

文章编号: 1000-0550(2011)05-0815-10

# 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<sup>①</sup>

袁 静<sup>1</sup> 杨学君<sup>1</sup> 路智勇<sup>2</sup> 陈武杰<sup>3</sup> 樊海琳<sup>4</sup> 袁凌荣<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学地球资源与信息学院 山东青岛 266555; 2. 中国石油化工股份有限公司 胜利油田分公司东辛采油厂 山东东营 257000;  
3. 延长油田股份有限公司化验中心 陕西延安 717208; 4. 大庆油田第四采油厂 黑龙江大庆 163511)

**摘 要** 在岩芯观察和沉积相分析基础上,利用粒度分析资料对东营凹陷北部陡坡带盐 22 块沙四上亚段近岸水下扇砂砾岩体的粒度概率累积曲线进行了研究。研究表明,该地区近岸水下扇砂砾岩中的粒度概率累积曲线主要包括:“上拱弧形”、“简单一段式”、“准牵引流型”等 3 种基本类型和“近似上拱弧形”、“台阶状多段式”、“低斜率两段式”、“低斜率三段式或多段式”等 4 种主要过渡类型。内扇亚相以泥石流(碎屑流)沉积作用为特点,其粒度概率累积曲线主要为“宽缓上拱弧形”;中扇亚相以碎屑流和颗粒流沉积作用为主,辫状沟道微相中下部的粒度概率累积曲线以“近似上拱弧形”为主,顶部砂岩表现为“准牵引流型”;外扇亚相发育牵引流和颗粒流沉积,粒度概率累积曲线为“低斜率滚动—跳跃—悬浮三段式”、“一跳—悬夹过渡三段式”和“较高斜率上拱弧形”。总体上,从内扇到外扇亚相,随流体性质由泥石流(碎屑流)向牵引流逐渐演化,粒度概率累积曲线会依次出现“宽缓上拱弧形”、“较高斜率上拱弧形”、“简单一段悬浮式”、“低斜率滚动—跳跃—悬浮三段式”或“一跳—悬夹过渡段三段式”,相邻典型曲线间有复杂的过渡类型。

**关键词** 近岸水下扇 砂砾岩 粒度概率累积曲线 沙四上亚段 东营凹陷

**第一作者简介** 袁静 女 1972 年出生 教授 储层沉积学 E-mail: drjyuan@163.com

**中图分类号** P583 P582.2 **文献标识码** A

碎屑岩的粒度分布受控于沉积时的流体动力条件,这主要包括搬运介质性质(风、水、冰等)、搬运介质能量(流速、流量、起动能力)和搬运方式(滚动、跳跃、悬浮),而这些也是沉积环境研究的重要方面。在目前用于沉积环境研究的粒度方法中,以 Visher G S<sup>[1]</sup>提出的粒度概率累积曲线应用最为广泛,效果最好。在其建立的典型粒度概率累积曲线模式中,重力流沉积环境只涉及了古浊流沉积,并认为粒度概率图仅有简单的“低斜率一段式”和“低斜率两段式”。在他之后,很多学者的研究曾涉及重力流沉积的粒度分布特征<sup>[2~16]</sup>,但尚未进行系统总结。

东营凹陷北部陡坡带是由陈南铲式边界断层控制的近东西向展布的构造带。沙四上亚段至沙三中亚段沉积时期,东营凹陷处于断陷期的深陷—扩张阶段,陈南断层强烈活动,湖盆大幅度沉降,在陡坡带形成了地势高差大、紧邻深水区的沉积背景,重力流沉积作用特征明显。盐 22 区块位于陡坡带东段盐 16 古冲沟正下方,在沙四上亚段发育近岸水下扇沉积,

其岩性较粗,以砂、砾等粗碎屑为主,可划分为内扇、中扇和外扇 3 个亚相和主沟道等 8 个微相,与半深湖—深湖暗色泥岩呈指状接触(图 1)。粒度概率图对水动力条件变化反映灵敏<sup>[4]</sup>,水动力条件研究可以重塑近岸水下扇的形成过程,为砂砾岩体沉积特征提供水动力解释基础。本文以东营凹陷北部陡坡带盐 22 区块沙四上亚段的近岸水下扇砂砾岩为研究对象,绘制了 3 口取芯井 226 个样品的粒度概率累积图,对其进行了剖析总结,以期对类似近源沉积体的粒度概率分布研究和沉积水动力解释提供借鉴,预测近岸水下扇砂砾岩体时空展布,为指导断陷湖盆砂砾岩体油气勘探提供基础地质理论基础。

## 1 粒度概率累积曲线类型

研究区的粒度概率累积曲线类型复杂多样,基于 Visher 关于“概率图上的直线段与特定的搬运方式相对应”的认识,同时结合岩芯观察结果,依据粒度概率累积曲线的形态(如直线段数目、跨度、斜率等)将

