学特征及成藏期分析[J]. 石油实验地质,2006,28(1):54-58. [Zhang Zhihuan, Zeng Yantao, Zhang Xuejun, et al. The geochemistry characteristics and accumulation-history of crude oil in the Bonan sub-sag of the Zhanhua sag, the Bohaiwan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(1): 54-58.]
- 6 吴富强,李后蜀,胡雪,等. 沾化凹陷渤南洼陷沙四段成岩史恢复及成岩模式建立[J]. 油气地质与采收率,2001,8(6):1-4. [Wu Fuqiang, Li Houshu, Hu Xue, et al. Diagenetic history of Es<sub>4</sub> in Bonan subsag of Zhanhua sag and establishment of diagenetic model[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2001, 8(6): 1-4.]
- 7 安爱琴,纪友亮,单敬福. 渤南洼陷沙四上亚段储层成岩作用及物性特征[J]. 上海地质,2007(1):11-16,53. [An Aiqin, Ji Youliang, Shan Jingfu. Diagenesis and physical property characteristics of the upper Sha4 member reservoir in Bonan subsag[J]. Shanghai Geology, 2007(1): 11-16, 53.]
- 8 吴富强,汪东波. 胜利油区渤南洼陷沙四上亚段成岩演化序列研究[J]. 华南地质与矿产,2005(1):54-59. [Wu Fuqiang, Wang Dongbo. Diagenetic sequence of the upper Sha4 member in Bonan subsag, Shengli oil field[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2005(1): 54-59.]
- 9 隋风贵,操应长,刘惠民,等. 东营凹陷北带东部古近系近岸水下扇储集物性演化及其油气成藏模式[J]. 地质学报,2010,84(2):246-256. [Sui Fenggui, Cao Yingchang, Liu Huimin, et al. Physical properties evolution and hydrocarbon accumulation of Paleogene nearshore subaqueous fan in the eastern north margin of the Dongying depression[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(2): 246-256.]
- 10 Hendry J P, Pearson M J, Trewin N H, et al. Jurassic septarian concretions from NW Scotland record interdependent bacterial, physical and chemical processes of marine mudrock diagenesis[J]. Sedimentology, 2006, 53(3): 537-565.
- 11 孙海涛,钟大康,刘洛夫,等. 沾化凹陷沙河街组砂岩透镜体表面与内部碳酸盐胶结作用的差异及其成因[J]. 石油学报,2010,31(2):246-252. [Sun Haitao, Zhong Dakang, Liu Luofu, et al. Carbonate cementation difference and its origin between exterior and interior surfaces of lenticular sandbody in Shahejie Formation of Zhanhua depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(2): 246-252.]
- 12 钟大康,朱筱敏,张琴. 不同埋深条件下砂泥岩互层中砂岩储层物性变化规律[J]. 地质学报,2004,78(6):863-871. [Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, Zhang Qin. Variation characteristics of sandstone reservoirs when sandstone and mudstone are interbedded at different buried depths[J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(6): 863-871.]
- 13 漆滨汉,林春明,邱桂强,等. 东营凹陷古近系沙河街组砂岩透镜体钙质结壳形成机理及其对油气成藏的影响[J]. 古地理学报,2006,8(4):519-529. [Qi Binwen, Lin Chunming, Qiu Guiqiang, et

- al. Formation mechanism of calcareous incrustation in lenticular sand-body of the Shahejie Formation of Paleogene and its influence on hydrocarbon accumulation in Dongying sag[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2006, 8(4): 519-529.]
- 14 张永旺, 曾澹辉, 高霞, 等. 东营凹陷古近系储层碳酸盐胶结物分布特征及主控因素[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2009, 39(1): 16-22. [Zhang Yongwang, Zeng Jianhui, Gao Xia, et al. Distribution characteristics and main controlling factors of carbonate cements in the Paleogene reservoirs in Dongying Depression[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2009, 39(1): 16-22.]
- 15 Lynch F L, Land L S. Diagenesis of calcite cement in Frio Formation sandstones and its relationship to formation water chemistry[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66(3): 439-446.
- 16 姜在兴. 沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003. [Jiang Zaixing. *Sedimentology* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.]
- 17 操应长, 贾艳聪, 王艳忠, 等. 渤南洼陷北带沙四上亚段储层成岩流体演化[J]. *现代地质*, 2014, 28(1): 199-200. [Cao Yingchang, Jia Yancong, Wang Yanzhong, et al. Diagenetic fluid evolution of reservoirs in Es<sub>4</sub> in the north zone of the Bonan sag[J]. *Geoscience*, 2014, 28(1): 199-200.]
