

文章编号: 1000-0550(2004)03-0443-06

扇三角洲亚相定量划分的思考

鄢继华 陈世悦 程立华

(石油大学地球资源与信息学院 山东东营 257061)

摘要 沉积相的定量划分一直是沉积学中一个难以解决的问题。通过水槽实验发现扇三角洲的形成是一个不断向前缘和侧缘前积、向上加积的过程,加积层和前积层分别代表了扇三角洲的平原部分和前缘部分。从剖面上来看,自扇三角洲根部至前端,平原部分的厚度逐渐减薄,而前缘部分的厚度则逐渐增厚。提出以剖面上前积层和加积层厚度相等的点作为扇三角洲平原与前缘亚相的厘定界限,由此可以解决扇三角洲平原与前缘亚相在平面上的定量划分问题。根据陡坡带扇三角洲模拟实验发现,剖面上前积层厚度与加积层厚度相等的点随着扇体的生长而不断变化,但平原部分与扇体延伸长度的比值 λ 保持不变,只受原始地形坡度 α 和扇面坡角 β 的影响。扇面坡角 β 是一个经验值常数,因此,在勘探过程中,只要通过地层倾角测井求出原始地形坡度 α ,再根据地震剖面或单井资料统计确定扇体的延伸长度,就可以计算出前缘亚相的分布范围,从而为预测油气勘探的有利相带提供依据。

关键词 扇三角洲 沉积亚相 定量划分 水槽实验

第一作者简介 鄢继华 男 1977年出生 在读博士 沉积学

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

1 前言

扇三角洲的概念最初由 Holmes A 和 McGowen J H 提出来,经过不断的修订和补充,现在人们已经普遍认为扇三角洲是冲积扇或辫状河直接入湖(海)形成的中-粗碎屑岩沉积体系。在扇三角洲相中以沉积环境和沉积特征为依据又可以进一步划分为扇三角洲平原、扇三角洲前缘和前扇三角洲三个亚相^[1~6],也有国外学者将其划分为水上冲积扇(alluvial fan)、前缘斜坡(delta slope)和前扇三角洲(prodelta)^[7],或者分为水上冲积扇和下水扇三角洲(可进一步分为三角洲前缘、三角洲斜坡和前三三角洲)^[8]。扇三角洲平原为扇三角洲的水上部分,以牵引流和沉积物重力流的粗粒沉积物为特征,其结构特征和沉积构造表现为冲积扇环境。扇三角洲前缘大部分处于水下,是扇三角洲的水下部分,常见大、中型交错层理。前扇三角洲则是悬移质在较深水中的静水沉积物,岩性以泥质和粉砂为主。由于扇三角洲多与生油凹陷相邻,油源充足,而且扇三角洲前缘砂质粒度适中,物性较好,是良好的油气储集体,现在已经成为寻找隐蔽油气藏的有利勘探目标之一。

2 问题的提出

既然扇三角洲前缘亚相是有利的油气储集体,那

么在编制盆地沉积体系平面图时,如果能够准确的厘定扇三角洲的各个亚相,对于指导油气田勘探将会有重要的意义。在编制岩相古地理图过程中可以反映沉积相带的基础图件有砂岩等厚图、砂岩百分含量等值线图、泥岩颜色图、重矿物图、岩石类型图以及化石分布图等^[9]。对于沉积相的进一步细分,可以通过测井曲线要素分析、骨架砂体密度、电相以及模糊聚类分析等数量化理论的应用^[1]。冯增昭提出单因素分析综合作图法^[10]进行量化的编制岩相古地理图,姜在兴、陈世悦等主要以砂岩百分含量和砂砾岩百分含量为依据,在层序划分的基础上,针对车镇凹陷提出定量的沉积体系平面编图原则^[11]。但是,尽管沉积相图的定量编制越来越具有可操作性,这些方法在平面沉积亚相的定量划分中仍存在一定的困难。

