

文章编号:1672-6561(2014)02-0001-09

投稿网址<http://jese.chd.edu.cn/>

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

朱筱敏¹, 赵东娜¹, 姜淑贤¹, 葛家旺¹, 张守鹏², 韩雪芳³, 刘新⁴

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石化胜利油田地质科学研究所,
山东 东营 257015; 3. 中海石油(中国)有限公司天津分公司勘探开发研究院,
天津 300452; 4. 中国石油渤海钻探工程公司, 河北 任丘 062552)

摘要:根据大量岩芯、薄片、扫描电子显微镜(SEM)和镜质体反射率等储层资料,探讨了渤海湾盆地车镇凹陷陡坡带沙河街组近岸水下扇砂体岩石学特征、储层物性特征、成岩作用类型及其特征、成岩阶段与成岩序列、储层孔隙类型与次生孔隙发育特征,分析了低孔低渗储层中次生孔隙(“甜点”)的形成条件及控制因素。结果表明:车镇凹陷陡坡带沙河街组近岸水下扇砂体由岩屑质长石砂岩构成,在埋藏过程中,储层经历了压实、胶结、溶解和交代等成岩作用,现今储层埋深2 000~3 800 m,储层处于中成岩阶段,总体上形成了低孔低渗储层;溶蚀作用对于改善储层质量起到了重要作用;主要在2 300~3 100 m深度段的有机酸对长石颗粒的溶蚀以及形成的粒间和粒内孔隙不仅增加了储层孔隙度,而且提高了储层渗透率,改善了储层质量,孔隙度可达25%,渗透率达到 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为油气富集高产提供了储集空间。总之,溶蚀作用及其形成的次生孔隙发育带对于预测有利储层是非常重要的。

关键词:成岩作用;成岩序列;沙河街组;陡坡带;低渗储层;孔隙类型;车镇凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:P618.130.2;TE122.2 **文献标志码:**A

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

ZHU Xiao-min¹, ZHAO Dong-na¹, JIANG Shu-xian¹, GE Jia-wang¹, ZHANG Shou-peng²,
HAN Xue-fang³, LIU Xin⁴

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Geological Scientific Research
Institute of SINOPEC Shengli Oilfield, Dongying 257015, Shandong, China; 3. Research Institute
of Exploration and Development of CNOOC Tianjin Branch, Tianjin 300452, China;
4. CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Renqiu 062552, Hebei, China)

Abstract: Based on the core, thin section, SEM and vitrinite reflectance data, the characteristics of lithology, physical properties, diagenesis, diagenetic stage and sequence, pore type, secondary pore for sand bodies of nearshore subaqueous fan of Shahejie Formation in the steep slope zone of Chezhen depression were discussed; formation condition and controlling factor of secondary pores (“sweet spot”) in reservoir with low porosity and permeability were analyzed. The results show that the sand bodies of nearshore subaqueous fan of Shahejie Formation in the steep slope zone of

收稿日期:2013-08-20

基金项目:国家科技重大专项项目(2011ZX05001-002-03, 2011ZX05025-005-02)

作者简介:朱筱敏(1960-),男,江苏扬州人,教授,博士研究生导师,工学博士, E-mail: xmzhu@cup.edu.cn。

Chezhen depression are consisted of feldspathic sandstone, mainly experiencing compaction, cementation, dissolution and metasomatism in the burial diagenetic evolution, and the reservoir is in the middle diagenetic stage now with the burial depth of 2 000-3 800 m, and the reservoir has the characteristics of low porosity and permeability; the dissolution plays a significant role in improving reservoir quality during the burial diagenetic evolution in the mainly depth; the feldspar dissolution by organic acid in the depth of 2 300-3 100 m and the intergranular and intragranular pores increase the porosity and permeability of reservoir and improve the reservoir quality, and the porosity is up to 25% and the permeability is up to $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, so that the reservoir spaces contribute to petroleum accumulation and high yield. In general, dissolutions and secondary pore development zone are very important for predicting favorable reservoir.

Key words: diagenesis; diagenetic sequence; Shahejie Formation; steep slope zone; low permeability reservoir; pore type; Chezhen depression; Bohai Bay Basin

0 引言

中国低孔低渗油气资源分布广、储量大,在油气勘探和开发中占据十分重要的地位^[1]。目前,对低孔低渗和致密储层等非常规油藏的勘探与开发引起了众多学者的密切关注^[2-12],前人建立了低孔低渗储层孔隙度定量演化模型^[13],指出储层低渗特征具有沉积作用主控、压实作用主导、溶蚀作用改善、胶结作用强化的特征^[14]。

低渗储层概念最早出现于 20 世纪三四十年代的科技文献中,至今尚无统一定义。大多数研究者依据实际的地质情况及技术水平,将低渗储层的物性下限定为 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ^[15],认为沉积作用、成岩作用和构造作用是低渗储层形成的主控因素,比如早期快速的压实作用、中期石英次生加大和碳酸盐胶结作用以及后期微弱的溶蚀作用形成了低孔低渗储层^[2,15-19]。

中国东部中—新生代发育陆相断陷湖盆,这类湖盆的陡坡带因具有坡度陡、物源近、古地形起伏大和构造活动强烈的特点而发育多种成因的砂砾岩扇体^[20-22],这些扇体临近烃源岩区并与其呈指状接触,可形成多种类型的油气藏^[23]。近年来,在中国东部断陷盆地中,近岸水下扇砂砾岩油气藏勘探取得了重大突破,渤海湾盆地车镇凹陷北部陡坡带近岸水下扇砂砾岩油气藏成功勘探便是典型实例。车镇凹陷北部陡坡带位于埕南断层的下降盘,从东营组至沙河街组发育了大量的近岸水下扇扇体,这些扇体规模大,沉积物粒度较粗,油源条件好,勘探潜力大^[24]。据第 3 次石油资源评价,车镇凹陷北部陡坡带砂砾岩体油藏拥有剩余资源量约 $2 \times 10^8 \text{ t}$,是胜利油区勘探的重要领域之一^[25]。近

