

文章编号: 1000-0550(2011)01-0001-13

# 惠民凹陷孔店组末端扇沉积及其储层特征<sup>①</sup>

张金亮<sup>1 2</sup> 李德勇<sup>1</sup> 司学强<sup>3</sup>

(1. 中国海洋大学海洋地球科学学院 山东青岛 266100;

2. 北京师范大学资源学院 北京 100875;

3. 中国石油杭州地质研究院 杭州 310023)

**摘要** 惠民凹陷孔店组为末端扇沉积,中部亚相是其沉积砂体的主体。根据岩芯观察并结合地震资料,将末端扇中部亚相划分为分流河道、河道漫溢和泥滩三种沉积微相。孔店组砂岩类型主要为中细粒的长石砂岩和岩屑长石砂岩。末端扇储层中发生了多种类型的成岩作用,主要的自生矿物包括黏土矿物、碳酸盐、石英和长石等。孔店组砂岩主要受到埋藏成岩作用的影响,成岩演化阶段正处于中成岩A期。孔店组末端扇储层性质受砂体微相和成岩作用的共同控制,发育绿泥石环边衬垫和塑性组分溶蚀成岩相的分流河道砂体的物性好于发育碳酸盐胶结和压实—充填成岩相的河道漫溢砂体。

**关键词** 末端扇 成岩作用 储层性质 成岩相

**第一作者简介** 张金亮 男 1962年出生 教授 博士生导师 石油地质学与储层沉积学 E-mail: jinliang@bnu.edu.cn

**中图分类号** P512.2 **文献标识码** A

随着国内外学者对河流体系及其伴生沉积研究的深入,形成于干旱气候条件下河流末端的砂质扇状堆积体—末端扇越来越多地被认识和接受。Mukerji和Friend首次提出了末端扇沉积的概念<sup>[1]</sup>,此后Parkash对末端扇体的岩相和沉积构造进行了详细的描述,第一次划分了末端扇的沉积相带<sup>[2]</sup>,Kelly和Olsen通过总结已有的研究成果构建了末端扇的沉积序列和相模式,将末端扇分为补给水道、分流河道和远端盆地三个相带<sup>[3]</sup>。从此,不同地区的末端扇沉积不断被发现和应用<sup>[4-6]</sup>,取得了较好的效果。

对于惠民凹陷孔店组沉积相的研究,前人做过很多工作,认为其属于洪水—漫湖沉积,同时许多学者对该地区的层序划分和原型盆地恢复进行过一些研究<sup>[7-11]</sup>,但对该地区储层的研究极其薄弱,其成藏地质条件尚处于推测阶段。笔者通过对钻遇孔店组砂岩的11口取芯井的岩芯描述,结合丰富的地震资料,将孔店组砂岩储层定为末端扇沉积,并通过铸体薄片、扫描电镜、X-射线衍射等多项分析测试方法,对孔店组砂岩岩石学特征、成岩作用和储层特征进行了分析和研究,旨在揭示优质储层的分布,为惠民凹陷深层油气的勘探提供一定理论依据。

## 1 地质背景

惠民凹陷位于渤海湾盆地济阳拗陷的西南部,是在中生代裂陷基础上发育的新生代断陷盆地,凹陷长轴大致呈NEE走向,面积约6 000 km<sup>2</sup>,是济阳拗陷内面积最大的一个次级凹陷,大致可分为中央隆起带、临南洼陷、南斜坡、滋镇洼陷、林樊家凸起及阳信洼陷等几个次级构造带。孔店组时期,惠民凹陷开始裂陷,受太平洋板块斜向俯冲产生的弧后扩张作用影响,盆内沉积主要受夏口断层的控制,具南断北超特征,此时,凹陷北部以及夏口断层以南向鲁西隆起的过渡地带均为缓倾斜坡,古气候较为干燥,湖盆周边水系不发达,受当时局限湖泊的控制,水体氧化性较强,孔三段和孔一段棕色及紫色沉积发育普遍,只有在孔二段下部发育了一套暗色泥岩沉积<sup>[1]</sup>。

## 2 末端扇沉积作用

末端扇是一种干旱—半干旱环境下发育于河流末端的特殊沉积形式,水流强度不大,沉积物大多暴露在地表,只有少部分远源溢岸沉积处于湖面以下。由于水体较浅且受到不同程度的氧化作用,导致末端

<sup>①</sup>国家“863”高技术研究发展计划项目(2006AA09Z336)资助; 国家科技支撑计划项目(2006BAC18B05)资助; 山东省自然科学基金项目(2009ZR02103)资助; 海洋公益性行业科研专项项目(200805029)资助  
收稿日期: 2009-11-05; 收修稿日期: 2010-01-15

扇沉积物多以中细粒砂岩沉积为主,砂岩中泥质含量高,砂岩颜色以棕色为主,泥岩沉积多为紫红色或棕色,缺乏暗色泥质沉积物。

## 2.1 沉积相分析

惠民凹陷孔店组末端扇沉积可划分为近端亚相、中部亚相及远端亚相三部分。从区内钻遇孔店组砂岩的探井取芯看,所见主要为末端扇中部亚相沉积,近端亚相主要发育在凹陷边缘埕宁隆起和鲁西隆起的根部,远端亚相则主要分布在古稳定水体的周边。

### 2.1.1 近端亚相

近端亚相主要由补给河道和河道间沉积物组成。河道砂岩主要为红色泥岩支撑的中—粗粒砂岩体或含砾砂岩体,间夹粉砂岩,碎屑成分混杂,分选很差,砂体垂向加积作用明显,河道底部具冲刷,上覆滞留大量的泥砾、泥屑甚至有少量砾石存在;河道间沉积物以厚层浅棕色泥岩夹薄层粉细砂岩为主,层理构造不发育。由于强烈的蒸发作用,河道间沉积物盐度达到饱和会出现岩盐沉积,位于商河背斜处的民深1井3 942~4 803 m孔一段中就出现了多层、厚度较大的石膏岩盐沉积<sup>[12]</sup>。由于近端亚相沉积物主要发育在隆起的根部,而这些区域内没有探井钻遇孔店组,所以在区内没有见到明显的近端沉积现象。

### 2.1.2 中部亚相

中部亚相是末端扇沉积体系中砂体的主要发育区,多分布在宽缓湖盆的边缘,岩性为厚层细砂岩和粉砂岩,局部存在中砂岩沉积。在古近纪初期,惠民凹陷夏口断裂以南地区地势平坦,末端扇中部亚相沉积分布范围较广,同时林商断裂以北地区,基底断层向南缓倾,也发育了广阔的末端扇中部亚相沉积。其可进一步划分为分流河道、河道漫溢和泥滩三种沉积微相。

末端扇分流河道,可有近源河道和远源河道两种形式。根据岩芯观察,研究区内两种河道类型均有发育。以盘深3井为例,其距宁津凸起的物源较近,分流河道砂体岩性以棕色中砂岩为主,底部多具明显的冲刷侵蚀构造(图1E),并富含棕色的泥砾泥屑,冲刷面之上发育小型的槽状或低角度交错层理(图1B和图1A),平行层理较发育(图1D),单砂层厚度在6~7 m之间,垂向剖面上会出现多个河道叠置的叠覆冲刷现象(图2A)。远源河道在夏23井比较发育,单砂层厚度多小于5 m,河道砂体底部的冲刷面变的不明显,多为微冲刷,冲刷面之上的槽状交错层理不发育,平行层理发育较多,少数为斜层理或低角度交错层理,丰富的平行层理说明水流是短期的但强度很大,这种径流模式恰好与现代半干旱地区的典型特征相符。

