

东营凹陷盐家地区沙四上亚段 近岸水下扇砂砾岩颗粒结构特征

操应长¹, 马奔奔¹, 王艳忠¹, 刘惠民², 高永进², 刘海宁³, 陈林⁴

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580;

2. 中国石化胜利油田地质科学研究所, 山东 东营 257015; 3. 中国石化胜利油田物探研究院, 山东 东营 257015;

4. 中国石化胜利油田西部新区研究中心, 山东 东营 257015)

摘要:针对现有的粒度分析方法难以实现对砾岩、砾质砂岩等粗碎屑岩颗粒结构特征分析的问题, 采用宏观岩心精描与微观薄片相结合的粒度分析方法, 建立由砾级颗粒到砂级颗粒的粒度概率累积曲线, 求取颗粒结构参数, 并对近岸水下扇不同岩相组合类型颗粒结构特征展开定量研究。依据岩石结构、沉积构造和颜色等特征, 将东营凹陷盐家地区沙四上亚段近岸水下扇砂砾岩体划分为 11 种岩相类型和 14 种岩相组合类型。依据 ϕ_s 、 M_z 、 S_o 和砾石含量等颗粒结构参数绝对值及其垂向递降度特征, 将近岸水下扇岩相组合划分为 3 大类 6 小类。总体上距物源方向断层边界距离由近及远砂砾岩颗粒结构参数具有粒度变细、分选变好、砾石含量降低和垂向递降度先增大后减小的特点。

关键词:近岸水下扇; 砂砾岩; 颗粒结构; 沙四上亚段; 东营凹陷

中图分类号: TE122.2⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1926(2014)06-0793-11

引用格式: Cao Yingchang, Ma Benben, Wang Yanzhong, *et al.* The particle texture characteristics of sandy conglomerate in the nearshore subaqueous fan of upper Es₄ in the Yanjia area, Dongying Depression [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(6): 793-803. [操应长, 马奔奔, 王艳忠, 等. 东营凹陷盐家地区沙四上亚段近岸水下扇砂砾岩颗粒结构特征[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(6): 793-803.]

0 引言

碎屑岩结构是指碎屑岩内各结构组分的特点和相互关系, 包括颗粒结构、杂基和胶结物结构、孔隙结构、碎屑颗粒与杂基和胶结物之间关系。碎屑岩颗粒结构包括粒度、圆度、球度、形状以及颗粒表面特征^[1]。碎屑岩颗粒结构中粒度特征(大小、分布)是碎屑岩分类命名的主要依据, 也是碎屑岩颗粒结构中分选性求取的基础。碎屑岩的粒度分布及分选性是判别沉积时的自然地理环境以及水动力条件的良好标志^[1]。碎屑沉积物搬运介质的水动力条件、沉积时的流体性质和自然地理条件的不同, 都会造成沉

积物被搬运和沉积方式上的差别, 这些差别在粒度概率图上都会有所反映^[2-3]。应用粒度概率累积曲线图建立沉积环境的典型模式, 最早是由 Visher^[4]提出来的, 现在已成为环境和相分析中重要的方法和手段^[5-7]。同时, 碎屑岩颗粒结构中粒度特征及分选性对碎屑岩埋藏演化过程中储集物性演化也具有重要的控制作用。因此, 碎屑岩颗粒结构特征研究是油气勘探开发领域中的重要研究内容之一。

东营凹陷盐家地区位于东营凹陷北带东段, 西与胜坨油田相邻, 东到青坨子凸起, 南邻民丰洼陷, 北至陈家庄凸起, 是由陈南铲式扇形边界断层所控制的陡斜坡构造带, 具有断坡陡峭、山高谷深、沟梁相间的古

收稿日期: 2013-08-11; 修回日期: 2014-01-16.

基金项目: 国家科技重大专项课题(编号: 2011ZX05006-003); 国家自然科学基金项目(编号: 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); 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。

作者简介: 操应长(1969-), 男, 安徽潜山人, 教授, 主要从事沉积学、层序地层学等教学和科研工作. E-mail: cyc8391680@163.com.

通讯作者: 马奔奔(1988-), 男, 安徽亳州人, 博士研究生, 主要从事储层地质学研究. E-mail: tianyanihao2009@163.com.

地貌^[8-9],自西向东发育了盐 16 和盐 18 这 2 大古冲沟。沙四上亚段沉积时期,受这种古构造背景的控制,季节性洪水携带大量粗碎屑物质沿古冲沟入湖,民丰洼陷北部陡坡带在边界断裂面上发育了多期近岸水下扇砂砾岩体。这类砂砾岩扇体与深湖亚相泥岩侧向接触,具有极佳的生储盖配置关系,形成大量的岩性或构造岩性油气藏^[10]。近年来,东营凹陷盐家地区沙四上亚段近岸水下扇砂砾岩体油气勘探取得了重大突破,如永 936 井在 3 793~3 808m 井段试油日产油 7.6t、盐 222 井在 3 985.8~4 194.6m 井段日产油 17.7t,2010 年在盐家地区永 920 块沙四上亚段上报探明石油地质储量 $4\ 176 \times 10^4$ t。但是,由于近岸水下扇砂砾岩体特殊的事件性沉积作用和形成过程,导致砂砾岩岩相变化快,颗粒结构特征复杂,储层非均质性强,进一步增大了勘探难度^[11-14]。

目前针对砂岩结构特征的研究方法和技术已趋于成熟,作为粗碎屑岩的主要组成部分,砾岩的结构特征研究也一直备受关注。冯增昭等^[15]在 20 世纪 70 年代结合中外砾岩研究现状,提出了砾岩的分类和研究方法,并对砾石的粒径、形态等参数进行了论述。杨光^[16]、孙雨等^[17]通过岩心图像分析技术对砾岩中砾石的结构特征进行了研究。但是针对砾岩的结构特征研究主要存在 2 方面的问题:①仅对砾岩中砾石的结构特征进行分析,而忽略了其中的砂级及砂级以下的颗粒结构特征^[16-17];②仅通过取直径 2.5cm 样品代替整个岩心样品,并进行粒度分析^[7,18-19],得到的颗粒组成以砂级颗粒为主。针对砾岩的这 2 种粒度分析方法,均未将砾石颗粒与砂级颗粒相结合进行砾岩的粒级组成研究,所获得的颗粒结构特征并不能代表真实的砾岩颗粒结构特征。针对砾岩的颗粒结构特征应用现有的粒度分析方法难以实现的特点^[16-17],笔者以东营凹陷盐家地区近岸水下扇砂砾岩体为例,开展适于砾岩、砾质砂岩等粗碎屑岩的粒度分析方法研究,系统总结砂砾岩的颗粒结构特征,为近岸水下扇砂砾岩体的油气勘探提供一定的地质理论基础。

1 粗碎屑岩颗粒结构参数求取方法

目前,碎屑岩粒度分析方法主要有直接测量法、筛析法、沉降法、激光粒度测试仪法及薄片图像分析法^[20-26]。直接测量法是利用直尺或测规直接测量直径大于 2mm 的砾石的直径,并分析其特征的粒度分析方法。筛析法是分析细砾级和砂级松散沉积物粒度特征的主要方法,通常取筛析样品 50g 以上,在