年来,完钻的车 66、车 660 井在车镇凹陷陡坡带近岸水下扇扇体中(对应次生孔隙发育带或“储层甜点”)获得日产百吨以上的高产油气流,标志着近岸水下扇砂砾岩储层的巨大勘探潜力。但由于陡坡带近岸水下扇构造背景特殊,近物源,沉积速率快,沉积分异差,内部结构及沉积规律复杂,加之对低孔低渗储层成岩序列和储层质量认识程度较低,制约了油气勘探开发工作。

前人从不同角度对车镇凹陷陡坡带沙河街组近岸水下扇砂砾岩储层的成岩作用开展了研究。综合研究认为,研究区成岩作用类型多样,常见压实、溶解、胶结、交代作用,孔喉结构总体较差,储层物性随着埋深的增加而变差,但酸性水对长石颗粒及碳酸盐胶结物的溶蚀改善了储层质量^[26-31]。

车镇凹陷是渤海湾盆地济阳坳陷的一个北断南超的次级凹陷,面积 $2\,390 \text{ km}^2$ 。其自南向北又可分为南部缓斜坡带、断阶带、中央洼陷带和北部陡坡带等 4 个个次级构造单元。车镇凹陷充填沉积了新生界,其中古近系沙河街组自下而上划分为沙四段、沙三段、沙二段和沙一段。沙四段主要沉积红色泥质岩、蓝灰色泥质岩和碳酸盐岩、油页岩。沙三段至沙二段是湖盆从最大沉陷逐渐回返上升、直至河流与滨浅湖广布的沉积时期。沙三段主要沉积深湖油页岩和泥岩夹重力流以及三角洲砂岩。沙二段主要沉积三角洲砂岩、滨浅湖云质岩。沙一段发育较深湖的油页岩和泥云岩以及滨浅湖滩坝、生物滩成因的钙质砂岩和生物-碎屑碳酸盐岩。

车镇凹陷北部陡坡带沙河街组发育一系列近岸水下扇成因的低孔低渗砂砾岩储层,目的层埋深为 $2\,000 \sim 3\,800 \text{ m}$,沙河街组内部具有丰富的油气或见有不同级别的含油显示。由于岩性变化大、成分

和结构成熟度较低,储层成岩作用(流岩作用)和油水关系复杂,虽经多年研究,但成岩作用及其序列对储层质量影响机理及预测等关键问题还需探讨。因此,笔者以渤海湾盆地车镇凹陷沙河街组近岸水下扇低孔低渗储层为研究对象,通过系列岩芯和储层分析化验资料综合研究,分析低孔低渗储层中次生孔隙(“甜点”)的形成条件及控制因素,为低孔低渗油气藏勘探提供储层地质学依据。

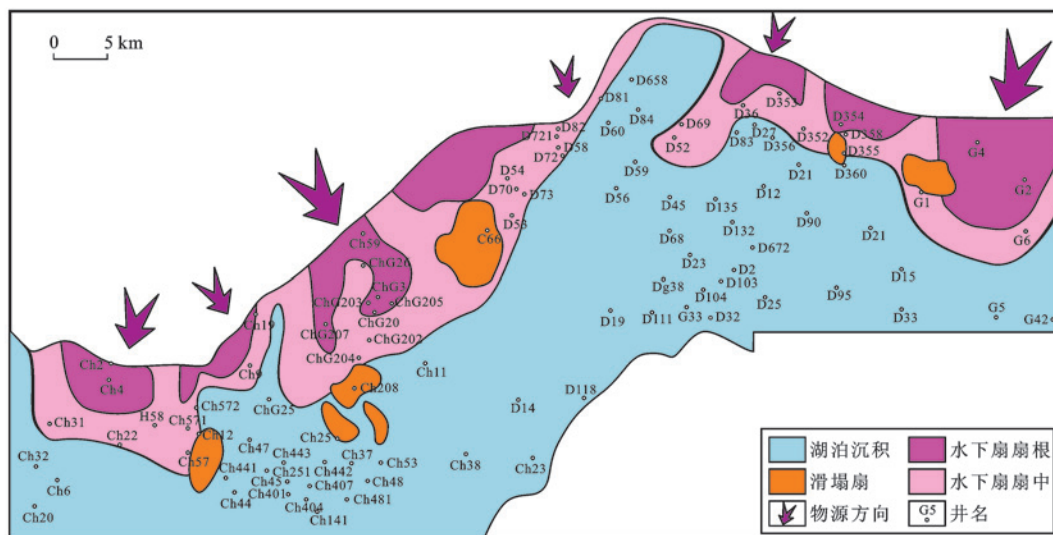
1 岩石学特征

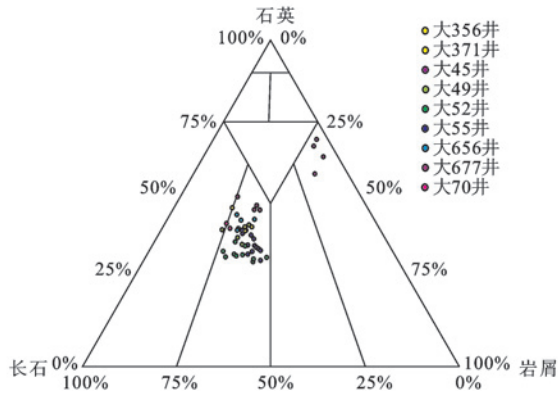
渤海湾盆地车镇凹陷北部陡坡带车西地区车66井区沙三段主要发育成分和结构的成熟度均较低近岸水下扇(图1)。储层岩性主要为岩屑质长石砂岩,少量岩屑砂岩(图2),砂岩粒度变化较大,有粗粉砂岩、细砂岩、中砂岩、含砾不等粒砂岩等。