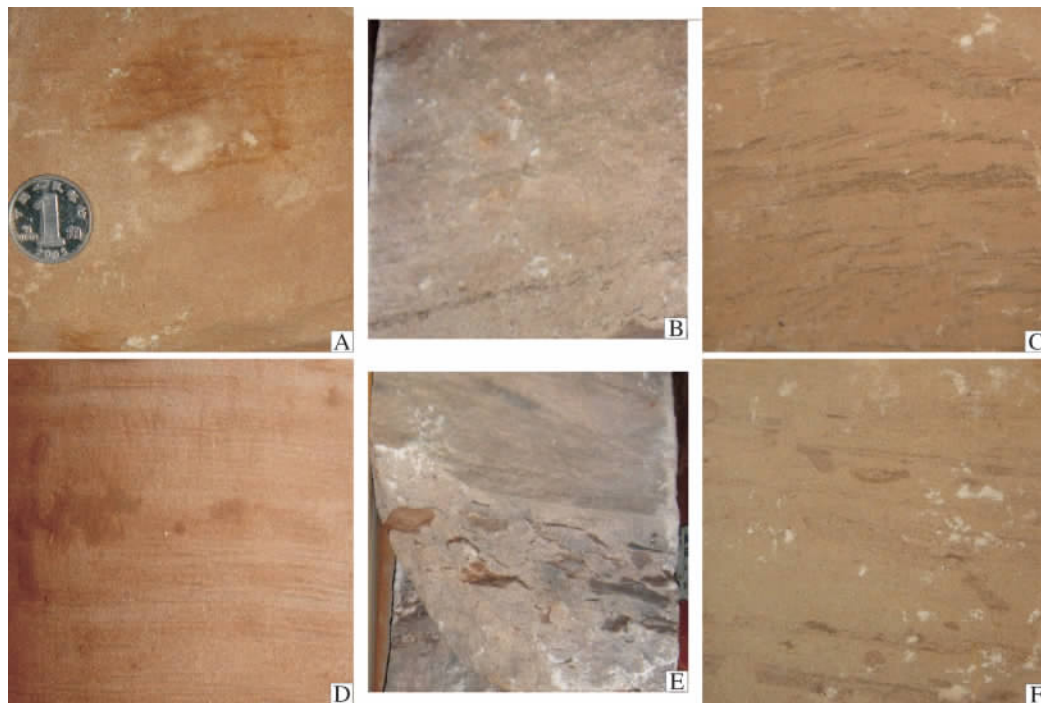


图1 孔店组末端扇沉积构造发育特征

A. 阳10井,低角度交错层理; B. 盘深3井,槽状交错层理; C. 阳10井,沙缓层理;  
D. 肖6井,平行层理; E. 盘深3井,冲刷侵蚀构造; F. 阳10井,生物成因构造

Fig. 1 Depositional structures of terminal fan in Kongdian Formation

河道漫溢是洪水期河道沉积物遭受侵蚀而溢出河岸形成的一种砂质沉积,可细分为近河道漫溢和远河道漫溢两种类型。近河道漫溢砂体泥质含量相对较低,以细砂岩为主,单砂层厚度相对较大,一般在 2~3 m 之间,由于沉积物常常被冲刷,因此该微相多以夹层的形式产出,主要为浅棕色泥岩夹薄层粉细砂岩,沉积构造以平行层理和水流沙纹层理为主(图 1D 和图 1C)。砂岩中富含植物炭屑。远河道漫溢分布在近河道漫溢砂体的外侧,岩性为浅棕色泥岩夹薄层粉砂岩、泥质粉砂岩,泥质含量远远高于砂质含量,呈明显的砂泥互层沉积(图 2C),可见生物潜穴和生物扰动构造(图 1F),单砂层厚度较小,多在 1~2 m 之间,自然电位曲线常呈指状,齿化严重。

泥滩微相主要发育在末端扇分流河道之间的低洼地区,由存在障碍的较浅洪水延伸沉积而形成,沉积作用以悬浮沉积为主,岩性主要有厚层紫红色、浅棕色泥岩,在洪水来临时,会出现漫溢成因的孤立薄层泥质粉砂岩沉积。砂层厚度多小于 1 m,微相中透镜状层理也较为发育,由小型的(几厘米)不完全的沙纹透镜体或者大的波浪透镜体(20 余厘米)所组成(图 2B),嵌于泥岩中,此外还常见生物扰动构造,电阻率曲线多呈中低幅枣核状,微电极曲线呈锯齿状,

自然电位曲线呈低平状。

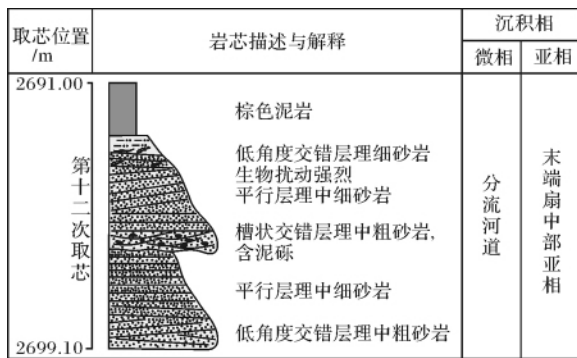
2.1.3 远端亚相

远端亚相位于中部亚相的前方,又称远端盆地。由于远离物源区和弱水动力作用环境的影响,沉积物很细,岩性以灰绿色、浅棕色泥岩为主,只有在特大洪水期,砂质沉积物供给充分,才有少量的泥质薄层砂沉积出现,砂层厚度多在 0.2~0.5 m 之间(图 2D)。受氧化作用影响,在宽缓的浅湖地带多形成以钙质胶结泥质粉砂岩为主的席状砂质浅滩。孔店组沉积时期,稳定水体主要分布在夏口断层和滋镇之间的地区及林樊家地区北部,远端亚相便分布在这些相对深水沉积的周边部位。

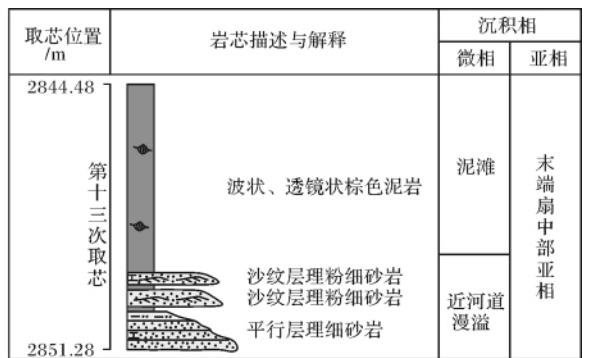
2.2 末端扇的识别与平面分布

2.2.1 末端扇与冲积扇的区别

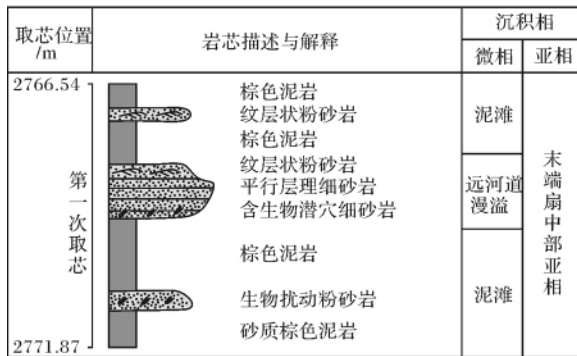
前人对于断陷湖盆发育的各种砂体进行过详细研究,但要确定其具体的沉积相类型还需要与实时的断裂构造演化相结合。孔店组时期,夏口断层控制了惠民凹陷的沉积演化,夏口断层北部到盘河——商河一带为此时的沉积和沉降中心。夏口断层以南地区整体持续隆起,地形宽缓,北部构造则主要受基底断层的控制,在基底断层的控制下惠民凹陷西部地层呈现向南缓倾的形态,直至与夏口断层相交,因此惠民



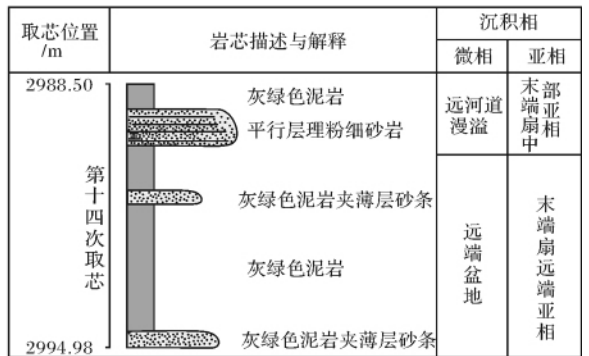
A.夏23井,中部亚相分流河道



B.夏23井,中部亚相近河道漫溢



C.盘深3井,中部亚相远河道漫溢与泥滩



D.夏23井,远端亚相

图 2 孔店组末端扇中部亚相沉积层序特征

Fig. 2 The depositional sequences of overbank in Kongdian terminal fan

表 1 末端扇和冲积扇的主要识别标志

Table 1 Recognition marks of terminal fan and alluvial fan

	末端扇	冲积扇
古地貌	盆地的宽缓斜坡或初始断裂缓倾带,地势开阔平坦,坡度骤然减小	断裂活动形成的由隆起区或山区向盆地或平原过渡的落差悬殊的突变地形
物源供给	受干旱气候和地形影响,河流流量流速剧减,碎屑供给不足,河流末端推进到不稳定水体中形成的砂质扇状堆积体	补给河道水量大,搬运能力强,近缘碎屑供给充足,辫状河道冲出谷口后形成的扇状砂砾岩堆积体
岩性特征	以中—细粒砂岩沉积为主,泥质含量高,在近端亚相或河道的底部存在部分粗砂岩或含砾砂岩沉积	主要为粗碎屑沉积,混杂砾岩、叠瓦状砾岩、砂砾岩及中粗砂岩常见,分选很差,
沉积构造	平行层理最为发育,河道冲刷面之上发育有小型的槽状交错层理且含有大量泥砾泥屑,漫溢沉积中还可可见水流沙纹层理和生物扰动,多为砂泥互层	层理构造复杂,可见大型的槽状或板状交错层理、递变层理和块状层理发育,河道冲刷—充填构造明显,平行层理和低角度层理不发育

