

文章编号:1000-0550(2016)01-0158-10

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2016.01.015

# 车西洼陷陡坡带沙三下亚段近岸水下扇储层成岩演化及其对储层物性影响

曹刚<sup>1</sup> 王星星<sup>2,3</sup> 朱筱敏<sup>2,3</sup> 曲全工<sup>1</sup> 吴陈冰洁<sup>2,3</sup> 贺敬聪<sup>2,3</sup> 戴博毅<sup>2,3</sup>

(1.中国石化胜利油田地质科学研究所 山东东营 257015;2.油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249;

3.中国石油大学(北京)地球科学学院 北京 102249)

**摘要** 利用岩芯观察、铸体薄片、扫描电镜、阴极发光及岩石物性测试等多种资料,本文对济阳坳陷车西洼陷陡坡带沙三下亚段近岸水下扇储层进行了探讨。结果表明,车西洼陷沙三下段近岸水下扇储层岩石类型宏观上主要表现为泥质杂基支撑砾岩、碎屑支撑砾岩、砾质砂岩等沉积,微观上以岩屑砂岩和长石质岩屑砂岩为主,灰泥质杂基含量最高可达40%。车西洼陷沙三下段近岸水下扇储层为典型的特低孔、特低渗储层类型,其平均孔隙度和渗透率分别为3.42%、 $2.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;但在3 500~4 000 m深度段发育异常高孔带,孔隙度可达10.2%,储集空间多为溶蚀孔和微裂缝。研究区储层经历了复杂的成岩演化过程,目前处于中成岩B期,其成岩演化序列为:压实作用/碳酸盐胶结→长石溶蚀/碳酸盐胶结物溶蚀→石英溶蚀/碳酸盐胶结/灰泥重结晶→石英加大/碳酸盐胶结溶蚀→碳酸盐胶结。不同亚相所经历的成岩演化有所差异,其中中扇辫状水道中远端及中扇前缘经历了多期溶蚀作用,储层物性相对较好,平均孔隙度分别可达4.5%、7.25%,为研究区近岸水下扇砂砾岩储层的“甜点区”。

**关键词** 车西洼陷 近岸水下扇 成岩演化 储层物性

**第一作者简介** 曹刚 男 1966年出生 学士 高级工程师 油田开发地质 E-mail: caogang@sinopec.com

**通讯作者** 朱筱敏 男 教授 E-mail: xzmzhu@cup.edu.cn

**中图分类号** P618.13 **文献标识码** A

## 0 引言

近年来,随着我国陆相断陷湖盆油气勘探程度的不断深入,其陡坡带的砂砾岩储层目前正逐渐成为主要的油气勘探阵地之一,并已取得了重大突破。由于断陷湖盆陡坡带砂砾岩体以重力流沉积为主,可形成近源粗粒的冲积扇、扇三角洲、近岸水下扇及滑塌扇沉积,这些不同沉积成因的砂砾岩储层所经历的成岩作用、成岩演化和物性发育特征均有所差异,总体形成了低孔低渗储层<sup>[1]</sup>。但是在低孔低渗含油气区中常常存在相对优质储层的高产油藏<sup>[2]</sup>。对于近岸水下扇成因的砂砾岩储层,中扇辫状水道储层物性较好<sup>[1,3-4]</sup>,为近岸水下扇沉积中主要的优质储层发育相带。但不同埋深的近岸水下扇砂砾岩储层所经历的成岩演化及其对储层物性的影响有所差异,随着我国陆上油气勘探不断向深层拓展,明确深层砂砾岩储层成岩演化过程及其对储层物性的影响具有重要意义。

车西洼陷陡坡带沙三下亚段的砂砾岩体为近岸

水下扇成因,其埋藏深度多大于3 500 m,最深达到4 521 m。根据我国2005年国土资源部发布的《石油天然气储量计算规范》,车西洼陷砂砾岩储层为深层储集层<sup>[5]</sup>。深层储集层在埋藏过程中通常经历了较长的地质历史时期,多次成岩时间的叠加使储集层发育控制因素更加复杂<sup>[6]</sup>。前人对车镇凹陷储层的研究多集中于大王北和郭局子洼陷以及车66扇体<sup>[7-8]</sup>,对车西洼陷陡坡带沙三下亚段近岸水下扇储层的研究较少,目前对车西洼陷储层认识程度相对较低。研究区车57井、车古25井以及车15-1井等虽在初期获得了一定产量,但产能递减较快<sup>[7]</sup>;而车71井则稳产较高。显然,沙三下亚段储层质量明显影响了油气产量,因而明确车西洼陷陡坡带深层砂砾岩储层特征及其主控因素,将有助于优质储层“甜点区”的预测和油气产量的提高。

## 1 地质背景

车镇凹陷位于渤海湾盆地济阳坳陷北部,北部以

收稿日期:2015-01-07; 收修改稿日期:2015-04-15

基金项目:国家自然科学基金项目(41272133); 国家科技重大专项专题(2011ZX05001-002-01) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, NO.41272133; National Science and Technology Major Project, NO.2011ZX05001-002-01]

埡南断裂为界,南部超覆于义和庄凸起之上,西接庆云凸起和无棣凸起,东临沾化凹陷,面积约为 2 390 km<sup>2</sup>[8]。盆地的形成和沉积格局受北部埡南断裂活动的控制,是一个典型的北断南超、北深南浅的箕状断陷湖盆[9]。车镇凹陷东西分区、南北分带,自西向东可依次划分为车西、大王庄、郭局子 3 个洼陷;每个洼陷自北向南可依次划分为北部陡坡带、中央洼陷带及南部缓坡带(图 1)。

车镇凹陷古近纪经历了三个构造演化阶段:沙四期初始断陷阶段,沙三一沙二下期强烈断陷阶段和沙二上一东营期断陷萎缩阶段。本文研究的古近系沙三下亚段时期处于强烈裂陷阶段,其南北绝对伸展量达 1 779 m,气候潮湿多雨,湖平面不断上升,沉积物供给量充足,沉积速率平均达 335.6 m/Ma[10]。与此同时,车西洼陷边界断层样式以板式和铲式为主,利于发育近岸水下扇[9],扇体沉积厚度变化较大,介于 500~1 000 m,自内扇向外扇砂砾岩厚度迅速减薄。

本文研究区位于车西洼陷陡坡带,其面积约为 300 km<sup>2</sup>。由于目前研究区勘探程度相对较低,区内仅有 4 口取芯井,其中位于断层根部的车 58 井岩相类型多为具块状层理的泥质杂基支撑砾岩,主要表现为内扇沉积特征;距离边界断层稍远的车 57 井和车古 25 井中的砂砾岩岩相多为块状层理、反递变层理的碎屑支撑砾岩,主要表现为中扇沉积特征;远离边界断层的车 63 井则主要表现为外扇沉积特征,可见典型的具鲍马序列的粉细砂岩沉积(图 1)。研究区沙三下亚段砂砾岩与油泥岩紧密相邻,具有较好的生储盖配置关系而有利于成藏[11]。