在砂岩颗粒中,石英平均体积分数为44%,长石平均为32%,岩屑平均为24%,分选中等偏好,磨圆次棱角状,颗粒支撑。

2 储层物性特征

车镇凹陷北部陡坡带车66井区沙三段65个样品点的物性数据表明(图3),近岸水下扇砂体为典型的低孔特低渗储层。储层孔隙度最大为27.5%,最小为4.9%,平均为13.9%,其中孔隙度为10%~15%的样品占46.88%,孔隙度为5%~10%的占20.31%,孔隙度为15%~20%的占17.19%,孔隙度小于5%的占1.56%;渗透率最大为 $511.218 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最小为 $0.251 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $57.65 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,主要集中在 $(1 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $(10 \sim 100) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,分别占全部样品的42%和30%。





图中数值为体积分数

图 2 车 66 井区沙三段岩石学特征

Fig. 2 Lithology of the Third Member of Shahejie Formation in Well Che66 Area

边形式存在,或充填在颗粒之间;铁白云石自形程度较差,晶体较细,充填孔隙(图 4)。随着埋深增加,方解石胶结物含量有减小趋势。埋深处于 2 100~2 800 m 时,白云石胶结物平均含量(质量分数,下同)为 6.8%;埋深小于 2 500 m 时,其含量小于 5%;埋深处于 2 500~3 200 m 时,白云石的胶结作

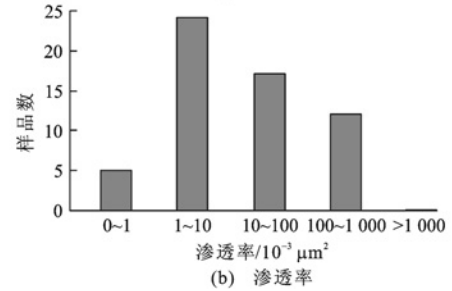
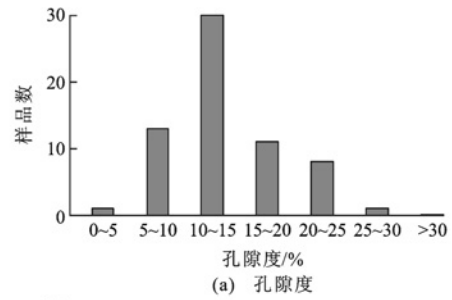
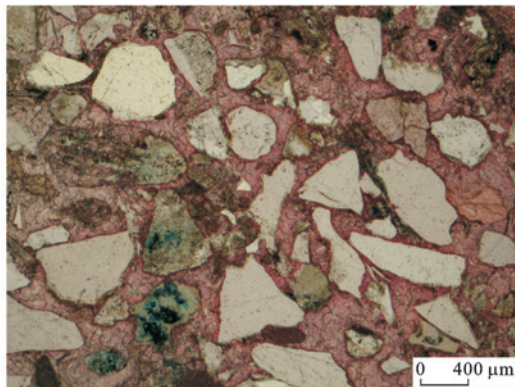


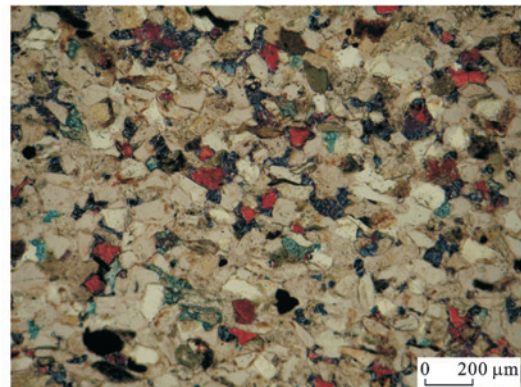
图 3 车 66 井区沙三段储层物性分布直方图

Fig. 3 Histogram of Physical Properties of the Third Member of Shahejie Formation in Well Che66 Area

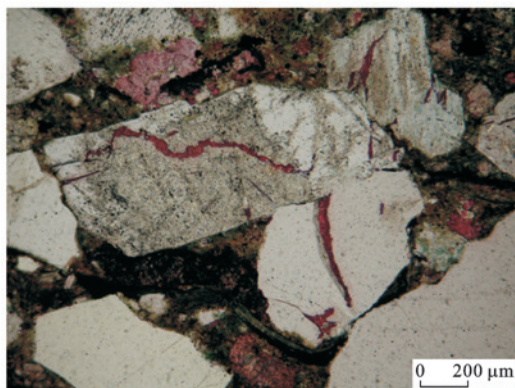
用较强,其最大含量可达 28%,说明深层主要为白云石胶结。



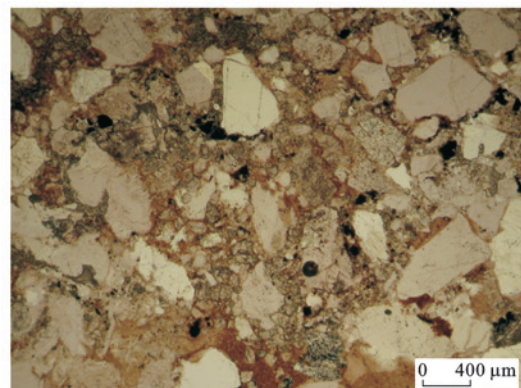
(a) 灰质岩屑状不等粒砂岩,方解石胶结物(大802井2 086.55 m井段)