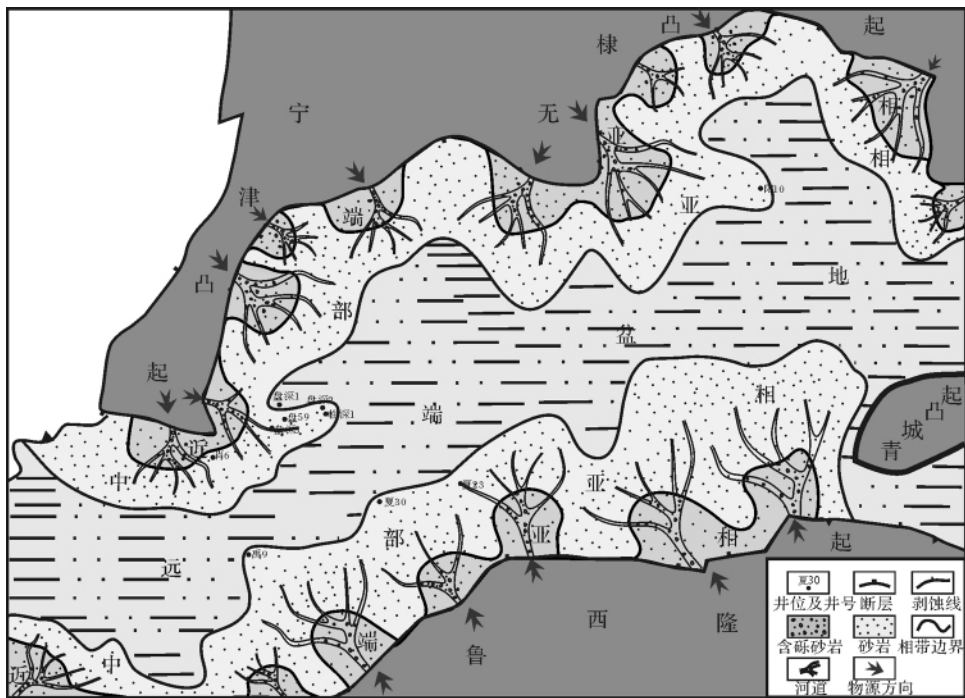


图 3 惠民凹陷孔店组沉积相分布

Fig. 3 The distribution of depositional facies of Kongdian Formation in Huimin depression

凹陷具备了末端扇发育的基本地质条件,并没有一般理解的冲积扇沉积体系的存在。本次研究从古地理环境、物源供给和沉积构造等方面分析了末端扇和冲积扇的不同(表 1),以期全面透彻把握末端扇沉积。

### 2.2.2 沉积相的平面分布

在湖泊沉积作用理论的指导下,利用丰富的地震资料与有限的取芯井岩芯的对比,绘制了孔店组的沉积相平面图。孔店初期,气候干旱,河流携带碎屑物质从两侧的鲁西隆起和埕宁隆起流出后,由湖泛平原

向盆地区推进。水流在推进的过程中能量不断减弱,因蒸发流量大大减小,同时河流不断分叉并逐渐向片流转变,碎屑物质大量沉积,最终在北部的缓倾带和南部夏口断层和鲁西隆起之间的宽缓斜坡上发育了大面积的末端扇沉积(图 3)。末端扇沉积体在地震剖面上有明显的反映<sup>[13,14]</sup>,靠近物源隆起的区域多为杂乱充填地震相,可视为近端亚相补给河道的地震反射特征;夏口断裂以南和临商断层以北的区域多发育中(弱)振幅中连续楔状相,是中部亚相的反射特

征;末端扇近端亚相和中部亚相的过渡地带多为前积相或透镜状地震相;强振幅高连续席状相则佐证了远端盆地层状泥质沉积的存在。

### 3 储层岩石学与成岩作用

#### 3.1 砂岩岩石学特征

惠民凹陷孔店组砂岩岩性以粉砂岩和细砂岩为主,含少量的中粗砂岩。砂岩粒径一般分在 0.01 ~ 0.46 mm 之间,结构成熟度中等,碎屑颗粒呈次棱角状,分选中等,颗粒间的接触关系以点—线接触为主,胶结类型主要为孔隙—基底胶结。碎屑中石英和燧石含量在 20% ~ 68% 之间,平均 50.71%,长石含量 14.1% ~ 45%,平均 33.68%,岩屑含量 1% ~ 40%,平均 15.61%。岩屑主要为变质岩岩屑,部分为中—酸性喷出岩和沉积岩岩屑。按福克砂岩分类<sup>[15,16]</sup>,孔店组砂岩主要为长石砂岩和岩屑长石砂岩,少数为长石岩屑砂岩(图4)。砂岩 X-射线衍射分析结果表明,矿物含量的平均值为:石英 55.43%,钾长石 5.83%,斜长石 14.88%,方解石 10.48%,白云石 3%,黄铁矿 1.12%,硬石膏 1.75%,黏土矿物 7.51%。

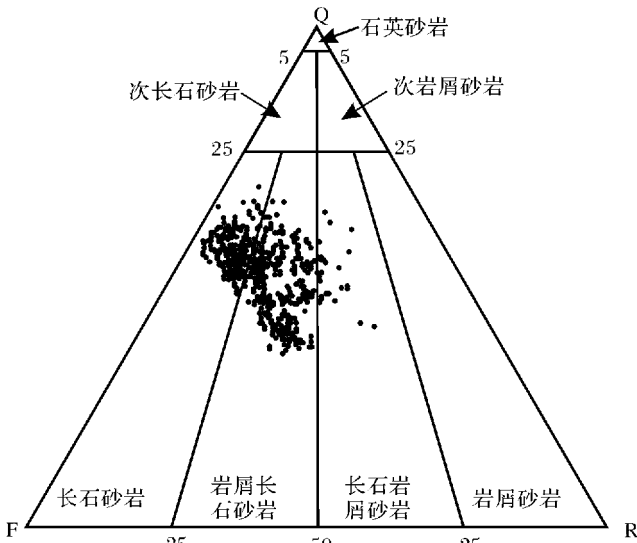


图4 惠民凹陷孔店组砂岩分类图

Fig. 4 The triangular plot of Kongdian sandstone types

#### 3.2 不同微相砂体的成岩差异

在沉积相研究的基础上,利用铸体薄片、扫描电镜和 X-射线衍射等测试手段,对惠民凹陷孔店组不同微相砂岩的成岩作用进行了对比分析,发现末端扇不同相带砂岩的成岩特征存在着明显差异,从而形成

主要由一种或两种成岩作用控制的多条成岩相带,不同微相带内的储层由于成岩相的不同导致了储渗性能的重大差别。

##### 3.2.1 压实作用

孔店组砂岩埋深大,成岩演化程度高,在埋藏成岩过程中经历了强烈的机械压实和化学压溶作用,导致碎屑颗粒被压裂、变形,甚至形成假杂基化,同时多数颗粒间的接触关系也变为紧密的缝合接触形态。压实作用的进行使得大量的原生孔隙被破坏,对储层性质产生了永恒的、不可逆的影响。压实作用的强度主要受埋藏深度的影响,而与岩石相带的关系不大,但是在埋深相近的条件下,压实作用对末端扇分流河道等结构成熟度较高砂岩储层的破坏程度要远远小于对远河道漫溢等泥质含量较高储层的影响。采用 Houseknecht 方法<sup>[17]</sup>计算得,孔店组末端扇中部亚相近源河道砂体的压实作用减孔量为 11.94%,远源河道砂体的压实减孔量为 15.97%,而近、远河道漫溢砂体的压实减孔量均超过了 20%,由此可知,河道漫溢砂体中压实作用的强度远远高于分流河道砂体(图5),砂体微相通过控制砂岩岩石结构间接影响了压实作用的强弱。

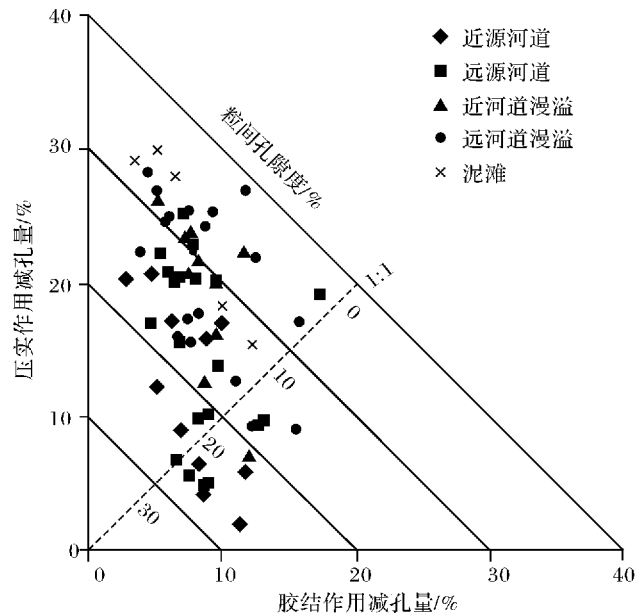


图5 末端扇不同微相砂体压实及胶结作用减孔三角图

Fig. 5 The triangular plot of compactional porosity loss versus cementation porosity loss of terminal fan