<sup>①</sup>山东省自然科学基金项目(编号:2009ZRA05059)资助。  
收稿日期:2010-08-17;收修改稿日期:2010-11-22

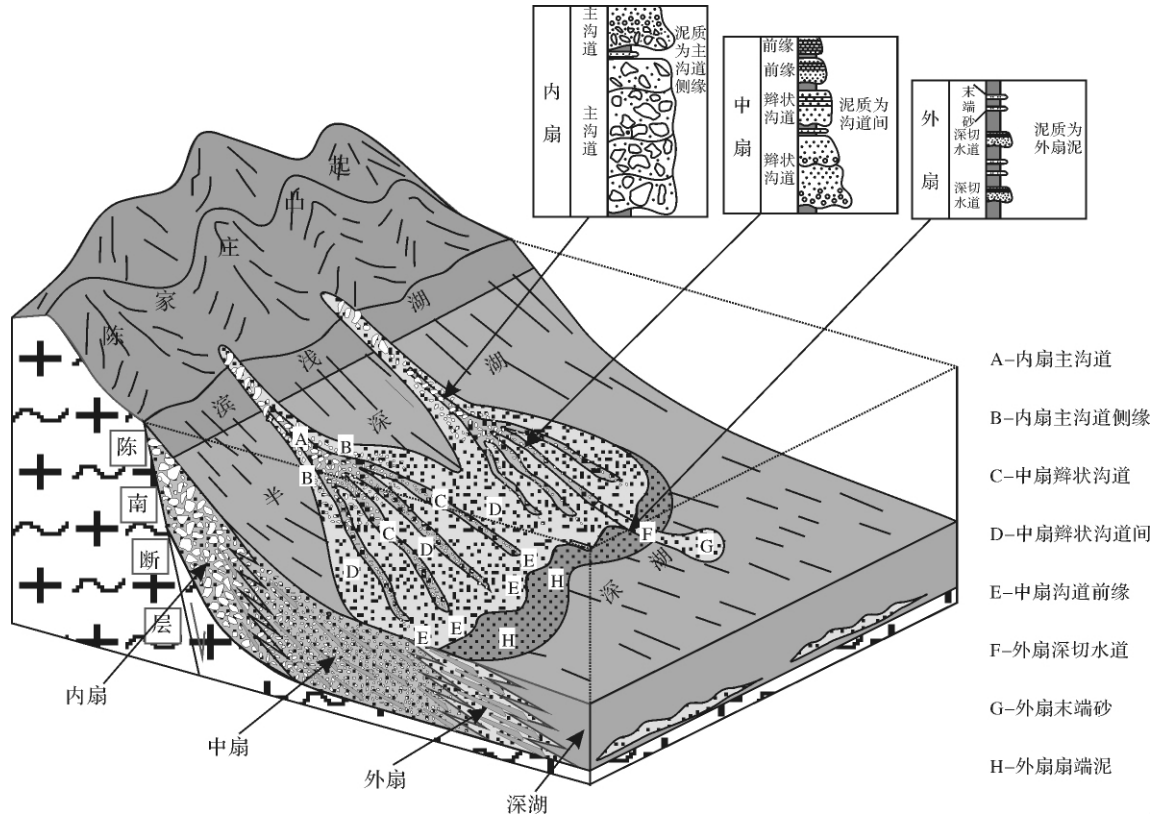


图 1 东营凹陷盐 22 块沙四上亚段近岸水下扇沉积相模式

Fig. 1 The depositional mode of nearshore subaqueous fan of the upper Es<sub>4</sub> in Yan 22 Block , Dongying Depression

其分为 3 种基本曲线类型和 4 种主要过渡曲线类型，并分析了各类曲线与水动力条件的对应关系(表 1)。

1.1 基本曲线类型

1.1.1 上拱弧形(记作“A型”)

该类曲线对应泥石流(碎屑流)和颗粒流沉积作用,形态呈上拱弧线,曲线没有明显的截点,颗粒粗细混杂。

较平缓的上拱弧形对应泥石流(碎屑流)沉积(曲线首尾连线倾角 20°~30°),记作“A1型”,其颗粒为杂基支撑悬浮搬运,岩性主要为呈混杂结构的杂基支撑中粗砾岩、中细砾岩,底部常见明显的冲刷面构造。该类曲线在内扇主沟道和中扇辫状沟道微相的中下部最常见(图 2a)。需要指出的是内扇主沟道微相发育中粗砾岩,甚至巨砾岩,由于岩芯分析样品尺寸和筛析—沉降法粒度分析范围(泥、粉砂、砂和细砾)的局限,分析结果不能代表泥石流(碎屑流)沉积的全部粒度特征,为得到更准确的粒度组成,还需结合岩芯上砾石的直径测量结果。尽管如此,泥石流(碎屑流)沉积杂基支撑、粗细混杂的结构特征仍能在 A1 型粒度概率曲线上得到充分体现。

较陡的上拱弧形一般对应颗粒流沉积(曲线首尾连线倾角 40°~60°),记作“A2型”,颗粒分选较泥石流(碎屑流)分选好,砂级颗粒含量占 80%~90%。粗砂、细砾和中砾等大颗粒由中砂、细砂和粉砂等细小颗粒支撑。岩性为发育块状构造的、颗粒支撑的中细砾岩和含砾中粗砂岩,底部冲刷面较明显。该类曲线在中扇辫状沟道的中上部常见(图 2b)。

1.1.2 简单一段悬浮式(记作“B型”)

该类曲线对应于浊流沉积作用,形态呈一条简单直线段,直线倾角为 25°~35°,碎屑颗粒分选差,颗粒为单一的湍流支撑悬浮搬运。岩性主要为具有粒序层理的、富含杂基的细砾岩和含砾中粗砂岩,底部发育较明显的冲刷面。该类曲线在中扇辫状沟道中上部和沟道间微相中常见(图 3)。

1.1.3 准牵引流型(记作“C型”)

该类曲线以斜率较大为特征,颗粒分选较好,  $M_z$  (平均粒径)和  $\sigma_1$  (标准偏差)较小,反映流体能量和湍动性已经较弱,底部冲刷面不甚发育。该类曲线对应重力流向牵引流转化的晚期,流体性质已经接近牵引流,但岩石颗粒整体分选较“牵引流”差。

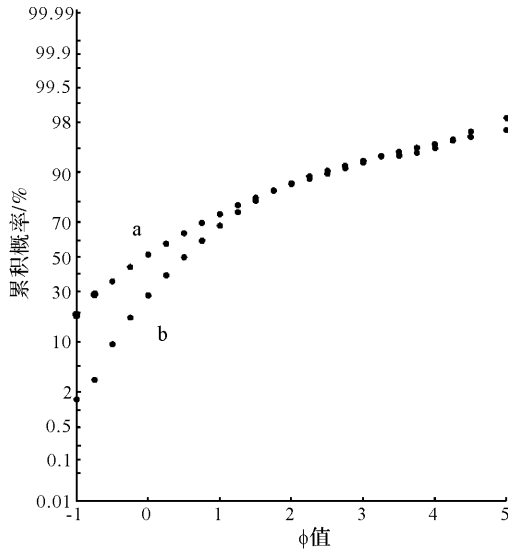


图 2 “上拱弧形”粒度概率图

( a. 含砾粗砂岩 ,内扇主沟道 盐 22-22 井 3 690.2 m;  
b. 含中粗砂岩 ,中扇辫状沟道 盐 22-斜 1 井 3 334.35 m)

Fig. 2 The probability cumulative grain size curve of “uphill arched arc” pattern

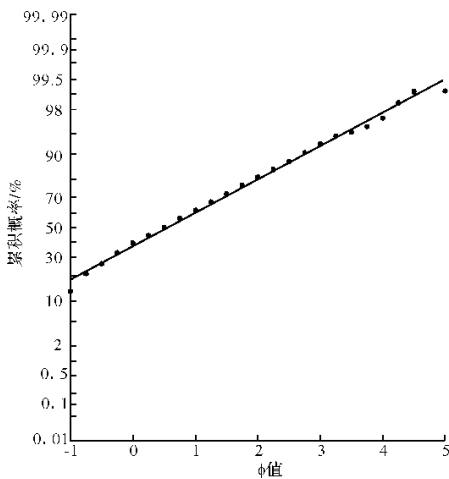


图 3 “简单一段悬浮式”粒度概率图

(含砾中粗砂岩 ,中扇辫状沟道间 盐 22-22 井 3 391.2 m)

Fig. 3 The probability cumulative grain size curve of one segment pattern

1) 一跳跃—悬浮夹过渡三段式(记作“C1型”)

该类曲线整体由一个“跳跃段”、一个“悬浮段”及其所夹持的过渡段组成,总体斜率较高,曲线首尾连线倾角 40°~60°。

颗粒搬运方式以“跳跃—悬浮夹过渡”方式为主,约占 60%,直线段倾角为 20°~40°,有时可由 2 个直线段组成。过渡段与跳跃总体的交截点处于 0.5~1.2φ 之间,与悬浮总体的交截点处于 2.0~3.0φ;跳跃总体含量约占 10%~30%,直线段倾角为 55°~

