

文章编号: 1000-0550(2010) 02-0274-11

# 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<sup>①</sup>

——以东营凹陷西部沙四上滩坝砂体沉积为例

操应长<sup>1</sup> 王 健<sup>1</sup> 刘惠民<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(华东)地球资源与信息学院 山东东营 257061; 2 中国石化胜利油田分公司地质科学研究院 山东东营 257000)

**摘 要** 东营凹陷西部古近系沙河街组沙四上亚段沉积时期广泛发育了滨浅湖滩坝砂体沉积。在钻井岩心观察描述及其相关测试分析的基础上,利用粒度—标准偏差方法对滩坝砂体的环境敏感粒度进行计算,结合粒度概率图分析和古地貌、古水流研究,在研究区内确定出了四种环境敏感粒度组分,分别代表悬浮搬运、沿岸流、波浪和风暴浪。其中,波浪和沿岸流是控制滩坝砂体形成和发育的主要水动力类型。通过对波浪和沿岸流的环境敏感粒度组分占整个粒度总体的百分比的计算表明,波浪对滩坝砂体的形成和发育的影响程度由凹陷边部向内部逐渐减弱;而沿岸流对滩坝砂体形成和发育的影响程度在凹陷外部较小,而主要表现在滨浅湖区的内侧。

**关键词** 滩坝 粒度—标准偏差 环境敏感粒度组分 水动力 东营凹陷

**第一作者简介** 操应长 男 1969 年出生 博士后 博士生导师 沉积学和层序地层学 E-mail caoych@hpu.edu.cn

**通讯作者** 王健 E-mail wangjian8512@yahoo.com.cn

**中图分类号** P512.2 **文献标识码** A

## 0 前言

东营凹陷是济阳坳陷的一个次级构造单元,具有北断南超、北陡南缓的基本构造格局(图 1)。古近系主要发育孔店组、沙河街组和东营组,其中沙河街组自上向下又分为沙河街组一段、二段、三段和四段(以下分别简称为沙一段、沙二段、沙三段、沙四段),沙四段沉积时期对应于裂谷盆地的初始扩张期,盆地基底相对平缓,广泛发育了滨浅湖沉积,特别是沙四上亚段沉积时期,处于东营断陷湖盆的初始裂陷向深裂陷的过渡时期,盆地南坡西部总体上处于“浅盆浅水、平盆广水”的沉积格局,在此背景之上广泛发育了滨浅湖滩坝砂体的沉积作用。

滩坝砂体是滨浅湖地区常见的一种沉积体系类型。碎屑岩滩坝沉积体系一般形成于开阔的滨浅湖地区,在湖浪或沿岸流等水动力的作用下,将邻近地区三角洲或其他近岸浅水砂体再搬运、沉积而成。因此,滨浅湖地区的水动力特征控制了滩坝砂体的形成和发育。在正常沉积作用条件下,沉积砂体的碎屑颗粒粒度与水动力能量密切相关,甚至是沉积环境中水

动力能量强度的响应。本文在钻井岩心观察描述的基础上,针对东营盆地西部沙四上亚段滩坝砂体进行系统取样,并采用激光粒度分析方法对每个样品进行激光粒度测试分析(测试分析主要在中国石化胜利油田测试分析中心进行),利用粒度—标准偏差方法,对滩坝砂岩的环境敏感粒度组分进行了系统分析,结合古构造、古地貌和古水流方向研究,探讨了滩坝砂体沉积区的水动力特征及其对滩坝砂体沉积作用的控制。

## 1 问题的提出

沉积物的粒度资料已广泛应用于物质运动方式的判定和沉积环境类型的识别<sup>[1~6]</sup>,然而,在现代和地质历史时期内的沉积物往往都是多种物源或沉积动力过程的混合,用全样的粒度参数显然只能近似的作为沉积环境的代用指标<sup>[7,8]</sup>。随着对沉积古环境定量研究的深入<sup>[8,9]</sup>,如何从多峰态的频率分布曲线中分离出单一粒度组分的特征(如众数值、分布范围和含量等),进而探讨各个组分所指示的沉积学意义,成为古环境研究的关键。

①国家油气重大专项(2008ZX05051-02)、国家自然科学基金项目(批准号 L40972080)和教育部分新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0604)资助。  
收稿日期:2009-02-15 收修修改稿日期:2009-04-07

