

渤海湾盆地东营凹陷永北地区沙河街组三段砂砾岩粒度概率累积曲线特征及沉积环境意义

王铸坤¹,李宇志²,操应长¹,王艳忠¹,杨田¹,赵博²

[1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛266580; 2. 胜利油田分公司东辛采油厂,山东东营257094]

摘要:沉积水动力条件是沉积相研究的基础,粒度分布特征是分析水动力条件的关键。在岩心精细观察描述和相分析基础上,利用大量粒度分析资料对渤海湾盆地东营凹陷永北地区沙河街组三段砂砾岩粒度概率累积曲线特征及其与水动力机制的对应关系进行了系统研究。研究表明:研究区砂砾岩粒度概率累积曲线主要包括泥石流型、高密度浊流型、低密度浊流型和牵引流型4种基本类型和泥石流-低密度浊流过渡型和高密度浊流-低密度浊流过渡型2种过渡类型。泥石流型包括宽缓上拱式和弧线-直线复合式,反映泥石流沉积特点,多发育在近岸水下扇主水道和扇三角洲平原。高密度浊流型包括悬浮一段式和低斜两段式,反映高密度浊流沉积特点,多发育在近岸水下扇水道、扇三角洲水上及水下分流河道内。低密度浊流型为低斜两段式和低斜两跳一悬式,反映低密度浊流特点,主要发育在近岸水下扇主水道间、辫状水道间。牵引流型包括高斜两段式、滚动-跳跃-悬浮三段式、一跳一悬夹过渡式及两跳一悬式,反映牵引流沉积特点,在近岸水下扇中、扇三角洲前缘最发育。泥石流-低密度浊流过渡型为台阶状多段式,反映泥石流向浊流逐渐转化,仅发育在扇三角洲水下分流河道。高密度浊流-低密度浊流过渡型为一跳一斜加过渡式,反映浊流浓度降低的过程,只在近岸水下扇外扇深切水道内发育。

关键词:粒度概率累积曲线;近岸水下扇;扇三角洲;沉积环境;沙河街组;永北地区;东营凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Probability cumulative grain-size distribution curves and their implications for sedimentary environment identification of coarse clastic rocks of the Es³ in Yongbei area, the Dongying Sag, Bohai Bay Basin

Wang Zhukun¹, Li Yuzhi², Cao Yingchang¹, Wang Yanzhong¹, Yang Tian¹, Zhao Bo²

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

2. Dongxin Oil Plant, SINOPEC Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong 257094, China)

Abstract: Sediment hydrodynamic conditions are the basis of the study on sedimentary facies and the key to hydrodynamic analysis is the distribution of grain size. On the basis of elaborate observation of cores and facies analysis, characteristics and its relationship with sedimentary environment of probability cumulative grain-size distribution curves of coarse clastic rocks of Es³ in Yongbei area of the Dongying Sag, Bohai Bay Basin are systematically studied through mass grain size data. The grain-size distribution curves can be classified into 4 basic types (including debris flow type, high-density turbidity current type, low-density turbidity current type and tractive current type) and 2 transitional types (including debris flow to low-density turbidity current transitional type and high-density turbidity current to low-density turbidity current transitional type). The debris flow type includes broad convex arc pattern and arc-linear composite pattern reflecting debris flow deposition, and mostly develops in main channels of inner fan of the nearshore subaqueous fan and the fan-delta plain. The high-density turbidity current type consists of one suspension segment pattern and low-slope two-segment pattern reflecting high-density turbidity current deposition, and develops in channels of the nearshore subaqueous fan and aquatic or subaqueous distributary channels of the fan-delta. The low-density turbidity current type contains low-slope

收稿日期:2016-01-31;修订日期:2017-02-20。

第一作者简介:王铸坤(1990—),男,博士研究生,层序地层学与沉积学。E-mail: wangzhukun1126@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(U1262203);中央高校基本科研业务费专项资金项目(15CX08001A)。

two-segment pattern and low-slope two bouncing segment-one suspension segment pattern reflecting low-density turbidity current deposition, and mainly develops in space between main channels and space between braided channels of the near-shore subaqueous fan. The tractive current type includes high-slope two-segment pattern, one roll segment-one bouncing segment-one suspension segment pattern, one bouncing segment-one suspension segment-one transitional zone pattern and two bouncing segment-one suspension segment reflecting tractive current deposition, and mainly develops in middle fan of the nearshore subaqueous fan and fan-delta front. The debris flow to low-density turbidity current transitional type shows step-like multi-segment pattern representing transition from debris flow to turbidity current and develops in subaqueous distributary channels of the fan-delta. The high-density turbidity current to low-density turbidity current transitional type is of one bouncing segment-one suspension segment-one transitional zone pattern and only develops in deeply-cutting channels of the outer fan on behalf of the density decline phenomenon of turbidity current.

Key words: probability cumulative grain-size distribution curve, nearshore subaqueous fan, fan-delta, sedimentary environment, Shahejie Formation, Yongbei area, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

粒度是碎屑岩颗粒最重要的结构特征, 粒度大小直接决定了岩石的类型和性质^[1]。粒度分布受到搬运介质性质(风、水、冰等)、搬运介质能量(流速、流量、启动能力)、搬运方式(滚动、跳跃、悬浮)等流体动力学条件的控制^[2-3], 反之可作为判别水动力条件的标尺和划分沉积环境的依据^[4]。应用粒度概率累积曲线建立沉积环境的典型模式最早由 Visher^[5] 提出, 现已成为环境和沉积相分析的重要方法和手段^[4], 在湖相滩坝、深水重力流、黄土沉积、现代沉积的水动力学研究^[6-14] 及沉积相(微相)的判别中发挥重大的作用^[15-18]。

近岸水下扇是陆源碎屑沿冲沟直接入湖、形成过程主要受重力流沉积作用的控制的典型的事件性沉积。扇三角洲多以陆上事件性洪流沉积为主体, 具有复合水动力机制, 兼具牵引流、重力流特点, 故沉积作用过程较为复杂^[1]。本文以渤海湾盆地东营凹陷永北地区沙河街组三段(简称沙三段)砂砾岩沉积体为研究对象, 利用激光粒度分析方法对研究区取心井进行粒度分析, 绘制 120 余块样品的粒度概率累积图件, 总结粒度概率累积曲线类型和不同沉积(微)相的粒度概率累积曲线组合特征, 以期研究区砂砾岩体沉积过程提供水动力解释, 为其他类似地区近源砂砾岩体的沉积(微)相判别和研究提供参考。

1 研究区概况

东营凹陷是中国东部典型的箕状裂陷-坳陷湖盆, 北部陡坡带是由陈南铲式扇形边界断层控制的近东西走向的陡斜坡构造带^[19]。东营凹陷沙三段沉积时期盆地继承了沙四段初始裂陷和伸展的特点, 陈南基底断裂持续活动, 沉降速率可达到 300 ~ 500 m/Ma^[20], 在北部陡坡带形成了高坡度、近物源、沟梁相

间、邻近深水区的沉积背景, 纵向上发育巨厚的砂砾岩体^[21], 重力流沉积作用明显^[2]。永北地区位于东营凹陷北部陡坡带东段, 北临陈家庄凸起, 南邻民丰洼陷, 东靠青坨子凸起(图 1), 沉积与构造特征与东营凹陷具有一致性, 在沙三段沉积时期沿陈南基底断裂发育了大规模近岸水下扇和扇三角洲沉积体^[22-24]。