70°,分选较好;悬浮总体含量约为 20%,直线倾角为 15°。

构成该类曲线的沉积物中砾石含量为 0~10%,岩性主要为具平行层理的(含砾)中粗砂岩,在外扇深切水道、末端砂微相和中扇辫状沟道前缘微相中最为常见,中扇辫状沟道上部少见(图 4)。

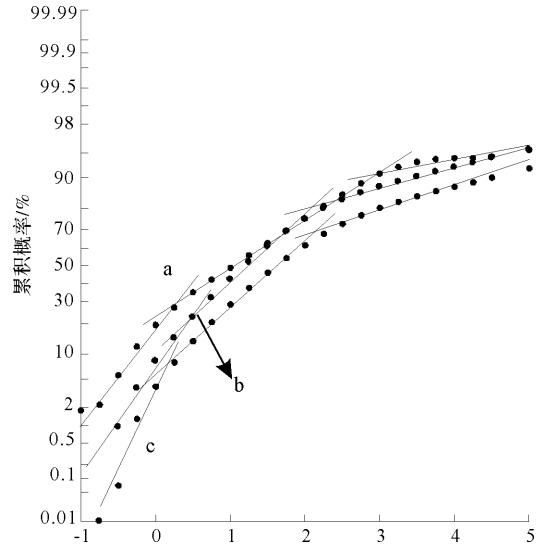


图 4 “一跳—悬夹过渡段三段式”粒度概率图

( a. 不等粒砂岩 ,中扇辫状沟道前缘 盐 22-22 井 3 491.15 m;  
b. 不等粒砂岩 ,外扇深切水道 盐 22-斜 1 井 3 336.8 m;  
c. 不等粒砂岩 ,外扇末端砂 盐 22-斜 1 井 3 395.46 m)

Fig. 4 The probability cumulative grain size curve of “one bouncing population— one suspension population sections—transitional zone” pattern

2) 低斜率滚动—跳跃—悬浮三段式(记作“C2型”)

该类曲线由三条主要直线段组成,大致对应滚动、跳跃和悬浮等三个粒度总体。

颗粒以跳跃总体为主,跳跃总体含量为 60%~80%,分选较好,直线段倾角为 40°~60°,跳跃总体一般由 2~3 个粒度次总体组成。跳跃总体的粗截点在 0φ 附近,细截点为 1.7~3.7φ,含量 80%~90%,直线段倾角为 40°~50°;悬浮总体含量 10%~25%,直线段倾角为 5°~10°;滚动总体含量 <20%,直线段倾角为 <10°。岩性主要为发育平行层理的中粗砂岩和细砾岩,该类曲线在中扇辫状沟道前缘、辫状沟道间和外扇末端砂微相中最为常见,其次也可见于中扇辫状沟道和外扇深切水道的上部(图 5)。

1.2 过渡曲线类型

1.2.1 泥石流(碎屑流)与浊流的过渡类型(记作“A

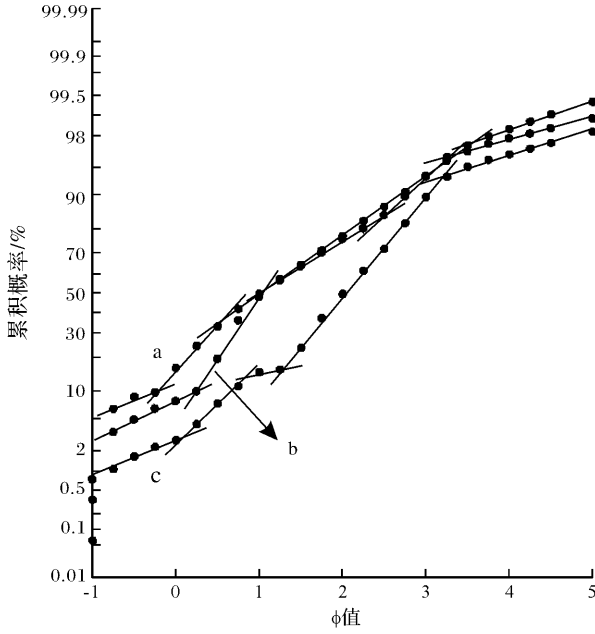


图5 低斜率“滚动—跳跃—悬浮”三段式粒度概率图  
 (a. 不等粒砂岩,内扇末端砂,盐22-22井3 383.05 m;  
 b. 不等粒砂岩,中扇辫状沟道前缘,盐22-22井3 396.85 m;  
 c. 不等粒砂岩,中扇辫状沟道,盐22-22井3 429.5 m)

Fig. 5 The probability cumulative grain size curve of low slope “one rolling population—one bouncing population—one suspension population” tri-segment pattern

- B 过渡型”)

1) 近似上拱弧形(记作“A - B(1)型”)

该类曲线近似呈现上拱弧形,能明显分出若干短小直线段,是上拱弧形的衍生类型,各直线段的斜率呈缓慢过渡,斜率在 $4.0\phi$ 和 $2.5\phi$ 处有明显起伏,粗细截点间的直线段倾角约为 $40^\circ$ 。该类曲线对应泥石流(碎屑流)向浊流演化的早期阶段,曲线整体形态呈现较明显的上拱弧形,反映了泥石流(碎屑流)沉积作用仍占有较大比重;由于搬运能量减弱和较粗颗粒的卸载,颗粒间流体比重增大,流体湍动性增强,少量颗粒(尤其是细小颗粒)开始呈现湍流悬浮搬运的趋势。岩性主要为中细砾岩、砂质细砾岩和含砾中粗砂岩,层理类型以块状为主,含少量平行层理和粒序层理。

该类曲线在内扇主沟道和中扇辫状沟道中下部最为常见,在辫状沟道前缘和辫状沟道间的底部也可见到(图6)。在中扇辫状沟道中,该类曲线自下而上弧形越来越不明显,直线段数目越来越少,曲线斜率逐渐增大,反映流体性质逐渐从泥石流(碎屑流)向浊流作用演变。

2) 台阶状多段式(记作“A - B(2)型”)

该类曲线形态的最大特点是呈现多直线段组成的台阶状,单条直线段的跨度均小于1个 $\phi$ , $M_z$ (平均粒径)较小,而 $\sigma_1$ (标准偏差)较大,反映流体能量较小,但湍动性较强。该类曲线一般对应发育递变层理、块状层理的中细砾岩和发育平行层理的含砾中粗砂岩,在内扇主沟道侧缘、中扇辫状沟道间微相中最为常见,此外也见于中扇辫状沟道和辫状沟道前缘微相中(图7)。

在中扇辫状沟道间和内扇主沟道侧缘微环境中,由于湖水的强烈顶托作用,水流能量和湍动性呈现动荡性特点,造成颗粒搬运方式复杂多变,颗粒或滚动—跳跃或悬浮,粒度概率累积曲线呈现上述多段台阶状。