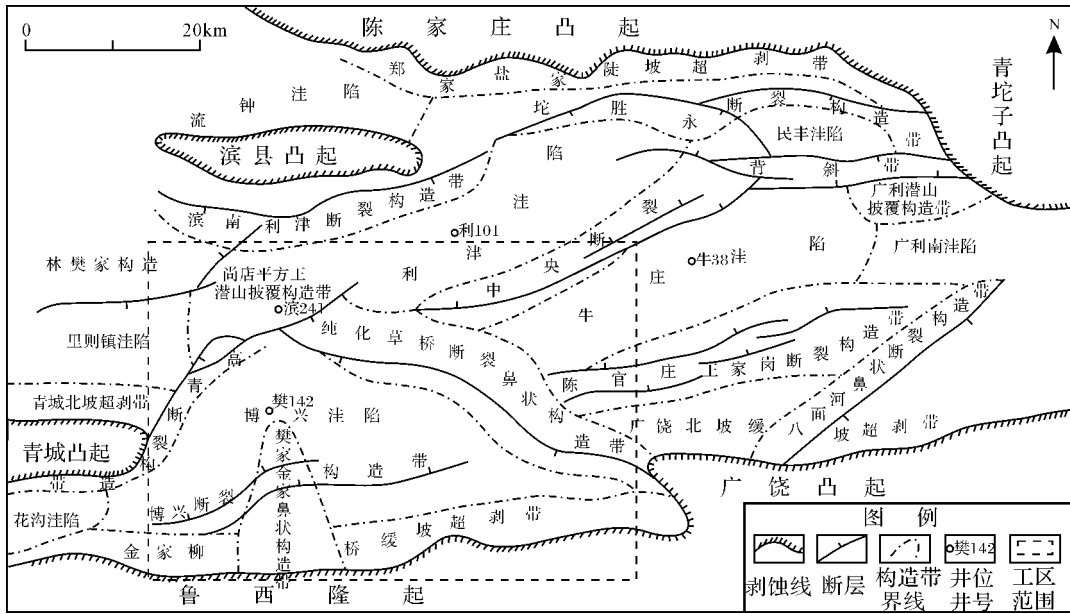


图 1 东营凹陷西部构造位置及工区范围图

Fig 1 The tectonic setting and the study area of the Western Dongying Depression

环境敏感粒度组分是指那些对沉积环境中水体能量变化敏感,能够指示沉积环境中不同能量水动力的粒度组分。环境敏感粒度组分分析是一种从多峰态的频率分布曲线中分离出单一粒度组分,进行沉积水动力研究的方法。由于不同能量的水动力所能搬运、沉积的沉积物粒度具有一定的范围,超过这个范围的沉积物将不能在该水动力条件下被搬运和沉积,因此不同能量的水动力具有不同的环境敏感粒度组分。

利用沉积物(岩)的粒度测试分析资料确定环境敏感粒度组分需要对沉积物粒度分布进行多组分分离。目前对沉积物粒度分布进行多组分分离的数学方法包括以 Weibull 函数为拟合函数<sup>[10]</sup>利用端元粒度模型<sup>[8]</sup>和粒度-标准偏差变化<sup>[11-14]</sup>来计算粒度组分的个数和分布范围。本文采用粒度-标准偏差变化来计算东营凹陷西部沙四上滩坝沉积物的环境敏感粒度组分。

标准偏差是反映数据离散趋势最常用的一个重要指标。标准偏差越大,说明观测值的变异程度愈大,标准偏差越小,说明观测值的变异程度愈小。通过粒度实验分析可以获得样品各粒级的体积百分含量,然后计算其标准偏差并以对数粒度为横坐标,以标准偏差为纵坐标作粒度-标准偏差图,就可以了解各粒级所对应的体积百分含量离散程度的大小,某一粒级所对应的标准偏差越大,说明该粒级对环境的变

化也就越敏感,从而可以获得不同沉积水动力的环境敏感粒度组分。

肖尚斌等<sup>[12]</sup>利用粒度-标准偏差图对东海内陆架泥区 DD2 孔沉积物的环境敏感粒度组分进行了提取。由图 2 可见, DD2 孔粒度-标准偏差图中存在两个峰,对应的粒度分别为 19 和 130  $\mu\text{m}$ , 其分界点为 45  $\mu\text{m}$ , 说明存在两组环境敏感粒度组分, 并且依据区域环境确定了 DD2 孔沉积物沉积过程中经受了两种动力机制, 分别为东海沿岸流和风暴流。

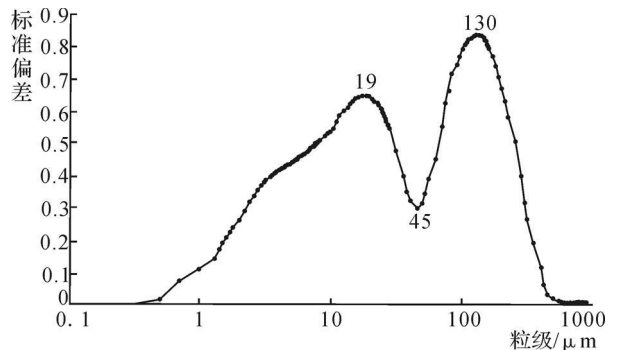


图 2 DD2 孔粒度-标准偏差图<sup>[12]</sup>

Fig 2 The grain size vs standard deviation curve of the DD2 hole

用粒度-标准偏差方法计算环境敏感粒度组分的个数和分布范围,并且进一步分析其沉积学意义在海洋细粒沉积物<sup>[11-13]</sup>和风成沉积物<sup>[14]</sup>中得到广泛

的应用,但是在陆相湖盆砂质沉积物(岩)中的应用尚不多见。滩坝砂体同其它沉积砂体一样,也是由不同粒径范围的碎屑颗粒组成,并且形成滩坝砂体的沉积物往往也是多种物源或沉积水动力作用的综合,而不是单一水动力作用的产物,并且每一种水动力的能量强度、作用方式等存在差异,这也决定了不同水动力控制的滩坝砂体的沉积物粒度特征不同,即存在不同的环境敏感粒度组分。因此,可以根据环境敏感粒度组分分析,结合古构造、古地貌和古水流方向来确定滩坝砂体形成发育时期的水动力类型。

## 2 滩坝砂体的碎屑颗粒粒度特征

### 2.1 粒度概率曲线特征

碎屑岩的碎屑颗粒结构特征主要包括其粒度、分选性和磨圆度,以及碎屑颗粒的分布特征,其能够反映碎屑颗粒的搬运营力、搬运方式及沉积环境,是判别沉积时自然地理环境以及水动力条件的良好标志<sup>[15]</sup>。在滩坝砂体的粒度测试分析的基础上,分别绘制了不同分析样品的粒度概率曲线图。东营凹陷西部沙四上滩坝砂体的粒度概率图主要具有以下四种类型:两跳一悬式、一跳一悬式、滚动跳跃加悬浮式和宽缓上拱式(图 3),其中以两跳一悬式和一跳一悬