困难之一是亚相的划分原则没有量化。对于扇三角洲相,大部分学者都是以水平面为界,依据陆上、浅水和深水分别对应的沉积特征来划分平原、前缘和前扇三角洲。也有部分学者将明显的陆上、过渡区和水下沉积部分分别等同于扇三角洲的三个亚相。但是由于扇体形成过程中水平面的不断变化,就使得各亚相之间很难找到准确的界限。

困难之二是研究手段有限,研究方法不成熟。对

于埋藏在地下的扇三角洲砂体,我们通常的研究手段包括地震资料解释、测井曲线分析和岩芯观察描述。地震资料解释的精确度有限,而测井和取芯资料不论是在层位上还是在平面分布上也都无法满足扇三角洲亚相平面定量划分的要求。

因此,要想定量的划分扇三角洲的各个亚相,就必须清楚的了解扇三角洲的形成过程和发育特征。为此,我们进行了水槽实验模拟。

3 水槽模拟实验

模拟实验在石油大学(华东)海洋馆内的大型水池内进行。水池长 25 m,宽 12.5 m,高 1.4 m,设有 1 个固定出水口,1 个潜水泵活动出水口,参考东营凹陷北部陡坡带古断剥面坡度^[12],在水池一侧为固定斜面,坡度为 15°,含砂水流从斜面上沿注砂槽向下流入池内(图 1)。每个实验的水流速度、加砂速度均为恒量,参考张春生等模拟扇三角洲的实验方

案^[13,14],同时考虑到湖平面变化对扇体的影响,结合陡坡带扇三角洲的形成特点进行了一定调整,设计了水进、水平面基本保持不变和水退三种情况,选择实验参数见表 1。

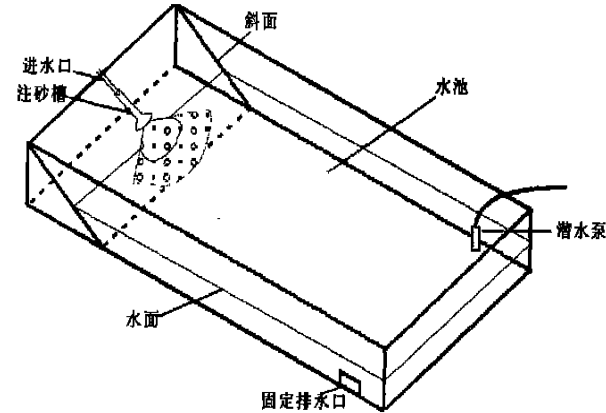


图 1 水槽实验装置示意图

Fig. 1 Sketch map of flume experiment equipment

表 1 水槽模拟实验设计方案

Table 1 Design plan of flume simulating experiment

方 案	开始水深	结束水深	实验时间	流速	加砂速度	总加砂量	加砂组成/ %			
	/ cm	/ cm	/ 分	/ (L/ s)	/ (kg/ s)	/ kg	砾石	粗砂	中砂	细砂
一号扇	76.0	83.5	140	2.5	0.185	1551	26.6	34.5	36.9	2.0
二号扇	85.0	82.7	220	1.8	0.100	1320	26.6	34.5	36.9	2.0
三号扇	23.5	13.0	290	1.8	0.100	1738	26.6	34.5	36.9	2.0

针对水平面的不同变化情况,模拟实验共分 3 轮进行。一号扇为水进情况下形成的扇三角洲,扇体在形成过程中水平面稳定上升,沉积物连续供应。扇面以片流沉积为主,主水道不明显,扇体垂向上的加积速度相对较快,进积速度相对较慢。扇体前缘形态比较规则,垂向厚度大,横向延伸距离短。

二号扇在形成过程中水平面基本保持不变,扇面沟道改道频繁,以侧向侵蚀为主。与一号扇形成过程相比加积能力减弱,进积能力增强,扇体前缘为不对称的弧形。

三号扇是在水平面不断下降的情况下形成的,扇面主沟道相对稳定,特征明显,下切能力强。扇体以向前缘和侧缘的进积为主,垂向加积速度很慢。前缘有多个朵叶体与主沟道末梢相对应。扇体横向分布范围较大,垂向厚度薄。