- 18 Hartig K A. Dolomite in Permian paleosols of the Bravo dome CO<sub>2</sub> field, U.S.A.: Permian reflux followed by late recrystallization at elevated temperature[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2011, 81(4): 248-265.
- 19 邓长瑜, 张秀莲, 陈建文, 等. 黔东南地区寒武系碳酸盐岩成岩作用分析[J]. *沉积学报*, 2004, 22(4): 588-596. [Deng Changyu, Zhang Xiulian, Chen Jianwen, et al. The analysis of sequence stratigraphy and diagenesis for the carbonates of Cambrian in the southeast of Guizhou province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(4): 588-596.]
- 20 Fu Qilong. Early dolomitization and recrystallization of carbonate in an evaporite basin: the Middle Devonian Ratner laminite in southern Saskatchewan, Canada[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 2006, 163(6): 937-948.
- 21 郭成贤, 王正允, 王方平. 深水碳酸盐岩成岩作用的稳定同位素特征[J]. *石油与天然气地质*, 1999, 20(2): 144-147. [Guo Chengxian, Wang Zhengyun, Wang Fangping. Stable isotopic characteristics of diagenesis in deep-water carbonate rocks[J]. *Oil & Gas Geology*, 1999, 20(2): 144-147.]
- 22 李秀华, 夏文杰. 砂岩中的杂基类型与鉴别标志[J]. *矿物岩石*, 1986, 6(3): 32-40. [Li Xiuhua, Xia Wenjie. The types of matrix in sandstones and their recognitional criteria[J]. *Minerals and Rocks*, 1986, 6(3): 32-40.]
- 23 Heydari E, Wade W J. Massive recrystallization of low-Mg calcite at high temperatures in hydrocarbon source rocks: Implications for organic acids as factors in diagenesis[J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(7): 1285-1303.
- 24 康玉柱. 塔里木盆地古生代海相碳酸盐岩储集岩特征[J]. *石油实验地质*, 2007, 29(3): 217-223. [Kang Yuzhu. Reservoir rock characteristics of Paleozoic marine facies carbonate rock in the Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2007, 29(3): 217-223.]
- 25 朱东亚, 金之钧, 胡文瑄, 等. 塔里木盆地深部流体对碳酸盐岩储层影响[J]. *地质论评*, 2008, 54(3): 348-357. [Zhu Dongya, Jin Zhijun, Hu Wenxuan, et al. Effects of deep fluid on carbonates reservoir in Tarim Basin[J]. *Geological Review*, 2008, 54(3): 348-357.]
- 26 刘树根, 马永生, 王国芝, 等. 四川盆地震旦系—下古生界优质储层形成与保存机理[J]. *油气地质与采收率*, 2008, 15(1): 1-5. [Liu Shugen, Ma Yongsheng, Wang Guozhi, et al. Formation and conservation mechanism of the high-quality reservoirs in Sinian-Lower Palaeozoic in Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2008, 15(1): 1-5.]
- 27 Raiswell R, Bottrell S H, Dean S P, et al. Isotopic constraints on growth conditions of multiphase calcite-pyrite-barite concretions in Carboniferous mudstones[J]. *Sedimentology*, 2002, 49(2): 237-254.
- 28 操应长, 马奔奔, 王艳忠, 等. 渤南洼陷北带沙四上亚段储层低渗成因机制及分类评价[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(5): 865-875. [Cao Yingchang, Ma Benben, Wang Yanzhong, et al. Genetic mechanisms and classified evaluation of low permeability reservoirs of Es<sub>4s</sub> in the north zone of Bonan sag[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(5): 865-875.]
- 29 蔡进功, 张枝焕, 朱筱敏, 等. 东营凹陷烃类充注与储集层化学成岩作用[J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(3): 79-83. [Cai Jingong, Zhang Zhihuan, Zhu Xiaomin, et al. Hydrocarbon filling and chemical diagenesis evolution of the clastic reservoir of the Paleogene in Dongying sag[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(3): 79-83.]
- 30 张枝焕, 胡文瑄, 曾澹辉, 等. 东营凹陷下第三系流体—岩石相互作用研究[J]. *沉积学报*, 2000, 18(4): 560-565. [Zhang Zhihuan, Hu Wenxuan, Zeng Jianhui, et al. Study of fluid-rock interactions in Eocene formation in Dongying depression, Bohai Gulf Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(4): 560-565.]