式粒度概率图最为常见,其它类型仅在部分地区见到。两跳一悬式和一跳一悬式粒度概率图的跳跃次总体与悬浮次总体的交切点平均为  $3.0\phi \sim 5.0\phi$ , 跳跃次总体含量一般为  $60\% \sim 80\%$ , 斜率  $50^\circ \sim 70^\circ$ , 说明滩坝沉积时期的水体能量较强,并且以牵引流作用为主。宽缓上拱式粒度概率图在滨浅湖区的局部存在,表明局部地区存在风暴浪作用。

### 2.2 粒度—标准偏差特征

本次研究中,对研究区内 20 多口取心井进行系统取样,利用激光粒度测试仪对每口井每个样品分别进行了激光粒度测试。在此基础上,分别对每口井进行粒度—标准偏差的计算,并绘制其相应的粒度—标准偏差图。虽然每口井所取的样品数量不同,但是它们的粒度—标准偏差图的形态相似,并且特征数值的分布具有明显的共性和规律性(表 1)。因此,根据所有井的粒度—标准偏差图的形态及特征数值的分布特征对这些粒度—标准偏差图进行分析、归类,认为存在三种样式:两峰型(I型)、三峰型(II型)和多峰型(III型),并且三峰型(II型)具有 II 1 型和 II 2 型两个亚类(图 4)。不同类型的粒度—标准偏差图在工区内具有明显不同的特征。

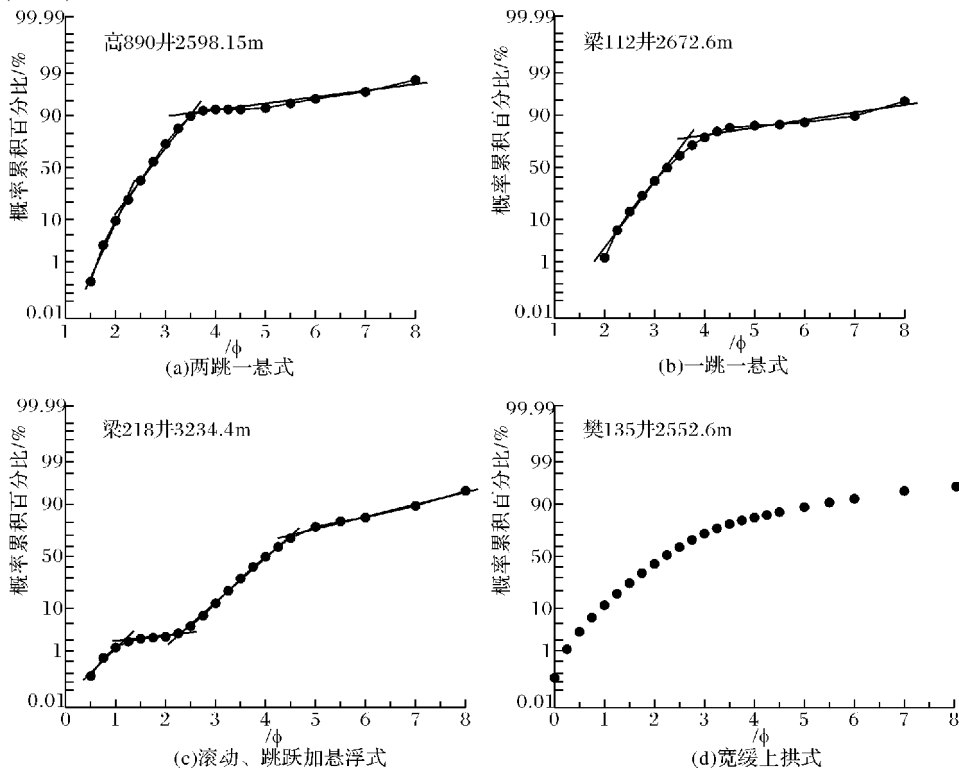


图 3 东营凹陷西部沙四上亚段滩坝砂体的粒度概率图类型

Fig. 3 Types of grain size probability curves of beach-bar sandbodies of the upper submember

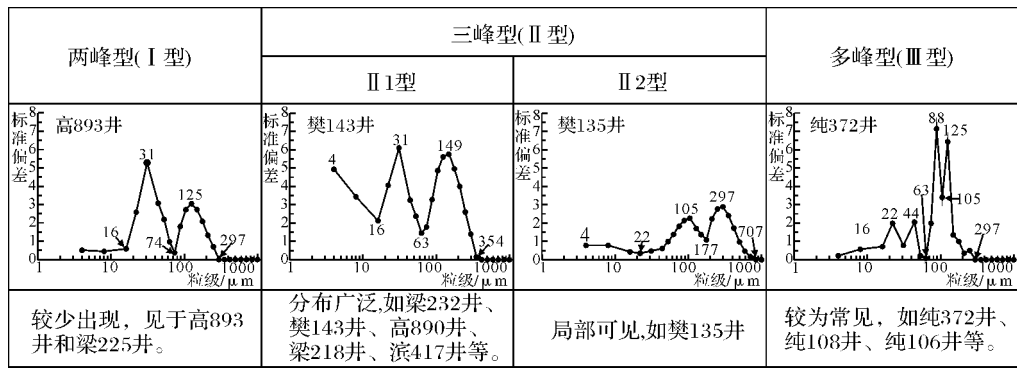


图 4 东营凹陷西部沙四上亚段滩坝砂岩粒度—标准偏差图类型

Fig 4 The grain size vs standard deviation curves types of beach-bar sandbodies of the upper submember of the fourth Member of the Shahejie Formation in the Western Dongying Depression

表 1 东营凹陷西部沙四上亚段滩坝砂岩粒度—标准偏差图特征数值

Table 1 The characteristic factors of grain size vs standard deviation curves of beach-bar sandbodies of the upper submember of the fourth Member of the Shahejie Formation in the Western Dongying Depression