震筛机上筛约 10min,然后分级称重^[24-26]。直接测量法和筛析法仅适用于松散沉积物,而对于已固结成岩的砾岩,若采用机械破碎,容易使颗粒发生破碎或破碎不完全,导致分析结果不准确;若采用化学试剂溶解填隙物的方法,会使颗粒同时发生溶解,导致分析结果不准确。沉降法的基本原理是利用颗粒沉降速度来划分粒级分布,但这个方法只适用于分析较细的粉砂和黏土样品。激光粒度分析法是根据激光照射到颗粒后,颗粒能使激光产生衍射或散射的现象来测试粒径范围在 0.02~2mm 范围的粒度分布^[25]。薄片图像分析法的原理将显微镜下的图像摄取到计算机中(选择有代表性的视域采集图像),在计算机上对颗粒的二维图像进行测量统计、编辑处理,并以此结果表征碎屑岩的粒度分布特征。薄片图像分析法作粗粒、中粒及细粒砂岩的粒度分析是比较可靠的,而对于砾岩、砾质砂岩中的砾石颗粒是作不到的^[24]。

因此,对于砾岩、砾质砂岩等粗碎屑岩,目前已有的碎屑岩粒度分析方法不能够准确表征其粒度特征。为得到更准确的颗粒组成,还需要结合岩心上砾石的直径测量结果^[7]。为此,本文研究采用宏观精描图像分析与微观薄片图像分析相结合的粒度分析方法(图 1),定量表征粗碎屑岩颗粒结构特征。对于砾岩、砾质砂岩中的砾级颗粒,采取对岩心砾级颗粒 1:1 精描的方法,获取砾级颗粒图像,然后通过图像分析系统求取每个砾石的面积及其等面积圆直径、岩心总面积等参数,计算砾级颗粒粒度分布特征以及砾石含量等参数;对于砾岩、砾质砂岩中的砂级、粉砂级颗粒,从岩心中选择代表性区域磨制薄片,利用图像分析系统计算各砂级、粉砂级颗粒的面积及其等面积圆直径,并将薄片各砂级、粉砂级颗粒面积转化为其在岩心中所占面积,从而求出在岩心中

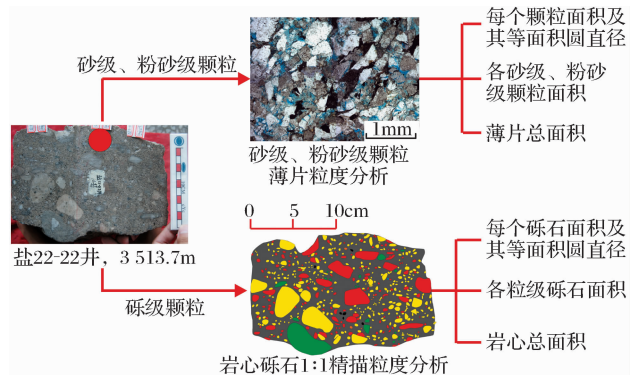


图 1 宏观岩心精描与微观薄片相结合的粒度分析方法
Fig. 1 A method of combining macroscopic core delineation with microscopic thin-section identification

砂级、粉砂级颗粒粒度分布特征和颗粒含量等参数。将宏观精描图像分析与微观薄片图像分析相结合,建立由砾级颗粒到砂级、粉砂级颗粒的粒度概率累积曲线,并由累积曲线求取颗粒的粒径、分选以及不同粒级颗粒含量等粗碎屑岩的颗粒结构参数。

具体计算方法如下:假设岩心总面积为 S ,岩心中砾级颗粒总面积为 SA ,岩心中砂级、粉砂级颗粒总面积为 SB ,则:

$$SA = \sum_{i=1}^n SA_i \quad (1)$$

式中: SA_i 为岩心中每个砾石颗粒的面积; n 为岩心中砾石颗粒的个数; S 、 SA 可由岩心精描得到。

选取薄片代表视域,可知薄片视域总面积 Sc ,薄片中所圈砂级、粉砂级颗粒总面积为 Sb ,

$$Sb = \sum_{i=1}^n Sbi \quad (2)$$

$$Sbi = Sbi/Sc \times (S - SA), i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

$$SB = \sum_{i=1}^n Sbi = Sb/Sc \times (S - SA) \quad (4)$$

式中: Sbi 为薄片每个砂级、粉砂级颗粒的面积; SBi

为岩心中每个等面积圆直径的砂级、粉砂级颗粒所对应的面积; n 为薄片砂级、粉砂级颗粒的个数; SB 可由岩心精描与薄片图像粒度分析综合得到。

岩心中颗粒总面积:

$$Sg = SA + SB \quad (5)$$

岩心中每个等面积圆直径的砾石面积占颗粒总面积的百分含量:

$$PA_i = SA_i/Sg \times 100\% \quad (6)$$

岩心中每个等面积圆直径的砂级、粉砂级颗粒面积占颗粒总面积的百分含量:

$$PB_i = Sbi/Sg \times 100\% \quad (7)$$

采用宏观精描图像分析与微观薄片图像分析相结合的粒度分析方法,利用上述计算公式,可以计算岩心中每个等面积圆直径对应颗粒面积占颗粒总面积的百分含量数据,得到由砾级颗粒到砂级、粉砂级颗粒百分含量的累积,绘制岩心粒度概率累积曲线图(图2)。以丰深10井4322.7m井段(岩性为中砾岩)为例,得到由砾级颗粒到砂级、粉砂级颗粒的粒度概率分布表(表1),绘制粒度概率累积曲线图[图2(a)],并求取颗粒结构参数。

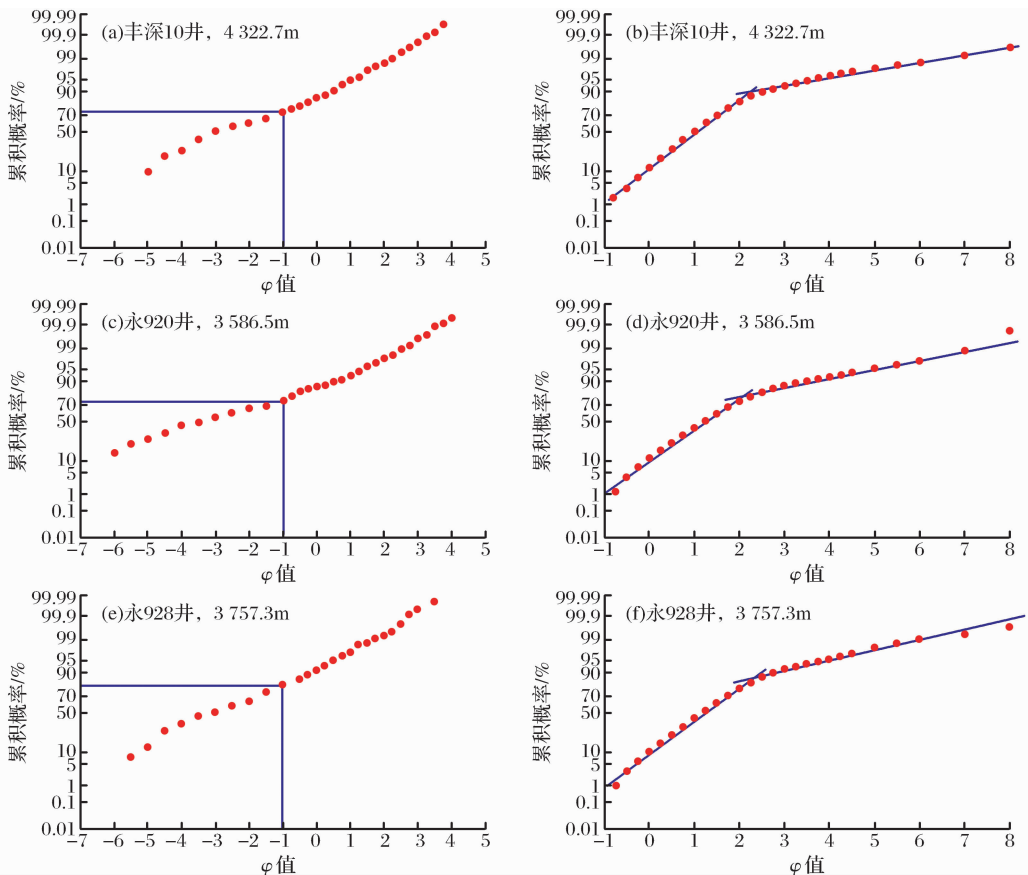


图2 2种粒度分析方法绘制的扇根砾岩粒度累积概率曲线

Fig. 2 Probability cumulative grain size curves of conglomerate of root fan by using two kinds of methods of particle size analysis