笔者主要依据研究区 4 口取芯井共计 149 m 岩芯资料、57 块铸体薄片、245 块样品的常规物性分析

资料以及 24 块黏土矿物分析资料等储层物性分析测试数据,采用宏观、微观相结合的研究手段对车西洼陷沙三下亚段近岸水下扇砂砾岩储层特征进行综合研究,探讨了车西洼陷沙三下亚段近岸水下扇储层成岩演化及其对储层物性影响,以期指导车西洼陷深部砂砾岩储层的勘探开发。

## 2 储层基本特征

### 2.1 岩石学特征

车西洼陷陡坡带沙三下亚段砂砾岩类型较为复杂,包括杂基支撑砾岩、碎屑支撑砾岩、砾质砂岩、含砾砂岩、砂岩及粉砂岩沉积。其中砾岩、砾质砂岩、含砾砂岩中碎屑颗粒粒度分选极差,砾石粒径不等,以中砾石为主;成分以白云岩和石灰岩砾石为主,也可见少量的火山岩砾石和泥岩撕裂屑。其中碳酸盐砾石磨圆度相对较好,为次棱一次圆,且多发生破碎,部分裂缝中充填方解石。研究区碎屑支撑砾岩和杂基支撑砾岩主要为内扇主水道及中扇辫状水道近端沉积,其单层沉积厚度较大,多为 3~5 m(车 58 井区);含砾砂岩、中—粗砂岩主要为中扇辫状水道中、远端沉积,其单层平均厚度约为 1~2 m(车 57、车 71 井区);粉、细砂岩多为中扇前缘及中扇辫状水道间沉积,单层厚度相对较薄,多小于 1 m(车 161 井区)。

砾石之间的砂级碎屑颗粒对砂砾岩储层物性与成岩特征具有重要影响。因而选取砂砾岩样品中砾石之间部位以及砂岩样品制备铸体薄片。研究区车 57、车 58、车古 25 及车 63 等 4 口井 57 块铸体薄片观察结果表明,砂级碎屑颗粒以岩屑砂岩和长石质岩屑砂岩为主(图 2)。石英平均相对含量为 14%;长石平均相对含量为 18%;岩屑平均相对含量为 68%,岩屑

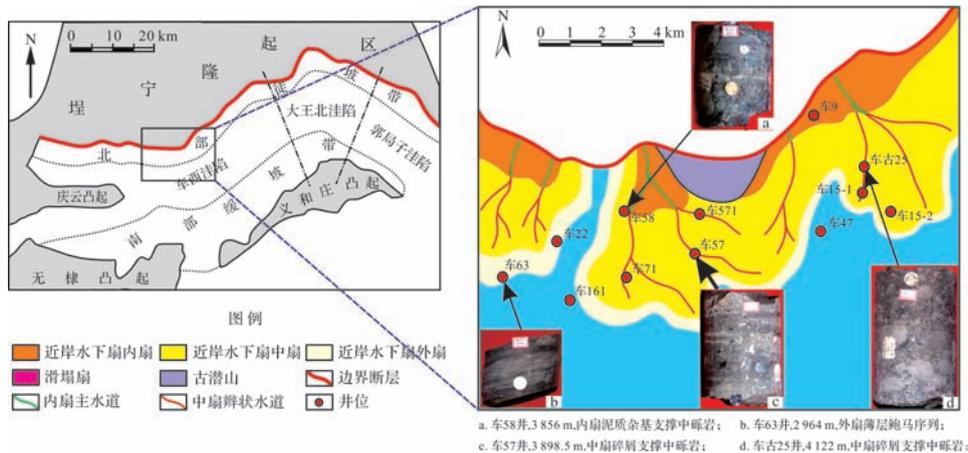


图 1 车镇凹陷构造单元及车西洼陷陡坡带沙三下亚段沉积相平面图

Fig.1 The tectonic units of the Chezheng Sag and the sedimentary facies of Es<sub>3</sub><sup>X</sup> in the steep slope zone of the western Chezheng sub-sag

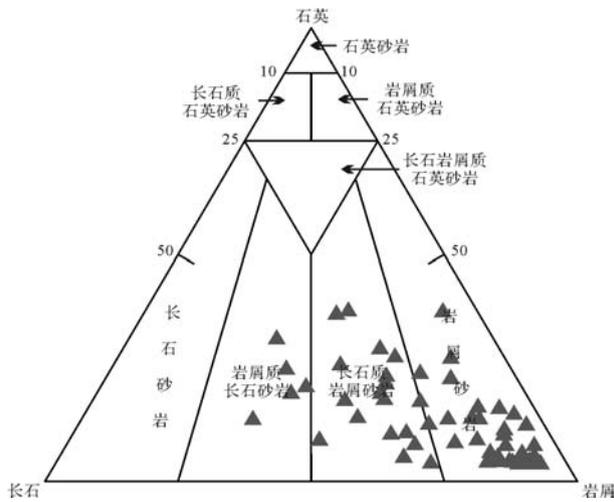


图2 车西洼陷陡坡带沙三下亚段岩石组分三角图

Fig.2 Ternary diagram of sandstone of  $E_{s3}^X$  in the steep slope zone of the western Chezhen sub-sag

成分主要为陆源碳酸盐岩屑。结构成熟度较低,分选、磨圆较差。颗粒之间填隙物含量较高,杂基以灰泥质成分为主,其绝对含量最高可达40%,反映了近岸水下扇重力流沉积特征;胶结物成分包括方解石、白云石、铁方解石,以钙质胶结为主,绝对含量为1%~15%;此外,还发育少量的硅质和黏土矿物胶结,两者绝对含量不超过5%。

## 2.2 储层物性特征

车西洼陷4口取芯井245块样品常规物性分析结果表明,沙三下亚段砂砾岩储层孔隙度为0.5%~10.2%,平均为3.42%;渗透率为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 43.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ,平均为 $2.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图3a)。根据中华人民共和国石油天然气行业标准《油气储层评价方法》

(SY/T6285—2011),车西洼陷沙三下亚段砂砾岩储层主要为特低孔特低渗储层。其中,内扇车58井、中扇辫状水道近端车古25井及外扇车63井的储层平均孔隙度小于3%,而中扇辫状水道中、远端及中扇前缘储层平均孔隙度较高,分别可达4.5%和7.25%。沙三下亚段砂砾岩储层孔隙度与渗透率之间相关性较差,部分低孔对应相对较高的渗透率,这主要是由裂缝的沟通作用促使低孔储层的渗透率增大(图4f);而相对高孔隙度对应相对较低的渗透率,则主要是因为储层泥质杂基含量较高(图4a),使得孔隙之间的连通性变差。垂向上,随着埋深增加,压实作用增强,孔隙度逐渐减小。但是,在井深3500~4000 m发育异常高孔带(图3b),其孔隙度最高可达10.2%,通过对该深度范围内储层微观孔隙结构的观察表明,该高孔带中原生孔隙含量极少,而发育较多的呈港湾状的次生溶蚀孔以及铸模孔(图4a,c,e)。