序号	井号	样品数	类型	峰点对应的粒度/ $\mu\text{m}$					谷点对应的粒度/ $\mu\text{m}$				最大敏感粒度/ $\mu\text{m}$
				第一个	第二个	第三个	第四个	第五个	第一个	第二个	第三个	第四个	
1	梁225	8	I	—	22	177	—	—	—	44	—	—	354
2	高893	2	I	—	31	125	—	—	—	74	—	—	297
3	滨417	9	II 1	4 或更小	31	149	—	—	16	88	—	—	354
4	滨427	4	II 1	4 或更小	31	125	—	—	16	88	—	—	354
5	滨斜426	7	II 1	4 或更小	31	88	—	—	16	44	—	—	297
6	博103	9	II 1	8	22	105	—	—	16	44	—	—	250
7	博104	10	II 1	4 或更小	31	125	—	—	16	53	—	—	354
8	博901	7	II 1	8	31	149	—	—	16	44	—	—	210
9	樊143	16	II 1	4 或更小	31	125	—	—	16	63	—	—	354
10	高890	15	II 1	4 或更小	31	149	—	—	16	44	—	—	354
11	梁105	4	II 1	4 或更小	31	125	—	—	16	63	—	—	250
12	梁109	11	II 1	4 或更小	31	177	—	—	16	88	—	—	354
13	梁112	6	II 1	4 或更小	31	149	—	—	16	74	—	—	354
14	梁218	12	II 1	4 或更小	31	149	—	—	16	88	—	—	354
15	梁230	7	II 1	4 或更小	31	149	—	—	16	88	—	—	354
16	梁232	5	II 1	4 或更小	31	125	—	—	16	63	—	—	354
17	樊135	8	II 2	4 或更小	105	297	—	—	22	177	—	—	707
18	纯106	5	III	8	31	53	88	149	16	44	63	105	354
19	纯108	9	III	8	31	53	88	177	16	44	63	105	354
20	纯372	2	III	—	22	44	88	125	16	31	63	105	297

两峰型 (I 型) 粒度—标准偏差图存在 2 个标准偏差高值峰, 仅见于高 893 井和梁 225 井。高 893 井两个峰点所对应的粒度分别为 31  $\mu\text{m}$  和 125  $\mu\text{m}$ , 分

界点为 74  $\mu\text{m}$ , 最大敏感粒度为 297  $\mu\text{m}$ ; 梁 225 井的两个峰点所对应的粒度分别为 22  $\mu\text{m}$  和 177  $\mu\text{m}$ , 分界点为 44  $\mu\text{m}$ , 最大敏感粒度为 354  $\mu\text{m}$  (表 1)。

三峰型(II型)粒级—标准偏差图存在3个标准偏差高值峰,在研究区内分布广泛,但以II1型为主,II2型仅在局部地区可见。II1型和II2型两个亚类的峰点和分界点的粒度具有明显的差别。II1型粒级—标准偏差图的第一个峰点所对应的粒级一般为 $4\ \mu\text{m}$ 或小于 $4\ \mu\text{m}$ ,少数为 $8\ \mu\text{m}$ ;第二个峰点粒级一般为 $31\ \mu\text{m}$ ,少数为 $22\ \mu\text{m}$ ;第三个峰点对应的粒级变化较大,分布在 $105\sim 177\ \mu\text{m}$ 之间,一般为 $125\ \mu\text{m}$ 和 $149\ \mu\text{m}$ 。第一个峰与第二个峰之间的谷点对应的粒级均为 $16\ \mu\text{m}$ ;第二个峰与第三个峰之间的谷点对应的粒级变化比较大,一般在 $44\sim 88\ \mu\text{m}$ 之间;最大敏感粒度一般为 $354\ \mu\text{m}$ (表1)。II2型粒级—标准偏差图见于樊135井,三个峰点对应的粒级分别为 $4\ \mu\text{m}$ 或更小、 $105\ \mu\text{m}$ 和 $297\ \mu\text{m}$ ,两个谷点对应的粒级分别为 $22\ \mu\text{m}$ 和 $177\ \mu\text{m}$ ,最大敏感粒度为 $707\ \mu\text{m}$ (图4)。由此表明,II2型粒级—标准偏差图所反映的沉积环境与II1型粒级—标准偏差图所反映的沉积环境存在明显差异。

多峰型(III型)粒级—标准偏差图存在多个标准偏差高值峰,不同井的高值峰的个数存在一定差别,一般为4~5个峰。第一个峰点的粒级为 $8\ \mu\text{m}$ ,少数不存在此峰点;第二个峰点的粒级一般为 $22\ \mu\text{m}$ 或 $33\ \mu\text{m}$ ;第三个峰点的粒级一般为 $53\ \mu\text{m}$ ,少数为 $44\ \mu\text{m}$ ;第四个峰点的粒级均为 $88\ \mu\text{m}$ ;第五个峰点的粒级一般为 $125\ \mu\text{m}$ 或 $149\ \mu\text{m}$ 。第一个峰与第二个峰之间的谷点所对应的粒级均为 $16\ \mu\text{m}$ ;第二个峰与第三个峰之间的谷点的粒级一般为 $44\ \mu\text{m}$ ,少数为 $31\ \mu\text{m}$ ;第三个峰与第四个峰之间的谷点的粒级一般为 $63\ \mu\text{m}$ ,少数为 $74\ \mu\text{m}$ ;第四个峰与第五个峰之间的谷点的粒级均为 $105\ \mu\text{m}$ ;最大敏感粒度为 $297\ \mu\text{m}$ 或 $354\ \mu\text{m}$ (表1)。多峰型粒级—标准偏差图的高值峰常被明显的分为三组或两组(图4)。