- 31 李艳霞, 刘洪军, 袁东山, 等. 石油充注对储层成岩矿物演化的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2003, 24(3): 274-280. [Li Yanxia, Liu Hongjun, Yuan Dongshan, et al. Effect of oil charging on reservoir's diagenetic mineral evolution[J]. *Oil & Gas Geology*, 2003, 24(4): 274-280.]
- 32 吴富强, 宁兴贤. 影响渤南洼陷深部储层次生孔隙形成的因素及其作用[J]. *沉积与特提斯地质*, 2004, 24(2): 76-82. [Wu Fuqiang, Ning Xingxian. The controlling factors and processes for the formation of the secondary porosity of the deep-seated reservoir rocks in the Bonan depression, Shandong[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2001, 24(2): 76-82.]
- 33 王艳忠, 操应长, 蕙克来, 等. 碎屑岩储层地质历史时期孔隙度演化恢复方法——以济阳拗陷东营凹陷沙河街组四段上亚段为例[J]. *石油学报*, 2013, 34(6): 1100-1110. [Wang Yanzhong, Cao Yingchang, Xi Kelai, et al. A recovery method for porosity evolution of clastic reservoirs with geological time: A case study from the upper part submember of Es<sub>4</sub> in the Dongying depression, Jiyang subbasin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(6): 1100-1110.]

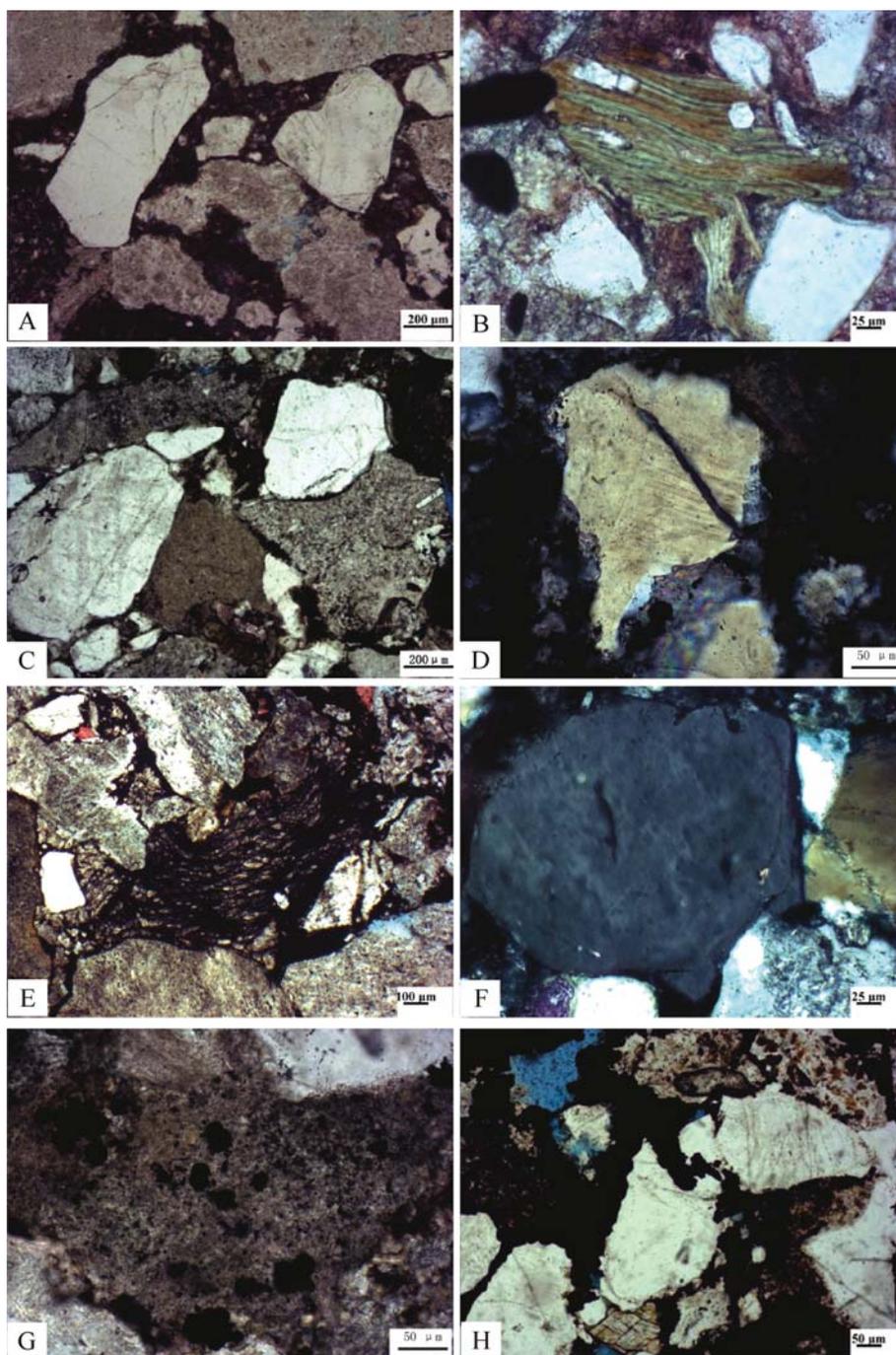
## Diagenetic Evolution and Its Influence on Physical Properties of Es<sub>4</sub><sup>s</sup> Reservoir in the Northern Steep Zone of the Bonan Sag

MA BenBen CAO YingChang WANG YanZhong JIA YanCong ZHANG ShaoMin

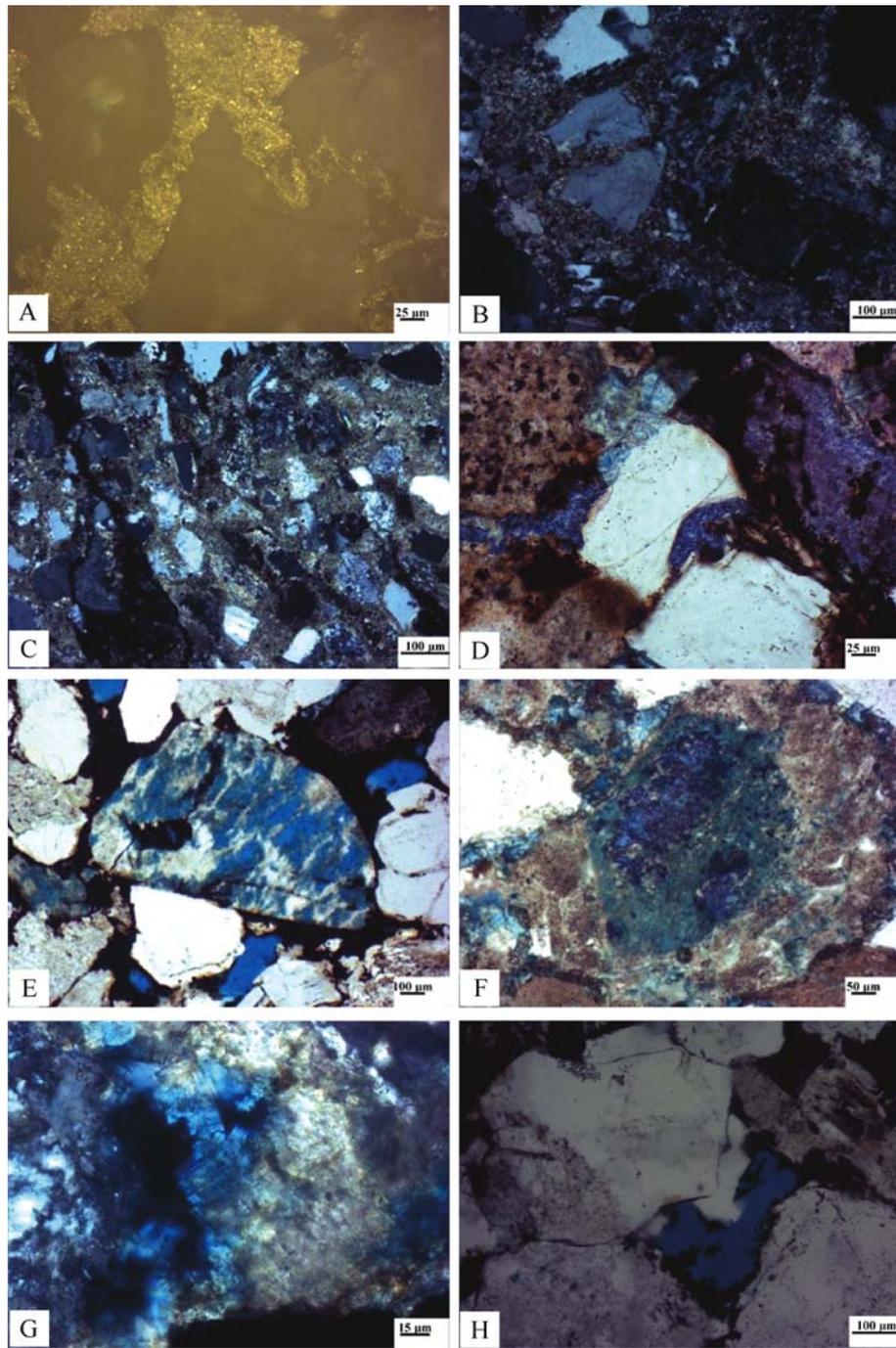
(School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580)