表1 丰深10井4 322.7m岩心精描粒度与薄片粒度相结合的数据

Table 1 Data table of combining core delineation with thin-section identification of well Fengshen10 at 4 322.7m

φ 值	各粒级颗粒面积 /mm ²	颗粒累积面积 /mm ²	砾级颗粒面积 /mm ²	砂级颗粒面积 /mm ²	颗粒总面积 /mm ²	岩心总面积 /mm ²	累积概率 /%
-5.5	0	0	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	0
-5	990.68	990.68	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	9.59
-4.5	1 166.60	2 157.28	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	20.88
-4	524.46	2 681.74	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	25.96
-3.5	1 368.74	4 050.48	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	39.21
-3	1 059.31	5 109.79	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	49.46
-2.5	592	5 701.79	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	55.19
-2	430.94	6 132.73	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	59.36
-1.5	601.8	6 734.53	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	65.19
-1	770.28	7 504.81	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	72.64
-0.75	341.19	7 846.00	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	75.94
-0.5	252.99	8 098.99	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	78.39
-0.25	368.04	8 467.04	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	81.96
0	368.04	8 835.08	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	85.52
0.25	170.17	9 005.25	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	87.16
0.5	291.72	9 296.97	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	89.99
0.75	309.81	9 606.78	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	92.99
1	187.70	9 794.48	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	94.80
1.25	92.72	9 887.20	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	95.70
1.5	174.98	10 062.17	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	97.40
1.75	66.15	10 128.32	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	98.04
2	47.49	10 175.81	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	98.50
2.25	48.05	10 223.86	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	98.96
2.5	43.25	10 267.11	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	99.38
2.75	26.01	10 293.12	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	99.63
3	14.98	10 308.10	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	99.78
3.25	10.74	10 318.84	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	99.88
3.5	3.67	10 322.52	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	99.92
3.75	5.37	10 327.89	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	99.97
4	2.82	10 330.71	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	99.99
4.5	0.57	10 331.28	7 504.81	2 826.47	10 331.28	13 161.07	100

本文研究采用的颗粒结构参数主要有以下5个:

(1) φ_5 值:指粒度累积概率曲线上累积概率为5%时所对应的 φ 值,能够反映对水动力条件最灵敏的粗组分的分选情况^[1]。

(2) 平均粒径:按福克和沃德的定义,平均粒径的表达式: $Mz = (\varphi_{16} + \varphi_{50} + \varphi_{84}) / 3$; φ_{16} 、 φ_{50} 、 φ_{84} 分别指粒度累积概率曲线上累积概率为16%、50%、84%时所对应的 φ 值。平均粒径 Mz 能比较准确地反映碎屑颗粒的集中趋势,它是沉积物最主要的粒度特征之一,用以表示沉积物在纵向或横向上的粒度变化规律^[1]。

(3) 分选系数:可表示为 $So = (P_{25} / P_{75})^{1/2}$ 。式中 P_{25} 和 P_{75} 分别代表累积曲线上25%和75%处所对应的颗粒直径。

(4) 砾石含量:砾石含量 = 砾石总面积 / 岩心总面积 $\times 100\%$ 。

(5) 这里笔者提出一个参数“递降度”,它是指同一岩相组合在垂向上单位深度变化范围内颗粒结构参数的差值,为了便于表述,笔者将递降度统一取正值,表征结构参数的变化快慢,它反映了该岩相组合在形成过程中水动力条件的变化。

从而可以得到丰深10井4 322.7m井段颗粒结构参数值为: $\varphi_5 = -5.4\varphi$, $Mz = -2.57\varphi$, $So = 3.08$, 砾石含量为57.02%。

运用上述计算方法,针对砾岩、砾质砂岩等粗碎屑岩,可以绘制由砾级颗粒到砂级颗粒的粒度概率累积曲线。而传统方法针对粗碎屑岩仅取砂级、粉砂级样品进行粒度分析得到的粒度概率累积曲线,

两者之间存在一定的偏差(图 2)。

图 2(a)、图 2(c)、图 2(e)为采用宏观精描图像分析与微观薄片图像分析相结合的粒度分析方法绘制的粒度概率累积曲线,图 2(b)、图 2(d)、图 2(f)为采用激光粒度测试分析绘制的粒度概率累积曲线。可以看出,图 2(a)、图 2(c)、图 2(e)粒度概率累积曲线表现为一条低斜率的直线段,分选很差,粒度曲线跨度较大,为 $-6\sim 5\phi$,砾级颗粒($< -1\phi$)所占比例高达 70%以上,悬浮总体含量高,该类曲线是重力流尤其是浊流沉积的典型特征。

图 2(b)、图 2(d)、图 2(f)粒度概率累积曲线跨度区间为 $-1\sim 8\phi$,砾级颗粒($< -1\phi$)所占比例在 5%以下,由一个跳跃总体和一个悬浮总体组成,跳跃总体与悬浮总体交截点低,跳跃总体含量大于 80%,流体性质对应于浊流向牵引流演化的早期阶段。

激光粒度测试仪法仅仅对砾岩中的砂级组分进行了粒度分析,而忽略了砾岩中占 70%以上的砾级组分,它难以准确表征砾岩的颗粒组成特征,并由此导致对沉积环境以及流体性质判断有误。实际岩心样品为扇根砾岩相,流体性质为典型的水下重力流。

因此,采用宏观岩心精描与微观薄片相结合的粒度分析方法能够准确地表征砾岩的颗粒组成,所绘制的粒度概率累积曲线能够较好地反映沉积环境以及流体性质。

2 近岸水下扇岩相及岩相组合特征

岩相(Lithofacies)是指一定沉积环境中形成的岩石或岩石组合,是沉积作用的物质记录或物质表现^[1]。每种岩相组合类型通常是一次沉积事件或一定环境连续演变的产物^[27-28]。岩相和岩相组合能够反映沉积物形成的沉积作用类型和过程。东营凹陷盐家地区沙四上亚段近岸水下扇砂砾岩沉积构造以块状层理、递变层理、鲍玛序列 AB 段等反映重力流特征的沉积构造为主,发育少量反映牵引流沉积特征的平行层理构造。岩石结构成熟度和成分成熟度均很低,砾石成分复杂,以灰岩和花岗片麻岩为主。在对盐家地区 40 余口井近岸水下扇砂砾岩岩心仔细观察描述的基础上,依据岩石结构、沉积构造和颜色等特征,将研究区近岸水下扇砂砾岩体划分为 11 种岩相类型(表 2)和 14 种岩相组合类型(图 3)。