## 2.3 储集空间特征

车西洼陷沙三下亚段砂砾岩储层的储集空间类型以溶蚀孔和裂缝为主。溶蚀孔类型较为复杂,主要为长石溶蚀粒间孔(图4a),其相对含量可达80%以上;其次为碳酸盐岩胶结物溶蚀(图4b),其相对含量约为12%;另还可见到少量的石英溶蚀、碳酸盐岩屑溶蚀及砾缘缝(图4c,d,e),其相对含量约为8%。但是由于近岸水下扇系重力流沉积,其中泥质杂基含量较高,溶蚀孔间的连通性较差,溶蚀孔在位于中扇部位的车57井和车古25井相对更为发育(图4a~d)。裂缝主要为地层超压破裂所致,裂缝多切穿碳酸盐岩砾石以及粒间胶结物,延伸距离变化较大,裂缝宽度主要为0.03~0.1 mm(图4f),少数可达0.5 mm,主要

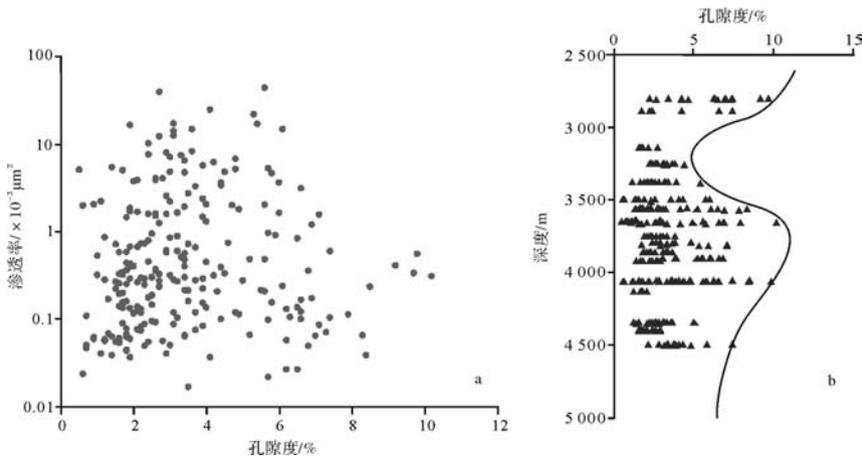


图3 车西洼陷陡坡带沙三下亚段储层孔渗关系和孔—深关系图

Fig.3 Core porosity versus core permeability cross-plot for  $E_{s3}^X$  in the steep slope zone of the western Chezhen sub-sag

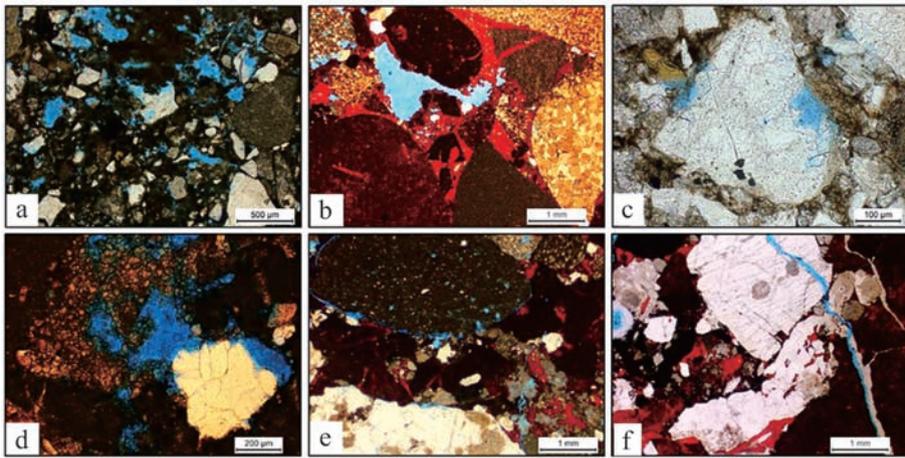


图4 车西洼陷陡坡带沙三下亚段镜下储集空间类型

a.长石溶蚀形成铸模孔,泥质杂基含量较高,孔隙间连通性较差,车57井,3 558.2 m;b.碳酸盐胶结溶蚀孔,车古25井,4 341.5 m;c.石英边缘溶蚀,车57井,3 654.1 m;d.白云岩岩屑溶蚀孔,石英边缘也发生部分溶蚀,车古25井,4 341.5 m;e.砾缘缝,车58井,3 554 m;f.强烈压实作用导致颗粒破裂形成微裂缝,裂缝宽度约为0.1 mm,车古25井,3 913 m。

Fig.4 Microscopic reservoir spaces types of  $E_3^X$  in the steep slope zone of the Western Chezhen sub-sag

为早期裂缝在后期得到进一步地溶蚀扩大。次生孔隙与裂缝在成因上具有一定的相关性,两者可以形成复合型储集空间<sup>[12]</sup>。

### 3 成岩作用特征

车西洼陷陡坡带沙三下亚段砂砾岩埋藏深度加大,经历了较为复杂的成岩作用,与此同时,由于近岸水下扇不同的亚相的砂砾岩沉积特征有所不同,从而导致了不同相带成岩作用的差异<sup>[3]</sup>。岩芯观察、铸体薄片、阴极发光观察以及X射线衍射分析表明,车西洼陷近岸水下扇沉积的砂砾岩储层自沉积以来经历了较强的压实作用,多期胶结、多期溶蚀作用,灰泥杂基重结晶作用以及交代作用。其中灰泥杂基重结晶作用和交代作用对储层质量的影响相对较小。研究区近岸水下扇砂砾岩储层现今主要处于中成岩B期。

#### 3.1 成岩作用类型及其特征

##### 3.1.1 压实作用

铸体薄片鉴定表明,车西洼陷陡坡带近岸水下扇在埋藏过程中经历了强烈的机械压实作用。其原因主要是由于近岸水下扇沉积为近源快速沉积,沉积物颗粒分选、磨圆较差且含有大量的泥质杂基,加之车西洼陷陡坡带沙三下亚段埋深多为3 500 m以下,埋藏深度较大,从而使得其压实作用较为强烈,颗粒之间多以线接触为主,如车58井的3 256.5 m深度处(图5a),石英颗粒发生破裂形成微裂缝,如车古25