### 3 滩坝沉积的水动力分析

#### 3.1 环境敏感粒度组分

通过对研究区的粒级—标准偏差图的特征数值进行综合研究表明,不同类型的粒级—标准偏差图所反映的环境敏感粒度组分的个数和种类存在明显的差异。通过结合反映全样沉积物粒度特征的粒度概率图和反映单一沉积物粒度组分特征的粒级—标准偏差图,对滩坝砂体的环境敏感粒度组分类型和特征进行分析。

两峰型(I型)粒级—标准偏差图表明存在两组环境敏感粒度组分。它们的粒度范围梁225井分别为 $16\sim 44\ \mu\text{m}$ 和 $44\sim 354\ \mu\text{m}$ ,高893井分别为 $16\sim 74\ \mu\text{m}$ 和 $74\sim 297\ \mu\text{m}$ (表1)。梁225井和高893井的粒度概率图主要为两跳一悬式(图3a)。第一组环境敏感粒度组分在粒度概率图上对应悬浮次总体的粒度较粗部分和跳跃次总体的粒度较细部分,第二组对应粒度概率图跳跃次总体的粒度较粗部分,即冲刷回流段粒度较粗部分(图5a)。三峰型(II型)粒级—标准偏差图表明存在三组环境敏感粒度组分,但是II1型和II2型两个亚类所反映的环境敏感粒度组分具有明显的差别。II1型对应的粒度概率图主要为两跳一悬式和一跳一悬式(图3ab)。II1型的第一组环境敏感粒度组分的粒度均小于 $16\ \mu\text{m}$ ,与粒度概率图的悬浮次总体具有良好的对应关系;不同地区的第二组和第三组环境敏感粒度组分的粒度范围变化比较大,但总体而言,第二组的粒度一般在 $16\sim 88\ \mu\text{m}$ 之间,对应粒度概率图的悬浮次总体粒度较粗部分和跳跃次总体的粒度较细部分;第三组的粒度一般在 $44\sim 354\ \mu\text{m}$ 之间,但多数在 $63\sim 354\ \mu\text{m}$ 之间(表1),对应粒度概率图跳跃次总体粒度较粗部分,即冲刷回流段粒度较粗部分(图5b)。II2型对应的粒度概率图有两跳一悬式和宽缓上拱式两种(图3ad),表明樊135井处既有正常牵引流沉积,又有风暴浪沉积。虽然粒级—标准偏差图中第一个峰与第二个峰的分界点为 $22\ \mu\text{m}$ ,但是图中 $16\sim 44\ \mu\text{m}$ 之间的标准偏差值极低,说明这一粒度范围对此处的水动力不敏感,不应将其归入环境敏感粒度组分之中(图5c)。因此,II2型粒级—标准偏差图的两组环境敏感粒度组分粒度分别为小于 $16\ \mu\text{m}$ 、 $44\sim 177\ \mu\text{m}$ 和 $177\sim 707\ \mu\text{m}$ 。第一组的粒度与II1型第一组一致;第二组的粒度与I型第二组和II1型第三组相近,均在 $44\sim 354\ \mu\text{m}$ 之间,II2型的第二组粒度范围之所以偏小,可能是由于能量较强的风暴浪对沉积物改造使得粒度较粗的部分成为其环境敏感粒度组分造成的。因此,II2型的第一组和第二组环境敏感粒度组分代表的是正常牵引流沉积,与两跳一悬式粒度概率图对应且对应特征与I型和II1型相近(图5)。II2型的第三组环境敏感粒度组分与其它类型的任何一组都不同,粒度明显偏粗,而宽缓上拱式粒度概率图的存在表明其所代表的水动力能量非常强,可能为风暴浪。