实际上,扇三角洲的形成是一个砂砾岩体不断充填地形坡度与水平面之间所产生的可容空间的过程。

在这个过程中,只要物源充足,砂砾岩体就会不断的向上加积、向前进积,迫使岸线向盆地方向推进。水平面的改变影响加积和进积的程度,即扇体向前生长和向上生长的速度,但是对于扇体的形成不会产生本质的影响^[15]。

4 实验结果分析

实验后的扇体在扇面上分为明显的三个部分,即平原、前缘斜坡和前扇三角洲(图 2)。其中平原所占比例最大,又可以分为水上平原和水上平原。前缘斜坡坡度大,一般在 35°左右。前扇三角洲为悬移细粒质沉积,与前缘斜坡为岩性突变接触。

从垂直于岸线的剖面图上可以看出(图 3),扇三角洲砂体由上部的加积层和下部的前积层组成,加积层相当于扇体形成过程中的平原亚相,前积层相当于前缘亚相。从扇面观察扇体以平原亚相为主,但是在扇体内部则是由平原与前缘共同组成,只是在靠近扇

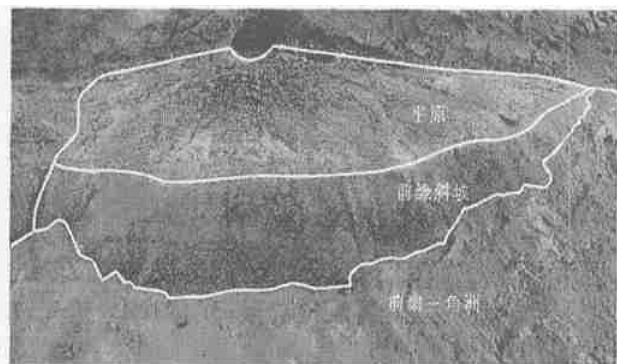


图2 一号扇砂体形态图

Fig. 2 Image of the first simulated fan delta

根的部位以平原加积层为主,向着扇体的延伸方向加积层厚度逐渐减薄,到前缘斜坡处消失,而前缘前积层则逐渐占据主导地位。平原与前缘在扇体表面和

剖面上的差异为平面上准确划分扇三角洲亚相造成了很大的困难。

实验还发现扇体的水上平原和水上平原的界限在扇体的形成过程中是不断变化的。在所做的三个扇体模拟实验中,对于水平面上升、水平面基本保持不变和水平面下降三种情况,水上平原占整个扇体延伸长度(不包括前扇三角洲)的比例分别为 0.493、0.54 和 0.625。也就是说,随着沉积物的不断供应,水上平原部分不断的向前推移,但是推移的程度取决于水平面的变化情况,在水平面下降时推移速度最快。因此,如果以陆上、水下为划分原则的话,根本找不到一条明确的界限,而是一个变化幅度较大的区带,区带的范围大小取决于沉积物的供应能力、湖平面的变化以及气候、构造活动等多种因素。