(b) 含灰质长石粗粉砂岩,铁方解石、铁白云石胶结物(大45井2 907.84 m井段)



(c) 含泥质长石岩屑不等粒砂岩,方解石充填裂缝(大801井2 312.06 m井段)



(d) 含白云质中粒岩屑长石砂岩,白云石胶结物(大51井3 837.08 m井段)

图 4 车 66 井区近岸水下扇砂岩碳酸盐胶结物显微照片

Fig. 4 Photomicrographs of Carbonate Cements of the Third Member of Shahejie Formation in Well Che66 Area

3.2.3 黏土矿物胶结

发育的黏土矿物主要有高岭石、伊利石、绿泥石和伊/蒙混层等。随着埋藏深度的增加,黏土矿物含量随之改变。在2 800~3 200 m井段内,高岭石含量较高,相对含量最高超过80%。伊利石、绿泥石、伊/蒙混层含量较低,含量在10%左右。

3.3 长石溶蚀作用

铸体薄片分析表明,沙三段近岸水下扇砂体的溶蚀对象主要为长石,其次为碳酸盐胶结物,在2 000~2 400 m和2 600~3 100 m井段内溶蚀作用较发育。如大801井2 310~2 330 m井段,长石溶蚀现象明显,局部也有少量碳酸盐胶结物,生物碎屑被溶蚀,形成孔隙;大677井2 870~2 920 m井段也出现长石以及碳酸盐胶结物溶蚀的现象;大671井2 950~3 100 m井段,除发育长石溶蚀外,还可见岩屑被溶,形成粒内溶孔(图5)。

3.4 交代作用

车66井区沙三段主要发育长石的高岭土化、绢云母化和碳酸盐的交代作用。前者普遍发育;后者主要表现为方解石、铁方解石对长石、岩屑的交代作

用以及白云石对方解石的交代作用。

4 成岩阶段与成岩序列

根据镜质体反射率(R_o)和黏土矿物混层比随埋深的变化,车镇凹陷北部陡坡带车66井区埋深大于1 500 m的碎屑岩储层经历了早成岩B期、中成岩A期和中成岩B期等成岩阶段(图6)。

当砂岩埋深为1 500~2 400 m时,岩石进入早成岩B期, R_o 值为0.35%~0.50%。该阶段主要发生碳酸盐胶结、高岭石胶结以及碳酸盐胶结物的溶蚀作用。长石颗粒以及碳酸盐胶结物的溶蚀作用出现以原生孔隙为主的原生-次生混合型孔隙。随着长石溶蚀作用弱→强→弱的变化趋势,高岭石的胶结作用也呈现对应变化趋势;碳酸盐胶结作用主要以方解石胶结作用为主,方解石胶结物含量可达25%左右,白云石为5%左右;随着方解石胶结作用减弱,白云石胶结作用逐渐增强;石英次生加大、伊利石胶结作用都比较弱(图6)。