##### 3.2.2 胶结作用

惠民凹陷孔店组末端扇储层中主要的自生矿物有绿泥石和伊利石等黏土矿物以及碳酸盐、石英、长

石等,各种类型成岩矿物的含量变化较大,但趋向于在某个单一微相带内的砂岩中富集,导致成岩矿物类型在一定程度上存在按砂体相带分布的特点。

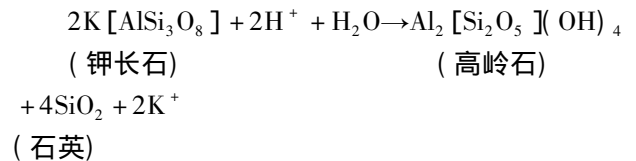
### (1) 黏土矿物

孔店组砂岩中的黏土矿物主要有绿泥石(Ch)、高岭石(K)、伊利石(I)和伊-蒙混层(I/S),其在各种类型的砂岩中均有分布,主要见于黏土基质含量较高的分流河道砂体的底部、远河道漫溢砂体的顶部或泥滩内的粉细砂岩中。黏土矿物由于受到埋藏成岩的影响,各种矿物的结构类型和数量随着埋藏深度的增加也会逐渐发生变化。

①绿泥石 绿泥石是孔店组砂岩中含量最高的自生黏土矿物,X-射线衍射分析其相对含量为34.6%,特别是在盘深3井的样品中相对含量更是达到了70%。扫描电镜下,绿泥石多表现为叶片状或针叶状,聚合体常呈玫瑰花瓣状或绒球状(图6A)。研究区绿泥石按产状可分为孔隙衬垫和孔隙充填两种类型。孔隙衬垫绿泥石是由放射状的绿泥石晶体以薄膜或环边的形式生长在碎屑颗粒表面形成的,环边厚度一般在5~10 μm之间,同时可见到长石溶蚀孔隙被绿泥石薄膜包裹的现象(图6B),这时的绿泥石衬垫对粒间孔隙以及溶蚀形成的粒内孔隙均起着保护作用。孔隙衬垫绿泥石主要发育于末端扇分流河道砂体中,这些砂体的原始孔渗性较好,而且绿泥石晶体间含有大量的微孔隙,可以允许酸性孔隙流体通过,有利于溶蚀作用对储层性质的改造<sup>[18]</sup>。绿泥石黏土膜的存在另一方面抑制了石英的次生加大,对原生粒间孔隙保存也起着积极作用。孔隙充填绿泥石主要形成于骨架颗粒溶蚀之后的较晚期成岩阶段(图6A),常与自生石英伴生(图6C、E),其在盘深3井的河道漫溢砂体中非常发育,既占据了孔隙空间又堵塞了喉道(图6D),使得储层储渗性能大大降低。禹9井孔一段绿泥石矿物的电子探针分析,各种氧化物含量为:Na<sub>2</sub>O 0.78%,MgO 6.52%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 21.59%,SiO<sub>2</sub> 33.54%,K<sub>2</sub>O 0.49%,CaO 0.29%,TiO<sub>2</sub> 0.06%,FeO 24.32%,其中铁含量较高,该种绿泥石可称为铁叶绿泥石。该井样品中见到了火山岩岩屑的溶蚀,可以说其为铁叶绿泥石的沉淀提供了铁质来源。

②高岭石 高岭石在孔店组末端扇储层中普遍可见,但含量偏低,相对含量只有7.27%,电镜下呈四角板状或不规则的板状,聚合体常呈书页状或蠕虫状充填于粒间孔隙内(图6E、F)。孔店组砂岩中的高岭石晶体受到了不同程度的溶蚀,且有时被伊利石

交代,导致高岭石晶面污浊,晶棱残缺不整齐(图6G)。区内的自生高岭石主要以孔隙充填的形态产出,它的这种产状收缩了孔隙,同时其集合体遇水破碎堵塞喉道,严重影响了储层的储集渗滤能力<sup>[19]</sup>。但是高岭石晶格间常存在着大量的残余微孔隙,并没有完全堵塞孔隙,反而在一定条件下对原生粒间孔隙的保存起着积极作用,同时大量高岭石的出现多与长石等硅酸盐矿物的溶蚀有关(图6H),因此,高岭石的富集往往意味着储层的高孔渗性。所以,可明显看出孔店组中的高岭石主要分布在末端扇分流河道砂体中,少数出现在远源河道的底部和河道漫溢砂体中。长石溶蚀为高岭石的沉淀提供了必要的物质来源,化学反应式可表述如下:



③伊利石 伊利石是本区储层中常见的一种黏土矿物类型,含量较高,平均相对含量为28.43%。扫描电镜观察伊利石多呈丝片状或卷曲波状充填孔隙,或以絮状膜形态披盖于颗粒表面(图6F)。波片状伊利石常在碎屑颗粒间形成黏土桥,分割粒间孔隙,严重影响储层的渗透性;伊利石表膜由于其致密的产状,对提高储层性质也没有太大的意义。伊利石在末端扇各种微相砂体中有广泛分布,但在远源河道的底部、河道漫溢和泥滩中特别发育。区内可见伊利石交代高岭石的现象(图6G),因此高岭石的成岩演化是伊利石形成的一个重要来源。在成岩演化中,孔店组砂岩中的伊利石含量是随着深度增加而逐渐增多的。

④伊-蒙混层 黏土矿物的X-射线衍射分析结果表明,惠民凹陷孔店组砂岩中广泛存在着伊-蒙混层矿物,伊-蒙混层比在20%左右。电镜中,伊-蒙混层矿物的形态介于蒙脱石和伊利石之间,系由蒙脱石成岩演化而来,多以棉絮状包膜和孔隙充填物的形式出现(图7A),常见于末端扇近、远河道漫溢和泥滩内的粉细砂岩中。

### (2) 碳酸盐胶结物

碳酸盐矿物是研究区极为普遍的胶结物,其中最重要的是方解石和白云石,多以充填物的形式存在。薄片中方解石含量平均4.34%,个别样品中高达18%,是孔店组砂岩中含量最高的一类胶结物。白云石含量在0.11%~5%之间,平均1.12%。显微镜