作者认为,扇三角洲平原亚相与前缘亚相在剖面

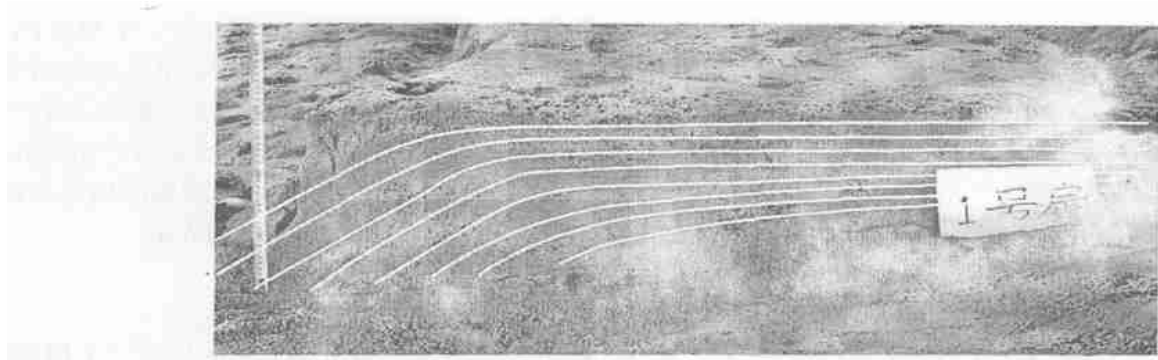


图3 扇三角洲加积、前积剖面结构图

Fig. 3 Section image showing accretion and progradation

上是共生的,要想把平面上某一位置是属于平原亚相还是属于前缘亚相确定下来,其实就是看平原加积厚度和前缘前积厚度在剖面中所占的比例,前者为主(>50%)就定为平原亚相,后者为主(>50%)就定为前缘亚相。因此,这条平原与前缘各占50%的界限就可以作为在平面上厘定扇三角洲平原亚相与前缘亚相的界限。

5 平原亚相与前缘亚相宽度比例计算

根据模拟扇体的基本形态,我们以扇根底部为坐标原点、扇体的延伸方向为 x 轴、垂向深度为 y 轴建立直角坐标系(图4),则 ODBF 为扇三角洲砂砾岩体。以 x 轴为界,上部 OBF 为平原的加积层,下部 OBD 为前缘的前积层。那么我们所要找的平原与前

缘的界限,其实就是 x 轴上上下厚度相等的点。

实际上,在扇体的不同部位扇面坡度也有所差别,一般来说从扇根到扇缘扇面坡度逐渐减小,递减趋势也是逐渐减弱的。但是由于实际扇体延伸距离很长,扇面坡度变化范围小,因此可以将扇体表面近似为一条直线。

假设:1. 原始地形坡度为 α ;

2. 扇面坡度为 β ;

3. 扇体延伸长度为 L (不包括前扇三角洲部分);

4. 扇体前缘斜坡倾角为 38° (实验数据)。

那么求平原与前缘厚度相等的点就是求 OC 上的某一点 A,使得 $AG = AE$ 。

已知: $OC = L$, $\angle COD = \alpha$, $\angle OBF = \beta$, $\angle BDH =$

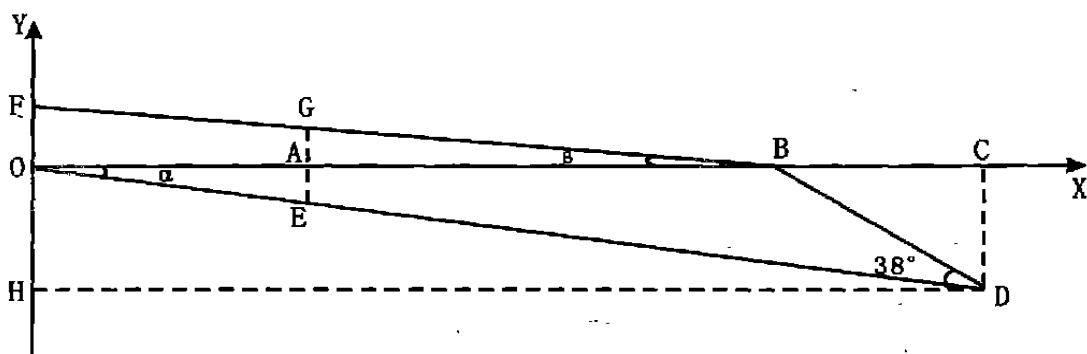


图4 扇三角洲剖面坐标示意图

Fig. 4 Sketch map of section coordinates of fan delta

38° , $AE = AG$,

则 $AE = OA \cdot \operatorname{tg} \alpha$,

$AB = AG / \operatorname{tg} \beta = AE / \operatorname{tg} \beta = OA \cdot \operatorname{tg} \alpha / \operatorname{tg} \beta$,

$CD = OC \cdot \operatorname{tg} \alpha$, $BC = CD / (\operatorname{tg} \angle CBD) = OC \cdot \operatorname{tg} \alpha / \operatorname{tg} 38^\circ$,