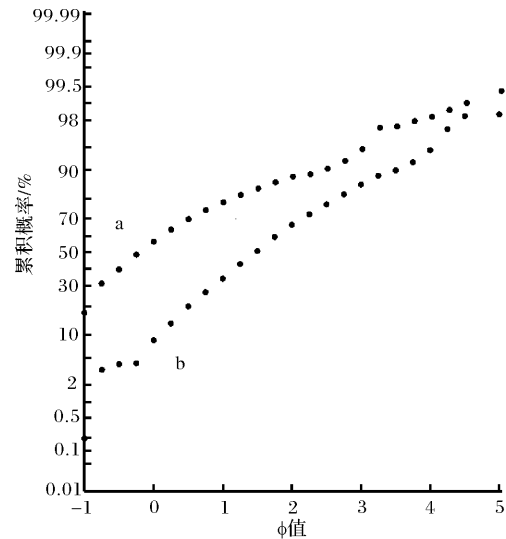


图6 “近似上拱弧形”粒度概率图

(a. 含砾中粗砂岩,中扇辫状沟道,盐22-22井3 393.65 m;  
 b. 不等粒砂岩,中扇辫状沟道间,盐22-22井3 438.7 m)

Fig. 6 The probability cumulative grain size curve of “approximate uphill arched arc” pattern

1.2.2 浊流与牵引流的过渡类型(记作“B - C 过渡型”)

该类曲线大致由两条、三条或多条低斜率直线段组成,与“简单一段悬浮式”相比,曲线斜率在粗尾部分略有增大。该类曲线直线段明显,但斜率普遍较小,对应于洪水型浊流向牵引流转化的早期,此时由于流体能量的降低,虽分化出了偶尔呈跳跃方式搬运的颗粒,但流体性质仍具有较强的湍动性,颗粒主要为湍流支撑悬浮。

1) 低斜率两段式(记作“B - C(1)型”)

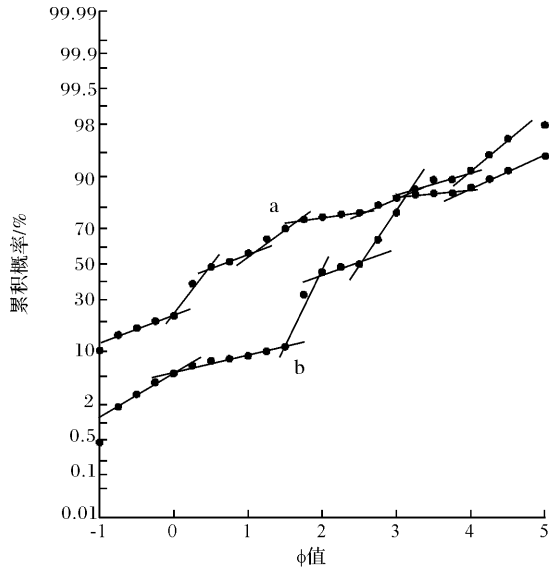


图 7 “台阶状多段式”粒度概率图

( a. 含砾中粗砂岩 ,内扇主沟道侧缘 ,盐 22-22 井 3 691.3 m;  
 b. 不等粒砂岩 ,中扇辫状沟道间 ,盐 22-22 井 3 390.8 m)  
 Fig. 7 The probability cumulative grain size curve of  
 “step-type” multi-segment pattern

该类型曲线由一个悬浮总体和一个跳跃总体组成 ,粗尾部分在  $0.8\phi$  附近斜率有明显增陡,“粗砂—砾”级颗粒 ( $<0.8\phi$ ) 对应的直线段倾角  $>40^\circ$ ,反映了“粗砂—砾”级颗粒已出现跳跃的搬运方式 ,该类粒度总体占 70% ,流体性质对应于浊流向牵引流演化的早期。岩性为发育递变层理的中细砾岩和含砾中粗砂岩 ,仅在中扇辫状沟道的中上部发育(图 8)。

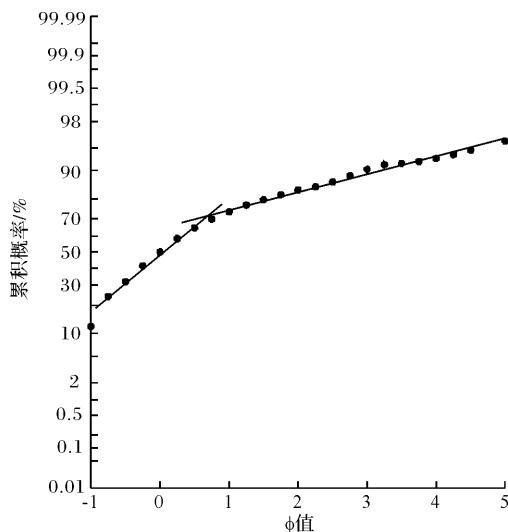


图 8 “低斜率两段式”粒度概率图

( 含砾中粗砂岩 ,中扇辫状沟道 ,盐 22-22 井 3 400.6 m)  
 Fig. 8 The probability cumulative grain size curve of  
 of “low slope bi-segment” pattern

2) 低斜率三段或多段式(记作“B-C(2)型”)

该类曲线由斜率依次减小的三条或多条直线段组成(粒度自细至粗),其中粒度稍粗的几条直线段分别对应于几个不同的“跳跃—悬浮混合搬运总体”:“粗砂—砾”( $<0.7\phi$ )级颗粒对应的直线段斜率为  $40^\circ$  ,“中砂—细砂”( $0.7\sim 3\phi$ )粒度对应的直线段斜率为  $30^\circ$  ,“粗砂—砾”粒级颗粒呈跳跃方式搬运的几率比“中砂—细砂”粒级颗粒大。由于“中砂—细砂”出现了“跳跃搬运”方式 ,所以流体能量比“低斜率两段式”低。粒度  $1\phi$  对应的累积百分比一般为 10% ~ 30% (一般代表细砾含量) ,岩性为发育递变层理、块状层理的中细砾岩和含砾中粗砂岩 ,平行层理少见。该类曲线在中扇辫状沟道前缘、沟道间和辫状沟道中上部常见(图 9)。

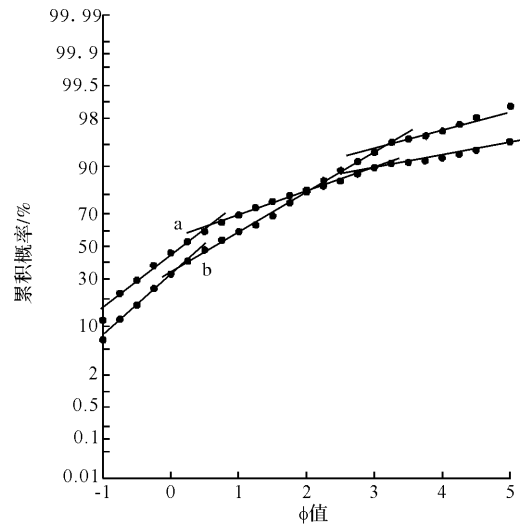


图 9 “低斜率三段式”粒度概率图

( a. 含砾中粗砂岩 ,中扇辫状沟道 ,盐 22-22 井 3 400.85 m;  
 b. 含砾中粗砂岩 ,中扇辫状沟道前缘 ,盐 22-22 井 3 396.5 m)  
 Fig. 9 The probability cumulative grain size curve of  
 of “low slope tri-segment” pattern