当砂岩埋深为2 400~3 100 m时,岩石处于中成岩A期。 R_o 值为0.50%~1.30%,黏土矿物混

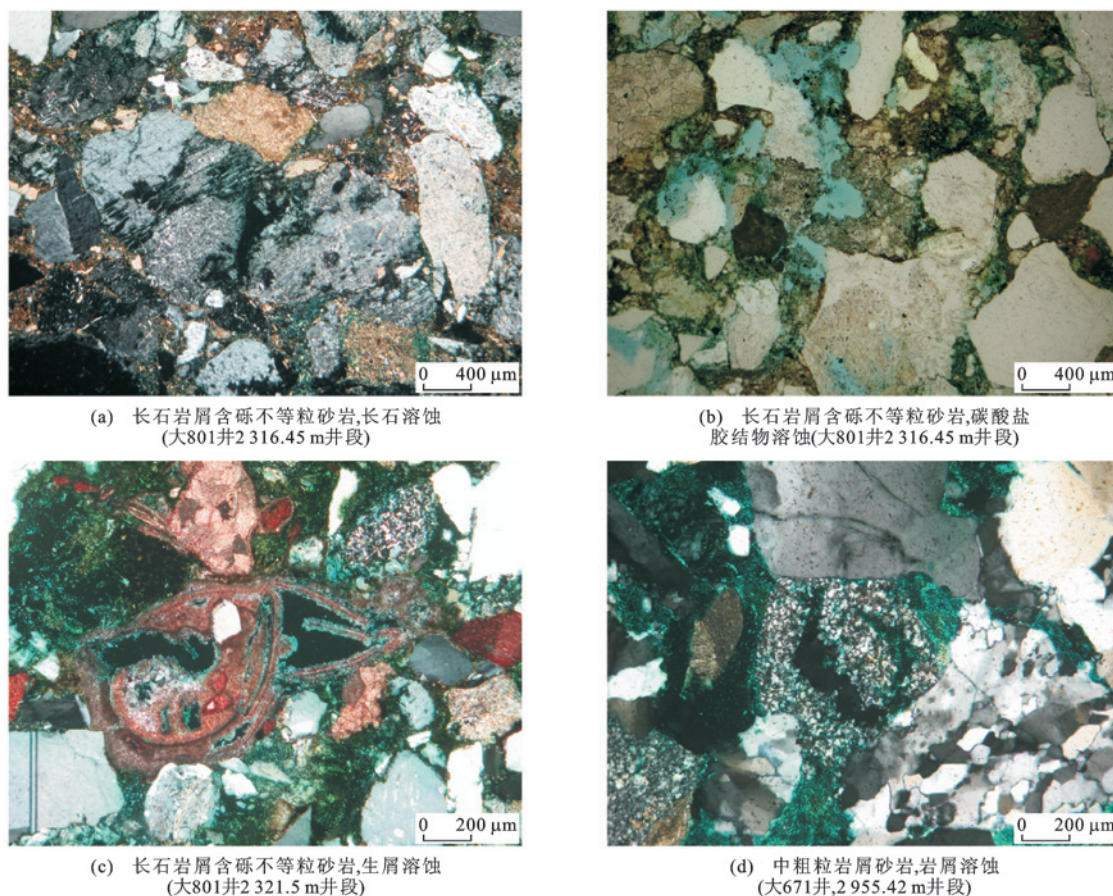
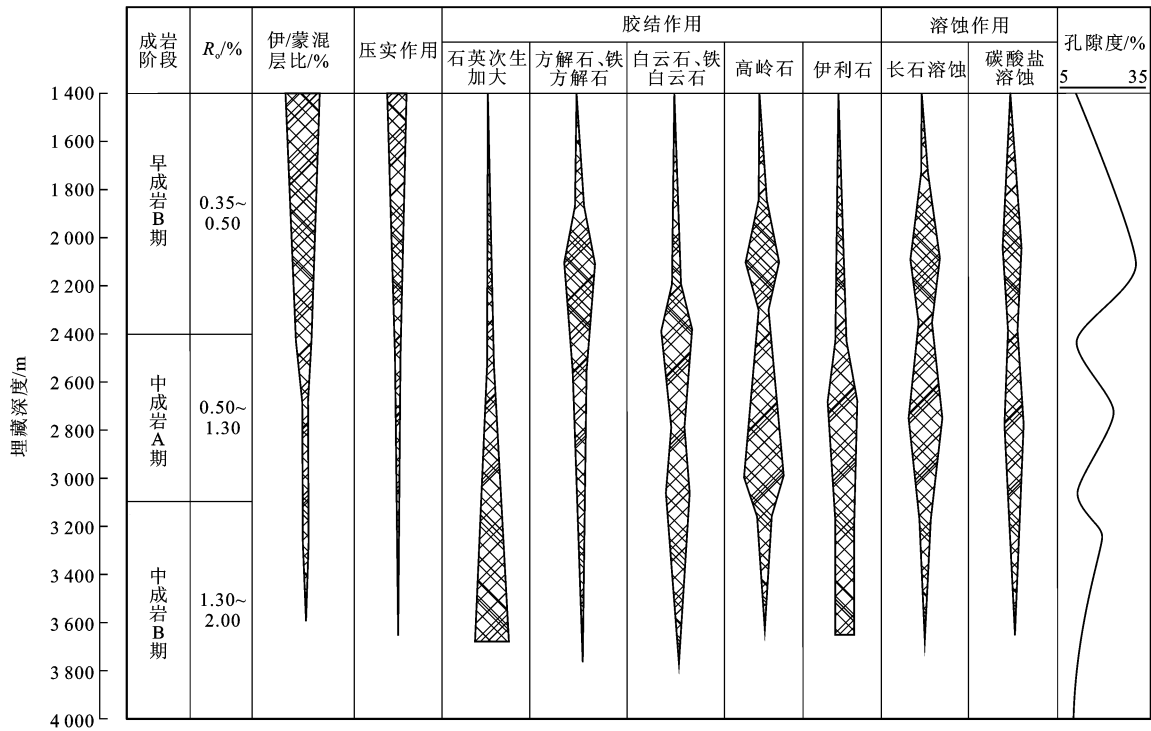


图5 车66井区沙三段砂岩溶蚀作用

Fig. 5 Sandstone Dissolution of the Third Member of Shahejie Formation in Well Che66 Area



图中宽窄的差异是指成岩作用相对强度的不同

图 6 车 66 井区储层成岩演化模式

Fig. 6 Sandstone Diagenetic Evolution of the Third Member of Shahejie Formation in Well Che66 Area

层比迅速降低,该阶段主要发生长石溶蚀、高岭土胶结、碳酸盐胶结以及石英次生加大作用。碳酸盐胶结作用以白云石、铁白云石胶结作用为主,含量可达到 15%,方解石、铁方解石胶结作用相对弱,含量为 10%左右;高岭石胶结作用逐渐增强,黏土矿物相对含量可达到 80%;伊利石的胶结作用呈现出先逐渐增强、后逐渐减弱的变化趋势;石英次生加大有增强的趋势。长石颗粒和碳酸盐胶结物溶蚀较为明显,因此形成了大量次生孔隙(图 6)。

储层埋深大于 3 100 m 时,砂岩进入中成岩 B 期。 R_v 值为 1.30%~2.00%,该阶段主要发生黏土胶结、碳酸盐胶结以及石英次生加大作用,孔隙仍以次生孔隙为主。溶蚀作用、晚期铁方解石和铁白云石胶结作用、高岭石胶结作用相对减弱,含量约 5%;石英次生加大、伊利石胶结作用相对增强,伊利石胶结物的相对含量可达到 40%左右(图 6)。

5 储层孔隙类型与次生孔隙发育特征

5.1 储层孔隙类型

铸体薄片分析表明,车镇凹陷车西地区车 66 井区沙三段砂岩储层中存在 2 种类型孔隙,即原生孔隙和次生孔隙。原生孔隙可细分为压实剩余的原生粒间孔隙、胶结剩余粒间孔隙和杂基中的微孔隙。