井3 913 m及车58井4 052.8 m深度处(图4f、图5g),并且可见石英颗粒的多晶消光,原生孔隙含量极少。

##### 3.1.2 胶结作用

研究区沙三下亚段近岸水下扇发育多种胶结类型,可见黏土矿物胶结、硅质胶结以及碳酸盐胶结,其中以碳酸盐胶结为主。

研究区黏土矿物主要包括高岭石、伊利石、绿泥石及伊/蒙混层,其总含量范围位于5%~20%之间,且随着深度的增大黏土矿物含量整体呈增高趋势(图6)。其中伊/蒙混层(图5b)含量最高,平均相对含量为40.7%,其次为伊利石(图5c),平均相对含量为36.6%,高岭石(图5d)、绿泥石的平均相对含量较低,分别为15.8%、6.9%。随着埋深的加大,高岭石、绿泥石含量逐渐减少,而伊/蒙混层、伊利石含量逐渐增高(图6)。硅质胶结主要表现为石英的次生加大,如车58井4 051.4 m深度处(图5e),但其发育较少,主要是由于近岸水下扇沉积富含杂基,其生长自由空间受限,因而石英次生加大少见<sup>[13]</sup>。

由于车西洼陷陡坡带沉积物中富含碳酸盐岩母岩成分,碳酸盐胶结是其最主要的胶结形式,包括方解石、铁方解石、白云石以及铁白云石胶结。研究区碳酸盐胶结发育早晚两期,早期以方解石和白云石为主,晚期碳酸盐胶结主要为含铁方解石,如车57井3 898.3 m深度处(图5f)。研究区白云石与方解石、铁方解石胶结相伴生,晶形较好,可见粗粉晶的白云

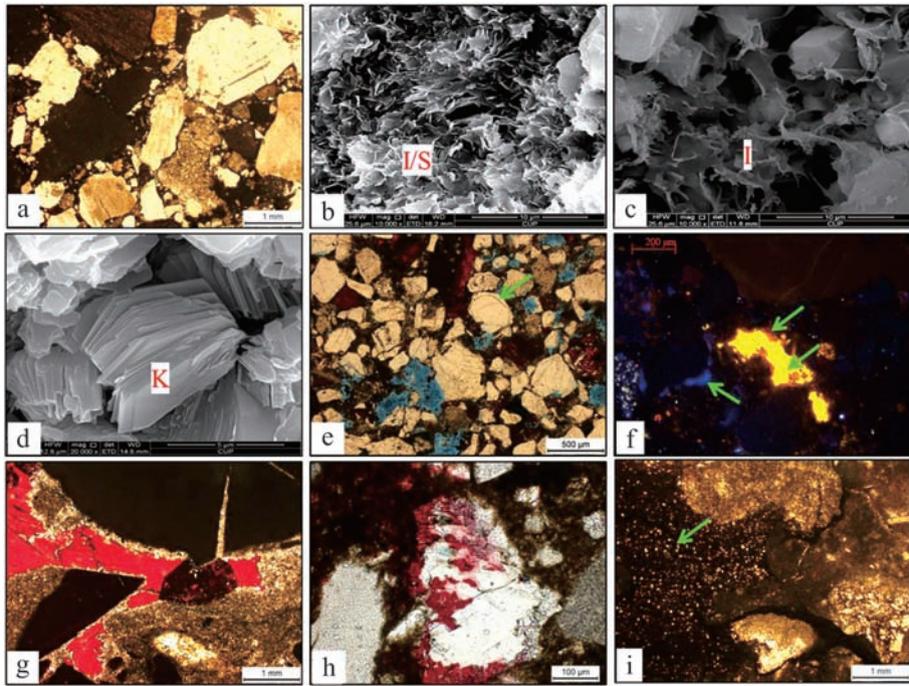


图5 车西洼陷陡坡带沙三下亚段微观成岩作用特征

a.碎屑颗粒分选较差,压实作用强烈,孔隙基本不发育,车58井,3 256.5 m;b.孔隙中充填片状伊蒙混层 I/S,车57井,4 059.76 m,SEM,×10000;c.孔隙中充填细鳞片状伊利石 I,车63井,2 886.7 m,SEM,×10000;d.孔隙间充填六边形自生高岭石 K,车57井,3 788.9 m,SEM,×20000;e.石英次生加大,加大边宽度约为0.04 mm,车58井,4 051.4 m;f.孔隙中充填有靛蓝色高岭石胶结及多期方解石胶结,早期方解石胶结呈橘黄色,其外侧发育晚期方解石胶结,呈暗棕色,阴极发光,车57井,3 898.3 m;g.岩屑颗粒间发育两期碳酸盐胶结,即呈红色的方解石胶结及其边缘未被染色的粗粉晶白云石胶结,后者为晚期交代成因,车58井,4 052.8 m;h.长石颗粒溶蚀后被方解石胶结,车57井,3 658.3 m;i.碎屑颗粒之间的灰泥杂基发生灰泥重结晶作用,形成微亮晶白云石,车58井,3 857.3 m。

Fig.5 Microscopic diagenetic features of  $E_3^X$  in the steep slope zone of the western Chezhen sub-sag

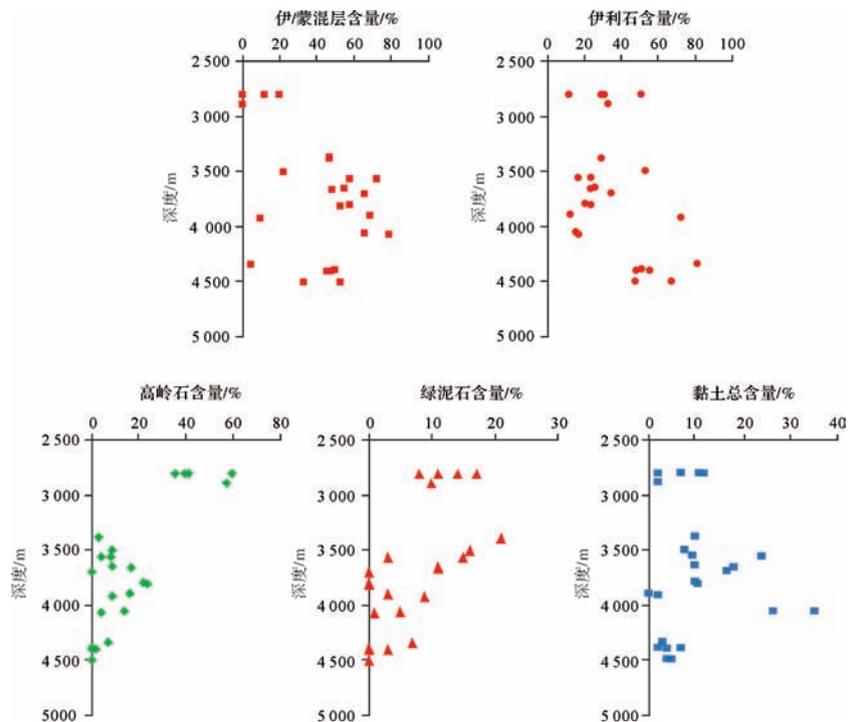


图6 车西洼陷陡坡带沙三下亚段黏土矿物相对含量—深度关系图

Fig.6 The content of the clay minerals versus depth cross-plots for  $E_3^X$  in the steep slope zone of the western Chezhen sub-sag