2 不同沉积微相中的粒度概率曲线特征

通过沉积相研究 ,研究区砂砾岩为典型的近岸水下扇沉积 ,发育内扇、中扇、外扇等 3 个亚相 ,包括主沟道、主沟道侧缘、辫状沟道、辫状沟道间、辫状沟道前缘、深切水道、末端砂和外扇泥等 8 个微相 ,各沉积微相具有特征的粒度概率曲线类型(表 2 图 10)。

2.1 内扇亚相

2.1.1 主沟道微相

主沟道系由高密度洪水冲蚀而成 ,主要岩性为大

表 1 盐 22 块沙四上亚段近岸水下扇砂砾岩中粒度概率曲线类型简表

Table 1 The simple list of probability cumulative grain size curve patterns in nearshore subaqueous fan sandy conglomerate of the upper Es<sub>4</sub> in Yan 22 Block, Dongying Depression

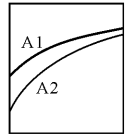
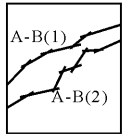
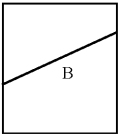
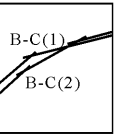
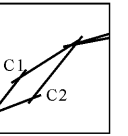
曲线类型	A型	A—B过渡型	B型	B—C过渡型	C型
曲线形态	上拱弧形	近似上拱弧形台阶状多段式	简单一段式	由低斜率的两条或三条直线组成	由较高斜率的三条直线或多条直线组成
流体性质	泥石流(碎屑流)颗粒流	泥石流向浊流过渡	浊流	浊流向牵引流过渡	接近牵引流
岩相特征	中粗砾岩呈混杂结构细砾岩、含砾中粗砂岩呈块状构造。	中细砾岩、含砾中粗砂岩以块状层理为主, 偶见递变层理和平行层理。	富含杂基中细砾岩和含砾中粗砂岩具有递变层理。	中细砾岩和含砾中粗砂岩多具递变层理和块状层理, 偶见平行层理。	中粗砂岩和细砾岩多具有平行层理, 偶见块状层理。
沉积微相	多见于内扇主沟道、中扇辫状沟道中下部, 外扇深切水道下部少见	A-B(1):中扇辫状沟道中下部、内扇主沟道; A-B(2):中扇辫状沟道间、内扇主沟道侧缘	中扇辫状沟道中上部、中扇辫状沟道间	中扇辫状沟道中上部、沟道前缘、沟道间	在外扇深切水道和末端砂中最常见, 其次是中扇的辫状沟道中上部、沟道间和沟道前缘
典型代表					

表 2 盐 22 块沙四上亚段近岸水下扇不同沉积微相中的粒度概率曲线组成

Table 2 The probability cumulative grain size curve patterns composition in different micro facies in nearshore subaqueous fan of the upper Es<sub>4</sub> in Yan 22 Block, Dongying Depression

沉积亚相	沉积微相	样品数	粒度概率曲线类型组成/%								
			A 型		A - B 过渡型		B 型	B - C 过渡型		C 型	
			A1	A2	A - B(1)	A - B(2)		B - C(1)	B - C(2)	C1	C2
内扇	主沟道	8	25	37.5	37.5	0	0	0	0	0	0
	沟道侧缘	1	0	0	0	100	0	0	0	0	0
中扇	辫状沟道	173	2.9	11.0	27.8	13.3	4.0	12.7	9.8	8.7	9.8
	沟道间	12	0	0	41.7	16.7	8.3	0	8.3	16.7	8.3
	沟道前缘	27	0	0	18.5	18.5	0	0	3.7	40.8	18.5
外扇	深切水道	3	0	66.7	0	0	0	0	0	33.3	0
	末端砂	2	0	0	0	0	0	0	0	50	50

套灰色中粗砾岩, 顶部发育薄层细砾岩和含砾中粗砂岩, 砂砾岩具有混杂结构和块状构造。粒度曲线以为“宽缓上拱弧形”(A1型)、“近似上拱弧形”(A-B(1)型)为主, 中上部常见“较陡上拱弧形”(A2型), 反映了最靠近物源的内扇主沟道主要为泥石流(碎屑流)沉积, 顶部有时发育颗粒流沉积。

### 2.1.2 主沟道侧缘

主沟道侧缘系高密度洪水溢出主沟道并在其侧缘沉积, 主要岩性为暗色泥岩夹薄层含砾中粗砂岩、细砂岩。粒度曲线为“台阶状多段式”(A-B(2)型), 反映了主沟道侧缘具有动荡性水流沉积作用特点, 这与湖水的强烈顶托有关。

## 2.2 中扇亚相

### 2.2.1 辫状沟道微相

中扇辫状沟道微相由一系列分流辫状沟道组成, 上接内扇主沟道。主要岩性为厚层含砾中粗砂岩和中细砾岩。辫状沟道中的粒度曲线复杂多变: 中下部的粒度曲线以“近似上拱弧形”(A-B(1)型)和“较陡上拱弧形”(A2型)为主, 砂砾岩呈块状构造, 内部不显纹层; 上部多以浊流与牵引流的过渡类型曲线(包括B-C过渡型、C型)为主, 多对应平行层理中粗砂岩段。这样的粒度曲线组合特征反映辫状沟道的流体性质已开始从泥石流(碎屑流)向浊流、牵引流转化, 其原因是随着搬运距离的增大, 流体能量渐弱, 流体密度渐小, 颗粒间的流体比重逐渐增加, 颗粒搬运方式逐渐向湍流支撑悬浮搬运和床砂负载搬运(滚动和跳跃)转化, 流体性质逐渐向浊流和牵引流演变。