表 2 东营凹陷盐家地区近岸水下扇岩相类型

Table 2 Types of lithofacies in the near-shore subaqueous fan in the Yanjia area, Dongying Depression

代号	岩相类型	沉积构造	结构特征	颜色特征
Gms	杂基支撑粗砾岩相	块状层理	砾石棱角状一次棱角状,基本无分选杂基(含量大于 20%)支撑,粗砾岩结构	浅灰色—灰色 杂基颜色灰色
Gcp	颗粒支撑粗砾岩相	块状层理	砾石呈次棱角状一次圆状,分选差,杂基含量高,颗粒支撑,粗砾岩结构	浅灰色—灰色 杂基颜色灰色
Gmp	颗粒支撑粗砾岩相	块状层理	砾石呈次棱角状一次圆状,分选较差,杂基含量高,颗粒支撑,中砾岩结构	浅灰色—灰色 杂基颜色灰色
Gfp	颗粒支撑粗砾岩相	块状层理	砾石呈次棱角状一次圆状,分选较差,杂基含量高,颗粒支撑,细砾岩结构	浅灰色—灰色
G-S	砾质砂岩相	块状层理	砾石以中砾和细砾为主,呈次棱角状一次圆状,分选较差,颗粒支撑	浅灰色—灰色
S-G	含砾砂岩相	块状层理	砾石以细砾为主,呈次棱角状一次圆状,分选较差,颗粒支撑	浅灰色—灰色
Sc	粗砂岩相	块状层理	粗粒结构,分选磨圆较好	浅灰色—灰色
Sm	中砂岩相	平行层理、块状层理,偶见交错层理	中粒结构,分选磨圆较好	浅灰色—灰色
Sf	中砂岩相	平行层理、块状层理,偶见交错层理	细粒结构,分选磨圆较好	浅灰色—灰色
Sg	递变层理砂岩相	递变层理	以正递变为主,偶见反递变,分选磨圆较好	浅灰色—灰色
M	泥岩相	块状层理		深灰色—黑色

3 砂砾岩颗粒结构特征

针对东营凹陷盐家地区沙四上亚段近岸水下扇砂砾岩扇体 14 种典型的岩相组合类型,在岩相组合的顶、中、底部分别取样进行颗粒结构特征分析(砾

岩和砾质砂岩进行岩心精描和薄片结合的粒度分析,含砾砂岩和砂岩进行薄片粒度分析)。在单一岩相组合颗粒结构参数特征分析的基础上,依据 ϕ_{5} 、 M_z 、 S_o 和砾石含量等颗粒结构参数绝对值以及其垂向递降度的变化特征,将近岸水下扇不同部位岩

相组合划分为3大类6小类。

I₁型岩相组合为块状中粗砾岩相,颗粒结构参数特征为 φ_5 值在 $-7\sim-5\varphi$ 之间, Mz 值在 $-4\sim-2.5\varphi$ 之间,粒度粗;分选系数 S_o 值在 $7\sim10$ 之间,分选极差;砾石含量基本上在 $60\%\sim80\%$ 之间,砾石

含量高; φ_5 、 Mz 、 S_o 和砾石含量的递降度分别为 $(0.01\sim0.1)\varphi/m$ 、 $(0.05\sim0.1)\varphi/m$ 、 $(0.14\sim0.2)/m$ 、 $(0.5\sim2.5)\%/m$,结构参数基本无递降,该类岩相组合主要发育于泥石流沉积扇根。代表井:盐227井3836.8~3865.83m井段[图4(a),表3]。

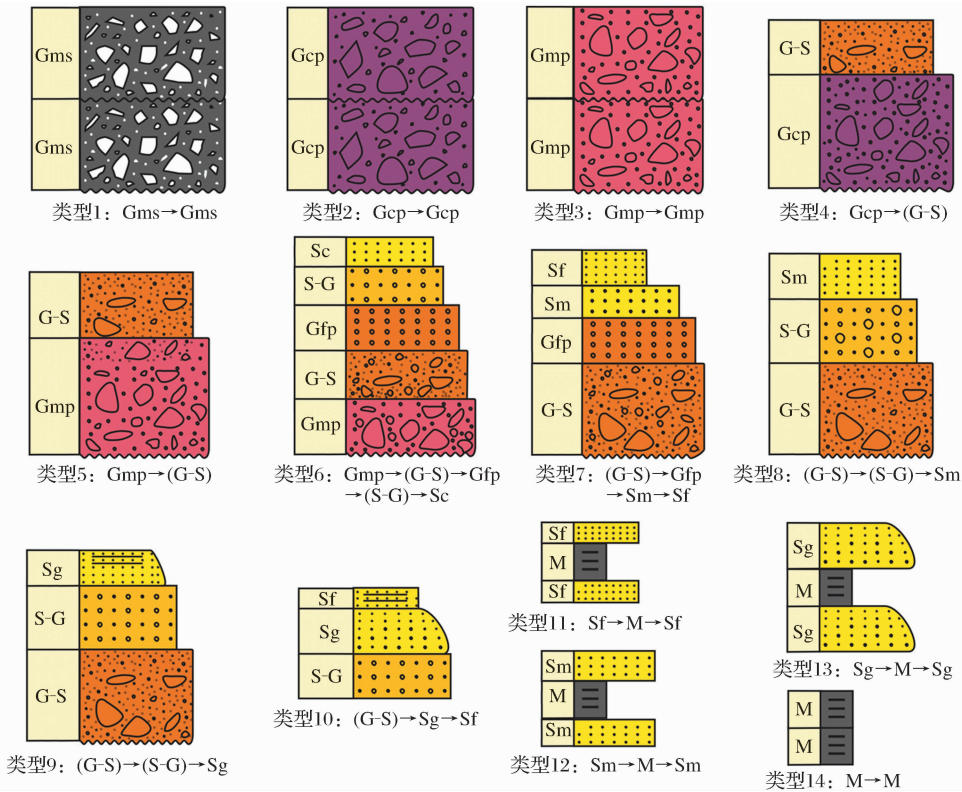


图3 东营凹陷盐家地区近岸水下扇岩相组合类型

Fig. 3 Types of lithofacies assemblages in the near-shore subaqueous fan in the Yanjia area, Dongying Depression

I₂型岩相组合底部为粗砾岩相或中砾岩相,顶部为砾质砂岩相。颗粒结构参数特征为 φ_5 值在 $-7\sim-4.5\varphi$ 之间, Mz 值在 $-3.7\sim-0.45\varphi$ 之间,粒度整体较粗;分选系数 S_o 在 $4.5\sim8$ 之间,分选较差;底部砾石含量基本上在 $50\%\sim72\%$ 之间,砾石含量高,顶部砾石含量在 $25\%\sim58\%$ 之间,砾石含量下降; φ_5 、 Mz 、 S_o 和砾石含量的递降度分别为 $(0.1\sim0.8)\varphi/m$ 、 $(0.25\sim0.8)\varphi/m$ 、 $(0.6\sim1)/m$ 和 $(1\sim20)\%/m$,颗粒结构参数略有递降,该类岩相组合主要发育于洪水沉积扇根。代表井为永920井的3584.5~3587m井段、永925井的2737.45~2740.65m井段和盐斜21井的3043.9~3047.5m井段[图4(b),表3]。