石。白云石多沿碎屑颗粒边缘分布,交代早期的方解石,如车58井4 052.8 m深度处(图5g),表明后期富含镁离子的地层水沿着颗粒边缘进入孔隙,发生白云石化作用。碳酸盐胶结物主要填充在溶蚀孔和裂缝之间,如车58井4 052.8 m及车57井3 658.3 m深度处(图5g,h),表明晚期碳酸盐胶结主要发育于溶蚀作用之后。

### 3.1.3 溶蚀作用

溶蚀作用是近岸水下扇优质储层形成的重要因素。通过铸体薄片分析表明,研究区的溶蚀作用主要为长石溶蚀和碳酸盐胶结溶蚀,其次为碳酸盐岩岩屑溶蚀和少量的石英溶蚀。由于车镇凹陷沙四段和沙三下亚段烃源岩较为发育<sup>[11]</sup>,研究区陡坡带扇体与深洼区烃源岩紧密相邻,因而有机质成熟释放的有机酸促使了溶蚀作用的发生<sup>[14]</sup>,垂向上主要发育于3 500~4 000 m之间(图3b)。根据化学自反应自由能大小,有机酸首先溶蚀长石,其次才是对碳酸盐胶结物的溶蚀<sup>[1]</sup>,因而在有机酸作用下,长石颗粒溶蚀形成铸模孔等次生孔隙,孔隙半径可达500 μm,如车57井3 558.2 m深度处(图4a),对储层孔隙度的提升具有重要作用,其次是碳酸盐胶结物的溶蚀,如车古25井4 341.5 m深度处(图4b)。由于研究区随着有机质的成熟,有机酸发生脱羧作用并发生油气充注,地层水pH增大,形成碱性流体环境,石英颗粒发生溶蚀作用<sup>[15]</sup>,溶蚀程度相对较低,多沿石英颗粒边缘发生部分溶蚀,如车57井3 654.1 m深度处(图4c)。

### 3.1.4 灰泥重结晶作用

车西洼陷北部陡坡带物源主要来自于埕宁隆起,埕宁隆起西段在沙三下亚段沉积时期主要出露的为寒武系、奥陶系的灰岩沉积<sup>[16]</sup>,在陡坡带扇体沉积物中可见大量的陆源碳酸盐岩砾石,因而内扇沉积中的泥质杂基主要为灰泥质成分。灰泥质杂基在50°C~75°C开始发生重结晶作用且一直可持续到4 000多米<sup>[17]</sup>,随着埋深的增加,灰泥质杂基重结晶作用程度逐渐增强,如研究区车58井3 857.3 m深度处,重结晶作用形成的微亮晶白云石粒径可达50~80 μm(图5i),其多与碳酸盐胶结作用同期发生<sup>[3]</sup>。

## 3.2 成岩阶段及演化序列

根据伊/蒙间层中蒙脱石含量、黏土矿物含量随深度的变化以及碳酸盐胶结物类型等参数,并根据车镇凹陷镜煤反射率、古地温梯度<sup>[18]</sup>等资料对车西洼陷车古25井的埋藏史—热史进行恢复分析(图7),其结果表明车西洼陷陡坡带沙三下亚段经历了早成

岩期、中成岩A1、A2期,现今处于中成岩B期。所经历的成岩演化序列为:压实作用/碳酸盐胶结→长石溶蚀/碳酸盐胶结物溶蚀→石英溶蚀/碳酸盐胶结/灰泥重结晶→石英加大/碳酸盐胶结溶蚀→碳酸盐胶结。

距今40 Ma之前,沙三下亚段地温小于85°C,埋深约为1 500 m,主要处于早成岩期(图7),地层水主要呈碱性。由于车西洼陷北带沙三下亚段物源区主要出露碳酸盐岩,剥蚀产物进入湖盆使得近岸水下扇间泥质沉积富钙,形成泥灰岩。因而,该时期在强烈的压实作用下,泥岩中的Ca<sup>2+</sup>和HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>不断释放并进入砂砾岩储层中,在碱性地层水环境下,形成早期的碳酸盐胶结。

距今40~25 Ma,沙三下亚段地温为85°C~120°C,埋深为1 500~3 300 m,其成岩阶段处于中成岩A1期(图7)。有机酸排放的最佳温度为80°C~120°C<sup>[19]</sup>,因而,该时期沙四段和沙三段两套烃源岩先后进入最佳排酸期,长石颗粒及早期碳酸盐胶结物发生溶蚀。碳酸盐岩岩屑、砾石颗粒溶蚀程度较弱,主要在边缘部位发生溶蚀(图4d,e)。此外,长石溶蚀产物在酸性条件下易于形成石英加大和高岭石胶结(图5e,f)。

距今25~23 Ma,由于构造抬升作用,沙三下亚段地温处于100°C~130°C之间,埋深约为3 150~3 300 m,主要处于中成岩A1期,下部地层进入中成岩A2期(图7)。该时期车镇北带发生第一期油气充注作用<sup>[12]</sup>,地层水变为碱性环境。但由于东营末期(距今23 Ma)的构造抬升,沙三段烃源岩又进入有机酸最佳排放温度,地层水从碱性环境向酸性环境转变。因而,油气充注所造成的碱性环境时间相对较短,石英在该时期的溶蚀作用相对较弱,多数石英颗粒仅溶蚀其边缘(图4c)。同时,该碱性环境有助于碳酸盐胶结物的形成和扇根灰泥重结晶的发生(图5i)。

距今23~5 Ma,沙三下亚段地温处于100°C~130°C,埋深为3 150~3 650 m,储层进入中成岩A2期(图7)。该时期沙三上、中亚段及沙三下亚段顶部处于85°C~120°C,为有机酸排放的最佳时期,储层长期处于酸性地层水环境,长石和早期碳酸盐胶结物、碳酸盐岩砾石等发生溶蚀作用,形成有效储集空间。由于近岸水下扇物性较差,成岩环境相对封闭。因此,长石溶蚀过程中形成的SiO<sub>2</sub>有利于自生高岭石和石英次生加大边的发育;碳酸盐胶结物及碳酸盐岩砾石溶蚀产物也难以排出,使得其在搬运至相对远离

烃源岩的部位,由于过饱和状态而发生沉淀再次形成碳酸盐胶结物。由于黏土矿物转化、泥岩孔隙水排放等作用可以为晚期碳酸盐胶结提供  $Fe^{2+}$ <sup>[13]</sup>,因而晚期碳酸盐多为含铁碳酸盐胶结物。