次生孔隙以长石、岩屑颗粒溶蚀形成的粒内溶孔和胶结物溶蚀形成的粒间溶孔为主,铸模孔、超大孔和构造作用形成的裂缝较少(图 7)。

储层孔隙经历了由原生到次生的演化过程。当沙三段砂岩埋深浅于 2 400 m 时,储层处于早成岩 B 期,以原生孔隙为主,发育少量次生孔隙,属于原生-次生孔隙混合发育带;当沙三段砂岩埋深大于 2 400 m 时,储层已进入中成岩期,次生孔隙发育,保留少量残余的原生孔隙(图 6、7)。

5.2 次生孔隙发育深度

图 7 表明车镇凹陷车 66 井区储层次生孔隙发育在 2 300~3 100 m 井段。在对应的次生孔隙发育带(储层“甜点”),车镇凹陷陡坡带车 66、车 660 井在近岸水下扇扇体中获得日产百吨以上的高产油气流也证明了该观点。在 2 300 m 井段次生孔隙发育带内,平均孔隙度约 18%,最大孔隙度可达 29%,平均渗透率为 $93 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最大渗透率可达 $690 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;在 3 100 m 井段次生孔隙发育带内,平均孔隙度为 15%,最大孔隙度约 25%,平均渗透率为 $19 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,最大渗透率只有 $200 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右。

5.3 次生孔隙成因

镜下观察表明:次生孔隙的形成以长石溶蚀为主,碳酸盐胶结物溶蚀次之;随着埋藏深度的增加,

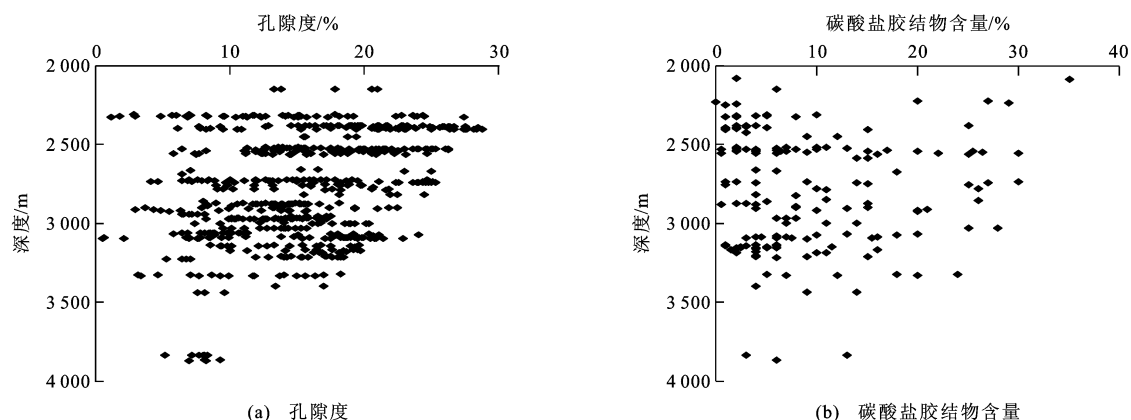


图7 车66井区沙三段储层孔隙度、碳酸盐胶结物含量的纵向变化

Fig. 7 Relationships of Porosity and Carbonate Cement to Depth of the Third Member of Shahejie Formation in Well Che66 Area

碳酸盐胶结物(方解石)溶蚀的程度逐渐增强。依据碳酸盐胶结物在纵向上的分布可以发现,当埋深大于3 100 m时,碳酸盐胶结物含量具有较为明显的降低趋势,碳酸盐胶结物含量约10%,说明在该深度存在碳酸盐溶蚀(图7)。高岭石纵向分布特征也反映出其与长石溶蚀深度的关系,在2 300 m井段次生孔隙发育带附近,高岭石相对含量可达到50%,在3 100 m井段附近,高岭石含量异常高,相对含量可达60%~90%,而超过3 300 m深度的井段,高岭石含量很快下降,平均含量只有10%左右。

6 结 语

(1)渤海湾盆地车镇凹陷北部陡坡带沙河街组沙三段近岸水下扇砂体储层质量明显受沉积条件和成岩作用影响。近岸水下扇砂体主要由长石质岩屑砂岩组成。在埋藏成岩演化过程中,储层经历了压实、胶结、溶解和交代等成岩过程,多种成岩作用明显影响了储层质量,总体形成了低孔低渗储层。

(2)车镇凹陷北部陡坡带沙三段近岸水下扇砂体储层埋深2 000~3 800 m,储层处于中成岩阶段。在成岩演化过程中,溶蚀作用对于改善储层质量起到了重要作用,也就是说,储层质量的改善明显与溶蚀作用及其形成的次生孔隙发育深度有关。车镇凹陷沙河街组沙三段有利储层主要发育在2 300~3 100 m井段,形成的粒间和粒内孔隙不仅增加了储层孔隙度,而且提高了储层渗透率,改善了储层质量,形成了储层“甜点”(孔隙度可达25%,渗透率达 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)。显然,近岸水下扇有利储层主要发育在有机酸溶蚀长石形成的次生孔隙发育深度段(2 300、3 100 m井段左右)。