II₁型岩相组合底部为中砾岩相或砾质砂岩相,向上过渡为砾质砂岩相或细砾岩相到含砾砂岩相,顶部为砂岩相。该类岩相组合底部颗粒结构参数特征

为 φ_5 值在 $-6.9\sim-6.1\varphi$ 之间, Mz 值在 $-4\sim-2\varphi$ 之间, S_o 在 $5\sim6.5$ 之间,砾石含量在 $40\%\sim60\%$ 之间,整体上粒度较粗,分选较差,砾石含量高;顶部颗粒结构参数特征为 φ_5 值在 $-3\sim0\varphi$ 之间, Mz 值在 $1.5\sim2.7\varphi$ 之间, S_o 值在 $1.5\sim3.5$ 之间,砾石含量在 $0\sim10\%$ 之间,顶部粒度变细,分选变好,砾石含量降低; φ_5 、 Mz 、 S_o 和砾石含量的递降度分别为 $(3.5\sim4.5)\varphi/m$ 、 $(2.9\sim3.7)\varphi/m$ 、 $(4.5\sim5.2)/m$ 和 $(25\sim45)\%/m$,各颗粒结构参数递降度大,递变趋势明显,反映出强水流动力条件下沉积分异作用明显,该类岩相组合主要发育于洪水沉积扇中后部,代表井为盐22-22井的3483.3~3484.8m井段、3499~3500.45m井段和永928井的3756.8~3758.6m井段[图4(c),表3]。

II₂型为砾质砂岩相到含砾砂岩相到砂岩相的岩相组合,岩相组合底部结构参数特征为 φ_5 值在 -6.5

~ -5.6φ 之间, Mz 值在 -3~-2φ 之间, So 在 3.5~5.5 之间, 砾石含量在 30%~50% 之间, 整体上粒度较粗, 分选较差, 砾石含量高; 顶部结构参数特征为 φ_5 值在 -2.5~0φ 之间, Mz 值在 0.7~2φ 之间, So 在 1.3~3 之间, 砾石含量在 0~10% 之间, 顶部粒度变细, 分选变好, 砾石含量降低; φ_5 、 Mz 、 So 和砾石含量的递降度分别为 (2~3.5) φ/m、(1.6~2.3) φ/m、(2~4)/m 和 (20~30)%/m, 各颗粒结构参数相比于 II₁ 型岩相组合递降度变小, 水动力条件变弱, 但递降度仍较大, 递变趋势比较明显, 该类岩相组合主要发育于洪水沉积扇中中部。代表井为盐 22-22 井的 3 504.85~3 506.6m 井段和永 92 井的 2 972.6~2 974.8m 井段[图 4(d), 表 3]。

II₃ 型为含砾砂岩到砂岩的岩相组合, 颗粒结构参数特征为 φ_5 在 -4.5~0.7φ 之间, Mz 在 -0.6~2.5φ 之间, So 在 1.4~2.2 之间, 砾石含量在 0~30% 之间, 整体上粒度变细, 分选变好, 砾石含量降低, φ_5 、 Mz 、 So 和砾石含量的递降度分别为 (0.7~1.2) φ/m、(0.2~0.7) φ/m、(0.1~0.2)/m 和 (6~10)%/m, 各颗粒结构参数的递降度明显减小, 递变趋势不明显, 反映出水动力条件的减弱, 该类岩相组合主要发育于洪水沉积扇中前部, 代表井为盐 22-22 井的 3 489.45~3 491.5m 井段、3 686.3~3 689m 井段和 3 386~3 388.5m 井段以及盐斜 223 井的 3 309.1~3 313.1m 井段[图 4(e), 表 3]。

III 型为砂岩到砂岩的岩相组合, 颗粒结构参数特征为 φ_5 在 0.9~2φ 之间, Mz 在 1.5~3φ 之间, So 在 1.2~1.7 之间, φ_5 、 Mz 、 So 的递降度分别为 (0.5~1) φ/m、(0.5~0.6) φ/m 和 (0.8~1)/m, 整体上粒度细, 分选好, 递降度小, 反映出水动力条件的进一步减弱, 该类岩相组合常发育于扇缘部位, 代表井为丰深 5 井的 4 304.9~4 305.3m 井段和盐 22-斜 1 井的 3 366.6~3 367m 井段[图 4(f), 表 3]。

近岸水下扇是在控盆断层幕式活动和气候控制下由多种沉积作用形成的多旋回正序叠加砂砾岩体, 其剖面特征为: 垂向上完整的正旋回自下而上为泥石流沉积、阵发性洪水沉积、洪水间歇期山区河流和湖相悬浮沉积, 在扇体的不同位置, 可能缺失某种沉积作用形成的沉积物, 但均表现为正旋回特征^[29]。泥石流沉积扇根以大套块状杂基支撑砾岩相、颗粒支撑砾岩相为主, 颗粒结构类型为 I₁ 型。洪水沉积扇根以发育叠覆递变、砾石次棱角状一次圆状的砾岩到砾质砂岩的岩相组合为主, 结构类型为 I₂ 型。洪水沉积扇中一般发育叠覆递变或夹有

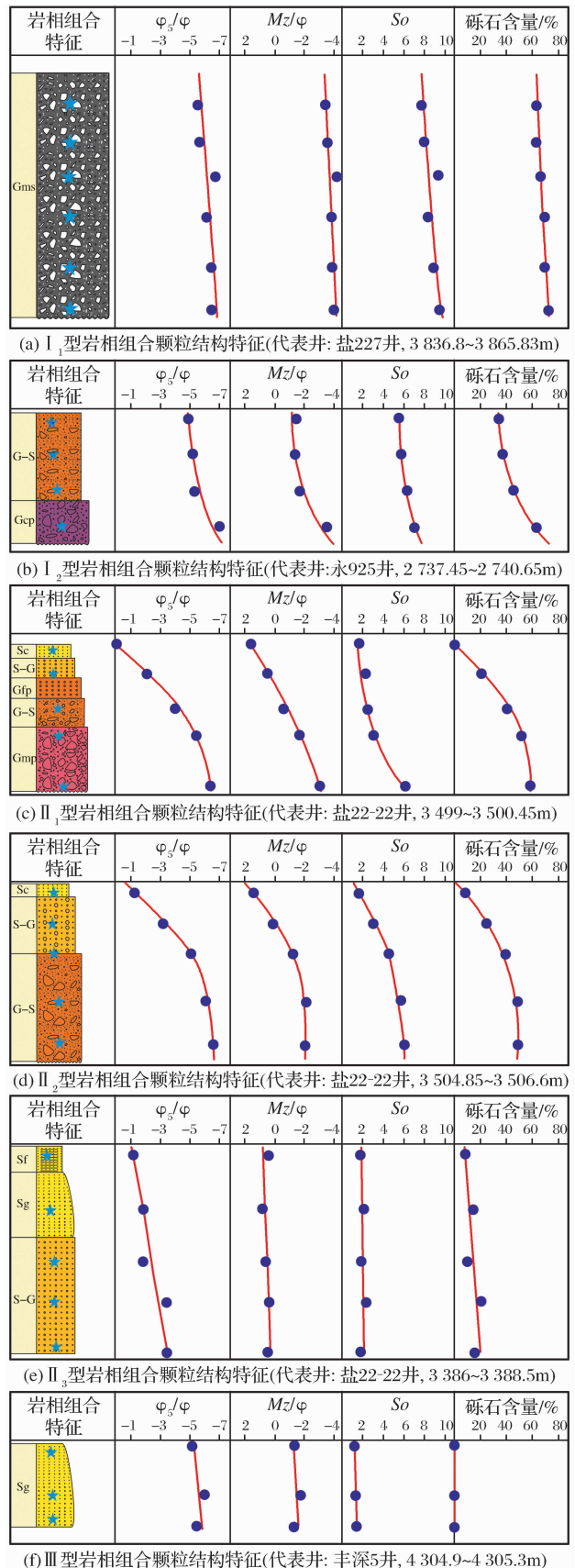


图 4 不同类型岩相组合颗粒结构特征

Fig. 4 The characteristics of particle texture of lithofacies assemblage of types