距今 5 Ma 至今,沙三下亚段地温为 120℃ ~ 160℃,埋深 3 650 ~ 4 500 m,储层进入中成岩 B 期(图 7)。在馆陶末期—明化镇早期(距今 5 Ma),构造活动强烈,发生快速深埋作用,有机酸发生热脱羧作用,大量分解,车镇北带发生第二期油气充注<sup>[12]</sup>,地层水呈碱性。该阶段石英发生弱溶蚀,碳酸盐胶结物沉淀,黏土矿物自生伊利石增多,含量最高可达

81%(图 6)。

### 4 成岩演化对物性的影响

车西洼陷陡坡带沙三下亚段近岸水下扇储层成岩作用复杂,不同相带的成岩演化序列存在差异,从而造成了储层物性的不同。

近岸水下扇内扇沉积多为泥质碎屑流成因砂砾岩,泥质杂基含量较高,分选极差,压实作用强烈,泥质杂基多发生灰泥重结晶;与此同时,由于次级断层较少,内扇成为一个封闭的成岩环境,压实作用形成的微裂缝多被碳酸盐胶结,后期有机酸难以进入内扇

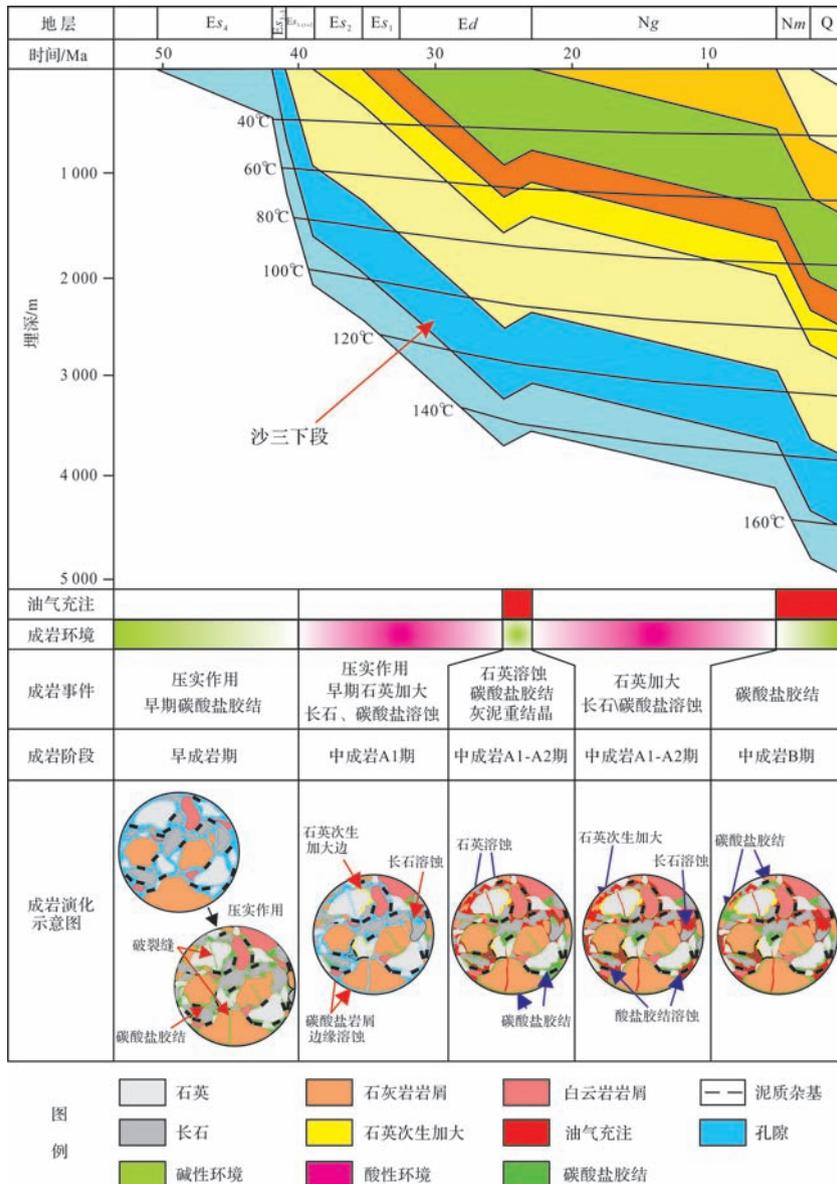


图 7 车西洼陷陡坡带沙三下亚段成岩演化序列—埋藏史综合图(埋藏史曲线以车古 25 井为例)

Fig.7 Reservoir diagenesis sequence and burial history of Es<sub>3</sub><sup>X</sup> in the steep slope zone of the western Chezhen sub-sag (Taking Well Chegu 25 as an example of the burial history curve)

部位发生溶蚀作用。因而,内扇部位压实作用持续增强,并伴随有灰泥重结晶作用,产生的微裂缝多被胶结,但溶蚀作用几乎不发育,最终导致内扇部位储层物性较差,如位于内扇相带的车58井3553~3558.7 m之间泥质粉砂岩支撑中砾岩储层,其平均孔隙度约为2.15%(图8)。

近岸水下扇中扇部位岩性逐渐向砂质碎屑流成因的砂砾岩过渡,泥质含量有所减少,泥岩夹层有所增多。其中中扇辫状水道近物源端砂砾岩单层厚度相对较大(约为3 m),碳酸盐胶结多发育在砂砾岩层的顶底界面处,而其中部碳酸盐胶结作用则相对较弱,后期有机酸进入储层发生溶蚀作用。但是,由于中扇辫状水道近物源端毗邻内扇主水道,其泥质含量在整个中扇部位相对为最高,储层流体活动性受到限制,使得后期溶蚀产物运移至此因难以释放而再次发生沉淀,最终导致其溶蚀作用多为无效溶蚀,储层物性较差,如车古25井4336~4338.8 m为中扇辫状水道近端成因的砂质支撑中砾岩,其泥质杂基含量大于15%,平均孔隙度约为2.7%(图8);而中扇辫状水道中、远端以及中扇前缘单层砂砾岩厚度有所减薄,多小于3 m,泥质含量相对减少,成岩环境相对开放,溶蚀产物能够得到排放而发育有效溶蚀作用,虽然目前地层处于碱性成岩环境,但由于地层厚度相对较大,因而碳酸盐胶结多发生在砂泥岩界面附近,而中部胶结程度较弱<sup>[13]</sup>,溶蚀孔多被保留下来,如车57井4049.36~4053.86 m之间中扇辫状水道中、远端成因的砂质支撑中砾岩,单层厚度小于3 m,平均孔隙度约为4.5%;车57井3650~3654.2 m之间为中扇前缘成因的粉、细砂岩沉积,单层厚度小于1.6 m,平