**Abstract:** Through the analysis of core observations, thin sections, measured physical properties and combined with the homogenization temperature analysis of fluid-inclusion and burial history in the nearshore subaqueous fan of the Es<sub>4</sub>s in the northern steep zone of the Bonan sag, the evolution characteristics of diagenesis and reservoir properties was studied. The results showed that, the reservoir diagenesis mainly included strong compaction, lime-mud matrix recrystallization, multi-phase of dissolution and cementation, and complicated metasomatism. The reservoirs have experienced multi-phase acidic and alkaline fluid evolution based on the characteristics of diagenetic environment. In the same diagenetic environment, the difference of sedimentary characteristics in different sub/micro-facies of nearshore subaqueous fan controls the difference of diagenetic evolution characteristics, which also determines the difference of the evolution of reservoir physical property. Based on a method of porosity's inversion and back stripping, physical properties of the reservoirs in geological history were restored, it is shown that compaction, carbonate cementation, lime-mud matrix recrystallization, acid dissolution and former hydrocarbon filling exert the most important effect on the evolution of physical properties. The evolution mode of reservoir physical properties in different sub/micro-facies of nearshore subaqueous fan have been established. The conglomerate in inner fan mainly experiences compaction and lime-mud matrix recrystallization, with weak dissolution, so the physical properties of the conglomerate in inner fan keep reducing and the lime-mud matrix recrystallization results