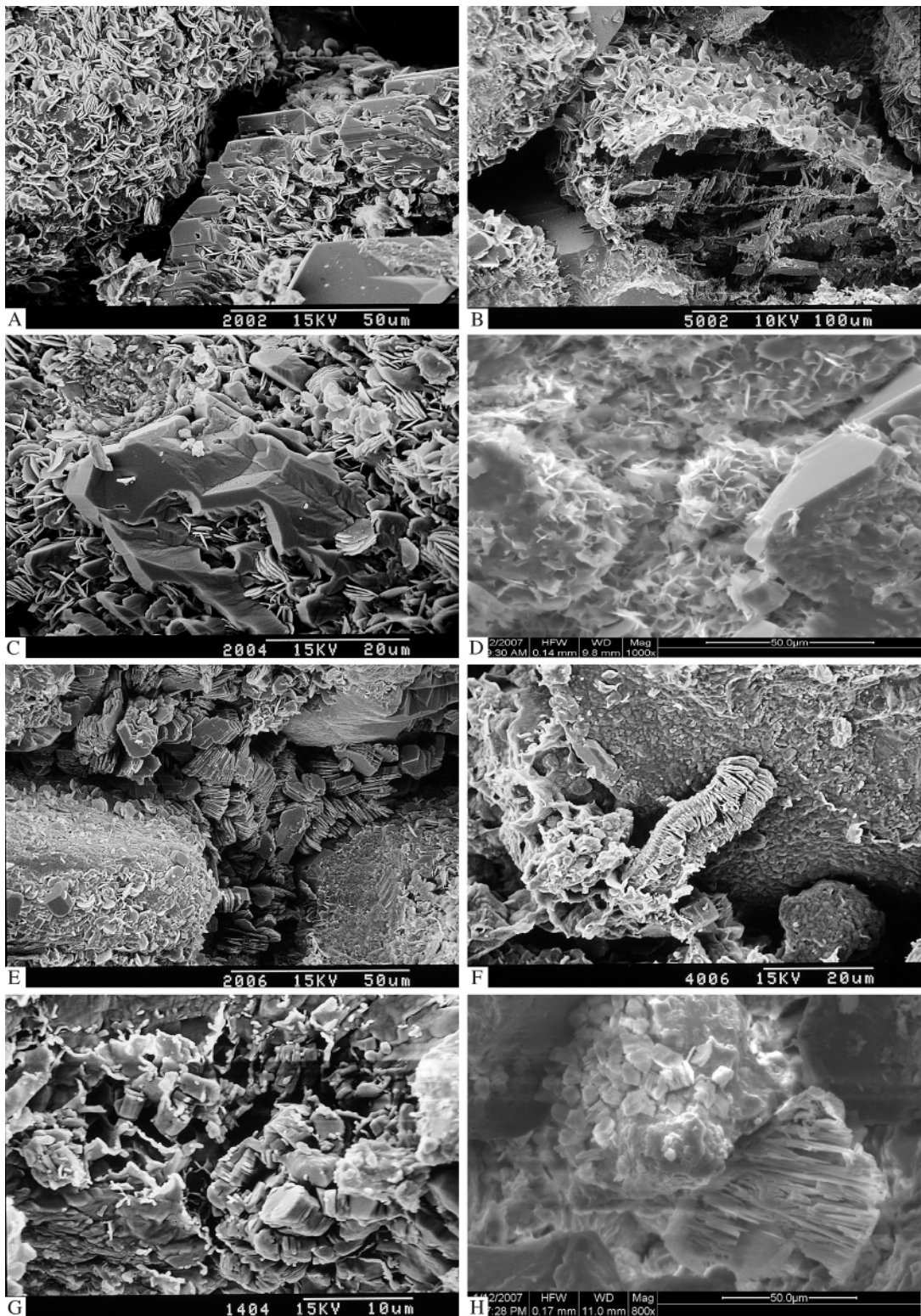


图 6 惠民凹陷孔店组砂岩中自生矿物的扫描电镜特征

(A) 粒表绿泥石衬垫、长石溶蚀孔隙内绿泥石的生长及其表面的长石加大现象, 盘 59 井 2 498.95 m; (B) 长石被溶蚀成残骸状、溶孔被绿泥石包膜包裹, 盘深 2 井 3 063.59 m; (C) 石英加大边包裹自生绿泥石矿物, 盘 59 井 2 498.95 m; (D) 孔隙充填绿泥石与石英次生加大, 盘深 3 井 3 572.14 m; (E) 粒间孔隙内的书页状高岭石与粒表的自生石英和绿泥石矿物, 盘 59 井 2 498.95 m; (F) 蠕虫状高岭石与粒表絮状伊利石膜, 阳 10 井 2 279.77 m; (G) 表面被波片状伊利石交代污浊的高岭石, 复 30 井 3 531.53 m; (H) 长石溶蚀现象与高岭石沉淀, 肖 6 井 2 000.52 m;

Fig. 6 SEM photomicrographs showing

(A) grain-coating chlorite, chlorite in the feldspar dissolved pore and feldspar overgrowth (Well P59, 2 498.95 m); (B) feldspar dissolution and its chlorite-coat (Well Ps2, 3 063.59 m); (C) overgrowth quartz and chlorite (Well P59, 2 498.95 m); (D) pore-filling chlorite and overgrowth quartz (Well Ps3, 3 572.14 m); (E) book-textured kaolinite, authigenic quartz and chlorite on detrital grain (Well P59, 2 498.95 m); (F) vermicular kaolinite and illite in the pores (Well Y10, 2 279.77 m); (G) kaolinite substituted and vitiated by illite (Well X30, 3 531.53 m); (H) dissolved feldspar and kaolinite (Well X16, 2 000.52 m)

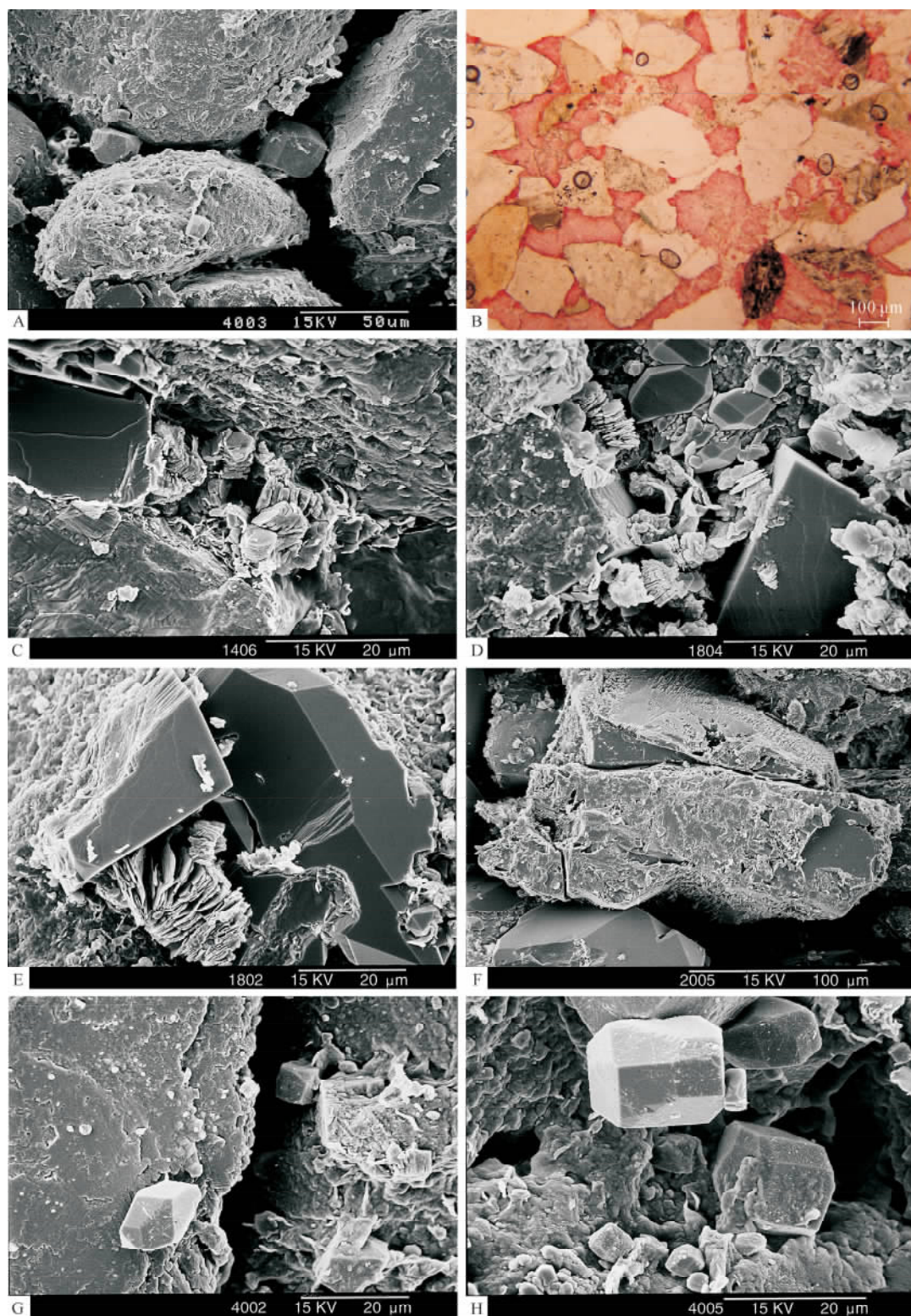


图 7 惠民凹陷孔店组砂岩中自生矿物的铸体薄片和扫描电镜特征

(A) 粒表棉絮状的伊-蒙混层矿物和粒间孔隙内的方解石自形晶, 阳 10 井, 2 279.77 m; (B) 基底胶结方解石及其内部的被交代碎屑残骸, 夏 23 井, 3 148.18 m, 铸体片; (C) 粒间孔隙内的方解石, 夏 30 井, 3 531.53 m; (D) 孔隙内的白云石菱形晶体与粒表的自生石英, 夏 23 井, 2 213.41 m; (E) 被溶蚀的白云石晶体、石英加大边与高岭石生长, 夏 23 井, 2 213.41 m; (F) 石英的平直加大边与长石颗粒溶蚀, 盘 59 井, 2 498.95 m; (G) 粒表的自生石英晶体与粒间孔隙的方解石晶体, 阳 10 井, 2 279.77 m; (H) 板条状和粒状钠长石晶体, 阳 10 井, 2 279.77 m

Fig. 7 Optical and SEM photomicrographs showing

(A) flocculent I/S on grains and calcite in intergranular pores (Well Y10, 2 279.77 m); (B) basal calcite and detrital wreckage (Well X23, 3 148.18 m); (C) calcite crystal in the intergranular pore (Well X30, 3 531.53 m); (D) dolomite in pores and authigenic quartz on detrital grains (Well X23, 2 213.41 m); (E) dissolution of dolomite and precipitation of overgrowth quartz and kaolinite (Well X23, 2 213.41 m); (F) overgrowth quartz and the dissolution of feldspar (Well P59, 2 498.95 m); (G) authigenic quartz and calcite in the pore (Well Y10, 2 279.77 m); (H) lath-shaped and granular albite (Well Y10, 2 279.77 m)



下,常常在砂岩样品中见到方解石嵌晶状的基底胶结现象(图7B),由此看来,区内的方解石胶结物多形成于埋藏作用的早期阶段。方解石的这种产状造成了储层中孔隙的封闭,导致后期溶蚀作用很难发生,形成了难以改造的致密低渗透层。区内方解石还常常伴有交代碎屑的现象,特别是对斜长石的选择交代,导致碎屑边缘呈不规则的锯齿状,甚至将整个碎屑颗粒全部交代,只残留斑点状的碎屑残骸(图7B)。扫描电镜下,方解石和白云石多呈立方体或菱面体(图7A、C、D),还见到被溶蚀成不规则状的白云石晶体(图7E)。连晶方解石对储层性质产生着重要影响,主要发育于远源河道、近河道漫溢和远河道漫溢砂体中,这些砂体沉积时具有一定的孔隙性又不利于酸性流体的流动,为大量方解石的生成提供了条件。