2 粒度概率累积曲线类型

在岩心精细观察和描述的基础上, 结合宏观层理发育特征和粒序变化, 分析粒度概率图直线段数目、线段分布区间、含量百分比、线段斜率、混合度、线段之间的交切点等特征, 总结出 4 种基本类型及 2 种主要过渡类型。

2.1 基本类型

2.1.1 泥石流型

1) 宽缓上拱式

曲线形态表现为一宽缓上拱的弧形, 滚动总体、跳跃总体和悬浮总体渐变过渡而无明显的转折, 粒度区间 -1 ~ 8。曲线斜率逐渐变小, 整体在 20°, 细尾部斜率最低, 分选极差^[1-2], 颗粒为递变悬浮搬运, 岩相以块状层理、粒级混杂的杂基支撑中-细砾岩、砾质砂岩为主, 个别砾石可达粗砾, 粒度图上砾石含量一般高于 10%, 杂基的粒度范围从粘土到细砾皆可出现。砾石成分复杂, 可出现花岗岩砾石、石英质砾石、灰岩砾和泥岩砾等多种类型, 反映了阵发性、高能条件下, 砂、砾、泥质来不及分选, 碎屑物质同时堆积而形成的泥石流沉积物。此类曲线多出现于近岸水下扇主水道微相(图 2a)。

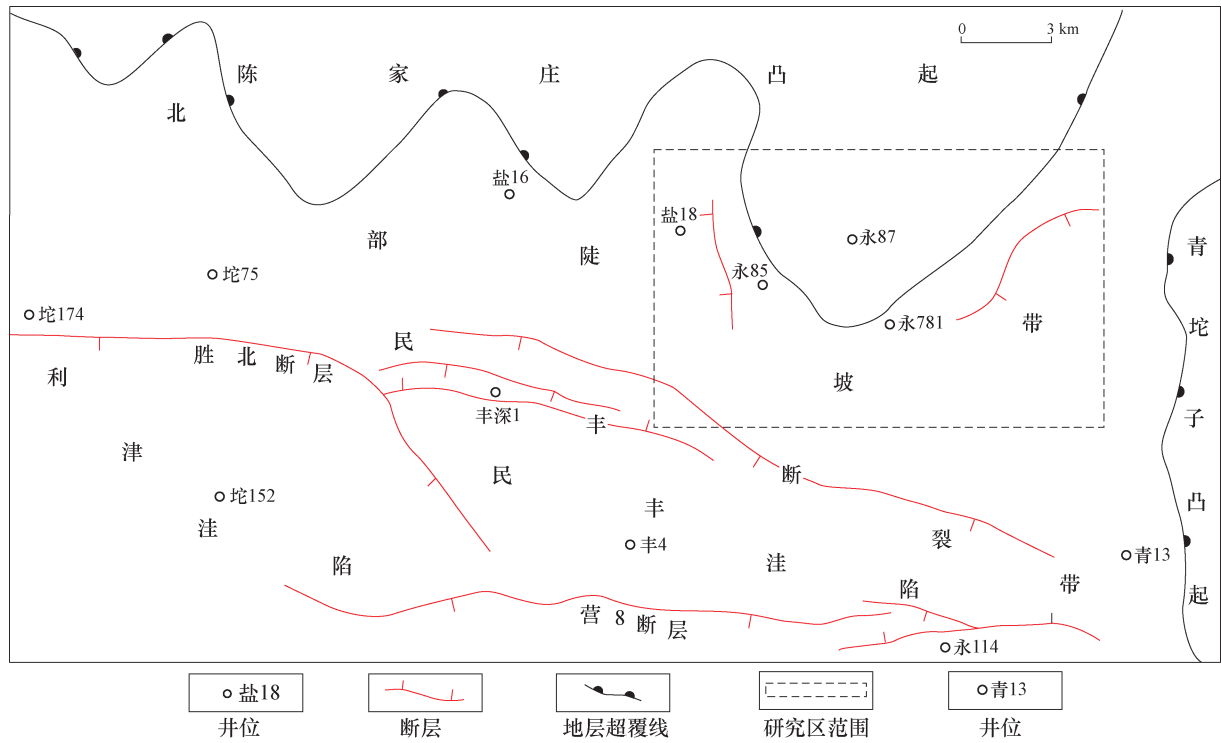


图1 东营凹陷永北地区构造位置

Fig.1 Structural location of Yongbei area in the Dongying Sag

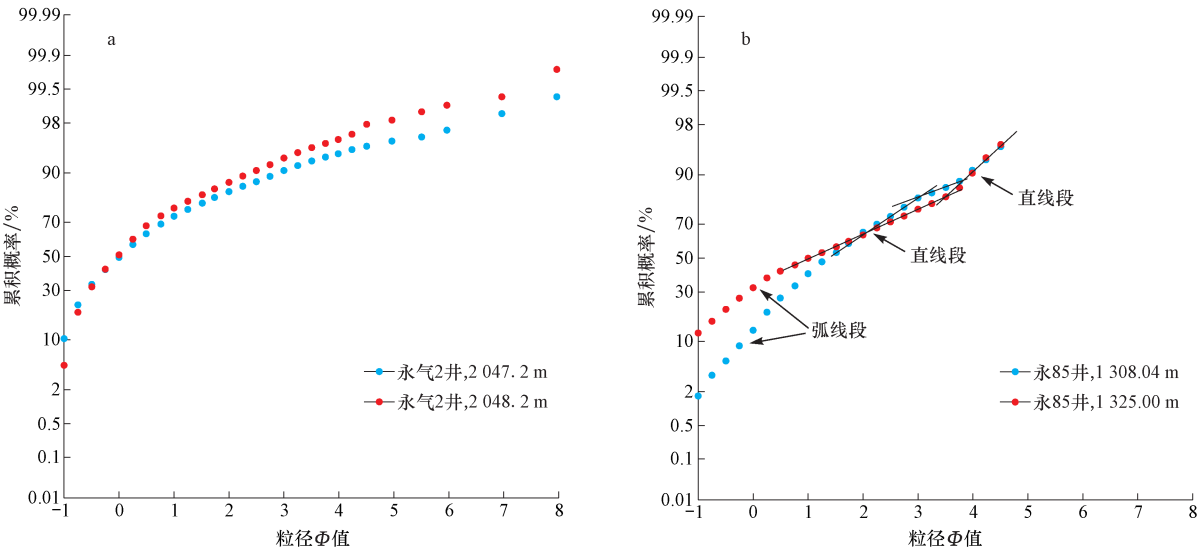


图2 东营凹陷永北地区沙三段泥石流型粒度概率累积曲线

Fig.2 Probability cumulative grain-size distribution curves of debris flow pattern of the Es³ in Yongbei area of the Dongying Sag

a. 宽缓上拱式; b. 弧线-直线复合式

2) 弧线-直线复合式

研究区发育一种特殊的粒度概率累积曲线类型,笔者称之为弧线-直线复合式,曲线整体为一条弧线段与多条直线段组成的复合样式。与宽缓上拱式不同,曲线在细尾部为直线段且斜率逐渐增大,向上逐渐“倾翘”,反映颗粒分选变好的特点,类似现代沉积中

稀性泥石流的特点^[25-26]。粗碎屑含量高,可达到50%左右,粒度图中砾石组分可超过10%,表明流体仍具有较强的搬运能力。相对于宽缓上拱式粒度曲线,粗碎屑颗粒间填充物质以砂、粗粉砂为主,细粉砂-粘土含量很低,导致颗粒之间的附加黏着力降低,较高的颗粒浓度形成了较大离散力,使泥石流沉积物