(3)发现溶蚀作用及其形成的次生孔隙发育深度带是一项综合研究工作,应该在沉积砂体成因和分布规律研究的基础上,开展流岩相互作用和岩石物理相研究,采用定量岩石物理相研究方法,科学预测有利储层空间分布。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 冉新权,朱筱敏,杨 华,等.大型内陆拗陷湖盆低渗储层富油理论与实践[J].地学前缘,2013,20(2):147-154.
RAN Xin-quan, ZHU Xiao-min, YANG Hua, et al. Petroleum Enrichment Theory and Practice for Low Permeability Reservoir in Large Continental Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(2): 147-154.
- [2] 张龙海,周灿灿,刘国强,等.不同类型低孔低渗储集层的成因、物性差异及测井评价对策[J].石油勘探与开发,2007,34(6):702-710.
ZHANG Long-hai, ZHOU Can-can, LIU Guo-qiang, et al. Origin and Property Differences of Various Types of Low-porosity and Low-permeability Reservoirs and Well Logging Evaluation Strategies [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(6): 702-710.
- [3] 李荣西,段立志,张少妮,等.鄂尔多斯盆地低渗透油气藏形成研究现状与展望[J].地球科学与环境学报, 2011, 33(4): 364-372.
LI Rong-xi, DUAN Li-zhi, ZHANG Shao-ni, et al. Review on Oil/Gas Accumulation with Low Permeability in Ordos Basin [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(4): 364-372.
- [4] 丁 圣,钟思瑛,高国强,等.测井地质结合定量评价低渗透储层成岩相[J].西南石油大学学报:自然科学版,2012,34(4):83-87.

- DING Sheng, ZHONG Si-ying, GAO Guo-qiang, et al. Quantitative Evaluation of Low Permeability Reservoir Diagenetic Facies by Combining Logging and Geology[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2012, 34(4): 83-87.
- [5] 许建红. 低渗透油藏产能主要影响因素分析与评价[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2012, 34(2): 144-148.
- XU Jian-hong. Main Influence Factor Analysis and Evaluation of the Productivity in Low Permeability Oil Reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2012, 34(2): 144-148.
- [6] 高 辉, 敬晓锋, 张 兰. 不同孔喉匹配关系下的特低渗透砂岩微观孔喉特征差异[J]. 石油实验地质, 2013, 35(4): 401-406.
- GAO Hui, JING Xiao-feng, ZHANG Lan. Difference of Micro-pore Throat Characteristics in Extra-low Permeability Sandstone of Different Pore Throat Matching Relationship[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2013, 35(4): 401-406.
- [7] 李 梅, 赖 强, 黄 科, 等. 低孔低渗碎屑岩储层流体性质测井识别技术[J]. 天然气工业, 2013, 33(6): 34-38.
- LI Mei, LAI Qiang, HUANG Ke, et al. Logging Identification of Fluid Properties in Low Porosity and Low Permeability Clastic Reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(6): 34-38.
- [8] 叶礼友, 钟 兵, 熊 伟, 等. 川中地区须家河组低渗透砂岩气藏储层综合评价方法[J]. 天然气工业, 2012, 32(11): 43-46.
- YE Li-you, ZHONG Bing, Xiong Wei, et al. An Integrated Evaluation Method of Xujiahe Low-permeability Sandstone Gas Reservoirs in Middle Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(11): 43-46.
- [9] 王永建, 王延斌. 大牛地气田上古生界低渗储层综合评价[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2013, 35(5): 57-64.
- WANG Yong-jian, WANG Yan-bin. Comprehensive Evaluation of Lower Porosity and Permeability Reservoir in Upper Paleozoic of Daniudi Gas Field[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2013, 35(5): 57-64.
- [10] 蒋裕强, 张 春, 邓海波, 等. 黏土矿物对低渗致密砂岩储性能的影响[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2013, 35(6): 39-47.
- JIANG Yu-qiang, ZHANG Chun, DENG Hai-bo, et al. Influences of Clay Minerals on Physical Properties of Low Permeability and Tight Sandstones[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science and Technology Edition, 2013, 35(6): 39-47.
- [11] 杨 华, 张文正, 刘显阳, 等. 优质烃源岩在鄂尔多斯低渗透富油盆地形成中的关键作用[J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35(4): 1-9.
- YANG Hua, ZHANG Wen-zheng, LIU Xian-yang, et al. Key Role of High-quality Source Rocks on the Formation of Low-permeability Oil-rich Reservoirs in Ordos Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, 35(4): 1-9.
- [12] 吴 凯, 李善鹏, 罗丽荣, 等. 特低渗—致密砂岩储层成藏模拟试验与成藏机理[J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35(4): 10-17.
- WU Kai, LI Shan-peng, LUO Li-rong, et al. Simulation Experiment of Petroleum Migration and Accumulation Mechanism for Extra-low Permeability and Tight Sandstone Reservoirs[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, 35(4): 10-17.
- [13] 唐 俊, 庞国印, 唐 丽, 等. 鄂尔多斯盆地姬塬地区长 8 段孔隙度演化定量模拟[J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35(1): 56-65.
- TANG Jun, PANG Guo-yin, TANG Li, et al. Quantitative Simulation on Porosity Evolution of Chang-8 Section in Jiyuan Area of Ordos Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, 35(1): 56-65.
- [14] 操应长, 远光辉, 王艳忠, 等. 准噶尔盆地北三台地区清水河组低渗透储层成因机制[J]. 石油学报, 2012, 33(5): 758-771.
- CAO Ying-chang, YUAN Guang-hui, WANG Yan-zhong, et al. Genetic Mechanisms of Low Permeability Reservoirs of Qingshuihe Formation in Beisantai Area, Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(5): 758-771.
- [15] 曾大乾, 李淑贞. 中国低渗透砂岩储层类型及地质特征[J]. 石油学报, 1994, 15(1): 38-46.
- ZENG Da-qian, LI Shu-zhen. Types and Characteristics of Low Permeability Sandstone Reservoirs in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 1994, 15(1): 38-46.
- [16] 蒋凌志, 顾家裕, 郭彬程. 中国含油气盆地碎屑岩低渗透储层的特征及形成机理[J]. 沉积学报, 2004, 22(1): 13-18.
- JIANG Ling-zhi, GU Jia-yu, GUO Bin-cheng. Characteristics and Mechanism of Low Permeability Clastic Reservoir in Chinese Petroliferous Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(1): 13-18.
- [17] SURDAM R C, CROSSEY L J, HAGEN E S, et al. Organic-inorganic Interactions and Sandstone Diagenesis[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(1): 1-23.
- [18] BJORLYKKE K. Petroleum Geoscience: From Sedi-