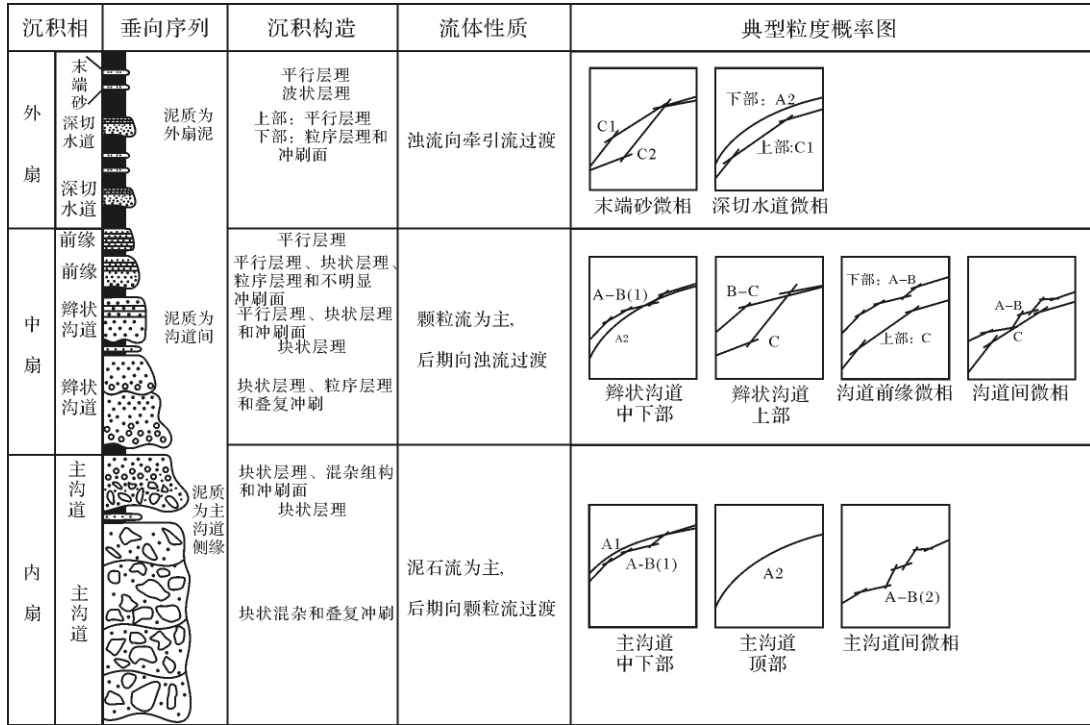


图 10 盐 22 块沙四上亚段近岸水下扇粒度概率曲线组成模式图

Fig. 10 The composing model diagram of probability cumulative grain size curve patterns in nearshore subaqueous fan of the upper Es<sub>4</sub> in Yan 22 Block , Dongying Depression

2.2.2 辫状沟道间微相

中扇辫状沟道间是由水流溢出辫状沟道后沉积而成。主要岩性为厚度不大的暗色泥岩夹中细砂岩, 粒度曲线以较高斜率的“近似上拱弧形”(A-B(1)型)、准牵引流型曲线(C型)为主, 并以发育“台阶状多段式”(A-B(2)型)、“简单一段悬浮式”(B型)为特点, “上拱弧形”(A型)不发育。水流溢出沟道后, 由于受到湖水的强烈顶托作用, 流体能量会迅速降低, 粗大颗粒快速卸载, 流体密度迅速减小, 因此反映碎屑流沉积作用的“宽缓上拱弧形”不发育。辫状沟道中的流体时常溢出, 在辫状沟道间出现震荡性水动力条件, 发育“台阶状多段式”(A-B(2)型)。

2.2.3 辫状沟道前缘微相

顾名思义, 辫状沟道前缘微相位于中扇辫状沟道的前缘, 系由水流携带的碎屑物质在辫状沟道末端溢出发生的沉积作用。岩性主要为灰色中细砂岩、含细砾中粗砂岩夹薄层泥岩, 发育平行层理、正递变层理和弱冲刷面等沉积构造。粒度曲线以“一跳跃—悬浮夹过渡三段式”(C1型)和“低斜率滚动—跳跃—悬浮三段式”(C2型)为主, 碎屑流成因的“宽缓上拱弧形”(A1型)不发育, 反映在辫状沟道出口处流体

能量较低, 大量粗颗粒在辫状沟道中早已发生卸载, 流体性质以浊流为主, 并开始向牵引流发生转化。

2.3 外扇亚相

2.3.1 深切水道微相

深切水道是由较大能量的洪水在外扇或深湖一半深湖暗色泥岩之上冲蚀出的水道, 持续时间较短, 砂岩厚度薄。岩性主要为中细砾岩、含砾中粗砂岩和细砂岩, 整体呈FU序, 发育明显冲刷面、小型正递变层理和平行层理。研究区深切水道微相的粒度资料有限(3个), 其类型有“近似宽缓上拱弧形(A-B(1)型)”和“低斜率滚动—跳跃—悬浮三段式”(C2型), A-B(1)型曲线对应深切水道底部的块状层理和粒序层理段, C2型曲线对应顶部的平行层理砂岩, 反映了深切水道底部具有碎屑流沉积特点, 顶部已经接近牵引流。

2.3.2 末端砂微相

末端砂是由深切水道携带的碎屑物质在流出水道口后发生的沉积, 岩性主要为中厚层暗色泥岩夹中薄层细砂岩、粉砂岩, 发育同生变形构造、小型平行层理和波状层理, 某些末端砂底部还可见小型正递变层理, 底部冲刷面不甚明显。前人研究指出末端砂属于

低密度浊流沉积(朱筱敏等,1995),研究区末端砂微相仅有2个粒度资料,粒度曲线为准牵引流C1型和C2型,反映了流体性质已经近于牵引流,具有较强湍动性。

### 3 粒度概率累积曲线的演化

根据前面分析推测得出:山洪爆发期间,洪水携带大量风化剥蚀的碎屑物质沿断沟入湖,随着搬运距离的逐渐增大,湖盆地形坡度逐渐变缓,加之湖水顶托作用的影响,流体能量逐渐减弱,颗粒按照粒度大小先后发生卸载,颗粒间流体的比重逐渐增大,流体密度逐渐降低,流体性质将会依次出现:泥石流→颗粒流→浊流→牵引流<sup>[20-22]</sup>,相应粒度概率曲线大致演化规律是“宽缓上拱弧形”→“较高斜率上拱弧形”→“简单一段悬浮式”→“一跳一悬夹过渡段三段式”或“低斜率滚动—跳跃—悬浮三段式”;相邻典型曲线间会出现复杂的过渡类型,如“上拱弧形”与“简单一段悬浮式”曲线之间包括“近似上拱弧形”、“台阶状多段式”等两类过渡曲线类型,“简单一段悬浮式”与“准牵引流型”曲线之间包括“低斜率两段式”、“低斜率三段式或多段式”等两类过渡曲线类型。随着流体性质逐渐向牵引流逐渐演化,粒度概率曲线中的直线段越来越明显,曲线斜率也逐渐增大(图10、图11)。

### 4 结论

(1) 结合流体力学特征分析,通过对比砂砾岩体

各类沉积的组构与粒度概率曲线特征,发现其粒度概率曲线与流体性质有一定的对应关系。研究区沙四段近岸水下扇发育3种基本粒度概率曲线,分别代表泥石流(碎屑流)作用、浊流作用和近牵引流作用,而过渡类型曲线代表了不同性质流体的过渡。

(2) 内扇亚相以泥石流(碎屑流)沉积为主,粒度概率曲线为“宽缓上拱弧形”;中扇亚相以碎屑流和颗粒流沉积为主,其中辫状沟道中下部的粒度曲线以“近似上拱弧形”为主,顶部砂岩段粒度曲线类型为“低斜率滚动—跳跃—悬浮三段式”或“一跳一悬夹过渡段三段式”,粒度概率曲线斜率自下而上逐渐增大;外扇亚相为牵引流沉积和颗粒流沉积,粒度概率曲线为“低斜率滚动—跳跃—悬浮三段式”、“一跳一悬夹过渡段三段式”和“较陡斜率上拱弧形”。