薄层泥岩的正递变砂砾岩为主。扇中后部发育的岩相组合底部为中砾岩相或砾质砂岩相,向上过渡为砾质砂岩相或细砾岩相到含砾砂岩相,顶部为砂岩相,结构类型为 II₁ 型,岩相组合间少见泥岩夹层。扇中中部发育的岩相组合为砾质砂岩相到含砾砂岩相到砂岩相,结构类型为 II₂ 型。扇中前部发育的岩相组合为含砾砂岩相到砂岩相,结构类型

为 II₃ 型,由于水动力条件的减弱,岩相组合间泥质夹层增多。扇缘以发育厚层暗色泥岩夹有薄层砂岩为特征,结构类型为 III 型,向前逐渐过渡为湖相悬浮沉积。总体上距物源方向断层边界距离由近及远砂砾岩颗粒结构参数具有粒度变细,分选变好,砾石含量降低,垂向递降度呈先增大后减小的特点(图 5)。

表 3 东营凹陷盐家地区近岸水下扇各岩相组合类型颗粒结构参数

Table 3 The particle texture parameters of different lithofacies assemblages in the nearshore subaqueous fan in the Yanjia area, Dongying Depression

颗粒结构参数特征	I ₁ 型	I ₂ 型	II ₁ 型	II ₂ 型	II ₃ 型	III 型
φ_s 顶部值/ φ	-5~-6	-4.5~-6	0~-3	0~-2.5	-1.5~0.7	0.9~2
φ_s 底部值/ φ	-6.5~-7	-5.8~-7	-6.1~-6.9	-5.6~-6.5	-2~-4.5	1~1.5
φ_s 递降度/(φ/m)	0.01~0.1	0.1~0.8	3.5~4.5	2~3.5	0.7~1.2	0.5~1
M_z 顶部值/ φ	-2.5~-3.5	-0.45~-2.8	1.5~2.7	0.7~2	0.3~2.5	1.6~3
M_z 底部值/ φ	-3~-4	-2.4~-3.7	-2~-4	-2~-3	-0.6~0.5	1.5~2.5
M_z 递降度/(φ/m)	0.05~0.1	0.25~0.8	2.9~3.7	1.6~2.3	0.2~0.7	0.5~0.6
S_o 顶部值	7~9	4.5~5.5	1.5~3.5	1.3~3	1.4~1.8	1.2~1.5
S_o 底部值	8.5~10	6~8	5~6.5	3.5~5.5	1.9~2.2	1.5~1.7
S_o 递降度	0.14~0.2	0.6~1	4.5~5.2	2~4	0.1~0.2	0.8~1
砾石含量顶部值/%	55~70	25~58	0~10	0~10	0~10	0
砾石含量底部值/%	60~80	50~72	40~60	30~50	20~30	0
砾石含量递降度/($m/\%$)	0.5~2.5	1~20	25~45	20~30	6~10	0

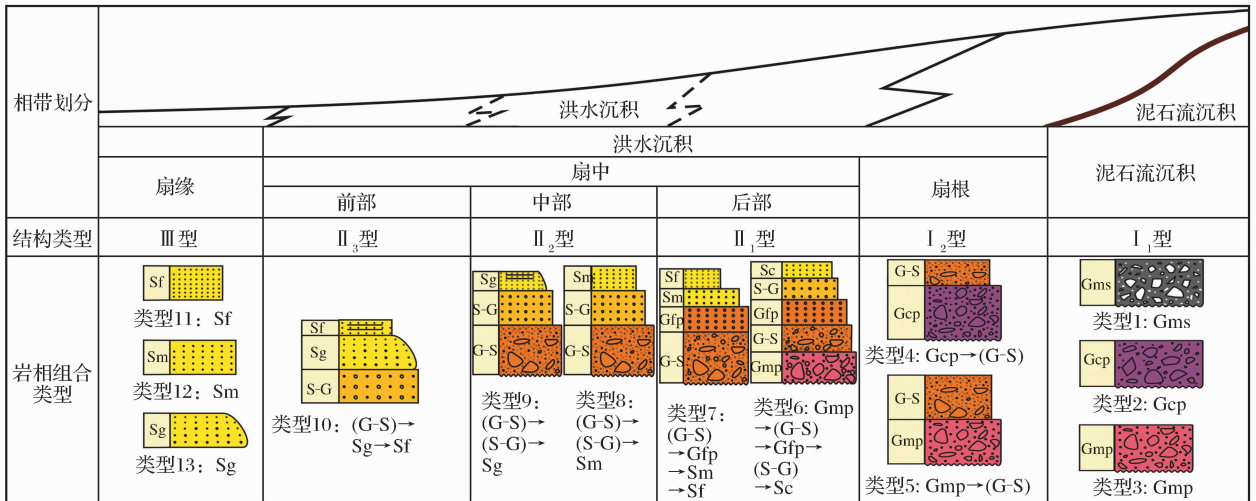


图 5 东营凹陷盐家地区沙四上亚段近岸水下扇岩相组合分布特征

Fig. 5 The distribution characteristics of lithofacies assemblages in the near-shore subaqueous fan of upper Es₄ in Yanjia area, Dongying Depression

4 理论意义探讨

对东营凹陷盐家地区沙四上亚段近岸水下扇不同部位砂砾岩颗粒结构参数的量化表征,主要有以下 2 个方面的意义。

(1)为近岸水下扇亚相的定量划分提供一定的理论基础。扇根亚相颗粒结构类型为 I 型,整体上粒度粗,分选差,颗粒结构参数递降度小;扇中亚相颗粒结构类型为 II 型,由扇中后部到扇中中部和前部,粒度由粗变细,分选由差变好,颗粒结构参数递

降度由大变小,颗粒结构类型由Ⅱ₁型过渡到Ⅱ₂型再到Ⅱ₃型;扇缘亚相颗粒结构类型为Ⅲ型,整体上粒度细,分选好,颗粒结构递降度小。根据近岸水下扇不同部位岩相组合结构参数的绝对值以及其垂向递降度的变化,可以为定量划分近岸水下扇亚相提供理论依据。由于受取心资料的制约,要精确厘定近岸水下扇不同亚相颗粒结构参数的绝对界限,目前尚存在一定难度,需要做进一步的精密取样研究。

(2)可以为近岸水下扇岩相与物性关系探讨提供一定的理论基础。不同的岩相具有不同的颗粒结构、成分、构造等属性,导致其具有不同的物性特征^[30-32]。不同的岩相又发育于扇体不同部位的岩相组合中。因此,近岸水下扇砂砾岩储层的物性和储集空间类型及其变化主要受到岩相及岩相组合的控制,不同岩相类型和相同岩相类型而不同岩相组合类型的储层特征可能产生很大差异。通过对近岸水下扇不同部位砂砾岩颗粒结构参数的量化表征,精确厘定不同部位岩相及岩相组合类型及特征,可以为近岸水下扇岩相与物性关系探讨提供一定的理论基础。