- mentary Environments to Rock Physics[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2010.
- [19] 朱筱敏,李亚辉,张义娜,等. 苏北盆地东南部泰州组砂岩储层孔隙类型及有利储层评价[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(3): 246-252.
- ZHU Xiao-min, LI Ya-hui, ZHANG Yi-na, et al. Pore Types of Sandstone Reservoir and Evaluation of Favorable Reservoir of Taizhou Formation in Eastern Subei Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(3): 246-252.
- [20] 韩宏伟,崔红庄,林松辉,等. 东营凹陷北部陡坡带砂砾岩扇体地震地质特征[J]. 特种油气藏, 2003, 10(4): 28-30.
- HAN Hong-wei, CUI Hong-zhuang, LIN Song-hui, et al. Seismic Geology of Glutenite Fan in the North Actic Region of Dongying Sag[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2003, 10(4): 28-30.
- [21] 林松辉,王 华,王兴谋,等. 断陷盆地陡坡带砂砾岩扇体地震反射特征——以东营凹陷为例[J]. 地质科技情报, 2005, 24(4): 55-59, 66.
- LIN Song-hui, WANG Hua, WANG Xing-mou, et al. Seismic Reflection Feature of Glutenite Fan in Abrupt Slope Zone of Rift-subsidence Lake Basin—A Case in Dongying Depression[J]. Geological Science and Technology Information, 2005, 24(4): 55-59, 66.
- [22] 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 Xiao-min, ZHANG Shou-peng, HAN Xue-fang, 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.
- [23] 谢风猛,武法东,陈建渝,等. 渤海湾盆地滨南油田砂砾岩扇体空间展布与成藏规律[J]. 石油实验地质, 2002, 24(4): 334-338, 344.
- XIE Feng-meng, WU Fa-dong, CHEN Jian-yu, et al. Spatial Distribution and Pool-forming Rules of Sandy-conglomeratic Fans in Binnan Oilfield, the Bohaiwan Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2002, 24(4): 334-338, 344.
- [24] 王来斌,徐怀民,蔡忠东. 车镇凹陷北部陡坡带油气成藏规律研究[J]. 安徽理工大学学报: 自然科学版, 2005, 25(4): 1-3, 11.
- WANG Lai-bin, XU Huai-min, CAI Zhong-dong. Study of Oil-gas Accumulation in the Northern Abrupt Slope Zones of Chezhen Sag[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology: Natural Science, 2005, 25(4): 1-3, 11.
- [25] 孙 怡. 陡坡带砂砾岩体地球物理储层预测方法应用研究[D]. 东营: 中国石油大学, 2008.
- SUN Yi. Research on Geophysical Reservoir Prediction Method and Application for Glutinitic Bodies in Steep Slope[D]. Dongying: China University of Petroleum, 2008.
- [26] 李潇丽,田 成. 山东车镇凹陷东部古近系沙河街组成岩作用[J]. 古地理学报, 2002, 4(4): 70-80.
- LI Xiao-li, TIAN Cheng. Diagenesis of Shahejie Formation of the Palaeogene in the Eastern Chezhen Depression of Shandong Province[J]. Journal of Palaeogeography, 2002, 4(4): 70-80.
- [27] 朱筱敏,米立军,钟大康,等. 济阳拗陷古近系成岩作用及其对储层质量的影响[J]. 古地理学报, 2006, 8(3): 295-305.
- ZHU Xiao-min, MI Li-jun, ZHONG Da-kang, et al. Paleogene Diagenesis and Its Control on Reservoir Quality in Jiyang Depression[J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(3): 295-305.
- [28] 王金铎,许淑梅,季建清,等. 车镇凹陷北部陡坡带砂砾岩体识别与储层物性预测[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(2): 93-98.
- WANG Jin-duo, XU Shu-mei, JI Jian-qing, et al. Recognition of Sand-gravel Body and Forecasting Its Petroleum-bearing Feature in Northern Steep Slope of Chezhen Sag[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2008, 28(2): 93-98.
- [29] 王艳忠,操应长. 车镇凹陷古近系深层碎屑岩有效储层物性下限及控制因素[J]. 沉积学报, 2010, 28(4): 752-761.
- WANG Yan-zhong, CAO Ying-chang. Lower Property Limit and Controls on Deep Effective Clastic Reservoirs of Paleogene in Chezhen Depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(4): 752-761.
- [30] 范振峰,张金亮,王金凯. 陡坡带砂砾岩体储集特征研究——以车镇凹陷北带为例[J]. 中国海洋大学学报, 2011, 41(6): 93-96.
- FAN Zhen-feng, ZHANG Jin-liang, WANG Jin-kai. Characters of Glutenite Reservoir in Steep Slope Zone in Case of North Belt of Chezhen Depression[J]. Periodical of Ocean University of China, 2011, 41(6): 93-96.
- [31] 鲜本忠,吴采西,余源琦. 山东东营车镇凹陷古近系流体异常高压及其对深层碎屑岩储集层的影响[J]. 古地理学报, 2011, 13(3): 309-316.
- XIAN Ben-zhong, WU Cai-xi, SHE Yuan-qi. Fluid Abnormal Overpressure and Its Influence on Deep Clastic Reservoir of the Paleogene in Chezhen Sag of Dongying, Shandong Province[J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(3): 309-316.