不易发生卸载而崩溃。分析该粒度曲线的水动力特征认为,细粉砂-粘土形成的粘性浆体比重较小,聚集在稀性泥石流上部以悬移或跳跃形式搬运,而下部粗碎屑以滚动、推移形式搬运,最终形成了稀性泥石流的“二层流”特征。需要指出,由于样品分析范围(粒径小于2 mm)的局限性,分析结果不能代表泥石流沉积整体粒度特征,但复模态的泥石流沉积粗细混杂、整体悬浮搬运-卸载的特点在宽缓上拱形和缓波浪形曲线上仍充分体现^[2]。岩石类型以发育块状层理的中-细砾岩、砾质砂岩为主,该类曲线仅发育在扇三角洲平原水上分流河道微相(图2b)。

2.1.2 高密度浊流型

浊流是水和大量呈自悬浮的沉积物质混合而成的一种密度流,在水体底部呈高速紊流状态搬运,湍流支撑机制,受阻抗降和离散压力起支持作用的最低质点浓度为20%~30%。含粗砂以上质点的水流,质点浓度小于20%则不稳定;中砂以下质点组成的浊流在各种浓度下都可以稳定^[1],笔者以30%浓度为界,将研究区浊流划分为粗砂-砾石浓度高于30%、以阻抗降、离散压力支撑的高密度浊流和粗砂-砾石浓度小于30%、中砂以下质点浓度为主、湍流支撑机制的低密度浊流。

曲线形态为悬浮一段式或低斜两段式,斜率一般不超过45°,整体分选很差,粒度组分以悬浮总体为主,粗碎屑(粗砂、砾石)含量超过40%,其中砾石的比重高于20%。悬浮一段式曲线表现为整体悬浮搬运

方式,分选差;二段式由分选较好、含量高的跳跃总体和分选差、含量较低的悬浮总体组成,两者交切点在1.5(Φ)以下。两段式中粗碎屑含量约50%~70%且多为跳跃搬运方式,最粗的颗粒组分开始卸载,多出现在层的底部;悬浮一段式粒度偏细且粗碎屑含量低于前者,说明流体负载能力减弱,多出现在层的中上部;岩相为发育块状层理、正粒序层理的细砾岩、砾质砂岩和含砾砂岩,两段式多出现于近岸水下扇主水道和辫状水道底部,一段式在扇三角洲平原水上分流河道更为常见(图3a)。

2.1.3 低密度浊流型

由粒度概率图可知,粗碎屑(粗砂、砾石)含量低于30%且砾石的含量很低,一般在10%以下,反映低密度浊流的搬运能力弱于高密度浊流。曲线主要由跳跃总体和悬浮总体组成,交切点粒径 Φ 值在2~3.5,其中跳跃总体含量30%~40%,中、粗砂为主,斜率约30°~40°,分选中等。悬浮总体含量较高,约60%~70%,包括细砂、粉砂和粘土等混杂组分,斜率约15°~20°,几乎无分选。部分曲线发育双跳跃组分,反映了低密度浊流搬运过程中受到其他水动力作用的影响,如风暴作用。岩相主要为发育块状层理的含砾砂岩,该曲线类型在近岸水下扇主水道间、辫状水道间较常见(图3b)。

2.1.4 牵引流型

典型的牵引流型粒度概率累积曲线一般包括跳跃

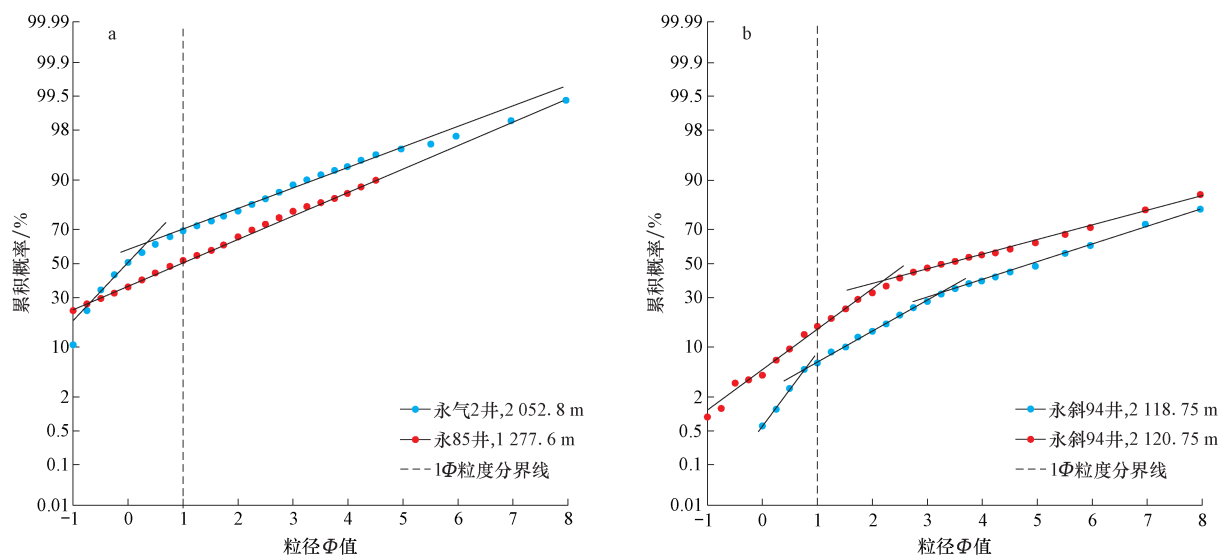


图3 东营凹陷永北地区沙三段浊流型粒度概率累积曲线

Fig. 3 Probability cumulative grain-size distribution curves of turbidity current pattern of the Es^3 in Yongbei area of the Dongying Sag

a. 高密度浊流型; b. 低密度浊流型

总体和悬浮总体两段,有时发育滚动总体。在河口处受到河流作用、波浪作用等复杂水动力条件影响,跳跃总体可发育为两个次总体或与悬浮总体之间发育过渡段(混合带)。

1) 一跳一悬两段式

此类型反映了典型河流沉积物的粒度概率曲线特征,发育高斜率跳跃组分和低斜率悬浮组分,以跳跃组分为主,含量约60%~70%,最高可达到90%,以中、粗砂为主,含少量细砂、粗粉砂组分,斜率范围在40°~70°,分选中等-好,与悬浮次总体截点在3~4(粒径 Φ 值)。悬浮组分含量低,粒度跨度范围>3(粒径 Φ 值),斜率约15°,分选差。岩相表现为发育平行层理、斜层理含砾砂岩、中-粗砂岩,底部可见弱冲刷现象,由粒度曲线分析可知,中-粗砂组分以跳跃形式搬运且含量可高达40%,代表了高含沙量河流的中上游低弯度段沉积^[15]。研究区该类曲线多发育在水流能量强、类似辫状河道的扇三角洲水下分流河道微相、近岸水下扇辫状水道间微相(图4a)。

2) 滚动-跳跃-悬浮三段式

该类曲线反映出一种下游河流沉积特征,由于水流分支,水动力减弱,原来呈跳跃搬运的部分转变为滚动方式^[15]。粒度曲线主要以跳跃组分构成,含量约70%~80%,粗截点介于2~3(粒径 Φ 值),细截点在5.5(粒径 Φ 值)附近,分选中等,直线斜率为45%~60%。滚动组分含量低、分选差,为少量中砂组分,悬浮组分含量约15%,斜率13%左右。该曲线主要反映缺乏强水流的沉积条件,水流能量弱于前述两段式曲线,岩相主要为发育平行层理、斜层理的含砾砂岩、中细砂岩。该类曲线多出现在扇三角洲前缘水下分流河道相序顶部、河道间微相(图4b)。