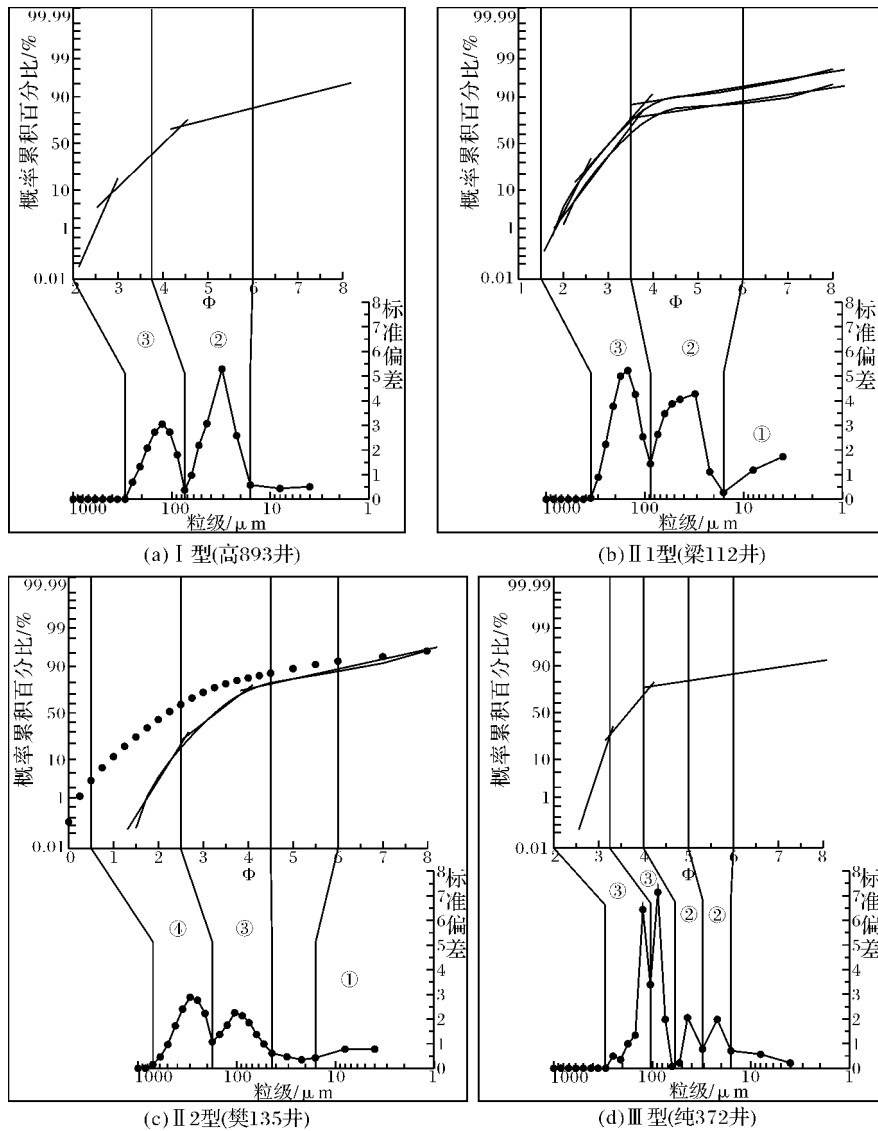


图 5 东营凹陷西部沙四上亚段滩坝砂体沉积时期环境敏感粒度组分特征  
(图中上图为粒度概率图, 下图为粒度—标准偏差图)

Fig 5 The characteristics of environmentally sensitive grain size components of beach-bar sandbodies of the upper submember of the Shahejie Formation in the Western Dongying Depression  
(the upper curve is grain size probability curve, the lower curve is grain size standard deviation curve)

多峰型 (II型) 粒度—标准偏差图表明存在多组环境敏感粒度组分, 由前所述, 一般存在四组或五组。II型粒度—标准偏差图对应的粒度概率图主要为两跳—悬式, 第一组环境敏感粒度组分的粒度均小于  $16 \mu\text{m}$ , 与粒度概率图的悬浮次总体具有良好的对应关系, 但个别井如纯 372 井此组不明显; 第二组的粒度一般为  $16 \sim 44 \mu\text{m}$ , 对应于粒度概率图的悬浮次总体粒度较粗部分; 第三组的粒度一般为  $44 \sim 63 \mu\text{m}$ , 对应于粒度概率图的悬浮次总体粒度较粗部分和跳跃次总体的粒度较细部分; 第四组和第五组的粒度分

别为  $63 \sim 105 \mu\text{m}$  和  $105 \sim 354 \mu\text{m}$ , 对应于粒度概率图跳跃次总体粒度较粗部分 (图 5d)。II型粒度—标准偏差图的第二组和第三组与第四组和第五组环境敏感粒度组分被明显的分为两大组, 即第二组和第三组为一大组, 第四组和第五组为一大组 (图 5d)。对比 II型和 I型与 II 1型粒度—标准偏差图发现, II型的第二组和第三组环境敏感粒度组分的粒度范围与 I型的第一组和 II 1型的第二组的粒度范围相近, 都在  $16 \sim 88 \mu\text{m}$  之间; II型的第四组和第五组环境敏感粒度组分的粒度范围与 I型的第二组和 II 1型的

第三组的粒度范围相近,都在 88~354  $\mu\text{m}$  之间,并且两者的粒度概率图类型和粒级—标准偏差图与粒度概率图的对应特征都基本相同。因此,II型的第二组和第三组环境敏感粒度组分与I型的第一组和II1型的第二组反映的水动力类型相同,同样,II型的第四组和第五组与I型的第二组和II1型的第三组反映的水动力类型相同。

综上所述,研究区沙四上滩坝砂体沉积时期存在四种环境敏感粒度组分(图5)。环境敏感粒度组分①的粒度小于16  $\mu\text{m}$ ,与粒度概率图的悬浮次总体对应良好,是悬浮搬运的环境敏感粒度组分。环境敏感粒度组分②和③的粒度范围在不同位置存在一定差异,但总体上组分②的粒度一般在16~88  $\mu\text{m}$ 之间,对应粒度概率图悬浮次总体的粒度较粗部分和跳跃次总体的粒度较细部分,组分③的粒度一般为44~354  $\mu\text{m}$ ,但多数在63~354  $\mu\text{m}$ 之间,对应粒度概率图的跳跃次总体粒度较粗部分,即冲刷回流段的粒度较粗部分。组分②和③在滩坝砂体发育的地区普遍存在,因此它们所代表的水动力是控制滩坝砂体形成和发育的主要水动力。环境敏感粒度组分④的粒度为177~707  $\mu\text{m}$ ,对应宽缓上拱式粒度概率图的粒度较粗部分,所代表的水动力为风暴浪。

### 3.2 滩坝砂体水动力机制分析

发育在滨浅湖地区的滩坝砂体是波浪和沿岸流共同作用的产物<sup>[16-18]</sup>,波浪控制了滩坝砂体的粒度和纵向(垂直岸线方向)分布特征,而沿岸流则控制了滩坝砂体的横向(平行岸线方向)分布特征<sup>①</sup>。东营凹陷沙四段沉积时期,湖盆处于强烈扩张初期,构造活动强度相对较弱,湖盆特别是斜坡带地形相对平缓,随着气候由干旱向半干旱、潮湿转化,湖水发生扩张,由于湖底相对平坦,湖水稍一上涨,就会淹没大部分甚至整个湖盆的湖底,形成广阔的滨浅湖沉积区,有利于波浪和沿岸流的形成。由于高青—平南大断层、石村断层和博兴断层活动的影响,在研究区内形成了高青—平南断裂构造带、平方王潜山披覆构造带、纯化草桥鼻状断裂构造带和金家鼻状构造带四个正向构造带,而正向构造带周围往往是水体消能、砂体堆积的有利场所,砂体轴向往往与正向构造带走向一致。同时,在东营凹陷南坡中部地区由于受到石村断层或纯化构造的影响,岸线明显向盆地中心突出,并形成了一个呈西南方向延伸的与鲁西隆起相连的纯化鼻状构造,其控制了滩坝砂体的形成和分布,砂体也呈西南方向延伸。而两侧的岸线形态相对简单,