5 结论

(1)与现有的粒度分析方法相比,采用宏观岩心精描与微观薄片相结合的粒度分析方法能够准确地表征粗碎屑岩的颗粒组成,所绘制的粒度概率累积曲线能够较好地反映沉积环境以及流体性质。

(2)依据岩石结构、沉积构造和颜色等特征,将研究区近岸水下扇砂砾岩体划分为11种岩相类型和14种岩相组合类型,并将其岩相组合类型划分为3大类6小类。泥石流沉积扇根以大套块状杂基支撑砾岩相、颗粒支撑砾岩相为主,颗粒结构类型为Ⅰ₁型。洪水沉积扇根以发育叠覆递变、砾石次棱角状一次圆状的砾岩到砾质砂岩的岩相组合为主,结构类型为Ⅰ₂型。洪水沉积扇中后部发育的岩相组合底部为中砾岩相或砾质砂岩相,向上过渡为砾质砂岩相或细砾岩相到含砾砂岩相,顶部为砂岩相,结构类型为Ⅱ₁型。扇中中部发育的岩相组合为砾质砂岩相到含砾砂岩相到砂岩相,结构类型为Ⅱ₂型。扇中前部发育的岩相组合为含砾砂岩相到砂岩相,结构类型为Ⅱ₃型。扇缘以发育厚层暗色泥岩夹有薄层砂岩为特征,结构类型为Ⅲ型,向前逐渐过渡为湖相悬浮沉积。总体上距物源方向断层边界距离由近及远砂砾岩颗粒结构参数具有粒度变细,分选变好,砾石含量降低,垂向递降度先增大后减小的

特点。

参考文献(References):

- [1] Jiang Zaixing. Sedimentology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010. [姜在兴. 沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.]
- [2] Wu Zhixiong, Shi Ji'an, Zhang Yongshu, et al. Sedimentary features and facies of Paleogene braided river in Mabei area [J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(5): 849-855. [吴志雄, 史基安, 张永庶, 等. 柴达木盆地北缘马北地区古近系辫状河微相特征及沉积模式[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(5): 849-855.]
- [3] Yang Fei, Zou Niuniu, Shi Ji'an, et al. Probability cumulative grain size curves in the Paleogene clastic sediments and environmental significance in Maxian region of northern Qaidam Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(4): 690-700. [杨飞, 邹妮妮, 史基安, 等. 柴达木盆地北缘马仙地区古近系碎屑岩沉积环境粒度概率累积曲线特征[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(4): 690-700.]
- [4] Visher G S. Grain size distributions and depositional processes [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1969, 39: 1074-1106.
- [5] Yuan Jing, Du Yumin, Li Yunnan. Probability cumulative grain size curves in terrigenous depositional environments of the Paleogene in Huimin Sag [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3): 103-107. [袁静, 杜玉民, 李云南. 惠民凹陷古近系碎屑岩主要沉积环境粒度概率累积曲线特征[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(3): 103-107.]
- [6] Zhu Xiaomin, Kang An, Wang Guiwen, et al. Sedimentary characteristics of Jurassic braid delta in Santanghu Basin [J]. Journal of the University of Petroleum, China: Natural Science Edition, 1998, 22(1): 14-17. [朱筱敏, 康安, 王贵文, 等. 三塘湖盆地侏罗系辫状河三角洲沉积特征[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1998, 22(1): 14-17.]
- [7] Yuan Jing, Yang Xuejun, Lu Zhiyong, et al. Probability cumulative grain size curves in sandy conglomerate of the upper Es₁ in Yan 22 Block, Dongying Depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(5): 815-823. [袁静, 杨学君, 路智勇, 等. 东营凹陷盐 22 块沙四上亚段砂砾岩粒度概率累积曲线特征[J]. 沉积学报, 2011, 29(5): 815-823.]
- [8] Sui Fenggui. Characteristics of reservoir dynamic on the sand-conglomerate fanbodies in the steep-slope belt of continental fault basin: A case study on Dongying Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(4): 335-340. [隋凤贵. 断陷湖盆陡坡带砂砾岩扇体成藏动力学特征——以东营凹陷为例[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(4): 335-340.]
- [9] Kong Fanxian. Exploration technique and practice of sandy-conglomeratic fans in the northern part of Dongying Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(5): 27-31. [孔凡仙. 东营凹陷北带砂砾岩扇体勘探技术与实践[J]. 石油学报, 2000, 21(5): 27-31.]
- [10] 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. [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.]
- [11] Xu Xiaohui, Xu Jianhua, Xie Yuanjun, *et al.* The reservoir rocks of the subaqueous fans in the western segment of the steep slope zone of northern Dongying Depression, Shandong[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2003, 23(1): 84-85. [徐晓晖, 许建华, 谢远军, 等. 东营凹陷北部陡坡带西段水下扇体储集层特征[J]. *沉积与特提斯地质*, 2003, 23(1): 84-85.]
- [12] An Jie, Cao Yingchang, Wang Yanzhong. Evolutional characteristics of physical property of sand-conglomerate reservoirs in nearshore subaqueous fans in Es₄ in the northern zone of the Dongying Depression[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2008, 30(6): 221-222. [安洁, 操应长, 王艳忠. 东营凹陷北带沙四段近岸水下扇砂砾岩储层物性演化特征[J]. *石油天然气学报*, 2008, 30(6): 221-222.]
- [13] Zhang Qing. Reservoir characteristics and effective reservoir identification in upper Sha₄ member of Yan222 block, Dongying Depression[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2008, 15(4): 33-34. [张清. 东营凹陷盐 222 块沙四段上亚段有效储层识别[J]. *油气地质与采收率*, 2008, 15(4): 33-34.]
- [14] Xia Jingsheng, Zhong Jianhua, Gao Xiangcheng. Characteristics and influencing factors of sand-conglomerate bodies in Es₄ in the Fengshen1 area[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2007, 29(3): 199-200. [夏景生, 钟建华, 高祥成. 丰深 1 地区沙四段砂砾岩体的储层特征及影响因素[J]. *石油天然气学报*, 2007, 29(3): 199-200.]
- [15] Feng Zengzhao. *Sedimentology*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993. [冯增昭. *沉积岩石学*[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993.]
- [16] Yang Guang. Analytical technique of gravels in core image and its application in research of conglomerate fan: Taking the conglomerate fan, northern steep slope, Dongying Sag as an example[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2010, 17(5): 20-23. [杨光. 岩心图像砾石分析技术在砂砾岩扇体中的应用——以东营凹陷北部陡坡带扇体为例[J]. *油气地质与采收率*, 2010, 17(5): 20-23.]
- [17] Sun Yu, Ma Shizhong, Shu Ping, *et al.* Analysis on grain-size characteristics and sedimentary environment of Es₄ conglomerate reservoirs of Xingcheng gas field in Songliao Basin[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2010, 32(4): 171-176. [孙雨, 马世忠, 舒萍, 等. 松辽盆地兴城气田营四段砾岩储层粒度特征与沉积环境分析[J]. *石油天然气学报*, 2010, 32(4): 171-176.]
- [18] Liu Hui, Cao Yingchang, Yuan Jing, *et al.* The types and reservoir characteristics of glutenite in the upper Es₄ member of Shengtuo area[J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2010, 32(5): 10-11. [刘晖, 操应长, 袁静, 等. 胜坳地区沙四上亚段砂砾岩类型及储层特征[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2010, 32(5): 10-11.]
- [19] Liu Fang, Wang Fenghua, Tan Bintian. Sedimentary characteristics and model of sandy conglomerate bodies in upper submember of Es₄ of Tuo 76 block, Shengtuo area[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2010, 17(5): 48-50. [刘芳, 王风华, 谭滨田. 胜坳地区坨 76 块沙四段上亚段砂砾岩体沉积特征及沉积模式[J]. *油气地质与采收率*, 2010, 17(5): 48-50.]
- [20] Ran Jing, Du Gu, Pan Zhongxi. Study on methods for particle size analysis of sediment samples[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2011, 30(6): 669-676. [冉敬, 杜谷, 潘忠习. 沉积物粒度分析方法的比较[J]. *岩矿测试*, 2011, 30(6): 669-676.]
- [21] Li Wenkai, Wu Yuxin, Huang Zhimin, *et al.* Measurement results comparison between laser particle analyzer and sieving method in particle size distribution[J]. *China Powder Science and Technology*, 2007, 4(5): 10-13. [李文凯, 吴玉新, 黄志民, 等. 激光粒度分析和筛分法测粒径分布的比较[J]. *中国粉体技术*, 2007, 4(5): 10-13.]
- [22] Zhang Fuyuan, Feng Xiuli, Zhang Weiyan, *et al.* Comparison and calibration of laser grain size analysis with pipette-sieve method: A solution for the underestimation of the clay fraction of surface sediments from the eastern South China Sea[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(4): 767-773. [张富元, 冯秀丽, 章伟艳, 等. 南海表层沉积物的沉降法和激光法粒度分析结果对比和校正[J]. *沉积学报*, 2011, 29(4): 767-773.]
- [23] Cheng Peng, Gao Shu, Li Xusheng. Evaluation of a wide range laser particle size analyses and comparison with pipette and sieving methods[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(3): 449-454. [程鹏, 高抒, 李徐生. 激光粒度仪测试结果及其与沉降法、筛析法的比较[J]. *沉积学报*, 2001, 19(3): 449-454.]
- [24] Jiang Mingli. Geological applications of grain size analysis[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2009, 31(1): 161-163. [蒋明丽. 粒度分析及其地质应用[J]. *石油天然气学报*, 2009, 31(1): 161-163.]
- [25] Xiao Chenxi, Li Zhizhong. The research summary of grain size analysis and its application in the sedimentation[J]. *Journal of Xinjiang Normal University: Natural Sciences Edition*, 2006, 25(3): 118-122. [肖晨曦, 李志忠. 粒度分析及其在沉积学中应用研究[J]. *新疆师范大学学报: 自然科学版*, 2006, 25(3): 118-122.]
- [26] Ding Xigui, Ye Siyuan, Gao Zongjun. Development and applications of grain size analysis technique[J]. *Global Geology*, 2005, 24(2): 203-207. [丁喜桂, 叶思源, 高宗军. 粒度分析理论技术进展及其应用[J]. *世界地质*, 2005, 24(2): 203-207.]
- [27] Yu Xinghe, Wang Defa, Sun Zhihua. Lithofacies types, vertical profile features and reservoir geological models of braided deltaic sandbodies in faulted lake basin: The observation on deposition of modern deltas in Daihai Lake, Inner Mongolia[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 24(2): 203-207. [于兴河, 王德发, 孙志华. 湖泊辫状河三角洲岩相、层序特征及储层地质模型——内蒙古岱海湖现代三角洲沉积考察[J]. *沉积学报*, 1995, 13(1): 50-52.]