3) 一跳一悬夹过渡式

曲线的跳跃组分含量约50%,粒度区间2~3.5(粒径 Φ 值),跳跃颗粒包含细砂、粗粉砂,直线段斜率55°~70°,分选较好,说明水流稳定、有很强的淘洗能力。过渡段含量25%~30%,斜率约30°~40°,分选中等-差,粗截点在13.5(粒径 Φ 值)附近,细截点在4(粒径 Φ 值)附近,其搬运方式介于递变悬浮搬运和跳跃方式搬运之间。悬浮组分含量15%~30%,斜率约15%,表明悬浮组分仍然占有较大比例,但分选很差,该曲线反映了枯(平)水期稳定水流进入湖盆后能量降低的水动力特征^[4,9]。过渡带是河口地区快速沉积后的再分选的滞后现象:河流流入盆地后,水流能量降低,密度较大的河水快速下沉,加之湖湾地区波浪作用不强,下沉物质来不及加工分选,使较细部分并入悬浮组分粗端使其粗

端弯曲,较粗部分并入跳跃组分细端使其细端弯曲便形成了过渡带^[4]。岩相为发育平行层理、楔状交错层理的粉细砂岩,该曲线仅出现在扇三角洲前缘水下分流河道内(图4c)。

4) 两跳一悬式

曲线类型与两段式粒度组成类似,由斜率较高、分选好的跳跃总体和斜率低、分选差的悬浮总体组成,但区别在于其跳跃总体由两个斜率不同的次总体组成(简称下次总体和上次总体)。上次总体与下次总体交切点在3(粒径 Φ 值)附近,其中下次总体粒度分布在1~3(粒径 Φ 值),含量约8%~20%,斜率在45°左右,分选中等;上次总体粒度分布在3~4(粒径 Φ 值),含量约65%~80%,斜率较大,约60°~65°,分选更好,比上次总体反映更强的水动力条件。悬浮组分与跳跃组分的截点处于4(粒径 Φ 值)附近,含量约20%,斜率低于14°。岩相为平行层理、反粒序层理细砂岩、粉砂岩,颗粒结构成熟度和成分成熟度很高。该类型曲线多发育在扇三角洲前缘河口坝微相,反映河口坝砂体受到河流作用和湖浪冲刷的双重影响(图4d)。

2.2 过渡类型

2.2.1 泥石流-低密度浊流过渡型

该曲线的典型特征是由若干斜率不等的直线段组成,在研究区永85井较发育。直线段数目较多,难以区分跳跃组分和悬浮组分,单条线段粒度区间跨度大多小于1(粒径 Φ 值),无稳定的分选性。粒度曲线整体斜率为30°~60°,其中粗砂-砾石分选好,直线段斜率可达70°,中砂、细砂次之,粉砂-粘土组分的分选最差,反映了流体能量不稳定且逐渐减弱,湍动性强的特点^[2]。在突发性洪水作用下,泥石流冲出水道进入相对宽阔的水道或河道间地带,由于湖水的顶托作用和沉积地形的急剧变化,导致水流能量的复杂多变,以至无法区分稳定的搬运方式。岩相主要为块状层理含砾砂岩、砾质砂岩,主要发育在扇三角洲水下分流河道间微相(图5a)。

2.2.2 高密度浊流-低密度浊流过渡型

该类型曲线由斜率依次降低的跳跃总体、过渡段和悬浮总体组成,跳跃总体颗粒为粗碎屑(粗砂、砾石),含量约50%,斜率60°左右,分选好。过渡段组分以中砂为主,含少量细砂,含量大约40%,粗截点在1(粒径 Φ 值)附近,细截点在2.5(粒径 Φ 值)附近。悬浮组分含量高于30%,斜率约15°,粒度分布介于2.5~

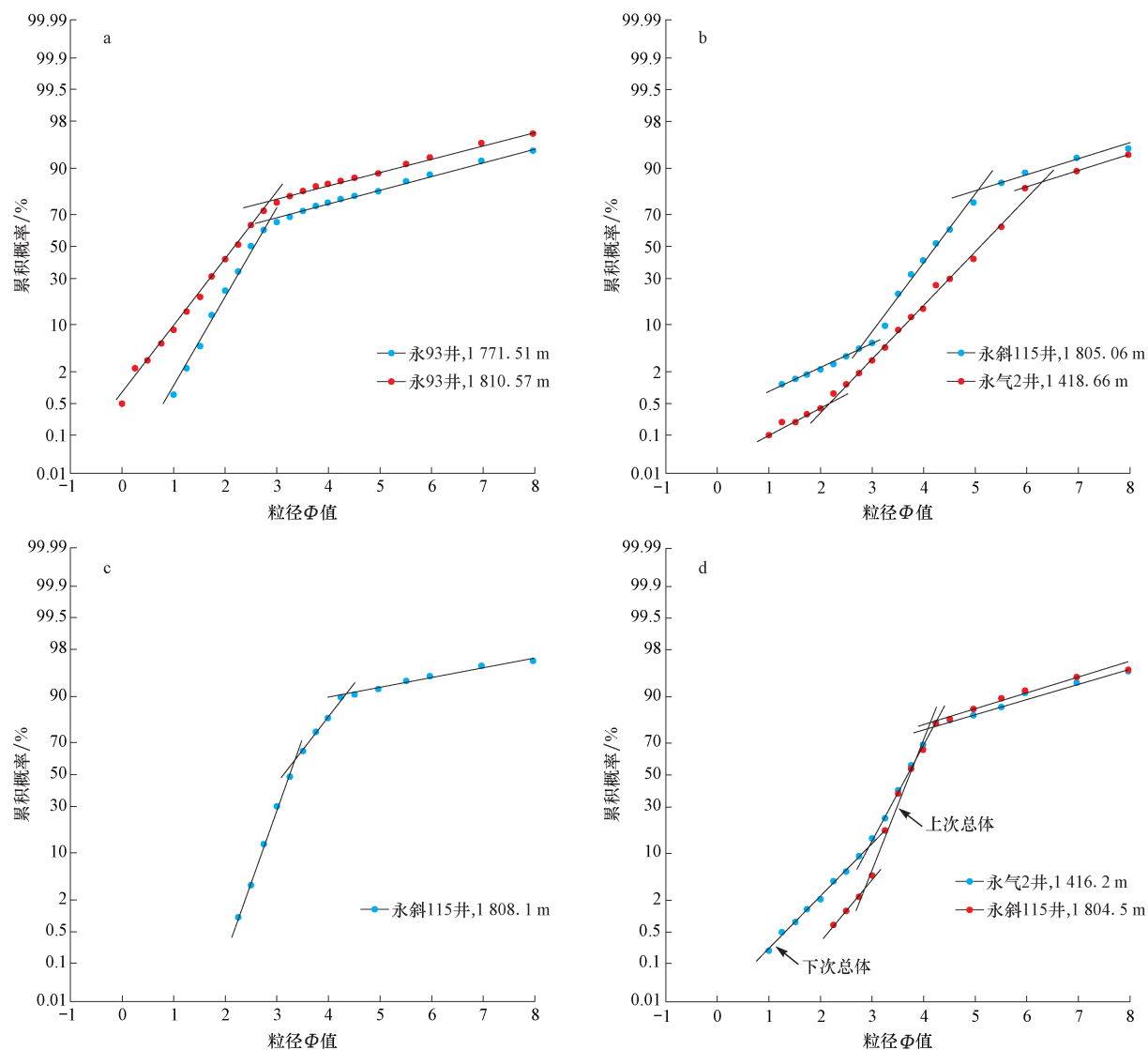


图4 东营凹陷永北地区沙三段牵引流型粒度概率累积曲线

Fig. 4 Probability cumulative grain-size distribution curves of tractive current pattern of the Es³ in Yongbei area of the Dongying Sag