呈内凹的弧形,特别在南坡西段的博兴洼陷南斜坡,发育了系列与平行或斜交岸线的滨浅湖滩坝沉积(图6)。因此,盆地内的古地貌特征以及岸线形态控制了波浪和沿岸流的能量变化,并且对古水流方向有显著的影响。

通过对位于湖盆西部的樊142井滩坝砂岩发育层段成像测井资料分析表明,存在北西向和北东向两个方向的古水流,前者与岸线垂直,为波浪冲刷回流的方向,后者与岸线走向存在一定夹角,但与滩坝砂体的走向一致,为沿岸流的方向<sup>②</sup>。

湖浪是在风力的直接作用下所形成的波浪,其规模、能量与湖泊的面积、水深以及风速等密切相关;沿岸流一般与河水入湖的惯性流、风生流等相关。对于滩坝砂体沉积区,一般河流作用相对较弱,三角洲沉积作用发育程度相对较低,而发育以波浪作用为主的滨浅湖滩坝沉积,这在钻井岩心上表现尤为明显。通过钻井岩心的观察和描述,研究区沙四段滩坝砂岩中沉积构造丰富多样,特别是反映浅水的波浪冲刷对沉积物的改造作用、生物扰动等沉积构造发育(图版I)。因此,东营凹陷西部沙四段滩坝砂体沉积时期波浪能量要强于沿岸流能量。根据上述的环境敏感粒度组分②和③的特征,结合古构造、古地貌和古水流方向研究认为,环境敏感粒度组分②所代表的水动力为沿岸流,而组分③所代表的水动力为波浪。多峰型粒级—标准偏差图的存在,可能是由于两个或多个能量不同的沿岸流交汇,携带的粒级有所不同的沉积物混杂堆积造成的。

总体而言,影响滩坝砂体发育的水动力类型主要有悬浮搬运、沿岸流、波浪和风暴浪。由图5中环境敏感粒度组分①在粒度概率图上的位置可以看出,其占整个粒度总体的百分含量一般小于15%,即悬浮搬运组分含量一般小于15%,对滩坝砂体的形成影响很小,这里不再对其讨论。而环境敏感粒度组分④所代表的风暴浪仅在局部地区发育,其含量一般为40%左右,对整个研究区而言,它对滩坝砂体的形成和发育影响小。因此,沿岸流和波浪是控制滩坝砂体形成和发育的主要水动力类型。

通过对研究区内沿岸流环境敏感粒度组分和波

① 操应长,弭连山,王健,等. 博兴洼陷周缘地区沙四上滩坝砂体成因机制研究. 中国石油大学(华东), 2007

② 胜利油田地质科学院, 断陷湖盆滩坝砂体分布规律与储层预测, 2006





因此,利用粒度—标准偏差方法对全样的粒度数据进行分析,计算出环境敏感粒度组分,进而进行水动力特征分析的研究方法可以较好的应用于陆相断陷湖盆砂质滩坝沉积中。利用这种方法不仅可以确定某一研究区内发育的水动力类型,而且还可以对各种水动力类型对沉积体形成和发育的控制程度进行定量计算,这对于研究沉积盆地中的水动力特征具有十分重要的意义。但是单纯的利用环境敏感粒度组分分析沉积砂体的水动力特征时往往会出现多解性,因此,要综合利用古构造、古地貌和古水流方向等资料,而不能单纯的依靠粒度资料进行分析。