in a rapid reduction of physical properties of the conglomerate in inner fan in middle-deep layers. The present physical property of inner fan becomes extremely poor and mainly develops dry layers. Because two stages of acid dissolution reconstruct the reservoirs and the hydrocarbon filling inhibits cementation, the reservoirs far away from mudstone layers in the braided channels of the middle fan develop a great number of primary and secondary pores, have a higher porosity and permeability, and can be effective reservoirs of hydrocarbon. The reservoirs adjacent to mudstone layers in braided channels of the middle fan, the reservoirs in interdistributaries of the middle fan and outer fan develop intensive cementation and metasomatism, therefore they have poor physical property and mainly develop dry layers.

**Key words:** diagenesis evolution; the evolution of physical property; nearshore subaqueous fan; Es<sub>4</sub><sup>s</sup>; Bonan sag



图版 I 说明 A.义 110 井,3 397.67 m,(-),杂基含量高,强压实作用;B.渤深 6 井,3 830.6 m,(-),塑性云母压实变形;C.义 285 井,3 973.4 m,(-),颗粒线—凹凸接触;D.义 285 井,3 909.75 m,(-),颗粒压裂缝;E.义 283 井,4 054.3 m,(-),团块状菱铁矿,形似假杂基;F.义 173 井,4 116 m,(-),石英两期加大;G.义 110 井,3 386.07 m,(-),早期球粒状黄铁矿;H.义 173 井,4 116 m,(-),晚期块状黄铁矿胶结。



**图版 II 说明** A.义 173 井,4 116 m,图版 I-H 视域局部放大,反射光下显示金属光泽的块状黄铁矿胶结;B.义 110 井,3 383.47 m,扇根灰泥重结晶作用;C.义 285 井,4 179.25 m,扇根灰泥重结晶作用并交代颗粒;D.义 284 井,3 803.6 m,(-),铁方解石交代石英次生加大;E.义 173 井,4 115.6 m,(-),长石溶蚀孔隙部分被沥青充填;F.义 110 井,3 365.5 m,(-),长石溶蚀孔隙部分被铁方解石充填;G.义 282 井,3 597.6 m,(-),碳酸盐胶结物溶蚀孔隙;H.义 173 井,4 116 m,(-),石英加大边的溶解.