a. 一跳一悬两段式; b. 滚动-跳跃-悬浮三段式; c. 一跳一悬夹过渡式; d. 两跳一悬式

8 (粒径 ϕ 值), 分选极差, 颗粒组分包括粉砂和部分细砂, 反映水体不稳定及较强的湍流条件。岩相以发育块状层理、斜层理粗砂为主。近岸水下扇辫状水道中的高密度浊流在搬运过程中粗碎屑不断卸载, 携带大量砂、粉砂、泥质的低密度水流冲出辫状水道末端, 形成近岸水下扇前端的深切水道微相 (图 5b)。

2.3 不同粒度概率累积曲线类型对比

重力流与牵引流具有不同的流体力学性质, 在粒度概率累积曲线特征上有很好的反映。在岩相分析基础上, 通过对比研究区概率粒度图的差异性, 发现不同流体性质在曲线形态、粗碎屑含量、组分含量、线段斜

率有明显的相应特征 (表 1)。

重力流粒度概率累积曲线以宽缓上拱式、弧线-直线复合式、直线一段式、低斜率两段式为主, 浊流型和泥石流型曲线形态特征有较大差别。泥石流型曲线形态分为宽缓上拱式和弧线-直线复合式, 代表递变悬浮搬运作用, 而浊流粒度曲线类型为低斜率两段式和直线一段式, 这由两者搬运机制所决定: 泥石流作用是碎屑带动流体的运动, 整体搬运、“冻结”^[27], 粗碎屑颗粒 (如不同粒级的砾石、砂) 分散弥漫于粘土、粉砂中, 形成的复模态沉积物分选极差; 高密度浊流颗粒间流体比重增加, 以扩散应力、阻抗降为支撑, 随着流体能量的降低, 碎屑颗粒便根据粒度的大小依次沉积; 低

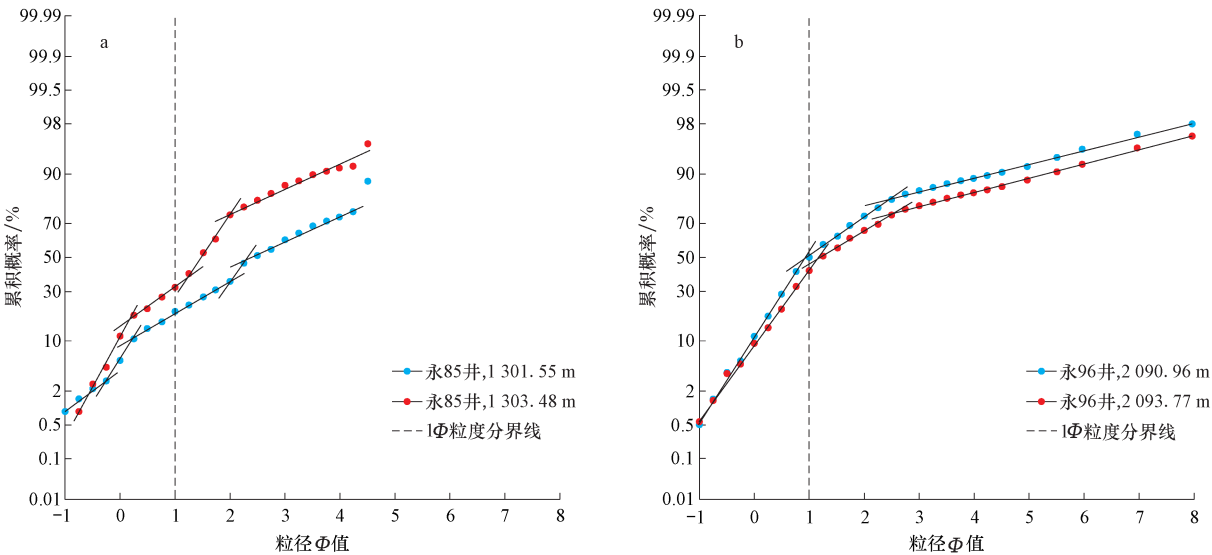


图 5 东营凹陷永北地区沙三段过渡类型粒度概率累积曲线

Fig. 5 Probability cumulative grain-size distribution curves of transitional pattern of the Es³ in Yongbei area of the Dongying Sag

a. 泥石流 – 低密度浊流过渡型; b. 高密度浊流 – 低密度浊流过渡型

表 1 东营凹陷永北地区沙三段砂砾岩粒度概率累积曲线类型对比

Table 1 Comparison of probability cumulative grain-size distribution curves of the coarse clastic rocks of the Es³ in Yongbei area of the Dongying Sag

曲线类型		泥石流型	高密度浊流型	低密度浊流型	牵引流型	泥石流 – 低密度 浊流过渡型	高密度浊流 – 低密 度浊流过渡型
曲线特征	形态	宽缓上拱式、 弧线 – 直线复合式	低斜两段式、 两跳 – 悬式、 悬浮一段式	低斜两段式	高斜两段式、三段式、 一跳 – 悬夹过渡式、 两跳 – 悬式	台阶状多段式	一跳 – 悬夹过渡式
	粗碎屑含量/%	40 ~ 70	> 30	< 30	< 10	10 ~ 30	30 ~ 50
	悬浮总体含量/%	10 ~ 100	30 ~ 100	60 ~ 100	< 30	—	20 ~ 30
	跳跃总体含量/%	40 ~ 50	< 60	0 ~ 40	> 70	—	40 ~ 50
	斜率	悬浮总体/%	< 25	< 20	< 15	—	15 ~ 20
		跳跃总体/%	40 ~ 50	< 40	> 60	—	60 ~ 65
岩相特性	沉积构造	块状层理	块状层理、 正粒序层理	块状层理	平行层理、交错 层理、反粒序层理	块状层理	块状层理、斜层理
	岩石类型	杂基支撑中 – 细砾 岩、砾质砂岩	细砾岩、砾质砂岩 含砾砂岩	中 – 粗砂岩	砂岩、粉砂岩	砾质砂岩、 含砾砂岩	粗砂岩
沉积微相		近岸水下扇主水 道、扇三角洲平原水 上分流河道	近岸水下扇主 水道辫状水道、 扇三角洲水上分 流河道河道间	近岸水下扇 主水道间、 辫状水道间	扇三角洲水下分 流河道、河道间、河 口坝、近岸水下扇 辫状水道间	扇三角洲水下 分流河道	近岸水下扇 深切水道
流体性质		泥石流(碎屑流)	高密度浊流	低密度浊流	牵引流	泥石流向低密度 浊流转化	高密度浊流向低 密度浊流转化

密度浊流沉积物颗粒间流体比重继续增加,颗粒之间碰撞几率少,水体紊动性强,湍流作为主要的搬运、支撑机制^[1],分选变好。高密度浊流型和低密度浊流型曲线都可发育低斜两段式,区别在于高密度浊流型粗碎屑含量高且曲线斜率大,而低密度浊流恰恰相反。