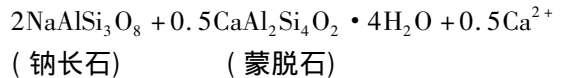
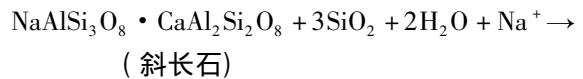
### (3) 石英次生加大与自生

石英的加大和自生现象在孔店组储层中较普遍,薄片统计石英胶结物含量一般0.5%~4.66%,平均2.07%。由于碎屑表面存在着黏土环边,显微镜下常见到不连续的石英加大边。扫描电镜中,可见为恢复碎屑面子棱直的规则几何外形的石英平直加大边(图7E、F),同时在石英颗粒表面和次生溶蚀孔中常见到大量晶形完好的自生石英晶体出现(图7D、G),显示了晚期成岩作用的特点。碎屑石英的次生加大程度在Ⅱ~Ⅲ级之间。长石的溶蚀和黏土矿物的转化为石英的沉淀提供了物质来源<sup>[20-21]</sup>。石英的次生加大现象在几乎每个样品中均有发现,但在末端扇分流河道和近河道漫溢砂体中非常明显。分流河道砂体泥质含量低,孔渗性好,特别有利于石英的再生长;而近河道漫溢砂体虽然泥质含量增高,但压溶作用增强,石英碎屑的压溶生长也较强烈。石英次生加大发育的近河道漫溢储层质量明显低于分流河道砂体。荧光显微镜下,中央隆起带处盘深2井和临深1井样品的石英加大边和裂纹中见到了次生液态烃包裹体,大小介于5~10 μm之间,形态为椭圆形或圆形,均一温度在75.5~125.5℃之间,主要分布在80~90℃和100~110℃两个区间内,这说明惠民凹陷应有两期油气注入事件发生。

### (4) 长石加大和自生

长石颗粒的加大和自生现象在本区储层中并不普遍,薄片中的含量也不高,一般在0.5%~2%之间,平均只有0.93%,仅有部分斜长石具有较为光洁的加大边(图6A),经电子探针分析,加大边的钠含量较高。扫描电镜下也可观察到板条状或粒状钠长

石晶体充填孔隙的现象(图7H)。长石胶结多出现在碎屑长石溶蚀的中细砂岩中,对储层性质的影响不大。区内斜长石的钠长石化作用随深度增加越来越强,且常与钾长石溶蚀相伴生,这显然是由钠长石化作用造成的<sup>[22-23]</sup>。斜长石向钠长石转化的反应式为:



### 3.2.3 溶蚀作用

惠民凹陷孔店组砂岩样品中常见到长石、火山岩岩屑和黏土基质的溶蚀,碳酸盐的溶蚀少见。镜下观察长石沿解理溶蚀成窗格状或残骸状(图6B、H),岩屑溶蚀则形成蜂巢状,由此形成的粒内孔和骨架颗粒溶孔是研究区最重要的次生孔隙类型。孔店组砂岩中溶蚀作用产生的次生孔隙量在2%~5%之间,对储层性质的改善起着积极的作用。溶蚀作用主要发生于地层流体流动畅通的末端扇分流河道和部分近河道漫溢砂体中。

### 3.3 成岩演化模式

根据孔店组砂岩中自生矿物的种类和形成次序,尤其是黏土矿物的组合类型和伊-蒙混层矿物的转化以及包裹体的均一温度、有机质成熟度、古温度及埋藏史等多项指标,可以确定惠民凹陷孔店组砂岩经历了早成岩和中成岩期,现在正处于中成岩的A期(图8)。

惠民凹陷自形成以来,主要经历了一次大的构造转型期,即喜山晚期东营运动造成的盆地整体抬升和剥蚀的反转期,这次构造作用对惠民凹陷孔店组砂岩的成岩演化过程产生了极其重要的影响。本次研究参考前人成果<sup>[24]</sup>,取古地表温度为15℃,地温梯度4.4℃/100m,取现今地表温度14℃,地温梯度3.5℃/100m,并结合孔店组的埋藏史曲线,对其成岩演化过程进行了详细研究,认为:自开始沉积至东营运动前期,孔店组砂岩主要受渐进埋藏作用影响,其埋藏深度不断加大,地温逐渐升高,碎屑岩逐渐进入了中成岩A期。早成岩阶段,碎屑颗粒的粒表开始出现较多的黏土薄膜,特别是形成了大量的孔隙衬垫绿泥石包膜,绿泥石衬垫的出现对砂岩中原生粒间孔隙的保存起着积极作用;同时早期的方解石胶结物也逐渐的沉淀析出,并在局部砂岩中形成了致密的基底胶结结构,这种现象在盘深2井孔二段砂岩中非常明显。进入中成岩的A期,区内沙四上亚段暗色泥岩埋深已超

过 2 500 m 进入了生烃门限<sup>[25~27]</sup> 局部地区生油岩有机质热演化释放出的酸性孔隙水使得孔店组砂岩中长石颗粒被溶解成蜂巢状或残骸状;伊-蒙混层开始大量转化为伊利石,同时作为孔隙充填物的绿泥石矿物的含量大大增多。需要说明的是东营运动前,惠民凹陷局部埋深较大的地区可能已进入中成岩的 B 期。东营运动期间,惠民凹陷整体被抬升,但孔店组砂岩并未进入到表生成岩阶段。东营运动停止后,惠民凹陷继续沉降接受充填,孔店组砂岩随着深度的持续埋深继续接受埋藏成岩作用,现今已进入中成岩 A 期。

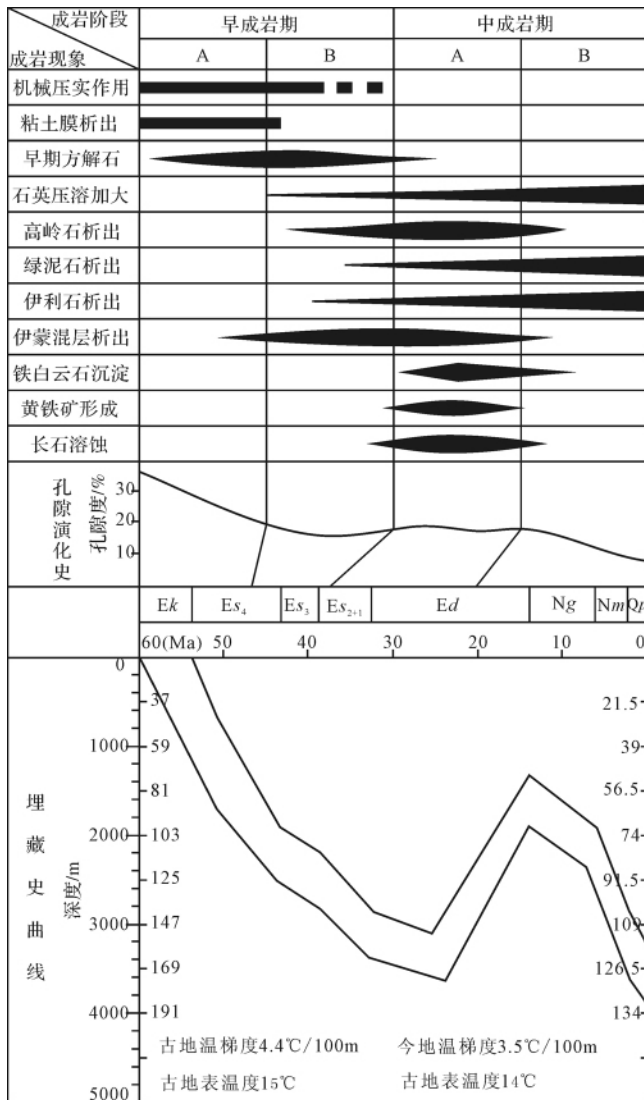


图 8 惠民凹陷孔店组砂岩成岩演化阶段

Fig. 8 Diagenetic stages of Kongdian Formation in Huimin depression

#### 4 沉积和成岩作用对储层性质的影响

© 沉积作用宏观上控制着砂体的厚度、规模及空间

展布,微观上影响着砂岩碎屑颗粒的大小、填隙物的种类和含量以及岩石结构的好坏等,所以其对储层的原始性质起着决定性的作用;但储层在后期漫长的埋藏演化过程中,又必然会遭受各种成岩事件的强烈改造,因此可以说成岩作用是储层最终形成的关键因素。对于同一相带的储集层来说,储层性质是成岩作用强度的函数,相同沉积微相储层正是由于成岩作用的差异而造就了不同的储渗性能。