均孔隙度可达7.25%(图8)。综上所述,中扇部位的中扇辫状水道中、远端及中扇前缘为近岸水下扇主要的优质砂砾岩储层发育相带。

近岸水下扇外扇储层单层厚度较薄,多小于0.5 m,且多夹于厚度较大的泥岩中,厚层的泥岩中的 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{HCO}_3^-$ 不断释放进入储层中发生沉淀而形成碳酸盐胶结,虽有后期排放的有机酸对其产生溶蚀作用,但是车西洼陷陡坡带成岩环境的酸、碱性不断更替,并最终碱性成岩环境为主,因而目前胶结作用较为发育,如车57井3807~3807.2 m外扇细砂岩孔隙度仅为1.8%(图8)。

此外,由于车西北带沙三下亚段发育有异常超压作用<sup>[12]</sup>,超压破裂形成的微裂缝可以有效地提高储层渗透率,改善储层物性。超压破裂形成的微裂缝<sup>[20]</sup>的分布具有随机性,车西北带沙三下亚段近岸水下扇的各个亚相均有所发育,如车58井3855.8 m为内扇成因的泥质支撑中砾岩,孔隙度仅为1.9%,而渗透率可达 $16.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ;车古25井4397 m为中扇辫状水道成因的砂质支撑中砾岩,孔隙度为2.7%,渗透率为 $38.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

## 5 结论

(1) 车西洼陷陡坡带沙三下亚段近岸水下扇砂砾岩类型在宏观上主要表现为杂基支撑砾岩,碎屑支撑砾岩、砾质砂岩等沉积,来自埋宁隆起的古生界碳酸盐岩砾石较为发育;微观上,岩石类型以岩屑砂岩和长石质岩屑砂岩为主,岩屑多为碳酸盐岩岩屑,灰泥质杂基绝对含量最高可达40%。

(2) 车西洼陷陡坡带沙三下亚段近岸水下扇砂

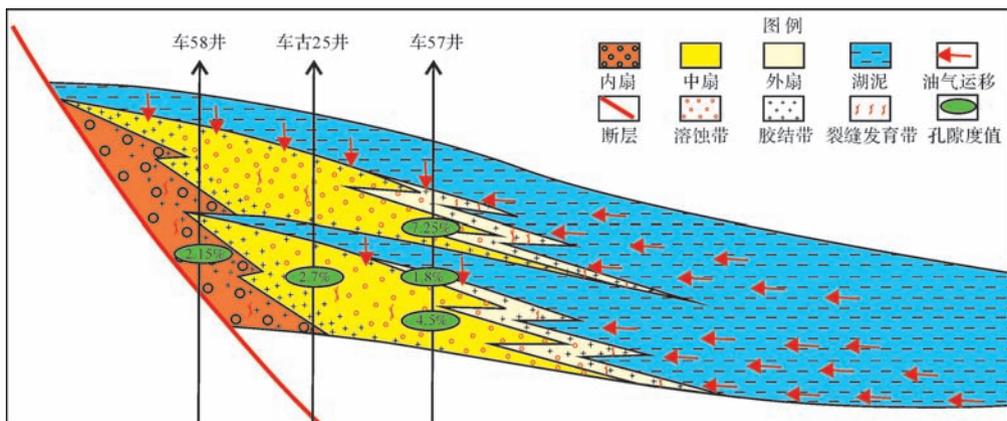


图8 车西洼陷陡坡带沙三下亚段近岸水下扇储层发育模式

Fig.8 The reservoir development model of the nearshore subaqueous fan for the  $\text{Es}_3^X$  in the steep slope zone of the western Chezhen sub-sag

砾岩储层平均孔隙度和渗透率分别为 3.42%、 $2.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 具有典型特低孔特低渗特点, 储集空间以溶蚀孔和裂缝为主。其中溶蚀孔主要为长石溶蚀孔及碳酸盐胶结物溶蚀孔; 裂缝主要为超压破裂所致。3 500~4 000 m 井段发育异常高孔带, 孔隙度可达 10.2%, 主要为次生溶蚀孔与裂缝的复合型储集空间。

(3) 车西洼陷近岸水下扇砂砾岩储层目前处于中成岩 B 期, 所经历的成岩演化序列为: 压实作用/碳酸盐胶结→长石溶蚀/碳酸盐胶结物溶蚀→石英溶蚀/碳酸盐胶结/灰泥重结晶→石英加大/碳酸盐胶结溶蚀→碳酸盐胶结。

(4) 车西洼陷近岸水下扇中扇辫状水道中远端以及中扇前缘经历了多期溶蚀作用, 目前其物性最好, 孔隙度分别可达 4.5%、7.25% (甜点储层); 而内扇、中扇辫状水道近端以及外扇经历了持续强压实及强烈胶结作用, 物性相对较差, 其平均孔隙度均小于 3%。