牵引流型粒度概率累积曲线明显由直线段构成,包括两段式、三段式、两跳 – 悬式和一跳 – 悬夹过渡式 4 种类型,不同沉积微相、相同沉积微相不同位置水动力的差异性导致粒度曲线类型的差异。牵引流水动力作用同样具有相似性,在粒度曲线上表现出相似的特

点:粗碎屑、悬浮组分含量较低且分选很差,形成粒度曲线的粗尾和细尾,是对水动力条件最为敏感的组分;一般跳跃总体含量很高,组成粒度曲线的主体,这说明牵引流搬运能力相对泥石流和浊流弱但分选好,有利于形成成熟度高的砂体,发育岩石类型主要有交错层理、平行层理、斜层理等典型牵引流成因的砂岩、粉砂岩。浊流沉积物也发育两段式曲线类型,但与牵引流型两段式形态特征有很大差别,其水动力学意义也截然不同。浊流型两段式斜率明显低牵引流型两段式,反映流体对碎屑颗粒的分选程度不同。浊流型两段式中,粗砂和砾石可以跳跃总体的形式搬运,也可作为较粗的悬浮组分,牵引流型两段式跳跃组分最大达粗砂粒级,悬浮组分一般为较细的粉砂、粘土。浊流型两段式悬浮组分含量很高,甚至沉积物整体呈悬浮搬运方式,反映浊流较强的湍动性,搬运能量高;牵引流型两段式中跳跃组分为主体,悬浮组分含量低,表明水动力弱,水体流动态为层流。

泥石流-低密度浊流过渡型、高密度浊流-低密度浊流过渡型介于泥石流型和低密度浊流型之间,兼具两者的特征。泥石流-低密度浊流过渡型在粒度概率图上为典型的台阶状多段式,说明流体不稳定且湍动性极强,其特点更接近浊流沉积。高密度浊流向低密度浊流转化类型的粒度概率累积曲线以一跳一悬夹过渡式为主,与牵引流型粒度曲线中的一跳一悬夹过渡式不同,前者粗碎屑含量高,跳跃组分含量低、斜率低、分选差,而后者以高斜率跳跃组分为主体,悬浮组分含量很低且几乎无分选,同时发育低流态、过渡流态条件下的平行层理和斜层理。

3 不同沉积微相粒度概率累积曲线特征

通过沉积相分析,将研究区砂砾岩划分为近岸水下扇相和扇三角洲相,其中近岸水下扇相发育扇根、扇中、扇端亚相,扇根包括主水道和水道间微相,扇中包括辫状水道、辫状水道间微相,扇端以发育深切水道微相为主;扇三角洲相发育扇三角洲平原、扇三角洲前缘、前扇三角洲,其中扇三角洲平原包括水上分流河道和水上分流河道间微相,扇三角洲前缘包括水下分流河道、水下分流河道间、河口坝微相,前扇三角洲以泥质为主,不划分微相。

3.1 近岸水下扇扇根

3.1.1 主水道微相

水道充填物主要由杂基支撑的砾石、碎屑支撑的

砾岩夹暗色泥岩组成^[1]。研究区主水道主要发育块状层理砾岩、砾质砂岩,向上可过渡为含砾砂岩,砾石缺乏定向性,杂乱排列甚至直立,灰岩砾含量高,底冲刷明显,粒度概率累积曲线发育反映泥石流沉积作用的宽缓上拱式和反映高密度浊流作用的两段式,反映了近物源、分选差、高能量、快速堆积的特点^[28]。

3.1.2 水道间微相

洪水能量的不稳定性导致规模较大者常漫出水道形成漫溢沉积,形成水道间充填,岩性主要由含砾砂岩、砂岩夹杂泥岩组成,砂岩底部有弱冲刷现象,由于主水道较为稳定,水道间沉积物保存较好。洪水冲出水道后向周围散开,较粗碎屑物质,流体水动力减弱,粒度曲线主要由反映低密度浊流作用的低斜两段式组成。

3.2 近岸水下扇扇中

3.2.1 辫状水道微相

辫状水道区是扇的主体,由于湖水顶托作用,能量消耗快,辫状水道较主水道宽、浅,且迁移摆动能力强。辫状水道以高密度砂、砾质浊流沉积为特征,相序中、下部以砾质砂岩、砂砾岩为主,块状层理、正粒序发育,砾石分选较差,有一定磨圆,成熟度低,底部冲刷-充填构造发育,垂向上过渡为块状、正粒序层理含砾砂岩。相序中、下部粒度曲线以代表高密度浊流作用的直线一段式和两段式为主,随着搬运距离增大,流体能量消耗,颗粒间流体比重增加,负载能力降低,相序上部粒度曲线为高密度浊流-低密度浊流过渡类型,流体性质开始向低密度浊流转化。

3.2.2 辫状水道间微相

辫状水道间微相与主水道间微相形成机理类似,都是由洪水溢出水道形成的细粒沉积物。由于辫状水道稳定性差,水道之间沉积物保存条件差,具体表现为大套砂砾岩层之间砂、泥互层,但整体厚度较小。曲线类型主要为高密度浊流-低密度浊流过渡型和低密度浊流型,随着距辫状水道的距离越远,辫状水道沉积开始发育牵引流型高斜两段式曲线,反映洪水溢出水道后水体密度小但湍动性较强,随着搬运距离增大,水动力逐渐降低,携砂能力大大减弱,流体呈明显的牵引性质。

3.3 近岸水下扇扇端

粗碎屑大多在扇端、扇中已发生卸载,扇端发育悬浮沉积为主的深灰色泥岩夹薄层砂,与深湖相泥呈指状交错^[29]。由于本身具有很高能量,规模较大的阵发

性高密度洪流除形成扇根、扇中水道砂体,可以达到扇主体以外的扇端区域形成深切水道,发育具鲍马层序的浊积序列。研究区深切水道微相岩心资料和粒度数据缺乏,岩相以发育块状层理、正粒序层理的长英质粗砂岩为主,且含较多暗色矿物,粒度曲线为代表高密度浊流向低密度浊流过渡的一跳一悬夹过渡式,反映沉积物经过较长距离的搬运,分选性变好,成熟度增加。

3.4 扇三角洲平原

3.4.1 水上分流河道微相

水上分流河道是扇三角洲平原亚相的主体,多表现为近源的砾质辫状河沉积^[1],以陆上水流和沉积物重力流的高密度浊流沉积充填为特征,泥质、粉砂质杂基含量高,岩相以发育块状层理的砾岩、砾质砂岩为主,底部可见到明显的河道冲刷-充填构造。由于形成于滨浅湖环境,颗粒碰撞几率高,故砾石磨圆较好,但因靠近源区,颗粒分选很差。粒度曲线主要为弧线-直线复合式泥石流型、高密度浊流型和反映泥石流向低密度浊流转化的过渡类型,牵引流型曲线不发育。研究区发育稀性泥石流,碎屑以滚动、跳跃和悬浮搬运,具有“二层流”特征,反映沉积时期湿润的气候条件。泥石流沉积可局限在一定的河道内,也可在侧向上呈席状或朵叶状延伸到河道间,沉积剖面上泥石流常与水携沉积交互出现。