### 参考文献 (References)

- Kohler J R. A wave tank analysis of the beach foreshore grain size distribution [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1973, 43(1): 200-204
- 狄明信,戴启德,白光勇. 济阳坳陷上第三系馆陶组河流相沉积的粒度特征 [J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 1996, 20(2): 1-5 [Di M ingxin Dai Qide Bai Guangyong Granularity of river sedimentary facies of the Neocene Guantao Formation in the Jiyang Depression [J]. *Journal of the University of Petroleum*, 1996 20(2): 1-5]
- Sine 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
- 曾兰华,李森,李保生,等. 海南岛西部八所组上部砂质沉积物的成因及其环境意义 [J]. *地质论评*, 2007, 53(6): 783-790 [Zeng Lanhua Li Sen, Li Baosheng *et al*. The genesis and environmental significance of the sandy sediments of the Upper Basuo Formation in Western Hainan Island [J]. *Geological Review*, 2007, 53(6): 783-790]
- 杨勇,李长安,胡思辉,等. 武汉青山“砂山”粒度特征及其成因指示 [J]. *沉积学报*, 2008, 26(3): 487-493 [Yang Yong Li Chang'an Hu Shui *et al*. Grain size features and genesis of the Qingshan Sand-dune in Wuhan [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(3): 487-493]
- 张平,宋春晖,杨用彪,等. 稳定湖相沉积物和风成黄土粒度判别函数的建立及其意义 [J]. *沉积学报*, 2008, 26(3): 501-507 [Zhang Ping Song Chunhui Yang Yongbiao *et al*. The significance and establishment of discriminant function with grain size of stable lacustrine sediment and eolian loess [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(3): 501-507]
- Syvitski J P M. Factor analysis of size frequency distributions: Significance of factor solutions based on simulation experiments [C] // Syvitski J P M, eds. *Principles, Methods, and Application of Particle Size Analysis*. Cambridge: Cambridge University Press, 1991: 249-263
- Prins M A, Postma G, Weltje G. Controls on the terrigenous sediment supply to the Arabian Sea during the late Quaternary: The Makran continental slope [J]. *Marine Geology*, 2000, 169: 351-371
- 孙东怀,安芷生,苏瑞侠,等. 古环境中沉积物粒度组分分离的数学方法及应用 [J]. *自然科学进展*, 2001, 11(3): 269-276 [Sun Donghuai An Zhisheng Su Ruixie *et al*. The mathematical method and its application of partitioning grain-size distribution from the sedimentary components in paleoenvironments [J]. *Progress of Natural Sciences*, 2001, 11(3): 269-276]
- Sun D H, Blomendal J, Rea D K, *et al*. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components [J]. *Sedimentary Geology*, 2002, 152: 163-277
- 孙有斌,高抒,李军. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析 [J]. *科学通报*, 2003, 48(1): 83-86 [Sun Youbin Gao Shu Li Jun. Preliminary analysis of grain-size populations with environmentally sensitive terrigenous components in marginal sea setting [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(1): 83-86]
- 肖尚斌,李安春. 东海内陆架泥区沉积物的环境敏感粒度组分 [J]. *沉积学报*, 2005, 23(1): 122-129 [Xiao Shangbin Li Anchun. A study on environmentally sensitive grain-size population in inner shelf of the East China Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(1): 123-129]
- 向荣,杨作升, Saito Y, 等. 济州岛西南泥质区近 2300a 来环境敏感粒度组分记录的东亚冬季风变化 [J]. *中国科学: D 辑*, 2006, 36(7): 654-662 [Xiang Rong Yang Zuosheng Saito Y, *et al*. In the past 2300 years paleoenvironmental implications of grain-size component variations in the mud area southwest of Jizhou Island, ECS [J]. *Science in China Series D*, 2006, 36(7): 654-662]
- 徐树建,潘保田,高红山,等. 末次间冰期—冰期旋回黄土环境敏感粒度组分的提取及意义 [J]. *土壤学报*, 2006, 43(2): 183-189 [Xu Shujian Pan Baotian Gao Hongshan *et al*. Analysis of grain-size populations with environmentally sensitive components of loess during the last interglacial-glacial cycle and their implications [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(2): 183-189]
- 姜在兴主编. *沉积学* [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 71 [Jiang Zaixing. *Sedimentology* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 71]
- 孙锡年,刘渝,满燕. 东营凹陷西部沙四段滩坝砂岩油气藏条件 [J]. *国外油气田工程*, 2003, 19(7): 24-25 [Sun Xnian, Liu Yu, Man Yan. Oil-gas reservoir forming conditions of beach-bar sandstones of the Member 4 of Shahejie Formation in western Dongying Depression [J]. *Foreign Oilfield Engineering*, 2003, 19(7): 24-25]
- 刘伟,吕优良,徐徽,等. 东营凹陷南斜坡东段沙四上亚段沉积相与砂体展布研究 [J]. *江汉石油学院学报*, 2004, 26(2): 23-25 [Liu Wei Lv Youliang Xu Hui *et al*. Sedimentary microfacies and sand-body distribution in the upper members of Es<sub>4</sub> in the south slope of Dongying Depression [J]. *Journal of Jianghan Petroleum Institute*, 2004, 26(2): 23-25]
- 常德双,卢刚臣,孔凡东,等. 大港油田湖泊浅水滩、坝油气藏勘探实践 [J]. *石油天然气学报*, 2005, 27(2): 292-293 [Chang Deshuang Lu Gangchen Kong Fandong *et al*. Exploration practice of shore-shallow lacustrine beach and bar in Dagang Oilfield [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2005, 27(2): 292-293]

# Preliminary Study on the Hydrodynamic Mechanism of Beach-Bar Sandbodies with Environmentally Sensitive Grain Size Components

A case study from beach-bar sandbody sediments of the upper part of the fourth Member of the Shahejie Formation in the Western Dongying Depression

CAO Ying-chang<sup>1</sup> WANG Jian<sup>1</sup> LIU Huimin<sup>2</sup>

(1. Faculty of Geo-resource and Information of China University of Petroleum, Dongying Shandong 257061;

2. Institute of Geology SINOPEC Shengli Oil Field Company Dongying Shandong 257000)

**Abstract** Shore-shallow lacustrine beach-bar sandbodies widely developed during the period of the upper submember of the fourth Member of the Shahejie Formation of Paleogene in the Western Dongying Depression. The environmentally sensitive grain size components of beach-bar sandbodies have been studied using the method of grain size-standard deviation according to the description of cores and other correlated analyses and tests. Combined with the analysis of grain size probability curves and the research of palaeotopography and palaeocurrent, there four kinds of environmentally sensitive grain size components were determined in the study area, which respectively represents suspension transportation, coastal current, wave and storm wave or gravity flow. Wave and coastal current are the main hydrodynamics of the four kinds of hydrodynamics which control the formation and development of beach-bar sandbodies. Wave is the most important hydrodynamics that control the formation and development of beach-bar sandbodies according to the calculation of the percentage of environmentally sensitive grain size components of wave and coastal current in the grain population. The energy of wave and its control degree to the formation and development of beach-bar sandbodies decreases from the outer to the inner part of shore-shallow lacustrine. The effects of coastal current mainly exist in the inner part of shore-shallow lacustrine.

**Key words** beach-bar; grain size-standard deviation; environmentally sensitive grain size component; hydrodynamic; Dongying Depression



图版I 说明: A 交错层理,高 890井, 2 597. 7 m; B 浪成交错层理,纯 107井, 2 886. 75 m; C 平行、楔状交错层理,高 890井, 2 873. 1 m; D 砂泥突变面、砂纹交错层理,樊 137井, 3 174. 4 m; E 浪成波痕,樊 119井, 3 296. 6 m; F 生物钻孔、反序,樊 143井, 3 111. 7 m.