### 参考文献 (References)

- 1 朱筱敏, 张守鹏, 韩雪芳, 等. 济阳拗陷陡坡带沙河街组砂砾岩体储层质量差异性研究 [J]. 沉积学报, 2013, 31(6): 1094-1104. [Zhu Xiaomin, Zhang Shoupeng, Han Xuefang, et al. On the differences of reservoir quality of Shahejie Fm. in steep slope zones of Jiyang sag [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(6): 1094-1104.]
- 2 王多云, 郑希民, 李风杰, 等. 低孔渗油气富集区优质储层形成条件及相关问题 [J]. 天然气地球科学, 2003, 14(2): 87-91. [Wang Duoyun, Zheng Ximin, Li Fengjie, et al. Forming condition of high-quality reservoir and its relative problems in low porosity and permeability enrichment zone [J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(2): 87-91.]
- 3 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): 865-878. [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): 865-878.]
- 4 鲜本忠, 路智勇, 余源琦, 等. 东营凹陷陡坡带盐 18—永 921 地区砂砾岩沉积与储层特征 [J]. 岩性油气藏, 2014, 26(4): 28-35. [Xian Benzong, Lu Zhiyong, She Yuanqi, et al. Sedimentary and reservoir characteristics of glutenite in Yan 18-Yong 921 area, steep slope of Dongying sag [J]. Lithologic Reservoirs, 2014, 26(4): 28-35.]
- 5 中华人民共和国国土资源部. DZ/T0217-2005 石油天然气储量计算规范 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T0217-2005 Regulation of petroleum reserves estimation [S]. Beijing: Standard Press of China, 2005.]
- 6 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.]
- 7 范振峰, 毕彩芹, 丁俊侠. 车镇凹陷北部陡坡带砂砾岩体成藏机理——以车 66 扇体为例 [J]. 油气地质与采收率, 2007, 14(6): 39-42. [Fan Zhenfeng, Bi Caiqin, Ding Junxia. Hydrocarbon accumulation mechanism of sandstone-conglomerate bodies in north abrupt slope zone, Chezhen depression—An example from Fan Che 66 [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, 14(6): 39-42.]
- 8 朱筱敏, 赵东娜, 姜淑贤, 等. 渤海湾盆地车镇凹陷陡坡带沙河街组近岸水下扇低孔低渗储层成岩序列 [J]. 地球科学与环境学报, 2014, 36(2): 1-9. [Zhu Xiaomin, Zhao Dongna, Jiang Shuxian, et al. Diagenetic sequence of low porosity and permeability reservoirs from nearshore subaqueous fan of Shahejie Formation in the steep slope zone of Chezhen depression, Bohai Bay Basin [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2014, 36(2): 1-9.]
- 9 鲜本忠, 王永诗, 周廷全, 等. 断陷湖盆陡坡带砂砾岩体分布规律及控制因素——以渤海湾盆地济阳拗陷车镇凹陷为例 [J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 429-436. [Xian Benzong, Wang Yongshi, Zhou Tingquan, et al. Distribution and controlling factors of glutenite bodies in the actic region of a rift basin: An example from Chezhen sag, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 429-436.]
- 10 郑四兵, 鲜本忠. 车镇凹陷古近系层序地层格架及发育模式 [J]. 沉积与特提斯地质, 2008, 28(1): 48-54. [Zheng Sibing, Xian Benzong. Sequence stratigraphic framework and model for the Palaeogene strata in the Chezhen depression [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2008, 28(1): 48-54.]
- 11 宋亮, 张营革, 牟敏, 等. 陆相断陷盆地超压系统下的油气运聚——以车镇凹陷车西地区为例 [J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(1): 28-32. [Song Liang, Zhang Yingge, Mou Min, et al. Hydrocarbon migration and accumulation in overpressure system of continental rifted basins—case study of Chexi area, Chezhen depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(1): 28-32.]
- 12 马奔奔, 操应长, 王艳忠, 等. 车镇凹陷北带古近系中深层优质储层形成机理 [J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(3): 448-457. [Ma Benben, Cao Yingchang, Wang Yanzhong, et al. Formation mechanism of high-quality reservoir in the middle-deep strata in Palaeogene in the north zone of Chezhen depression [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(3): 448-457.]
- 13 朱筱敏, 钟大康, 张琴, 等. 济阳拗陷古近系碎屑岩储层特征和评价 [M]. 北京: 科学出版社, 2008: 1-274. [Zhu Xiaomin, Zhong Dakang, Zhang Qin, et al. Clastic Reservoirs Characteristics and Evaluation of Paleogene, Jiyang Depression [M]. Beijing: Science Press, 2008: 1-274.]
- 14 Surdam R C, Crossey L J, Hagen E S. Organic-inorganic and sandstone diagenesis [J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(1): 1-23.
- 15 Nangia S, Garrison B J. Reaction rates and dissolution mechanisms of quartz as a function of pH [J]. The Journal of Physical Chemistry,

- 2008, 112(10): 2027-2033.
- 16 袁淑琴, 刘子藏, 李勇, 等. 黄骅坳陷缓坡带沙河街组物源体系分析[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2010, 37(1): 36-43. [Yuan Shuqin, Liu Zicang, Li Yong, et al. Provenance system of Paleogene Shahejie Formation in the gentle slope (ramp) of the Huanghua depression in Bohai Gulf, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2010, 37(1): 36-43.]
- 17 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.
- 18 邱楠生, 苏向光, 李兆影, 等. 济阳拗陷新生代构造—热演化历史研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(4): 1127-1135. [Qiu Nansheng, Su Xiangguang, Li Zhaoying, et al. The Cenozoic tectono-thermal evolution of Jiyang depression, Bohai Bay Basin, East China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(4): 1127-1135.]
- 19 曾溅辉, 朱志强, 吴琼, 等. 烃源岩的有机酸生成及其影响因素的模拟实验研究[J]. 沉积学报, 2007, 25(6): 847-851. [Zeng Jianhui, Zhu Zhiqiang, Wu Qiong, et al. Experimental study on the generation of organic acids from source rock and its effect factors[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(6): 847-851.]
- 20 付广, 苏玉平. 利用声波时差研究异常孔隙流体压力释放次数及深度的方法[J]. 石油物探, 2006, 45(1): 21-24, 92. [Fu Guang, Su Yuping. A method for studying release times and depths of abnormal pore fluid pressure of mudstone[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006, 45(1): 21-24, 92.]

## Diagenetic Evolution of $Es_3^x$ Nearshore Subaqueous Fan Reservoir and Its Influence on Property in the Steep Slope Zone of Western Chezhen Sub-sag

CAO Gang<sup>1</sup> WANG XingXing<sup>2,3</sup> ZHU XiaoMin<sup>2,3</sup> QU QuanGong<sup>1</sup>

WUCHEN BingJie<sup>2,3</sup> HE JingCong<sup>2,3</sup> DAI BoYi<sup>2,3</sup>

(1. Shengli Oilfield Company, SINPEC, Dongying, Shandong 257015, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, Beijing 102247, China;

3. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstracts:** Based on the core, casting thin section, SEM, cathodeluminescence and petrophysical properties analysis data, the characteristics of the  $Es_3^x$  nearshore subaqueous fan reservoir in the steep slope zone of Western Chezhen Sub-sag are discussed. The results show that lithology types are mainly the mud matrix-supported conglomerate, clast-supported conglomerate, pebbly sandstone and so on at macro level, and the microscopic lithology types are showed as lithic sandstone and feldspathic lithic sandstone and their plaster matrix content can be up to 40% for the nearshore subaqueous fan reservoir of  $Es_3^x$  in the steep slope zone of the Western Chezhen sub-sag. The nearshore subaqueous fan reservoir is characterized with extremely low porosity and permeability, and their porosity and permeability are respectively 3.42%,  $2.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , but there is an abnormal high porosity zone between 3 500 m and 4 000 m in the vertical section, where the porosity can be 10.2% and the reservoir space are mainly dissolved pores and micro-fractures. The reservoir had experienced complex diagenesis in the study area and it is in the B sub-stage of middle diagenesis. The reservoir diagenesis evolution sequence in the study area is as follows: compaction/carbonate cementation → dissolution of feldspars and carbonate cements → dissolution of quartz/carbonate cementation/plaster recrystallization → quartz overgrowth/carbonate cementation dissolution → carbonate cementation. The different sub-facies of the nearshore subaqueous fan had experienced different diagenesis evolution, because the middle- distal zones of the braided channel of the middle fan and middle fan front had experienced multi-period dissolution, the relative reservoir quality is very good and their average porosity respectively are 4.5% and 7.25%, which can be regarded as the “sweet spot” of the nearshore subaqueous fan glutinite reservoir in the steep slope zone of the Western Chezhen sub-sag.

**Key words:** Western Chezhen sub-sag; nearshore subaqueous fan; diagenesis evolution; reservoir quality