3.4.2 水上分流河道间微相

扇三角洲平原水上河道间沉积是水流携带的高密度沉积物溢出水道而成,或由水道延伸至河道间的泥石流沉积。岩相以泥岩夹发育块状层理、正粒序层理的砾质砂岩和含砾砂岩为主。由于水上分流河道间微相属于陆上环境,缺乏湖盆水体的顶托作用,洪水期流体越岸后能量仍较强,粒度曲线以直线一段式最为常见,反映泥石流沉积作用和高密度浊流作用的特点。

3.5 扇三角洲前缘

3.5.1 水下分流河道微相

水下分流河道是水上分流河道入湖后向湖盆中央的延伸部分,除具有水上分流河道的特点外,牵引流取代重力流成为优势沉积作用类型。靠近河口处发育块状层理的砾质砂岩、含砾砂岩,底部冲刷面明显,粒度曲线可见台阶状多段式、直线式、一跳一悬夹过渡式等类型,反映水流入湖后受到湖水顶托作用能量迅速降低,在靠近河口处粗碎屑卸载,颗粒间流体比重增加,

流体类型由泥石流向浊流转化的特点。随着搬运距离的增加,湖盆水体的顶托和动荡性愈来愈明显,携带的沉积物受到多组水流的作用,粒度概率累积曲线以反映牵引流作用的高斜两段式、三段式 and 一跳一悬夹过渡式为主,这是水下分流河道受到多向、多组水流影响的具体表现,沉积作用由浊流向牵引流过渡。

3.5.2 水下分流河道间微相

相对陆上、近物源的水上分流河道间沉积,水下分流河道间微相具有粒度细、杂基含量低的特征,岩相以大套泥岩夹平行层理、交错层理砂岩、粉砂为主,靠近河口处岩相较粗,主要为泥岩夹块状层理、平行层理的砾质砂岩、含砾砂岩,这也反映了随着搬运过程的进行流体湍动性减弱、牵引流性质增强的特点。

3.5.3 河口坝微相

河口坝微相位于水下分流河道的河口处,扇三角洲河口坝的形成需要河道相对稳定和相对较弱的湖水能量^[9],岩性以中-细砂、粗粉砂为主,分选磨圆好,砂体以明显反粒序为特征^[30,31],可发育平行层理、波状交错层理、低角度交错层理。粒度曲线主要为两跳一悬式,是牵引流和湖浪作用共同影响的结果^[32],其中下跳跃段斜率低,代表河流搬运的较粗组分;上跳跃段斜率高,代表湖浪反复淘洗簸选的较细组分。

3.6 前扇三角洲

前扇三角洲由河道搬运至此的陆源悬浮泥质成分和湖盆静水悬浮物质组成,与湖相泥呈指状交互接触,岩性以泥岩为主,夹杂薄砂层。

4 结论与认识

1) 划分了泥石流型、高密度浊流型、低密度浊流型、牵引流型等4种基本类型和泥石流-高密度浊流型、高密度浊流-低密度浊流过渡型2种过渡类型。

2) 近岸水下扇扇根主水道发育泥石流和高密度浊流,粒度曲线为宽缓上拱式、低斜两段,水道间发育低密度浊流,粒度曲线为低斜两段式;扇中辫状水道主要发育高密度浊流和低密度浊流,粒度曲线为低斜两段式,辫状水道间发育低密度浊流和牵引流作用,粒度曲线为低斜两段式和高斜一跳一悬两段式;扇端深切水道粒度曲线为一跳一悬夹过渡式,反映高密度浊流向低密度浊流的转化。

3) 扇三角洲平原水上分流河道发育稀性泥石流

沉积,粒度曲线为弧线-直线复合式,水上分流河道间以高密度浊流为主,粒度曲线为一段式;扇三角洲前缘水下分流河道以牵引流作用为主,兼具浊流作用特征,粒度曲线可发育两段式、一跳一悬夹过渡式、两跳一悬式和台阶状多段式,水下分流河道间以牵引流为主,粒度曲线为高斜一跳一悬式和滚动-跳跃-悬浮三段式,河口坝发育反映河流作用和波浪作用共同影响的典型两跳一悬式粒度曲线。

4) 粒度分布对水动力条件最为敏感,但类似水动力条件可出现于不同的环境,不同成因的碎屑沉积物又可能混合出现,因此将粒度分析资料与沉积构造、生物特征等资料有效结合起来,才能对沉积环境解释提供更有说服力的证据。

参 考 文 献

- [1] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京:石油工业出版社,2003:7-15.
Jiang Zaixing. Sedimentology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003:7-15.
- [2] 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):815-824.
Yuan Jing, Yang Xuejun, Lu Zhiyong, et al. Probability cumulative grain size curves in sandy conglomerate of the upper Es₄ in Yan 22 block, Dongying depression[J]. Sedimentologica Sinica, 2011, 29(5):815-824.
- [3] 郑浚茂,王德发,孙永传. 黄骅拗陷几种砂体的粒度分布特征及其水动力条件的初步分析[J]. 石油实验地质,1980,2(2):9-21.
Zeng Junmao, Wang Defa, Sun Yongchuan. Characteristics of Grain size distribution and preliminary hydrodynamic analysis of several types of sandbodies in Huanghua depression[J]. Petroleum Geology & Experiment, 1980, 2(2):9-21.
- [4] 杨飞,邹妞妞,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):690-699.
Yang Fei, Zou Niuniu, Shi Jjian, 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):690-699.
- [5] Visher G S. Grain size distributions and depositional processes[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1969, 39:1074-1106.
- [6] 操应长,王健,刘惠民. 利用环境敏感粒度组分分析滩坝砂体水动力学机制的初步探讨-以东营凹陷西部沙四上滩坝砂体沉积为例[J]. 沉积学报,2010,28(2):274-282.
Cao Yingchang, Wang Jian, Liu Huimin. Preliminary study on the hydrodynamic mechanism of beach-bar sandbodies with environmentally sensitive grain size components—a case from beach-bar sandbody sediments of the upper part of the fourth member of the Shahejie formation in the western Dongying depression[J]. Sedimentologica Sinica, 2010, 28(2):274-282.
- [7] 路慎强,王健,操应长. 车西洼陷沙二段滩坝砂体粒度特征及其水动力学意义[J]. 油气地质与采收率,2013,20(3):26-29.
Lu Shenqiang, Wang Jian, Cao Yingchang. Study on characteristics and hydrodynamic significance of grain size components of beach-bar sandbodies, second member of Shahejie formation, Chexi sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2013, 20(3):26-29.
- [8] Kolmer J R. A wave tank analysis of the beach foreshore grain size distribution[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1973, 43(1):200-204.
- [9] 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[J]. 石油勘探与开发,2003,30(3):103-106.
Yuan Jing, Du Yumin, Li Yunnan. Probability cumulative grain size curves in terrigenous depositional environments of paleogene in Huimin sag[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3):103-106.
- [10] 邱隆伟,周军良,王新征,等. 山东峽山湖滩砂的现代沉积特征研究[J]. 矿物岩石地球化学通报,2010,29(2):142-148.
Qiu Longwei, Zhou Junliang, Wang Xinzhen, et al. A characteristics study of neoteric sediment to the beach of Xiashan lake in Shandong province[J]. Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2010, 29(2):142-148.
- [11] 朱锐,张昌民,龚福华,等. 粒度资料的沉积动力学在沉积环境分析中的应用:以江汉盆地西北缘上白垩统红花套组沉积为例[J]. 高校地质学报,2010,16(3):358-363.
Zhu Rui, Zhang Changmin, Gong Fuhua, et al. Use of sediment dynamic analysis in environment interpretation: a case study on Honghuatao formation, upper Cretaceous of western Jianghan basin, Hubei province[J]. Geological Journal of China Universities, 2010, 16(3):358-363.
- [12] 徐树建,潘保田,李琼,等. 陇西盆地末次冰期黄土粒度特征及其环境意义[J]. 沉积学报,2005,23(4):702-707.
Xu Jianshu, Pan Baotian, Li Qiong, et al. Environmental significance and characteristics of grain size of the loess in Longxi basin during the last glacial period[J]. Sedimentologica Sinica, 2005, 23(4):702-707.
- [13] Sime L C, Ferguson R I. Research on grain sizes in gravel-bed rivers by automated image analysis[J]. Journal of Sedimentary Research, 2003, 73(4):630-636.
- [14] 杨欣德,王宗秀,郭通珍,等. 青海巴颜喀拉山三叠系复理石沉积粒度概率累积曲线的特征[J]. 地质通报,2008,27(4):477-490.
Yang Xinde, Wang Zongxiu, Guo Tongzhen, et al. Probability cumulative grain-size curves of Triassic flysch deposits in the Bayan Har Mountains area, Qinghai, China[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(4):477-490.
- [15] 赵永胜,赵霞飞. 新疆北三台仓房沟群碎屑岩粒度特征及沉积环境[J]. 石油与天然气地质,1992,13(4):407-417.
Zhao Yongsheng, Zhao Xiafei. Grain-size characteristics and sedimentary environment of Cangfanggou group in Bei Shantai area, Xinjiang[J]. Oil & Gas Geology, 1992, 13(4):407-417.
- [16] 宋璠,邱隆伟,苏妮娜,等. 渤海湾盆地渤南洼陷古近系沙河街组二段沉积相特征及演化[J]. 石油与天然气地质,2016,37(4):477-507.
Song Pan, Qiu Longwei, Su Nina, et al. Features and evolution of se-