(3) 山洪爆发期间,洪水携带大量碎屑物质入湖,随着搬运距离渐远,流体性质会依次出现:泥石流→颗粒流→浊流→牵引流,相应粒度概率曲线演化规律是“宽缓上拱弧形”→“较高斜率上拱弧形”→“简单一段悬浮式”→“低斜率滚动—跳跃—悬浮三段式”或“一跳一悬夹过渡段三段式”,相邻典型曲线间会出现复杂的过渡类型。

(4) 本次研究不仅发现粒度概率曲线与流体性质有着很好的对关系,而且利用粒度概率曲线对近岸水下扇各沉积微相砂体作出了合理的成因解释。与近岸水下扇类似,洪积扇、辫状河三角洲、扇三角洲、湖底扇和近岸砂体前缘滑塌浊积扇等陆相断陷湖盆砂砾岩体形成过程也具有重力流性质,粒度概率曲线

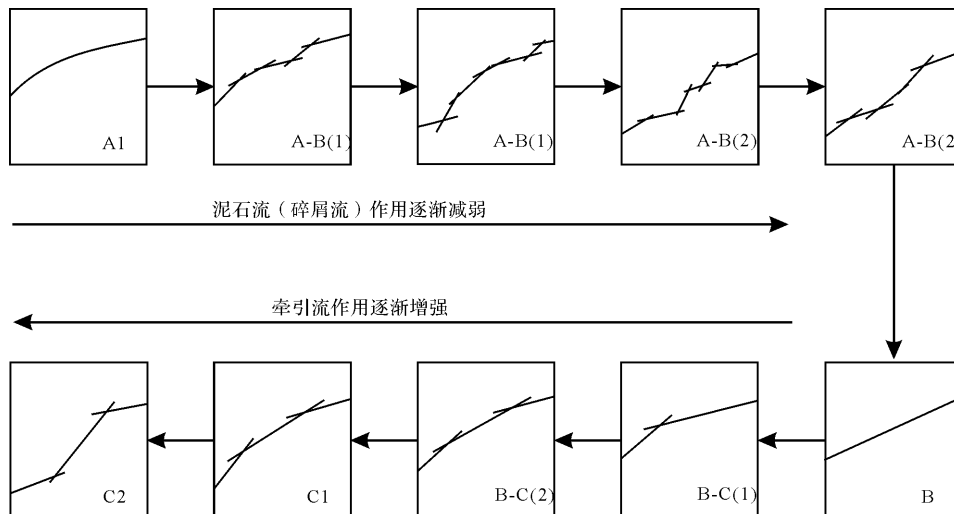


图11 盐22块沙四上亚段近岸水下扇砂砾岩中的粒度概率图类型演化  
(箭头方向指示流体搬运距离逐渐增大)

Fig. 11 The type evolution of the probability cumulative grain size curve patterns in nearshore subaqueous fan sandy conglomerate of the upper Es<sub>4</sub> in Yan 22 Block, Dongying Depression



同样具有“粒度粗、宽区间和低斜率”特征,本文中提出粒度概率曲线分类对其动力学解释具有重要的借鉴意义。

致谢 本文研究工作得到了东辛采油厂领导和同仁的帮助,在此对他们表示感谢。

### 参考文献(References)

- Visher G S. Grain size distributions and depositional processes [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1969, 39: 1074-1106
- Glaister R P, Nelson H W. Grain-size distributions, an aid in facies identification [J]. *Bulletin of Canada Petroleum Geology*, 1974, 22 (3): 203-240
- 成都地质学院陕北队. 沉积岩(物)粒度分析及其应用[M]. 北京:地质出版社,1978: 55-65, 133-136 [Shanbei Team of Chengdu Geology Institute. *The Grain Size Analysis of Sedimentary Rocks or Sediments and Its Application* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1978: 55-65, 133-136]
- 郑俊茂,王德发,孙永传. 黄骅坳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: 9-20 [Zheng Junmao, Wang Defa, Sun Yongchuan. *The grain size distribution characteristic of some sandbody in Huanghua Depression and its hydrodynamic conditions analysis* [J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1980, 2: 9-20]
- 赵惠林. 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 study of debris flow* [J]. *Journal of Catastrophology*, 1991, 6(2): 6-11]
- 盛和宜. 粒度分析在扇三角洲分类中的应用[J]. *石油实验地质*, 1993, 15(2): 185-191 [Sheng Heyi. *The application of grain size analysis to the classification of fan-deltas* [J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1993, 15(2): 185-191]
- 朱筱敏,查明,张卫海. 陆西凹陷上侏罗统近岸水下扇沉积特征[J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 1995, 19(1): 1-6 [Zhu Xiaomin, Zha Ming, Zhang Weihai. *Sedimentary features of Upper Jurassic nearshore subaqueous fan in Luxi Depression* [J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 1995, 19(1): 1-6]
- 张善文,王永诗,纪友亮. 义东地区陡岸扇体沉积特征及相模式[J]. *石油勘探与开发*, 1997, 24(2): 41-45 [Zhang Shanwen, Wang Yongshi, Ji Youliang. *Sedimentary characteristics and facies model of the fan body on the abrupt slope in Yidong Region* [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1997, 24(2): 41-45]
- 袁静,徐根旺. 东营凹陷永 554 古近系沙四段沟道浊积岩相模式[J]. *煤田地质与勘探*, 2003, 31(6): 11-14 [Yuan Jing, Xu Genwang. *Sedimentary facies models of channel turbidites of the fourth member of Paleogene Shahejie Formation in Yong 554 well block, Dongying Depression* [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2003, 31(6): 11-14]
- 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 [Yuan Jing, Du Yumin, Li Yunnan. *Probability cumulative grain size curves in terrigenous depositional environments of the Paleogene in Huimin Depression* [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2003, 30(3): 103-107]
- 刘招君. 湖泊水下扇沉积特征及影响因素——以伊通盆地莫里青断陷双阳组为例[J]. *沉积学报*, 2003, 21(1): 149-154 [Liu Zhaojun. *Lacus subaqueous fan sedimentary characteristics and influence factors: A case study of Shuangyang Formation in Moliqing Fault Subsidence of Yitong Basin* [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(1): 149-154]
- 袁文芳,陈世悦,曾昌民,等. 柴达木盆地西部地区第三系碎屑岩粒度概率累积曲线特征[J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 2005, 29(5): 12-18 [Yuan Wenfang, Chen Shiyue, Zeng Changmin, et al. *Probability cumulative grain size curves in terrigenous of a Tertiary in west Qaidam Basin* [J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 2005, 29(5): 12-18]
- 宋子齐,杨金林,潘玲黎,等. 利用粒度分析资料研究砾岩储层有利沉积相带[J]. *油气地质与采收率*, 2005, 12(6): 16-18 [Song Ziqi, Yang Jinlin, Pan Lingli, et al. *Study on the favorable sedimentary facies belt of conglomerate reservoir by using grain-size analysis data* [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2005, 12(6): 16-18]
- 孙连浦,刘招君,毛天基,等. 伊通盆地莫里青断陷双阳组湖泊水下扇沉积特征[J]. *世界地质*, 2005, 24(2): 137-143 [Sun Lianpu, Liu Zhaojun, Mao Tianji, et al. *Sedimentary features of submarine fan in Shuangyang Formation, Moliqing Faulted depression, Yitong Basin* [J]. *Global Geology*, 2005, 24(2): 137-143]
- 刘忠宝,刘晓,苗峰,等. 阿北凹陷下白垩统阿尔善组水下扇沉积特征[J]. *沉积与特提斯地质*, 2005, 25(3): 58-61 [Liu Zhongbao, Liu Xiao, Miao Feng, et al. *Sedimentary features of the submarine fans in the Lower Cretaceous Arxan Formation, Abei depression, Nei Mongol* [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2005, 25(3): 58-61]
- 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 Mountain area, Qinghai, China* [J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(4): 477-490]
- 王秉海,钱凯. 胜利油区地质研究与勘探实践[M]. 山东东营:石油大学出版社,1992: 2-21 [Wang Binghai, Qian Kai. *The Geology Study and Oil Exploration of Shengli Oilfield* [M]. Shandong Dongying: China University of Petroleum Press, 1992: 2-21]
- 王居峰. 济阳坳陷东营凹陷古近系沙河街组沉积相[J]. *古地理学报*, 2005, 7(1): 45-58 [Wang Jufeng. *Sedimentary facies of the Shahejie Formation of Paleogene in Dongying Depression, Jiyang Depression* [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2005, 7(1): 45-58]
- 石宁. 盐家—永安地区沙四上亚段砂砾岩体次精细划分[D]. 山东青岛:中国海洋大学,2009 [Shi Ning. *The glutenite bodies depositional stage fine division of the upper fourth member of the Shahejie sand formation in Yanjia-Yongan zone* [D]. Qingdao Shandong: Ocean University of China, 2009]