末端扇中部亚相是孔店组储层的主体,研究中选取中部亚相分流河道、河道漫溢及泥滩微相中的砂岩进行了储层物性分析。结果可知,沉积物粒度较粗、厚度较大、砂质纯净的河道砂的储集物性明显好于各种粒度较细、厚度偏薄且泥质含量较高的河道漫溢和泥滩微相砂岩(表 2)。沉积微相通过控制砂岩的岩石结构,而影响着砂岩的孔隙结构,进而决定了储层性质的好坏。如末端扇分流河道砂岩碎屑颗粒粗大,黏土基质含量少,往往具有较高的储渗能力;河道漫溢砂岩由于黏土基质含量增高,大大促进了机械压实作用进行,而且黏土基质的存在抑制了地下流体的流动,特别不利于储层的改造。末端扇不同微相砂体的物性存在明显的差别。

表 2 惠民凹陷孔店组砂岩沉积微相与储集物性

Table 2 Relationship between reservoir microfacies and properties in Kongdian sandstones

砂体微相	层位	孔隙度/%			渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$			
		最大	最小	平均	最大	最小	平均	
分流河道	河道近源	Ek <sub>1</sub>	24.20	10.10	18.96	439.48	0.71	134.68
		Ek <sub>2</sub>	16.70	6.50	13.60	30.00	0.97	4.56
	河道远源	Ek <sub>1</sub>	23.20	10.90	16.66	187.19	0.15	37.14
		Ek <sub>2</sub>	15.60	8.20	14.25	6.11	0.30	2.25
河道漫溢	漫溢近河道	Ek <sub>1</sub>	12.30	2.16	9.62	10.83	0.33	2.26
		Ek <sub>2</sub>	14.80	1.95	10.32	6.10	0.11	1.03
	漫溢远河道	Ek <sub>1</sub>	12.28	1.80	7.72	2.59	0.19	0.63
		Ek <sub>2</sub>	11.34	3.10	7.17	4.51	0.13	1.39
泥滩	Ek <sub>1</sub>	7.00	2.16	5.31	0.47	0.00	0.14	
	Ek <sub>2</sub>	5.81	0.80	3.97	0.72	0.00	0.07	

成岩相是储层环境和成岩作用的综合响应,与储层质量有着密切的联系。通过成岩相的研究,可以对不同微相砂体中成岩作用影响储层性质的程度进行评价<sup>[28]</sup>。在详细分析发生于末端扇不同微相砂体中主要成岩作用特征的基础上,研究区划分出了塑性组分溶蚀、绿泥石环边衬垫、碳酸盐胶结、压实-充填及石英次生加大五种成岩相类型。不同的成岩相类型是末端扇不同微相砂体成岩变化和储渗性能演化的

综合响应。

(1) 塑性组分溶蚀成岩相 以长石、火山岩岩屑、黏土基质及少量的碳酸盐胶结物溶蚀为特征,是中深部储层性质改善的必要条件。该成岩相较发育,分布丰度以末端扇分流河道微相砂体为主,次为近河道漫溢微相。这些砂体的原始孔渗性较好,有利于酸性流体的流动,因此易发生溶蚀作用。储层中发育较多的溶蚀孔隙,常构成高渗透性储层。

(2) 绿泥石环边衬垫成岩相 碎屑粒表发育大量的绿泥石矿物,形成包裹整个颗粒的黏土薄膜。绿泥石包膜的存在一方面阻碍了压实作用的进行,限制了石英和长石碎屑的增长,保存了原生粒间孔隙,同时晶间微孔隙可允许酸性流体自由通过,有利于次生溶孔的生成。该成岩相少见,多出现于发生溶蚀的分流河道砂体中,砂体往往具有较好储集渗透能力。

(3) 碳酸盐胶结成岩相 具此类成岩相的砂岩具有很高的碳酸盐含量,多由早期连晶状的孔隙充填方解石基底胶结而成。常常见于末端扇远源河道、近河道漫溢和远河道漫溢微相的粉细砂岩中,其特有的嵌晶胶结形式使得储层变得特别致密。发育该成岩相的储层孔渗性很差,多为非储集层。

(4) 压实—充填成岩相 该成岩相发育广泛,多见于黏土矿物和黏土基质含量较高的泥质砂岩中,主要分布于分流河道的底部、远河道漫溢以及泥滩微相中。由该类成岩相控制的储层颗粒细,黏土胶结物等软组分含量高,强烈的机械压实作用使原生孔隙大大减少,同时胶结物大量充填孔隙,导致储层储集和渗透性能大大降低。

(5) 石英次生加大成岩相 砂岩以石英的次生加大胶结为主,缺乏其他类型的胶结物,与石英的强烈压溶有关。孔店组砂岩中石英的次生加大现象多见,但绝大多数未达到成岩相的标准,所以对储层性质的影响不大。仅见于少数分流河道和近河道漫溢砂体中,与塑性组分溶蚀成岩相和碳酸盐胶结成岩相有一定的伴生关系,储层性质不好。

实际上,砂体微相和成岩作用并不是独立地对储层性质产生影响,两者是相辅相成不可分割的。砂体微相通过对砂岩岩石结构的控制,较大程度上影响着储层埋藏成岩过程中成岩作用的类型和强度,从根本上决定了储层的原始储渗性能,所以,惠民凹陷孔店组末端扇优质储层的分布与沉积微相有着直接的联系,平面上受控于砂体微相的展布。

## 5 结论

(1) 孔店组沉积时期,惠民凹陷处于盆地的初始裂隙阶段,受当时干旱气候影响,湖盆水系流量骤减,由河流携带的来自鲁西隆起、宁津凸起和无棣凸起的碎屑物源在位于凹陷宽缓斜坡上的河流尾部形成了分布宽广的末端扇沉积,沉积物主要为棕色的中细粒砂岩。中部亚相是末端扇沉积砂体的主体,包括分流河道、河道漫溢和泥滩三种沉积微相,主要的层理构造有平行层理、小型槽状交错层理、低角度交错层理及沙纹层理,也常见冲刷侵蚀构造和生物潜穴等生物成因构造。

(2) 孔店组砂岩类型主要为中细粒的长石砂岩和岩屑长石砂岩。储层经历了压实作用、胶结作用和溶蚀作用的强烈改造,主要的成岩矿物有绿泥石、伊利石、方解石、石英、长石、高岭石和伊-蒙混层等。不同的成岩作用类型趋向于在单一微相砂体中强烈发生,并控制储层形成。压实作用在杂基含量高砂岩中的强度明显偏大;黏土胶结作用主要在末端扇分流河道底部、河道漫溢和泥滩微相砂岩中发生,碳酸盐胶结现象主要见于近、远河道漫溢砂体;溶蚀作用则在砂岩结构成熟度高的分流河道砂体中常见。

(3) 根据埋藏史研究,东营运动前,孔店组主要受到渐进埋藏成岩作用的影响,储层持续埋深,地温逐渐升高。储层经历早成岩阶段后进入了中成岩的A期,局部地区已进入中成岩的B期。东营运动期间,惠民凹陷被整体抬升并逐渐接近地表,盆地遭受剥蚀,但孔店组砂岩并未进入表生成岩环境。随着东营运动停止,惠民凹陷继续沉降并接受沉积充填,孔店组砂岩再次进入深埋成岩期,现已进入中成岩A期。

(4) 孔店组末端扇储层性质主要受砂体微相和成岩作用的影响。砂体微相决定了储层的原始储渗性能,成岩作用则对储层的最终形成起着关键作用。孔店组砂岩中划分出了塑性组分溶蚀、绿泥石环边衬垫、碳酸盐胶结、压实—充填及石英次生加大五种成岩相类型,成岩相类型是不同微相砂体成岩变化和储渗性能演化的综合响应。发育塑性组分溶蚀和绿泥石环边衬垫成岩相的末端扇分流河道砂体多为较好的油气储集层,发育碳酸盐胶结和压实—充填成岩相的河道漫溢砂体的物性往往较差。孔店组末端扇储层性能表现为按相带类型分布的相控特点。