- dimentary facies in the second member of paleogene Shahejie formation in Bonan subsag, Bohai Bay basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(4): 477–507.
- [17] 袁静, 鹿洪友, 高喜龙, 等. 胜利油区新北油田馆上段沉积特征及沉积相模式[J]. 沉积学报, 2009, 27(1): 18–23.
Yuan Jing, Lu Hongyou, Gao Xilong, et al. The sedimentary characteristics and facies model of the upper member of Guantao formation of the Eocene in Xinbei oilfield of Shengli petroleum province[J]. Sedimentologica Sinica, 2009, 27(1): 18–23.
- [18] 谭先锋, 夏敏全, 张勤学, 等. 柴达木盆地西南缘下干柴沟组下段辫状河三角洲沉积特征[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(3): 332–339.
Tan Xianfeng, Xia Minquan, Zhang Qinxue, et al. Sedimentary characteristics of braided river delta of the lower member of the lower Ganchaigou formation in southwestern Qaidam basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(3): 332–339.
- [19] 叶兴树, 王伟峰, 陈世悦, 等. 东营凹陷断裂活动特征及其对沉积的控制作用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2006, 21(5): 19–33.
Ye Xingshu, Wang Weifeng, Chen Shiyue, et al. Characteristics of the fault activities in Dongying depression and their controlling effects on sediment[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2006, 21(5): 19–33.
- [20] 冯有良, 周海民, 任建业, 等. 渤海湾盆地东部古近系层序地层及其对构造活动的响应[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(10): 1356–1376.
Feng Youliang, Zhou Haimin, Ren Jianye, et al. Paleogene sequence stratigraphy in the east of the Bohai Bay basin and its response to structural movement(in Chinese)[J]. Scientia Sinica Terrae, 2010, 40: 1356–1376.
- [21] 王居峰. 陆相断陷盆地陡坡带沉积相类型与沉积演化特征—以东营凹陷民丰地区沙三段、沙四段为例[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(5): 611–617.
Wang Jufeng. Sedimentary facies types and evolution features on steep slope belt in terrestrial fault-depression basin—a case in Sha 3 and 4 member of Minfeng area in Dongying depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(5): 611–617.
- [22] 孟玮, 钟建华, 王嘉玮. 东营凹陷永北地区砂砾岩体储集层特征及影响因素[J]. 地质力学学报, 2009, 15(3): 305–314.
Meng Wei, Zhong Jianhua, Wang Jiawei. The characteristics and affecting factors of glutenite reservoirs in northern Yongbei area of Dongying sag[J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15(3): 305–314.
- [23] 王书宝, 钟建华, 王勇, 等. 永北地区砂砾岩体成岩作用及次生孔隙成因[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2008, 30(4): 19–23.
Wang Shubao, Zhong Jianhua, Wang Yong, et al. Diagenesis and secondary pore origin of sandstone and conglomerate reservoir in Yongbei area[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008, 30(4): 19–23.
- [24] 于建群, 姜东波. 永北地区砂、砾岩油藏油气富集规律及勘探开发实践[J]. 特种油气藏, 2001, 8(2): 11–14.
Yu Jianqun, Jiang Dongbo. Oil and gas enriched accumulation regularities and its exploration & production practice of glutenite reservoir, Yongbei area[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2001, 8(2): 11–14.
- [25] 赵惠琳. 泥石流研究中的粒度分析方法及其应用[J]. 灾害学, 1991, 6(2): 6–11.
Zhao Huilin. Sizing analysis methods and its applications to studying of debris flow[J]. Journal of Catastrophology, 1991, 6(2): 6–11.
- [26] 黄芮, 陈剑平, 李会中, 等. 基于 φ 值粒度成分分析的泥石流流动性特性[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(1): 182–187.
Huang Rui, Chen Jianping, Li Huizhong, et al. Dynamic characteristics of debris flow based on the granulometric analysis of the value of φ [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(1): 182–187.
- [27] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 358–361.
Jiang Zaixing. Sedimentology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 358–361.
- [28] 刘晖, 操应长, 姜在兴, 等. 胜坨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): 9–15.
Liu Hui, Cao Yingchang, Jiang Zaixing, 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): 9–15.
- [29] 刘晖, 姜在兴, 张锐峰, 等. 廊固凹陷大兴砾岩体成因类型及其对油气的控制[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(5): 545–551.
Liu Hui, Jiang Zaixing, Zhang Ruifeng, et al. Genetic types of Daxing conglomerate bodies and their controls on hydrocarbons in the Langgu Sag, Bohai Bay Basin, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(5): 545–551.
- [30] 刘昭君, 孙平昌, 杜江峰, 等. 汤原断陷古近系扇三角洲沉积特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(1): 1–8.
Liu Zhaojun, Sun Pingchang, Du Jiangfeng, et al. Sedimentary characters of fan delta of Paleocene in Tangyuan fault depression[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2010, 40(1): 1–8.
- [31] 杨延强, 吴胜和, 齐立新, 等. 南堡凹陷柳赞油田沙三3亚段扇三角洲相构型研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2014, 29(5): 1–8.
Yang Yanqiang, Wu Shenghe, Qi Lixin, et al. Study on microfacies architecture of fan delta in Es33 reservoir of Liuzan Oilfield, Nanpu Sag[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2014, 29(5): 1–8.
- [32] 肖莉. 罗家地区水下冲积扇与星西地区扇三角洲沉积特征及沉积模式对比[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(3): 36–40.
Xiao Li. Comparison of sedimentary characteristics and sedimentary model between subaqueous alluvial fan and fan delta in Luoia and Kenxi area[J]. PGRE, 2014, 21(3): 36–40.

(编辑 张亚雄)