- 20 姜在兴. 沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 74-75, 80-84 [Jiang Zaixing. Sedimentology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 74-75, 80-84]
- 21 张萌, 田景春. “近岸水下扇”的命名、特征及其储集性[J]. 岩相古地理, 1999, 19(4): 42-52 [Zhang Meng, Tian Jingchun. The nomenclature, sedimentary characteristics and reservoir potential of near-shore subaqueous fans[J]. Sedimentary Facies and Palaeogeography, 1999, 19(4): 45-52]
- 22 孙连浦, 刘招君, 李本才, 等. 水下扇岩相特征及形成机制[J]. 世界地质, 2001, 20(3): 249-256 [Sun Lianpu, Liu Zhaojun, Li Bencai, et al. Submarine fans: characteristics of rock facies and mechanisms of deposition[J]. World Geology, 2001, 20(3): 249-256]

## Probability Cumulative Grain Size Curves in Sandy Conglomerate of the Upper Es<sub>4</sub> in Yan 22 Block, Dongying Depression

YUAN Jing<sup>1</sup> YANG Xue-jun<sup>1</sup> LU Zhi-yong<sup>2</sup> CHEN Wu-jie<sup>3</sup> FAN Hai-lin<sup>4</sup> YUAN Ling-rong<sup>1</sup>

(1. Faculty of Geo-Resource and Information in China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266555;

2. Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 251000;

3. Laboratory Center of Yanchang Oil Field, Yan'an, Shaanxi 717208;

4. The 4<sup>th</sup> Oil Recovery Factory of Daqing Oil Field, Daqing, Heilongjiang 163511)

**Abstract** On the basis of observation of cores, facies analysis and grain size analysis of 226 samples from 3 core wells, the probability cumulative grain size curves features of sandy conglomerate of the upper Es<sub>4</sub> in Yan22 block Dongying Depression are summarized, the relationships between the probability cumulative grain size curves types and the hydrodynamic conditions are studied. Conclusions are gained as follows:

(1) The relationships between the probability cumulative grain size curves shapes and the hydrodynamic conditions or fluid property are found. The research shows that the grains size curves of the nearshore subaqueous fan have the characteristics of coarse-grained, wide-range and low-slope, can be classified into 3 basic patterns (e. g. "uphill arched arc" pattern, one segment pattern and "quasi drag flow" pattern) and 4 transitional patterns. The "uphill arched arc" pattern represents debris flow deposition, one segment pattern represents turbidity deposition, the transitional patterns represent the deposition of transitional fluid property.

(2) The composition characteristics of probability cumulative grain size curve patterns vary with the change of micro-facies or sub-facies. Inner fan of the nearshore subaqueous fan, made up of thick sandy conglomerate with mixed fabrics of main channel, is typical of "broadly uphill arched arc" pattern, that represents debris flow deposition. Middle fan mainly has two kinds of deposition: debris flow deposition and drag flow deposition. The curve type of the lower-middle part, made up of thick coarse sandstone with massive bedding, is "approximate uphill arched arc" pattern. And the upper part, made up of parallel bedding, are "one bouncing population-one suspension population sections-transitional zone" pattern and "one rolling population-one bouncing population-one suspension population" tri-segment pattern. Outer fan has three types of curve patterns, such as "low slope tri-segment" pattern, "one bouncing population-one suspension population sections-transitional zone" pattern, "one rolling population-one bouncing population-one suspension population" tri-segment pattern and etc, the sandstones often have parallel bedding, cross bedding and graded bedding. Note that, inter-channel micro-face is typical of "step-type" multi-segment pattern that reflects the effect of flood overflow from channels.

(3) The type evolution of the grain size curve patterns in nearshore subaqueous fan sandy conglomerate is inferred in the paper. With the transportation of nearshore subaqueous fan away from origination area, sub-facies develop from inner fan, middle fan to outer fan in turn. As the behavior of the fluid evolves from debris flow to drag flow, the patterns of the grain size curves may change from "broadly uphill arched arc" pattern, "slightly high slope uphill arched arc" pattern to one segment pattern, "high slope multi-segment" pattern.

(4) Besides nearshore subaqueous fan, terrigenous basin has other 5 different genetic types of sandy conglomerate, such as alluvial fan, braided river delta, fan delta, deepwater turbidity fan in steep slope and turbidity fan slides from nearshore sand body front. All kinds of these depositions are affected by gravity flow, they all have the characteristics of close source, quick accumulation, while the grain size curves have the same characteristics of coarse-grained, wide-range and low-slope. And thus the classification of the probability cumulative grain size curve patterns mentioned in this paper may be applicable to other different genetic types of sandy conglomerate.

**Key words** nearshore subaqueous fan; sandy conglomerate; probability cumulative grain size curve; the upper 4th member of Shahejie formation; Dongying Depression