## 参考文献 (References)

- 1 Mukerji A B. Terminal fans of inland streams in Sutlej-Yamuna Plain, India[J]. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 1976, 20: 190-204
- 2 Parkash B, Awasthi A K, Gohain K. Lithofacies of the Markanda terminal fan, Kurukshetra district, Haryana, India [C] // Collinson J D, Lewin J. *Modern and Ancient Fluvial Systems*. Oxford: Blackwell Publication, 1983: 337-374
- 3 Kelly S B, Olsen H. Terminal fans: a review with reference to Devonian examples[J]. *Sedimentary Geology*, 1993, 85: 339-374
- 4 Newell A J, Tverdokhlebov V P, Benton M J. Interplay of tectonics and climate on a transverse fluvial system, Upper Permian, Southern Uralian Foreland Basin, Russia [J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 127: 11-29
- 5 张金亮, 戴朝强, 张晓华. 末端扇——在中国被忽略的一种沉积作用类型[J]. *地质论评*, 2007, 53(2): 170-179 [Zhang Jinliang, Dai Chaoqiang, Zhang Xiaohua. Terminal fan: a type of sedimentation ignored in China[J]. *Geological Review*, 2007, 53(2): 170-179]
- 6 张金亮, 谢俊. 储层沉积相[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 81-98 [Zhang Jinliang, Xie Jun. *Reservoir Facies Models* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 81-98]
- 7 许建华, 肖焕钦. 惠民凹陷盘河地区孔店组石油地质特征研究[J]. *复式油气田*, 2000, 12(4): 53-56 [Xu Jianhua, Xiao Huanqin. Petroleum geology of Kongdian Formation in Panhe area in Huimin depression [J]. *Multiple Oil-gas Field*, 2000, 12(4): 53-56]
- 8 吴崇筠, 薛叔浩. 中国含油气盆地沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993: 66-75 [Wu Chongyun, Xue Shuhao. *Sedimentology of Oil and Gas Bearing Basin in China* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993: 66-75]
- 9 谯汉生, 方朝亮, 牛嘉玉, 等. 渤海湾盆地深层石油地质[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 50-63 [Qiao Hansheng, Fang Chaoliang, Niu Jiayu, et al. *Petroleum Geology of Deep Formation in Bohai Bay Basin* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 50-63]
- 10 李丕龙. 富油断陷盆地油气环状分布与惠民凹陷勘探方向[J]. *石油实验地质*, 2001, 23(2): 146-148 [Li Pilong. Zonal distribution of hydrocarbon in oil-enriched rifted basins and exploration direction in the Huimin sag [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2001, 23(2): 146-148]
- 11 王建伟, 赵勇生, 田海芹. 东营-惠民凹陷孔店组层序地层学研究[J]. *石油大学学报*, 2001, 25(6): 1-5 [Wang Jianwei, Zhao Yongsheng, Tian Haiqin. Primary study of sequence stratigraphy of Kongdian Formation in Dongying Huimin sag [J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 2001, 25(6): 1-5]
- 12 岳志鹏, 曾俊, 高志卫, 等. 惠民凹陷孔店组-沙四段“膏盐岩”层沉积机理——以MS1井“膏盐岩”层分析为例[J]. *石油勘探与开发*, 2006, 33(5): 591-595 [Yue Zhipeng, Zeng Jun, Gao Zhiwei, et al. Sedimentation mechanism of "gypsum rock" in Kongdian Formation and Sha 4 Member of Shahejie Formation in Huimin Sag [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(5): 591-595]
- 13 尹兵祥, 王尚旭, 杨国权, 等. 渤海湾盆地东营-惠民凹陷古近系孔店组孔二段地震相与沉积相[J]. *古地理学报*, 2004, 6(1): 49-56 [Yin Bingxiang, Wang Shangxu, Yang Guoquan, et al. Seismic facies and sedimentary facies of the Member 2 of Kongdian Formation of Paleogene in Dongying and Huimin sags, Bohai Bay Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(1): 49-56]
- 14 张鑫, 张金亮. 胜坨地区沙三下砂砾岩体沉积特征与沉积模式[J]. *石油学报*, 2008, 29(4): 530-535 [Zhang Xin, Zhang Jinliang. Depositional feature and mode of sand-conglomerate bodies in the lower third member of Shahejie Formation in Shengtuo area [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2008, 29(4): 530-535]
- 15 Folk R L. *Petrology of Sedimentary Rocks* [M]. Texas: Hemphill Press, 1968: 107
- 16 刘宝珺. 沉积岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1980: 146-149 [Liu Baojun. *Sedimentary Petrology* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1980: 146-149]
- 17 Houseknecht D W. Assessing the relative importance of compaction processes and cementation to reduction of porosity in sandstones [J]. *AAPG Bulletin*, 1987, 71: 633-642
- 18 张金亮, 司学强, 梁杰, 等. 陕甘宁盆地庆阳地区长8油层砂岩成岩作用及其对储层性质的影响[J]. *沉积学报*, 2004, 22(2): 226-232 [Zhang Jinliang, Si Xueqiang, Liang Jie, et al. Diagenesis of lacustrine deltaic sandstones and its impact on reservoir quality [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(2): 226-232]
- 19 张金亮, 刘宝珺, 毛凤鸣, 等. 苏北盆地高邮凹陷北斜坡阜宁组成岩作用及储层特征[J]. *石油学报*, 2003, 24(2): 43-49 [Zhang Jinliang, Liu Baojun, Mao Fengming, et al. Clastic diagenesis and reservoir characteristics of Funing Formation in north slope of Gaoyou Depression in Subei Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(2): 43-49]
- 20 Zhang Jinliang, Qin Lijuan, Zhang Zhongjie. Depositional facies, diagenesis and their impact on the reservoir quality of Silurian sandstones from Tazhong area in central Tarim Basin, western China [J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2008, 33: 42-60
- 21 Zhang Jinliang, Jia Ying, Du Guilin. Diagenesis and its effect on reservoir quality of Silurian sandstones, Tabei Area, Tarim Basin, China [J]. *Petroleum Science*, 2007, 4(3): 1-13
- 22 张金亮, 沈凤. 东濮凹陷桥口地区沙三段碎屑岩成岩作用与储层特征[J]. *矿物岩石*, 1990, 10(1): 35-42 [Zhang Jinliang, Shen Feng. Clastic diagenesis and reservoir properties of the third member of Shahejie Formation, Qiaokou area, Dongpu depression [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 1990, 10(1): 35-42]
- 23 沈凤, 张金亮. 鲁西凹陷九佛堂组储层成岩作用[J]. *石油学报*, 1995, 16(2): 23-30 [Shen Feng, Zhang Jinliang. A study of the diagenesis of the reservoir in Jiufotang Formation, Luxi depression [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1995, 16(2): 23-30]
- 24 苏向光, 邱楠生, 柳忠泉, 等. 济阳坳陷惠民凹陷热演化史分析[J]. *天然气工业*, 2006, 26(10): 15-17 [Su Xiangguang, Qiu Nansheng, Liu Zhongquan, et al. An analysis of thermal evolution of Huimin sag in Jiyang depression [J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(10): 15-17]
- 25 陈建渝, 彭晓波, 张冬梅, 等. 济阳坳陷古新世孔店组生烃潜能



- 评价[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(3): 17-20 [Chen Jianyu, Peng Xiaobo, Zhang Dongmei, *et al.* Evaluation of the hydrocarbon generation potential for the Kongdian Formation of Palaeocene in Jiyang Depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(3): 17-20]
- 26 谭丽娟, 蒋有录. 渤海湾盆地东营—惠民凹陷油气成藏模式和油气富集控制因素[J]. 石油实验地质, 2003, 25(4): 366-370 [Tan Lijuan, Jiang Youlu. Pool-forming Ratterns of hydrocarbon and controlling factors of hydrocarbon enrichment in the Dongying and the Huimin sags[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(4): 366-370]
- 27 朱芒征, 陈建渝. 惠民凹陷临南洼陷下第三系烃源岩生烃门限[J]. 油气地质与采收率, 2002, 9(2): 35-37 [Zhu Mangzheng, Chen Jianyu. Hydrocarbon generating threshold of the source rocks in Palaeogene of Linnan subsag in Humin sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2002, 9(2): 35-37]
- 28 钟广法, 鄢宁芬. 成岩相分析: 一种全新的成岩非均质性研究方法[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(5): 62-66 [Zhong Guangfa, Wu Ningfen. Diagenetic lithofacies analysis: a new approach to studying diagenetic heterogeneity [J]. Petroleum Exploration and Development, 1997, 24(5): 62-66]

## Deposition and Reservoir Characteristics of Terminal Fan in Kongdian Formation of Huimin Depression

ZHANG Jin-liang<sup>1 2</sup> LI De-yong<sup>1</sup> SI Xue-qiang<sup>3</sup>

- (1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong 266100;  
2. College of Resource Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875;  
3. Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou 310023)

**Abstract** Sedimentary facies of Kongdian sandstones is terminal fan. Middle zone is the main part of the tripartite terminal fan which can be divided into distributary channel, overbank and mudflat according to observation and description of cores combined with the numerous data of seismic. The sandstones type of Kongdian Formation are of fine-medium grained arkose and lithic arkose. Terminal fan sandstone has undergone many types of diagenesis. Authigenic minerals in Kongdian reservoir include clay minerals, carbonate, quartz, feldspar and so on. Based on the study of burial history, the diagenetic stage of Kongdian Formation is in A period of mesodiagenesis. Reservoir quality of terminal fan in Kongdian Formation is mainly controlled by sandbody microfacies and diagenesis. Sedimentary microfacies resolves reservoir's original physical property, while diagenesis dominates final status of sandstone reservoir. There exists five diagenetic lithofacies in Kongdian sandstone, for example plastic composition dissolution lithofacies, chlorite gasket lithofacies, carbonate cementation lithofacies, compaction and filling lithofacies, quartz overgrowth lithofacies and so on. Diagenetic lithofacies is comprehensive reflection of diagenetic change and reservoir evolution of different microfacies sand. Distributary channel sandstone in connection with plastic composition dissolution or chlorite coating lithofacies is usually nice hydrocarbon pay bed, whereas overbank sandstone related with carbonate cementation or compaction and filling lithofacies is often low permeability layer. Terminal fan reservoir shows facies controlled feature.

**Key words** terminal fan; diagenesis; reservoir quality; diagenetic lithofacies