- [28] Zhang Zhijie, Li Wei, Yang Jiajing, *et al.* Lithofacies association and depositional characteristics of the Upper Triassic Xujiahe Formation in Guang'an area, central Sichuan Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(1): 296-305. [张志杰, 李伟, 杨家静, 等. 川中广安地区上三叠统须家河组岩相组合与沉积特征[J]. *地学前缘*, 2009, 16(1): 296-305.]
- [29] Gao Yongjin. Sedimentary cycle division and correlation of sand-conglomerate body: A case of upper Sha IV Formation of Yanjia area, Jiyang Depression[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2010, 17(6): 6-7. [高永进. 砂砾岩体沉积旋回划分及对比方法——以济阳拗陷盐家地区沙四段上亚段为例[J]. *油气地质与采收率*, 2010, 17(6): 6-7.]
- [30] Chen Huanqing, Hu Yongle, Ran Qiquan, *et al.* Lithofacies characteristics of volcanic gas reservoirs and their influence on reservoir physical properties: A case study of Member 1 of Cretaceous Yingcheng Formation in Xudong area of the Xushen Gasfield[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2011, 30(1): 61-68. [陈欢庆, 胡永乐, 冉启全, 等. 火山岩气藏储层岩相特征及其对储层物性的影响——以徐深气田徐东地区白垩系营城组一段火山岩为例[J]. *岩石矿物学杂志*, 2011, 30(1): 61-68.]
- [31] Wu Yanxiong, Wang Pujun, Qu Licai, *et al.* Detailed description of lithology, lithofacies and porosity and permeability of the first and the lower member of Yingcheng Formation: Based on the latest data of Ying-1D1 well cores in standard section[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2007, 37(6): 1193-1197. [吴颜雄, 王璞珺, 曲立才, 等. 营城组一段及下段岩性岩相和储层物性的精细刻画——基于标准剖面营一 D1 井全取心钻孔资料[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2007, 37(6): 1193-1197.]
- [32] Wang Pujun, Wu Heyong, Pang Yanming, *et al.* Volcanic facies of the Songliao Basin: sequence, model and the quantitative relationship with porosity & permeability of the volcanic reservoir[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2006, 36(5): 806-810. [王璞珺, 吴河勇, 庞颜明, 等. 松辽盆地火山岩相: 相序、相模式与储层物性的定量关系[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2006, 36(5): 806-810.]

The Particle Texture Characteristics of Sandy Conglomerate in the Nearshore Subaqueous Fan of Upper Es₄ in the Yanjia Area, Dongying Depression

CAO Ying-chang¹, MA Ben-ben¹, WANG Yan-zhong¹, LIU Hui-Min²,

GAO Yong-jin², LIU Hai-ning³, CHEN Lin⁴

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Geological Scientific Research Institute of Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257015, China;

3. Geophysical Research Institute of Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257015, China;

4. Western New Prospect Research Center of Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257015, China)

Abstract: It's difficult to analyze the particle texture characteristics of coarse clastic rocks (conglomerate, conglomerate-sandstone, etc.) by using existing methods of particle size analysis. A method of combining macroscopic core delineation with microscopic thin-section identification was used. Probability cumulative grain size curves from gravel to sand were established. The parameters of particle texture were calculated, and the characteristics of particle texture among different lithofacies assemblages in near-shore subaqueous fan were studied quantitatively. According to the characteristics of rock structure, sedimentary structure and rock color, the sandy conglomerate bodies are separated into 11 types of lithofacies as well as 14 types of lithofacies assemblages of upper Es₄ in the Yanjia area, Dongying Depression. On the basis of parameters of particle texture such as φ_5 , Mz , So , gravel contents and the characteristics of their vertical degradation degree, the types of lithofacies assemblages are divided into three categories and six subcategories. Generally, with the distance from near to distant from the fault boundary in source direction, particle size turns fine, sorting becomes better, gravel contents decrease and vertical degradation degree increases at first then decreases.

Key words: Nearshore subaqueous fan; Sandy conglomerate; Particle texture; Upper Es₄; Dongying Depression