由 $OA + AB + BC = OC$ 得:

$OA + OA \cdot \operatorname{tg} \alpha / \operatorname{tg} \beta + OC \cdot \operatorname{tg} \alpha / \operatorname{tg} 38^\circ = OC$

$OA = OC \frac{\operatorname{tg} \beta (\operatorname{tg} 38^\circ - \operatorname{tg} \alpha)}{\operatorname{tg} 38^\circ (\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \alpha)}$

那么, 平原部分所占扇体的比例

$$\lambda = \frac{OA}{OC} = \frac{\operatorname{tg} \beta (\operatorname{tg} 38^\circ - \operatorname{tg} \alpha)}{\operatorname{tg} 38^\circ (\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \alpha)} \quad (1)$$

(α - 原始地形坡度, β - 扇面坡度)。

扇面坡度 β 是由扇体的延伸长度 L 、扇体根部的厚度 h 和原始地形坡度 α 共同决定的。

又已知 $OF = h$, 则: $\operatorname{tg} \beta = OF / OB = OF / (OC -$

$$BC) = \frac{h}{L - L \cdot \operatorname{tg} \alpha / \operatorname{tg} 38^\circ} = \frac{h}{L (\operatorname{tg} 38^\circ - \operatorname{tg} \alpha)}$$

将上式代入(1)式可得:

$$\lambda = \frac{h \cdot (1 - \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} 38^\circ})}{L \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot (1 - \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} 38^\circ}) + h} \quad (2)$$

其中: α - 原始地形坡度; h - 扇体根部厚度; L - 扇体长度

也就是说, 扇三角洲平原在整个扇体中所占的比例是一个由原始地形坡度、扇体延伸长度和扇根厚度决定的函数关系式。在实际勘探过程中, 通过地层倾角测井, 可以求取原始地形坡度 α ; 通过地震资料可以确定扇体的延伸长度 L 和根部厚度 h 。利用(2)式, 就可以计算平原亚相和前缘亚相的范围, 从而为预测有利相带提供依据。

其实, 这个使平原亚相与前缘亚相厚度相等的点

是随扇体生长而不断向前推移的, 但平原与扇体延伸长度的比值 λ 基本保持不变, 只受原始地形坡度 α 和扇面坡角 β 的影响。实验还发现, 扇体前缘扇面倾角一般在 $2^\circ \sim 3^\circ$ 范围内变化, 那么在一个扇体内平原与前缘的比例关系就完全取决于原始地形坡度。在编制沉积体系平面图时, 根据岩芯、地震以及砂砾岩资料的单井统计, 我们已经可以确定扇三角洲的分布范围, 再通过地层倾角测井得出原始的地形坡度, 就可以确定平原亚相与前缘亚相的界限。

6 应用

以东营凹陷胜坨油田坨 121 区块沙三下段砂层组为例。该区块在沙三下段分为 5 个砂层组, 每个砂层组可视为一期扇三角洲沉积。其中 I 砂层组位于沙三下段的底部, 地层厚度在 30~50 m 之间, 包括 1~2 个单砂层, 砂体厚度最大可达 20 m, 自北东向南西砂体厚度减薄, 砂岩百分含量降低(图 5-a)。通过研究区砂砾岩统计及沉积相分析, 该扇体南北长 1 100 m, 东西宽 1 220 m, 面积约 1 km², 扇体根部为坨 121-6 井北侧的胜坨断层下降盘。通过坨 121 井的地层倾角测井得出该处地层倾角约为 8° 。取扇面坡度为 2.5° , 根据公式(1), 扇三角洲平原所占的比值 λ 为 20%。取扇根到扇端各延伸方向长度的 20%, 可将该扇三角洲砂砾岩体的平原与前缘亚相区分开(图 5-b)。

坨 121 井位于扇三角洲前缘的主沟道上, 该井处的沙三下段也是该区块主要的产油层位, 因此我们可以推测前缘的各水下分支河道均有油气勘探潜力, 而平原范围内储集性能相对较差, 可排除在勘探目标之外。

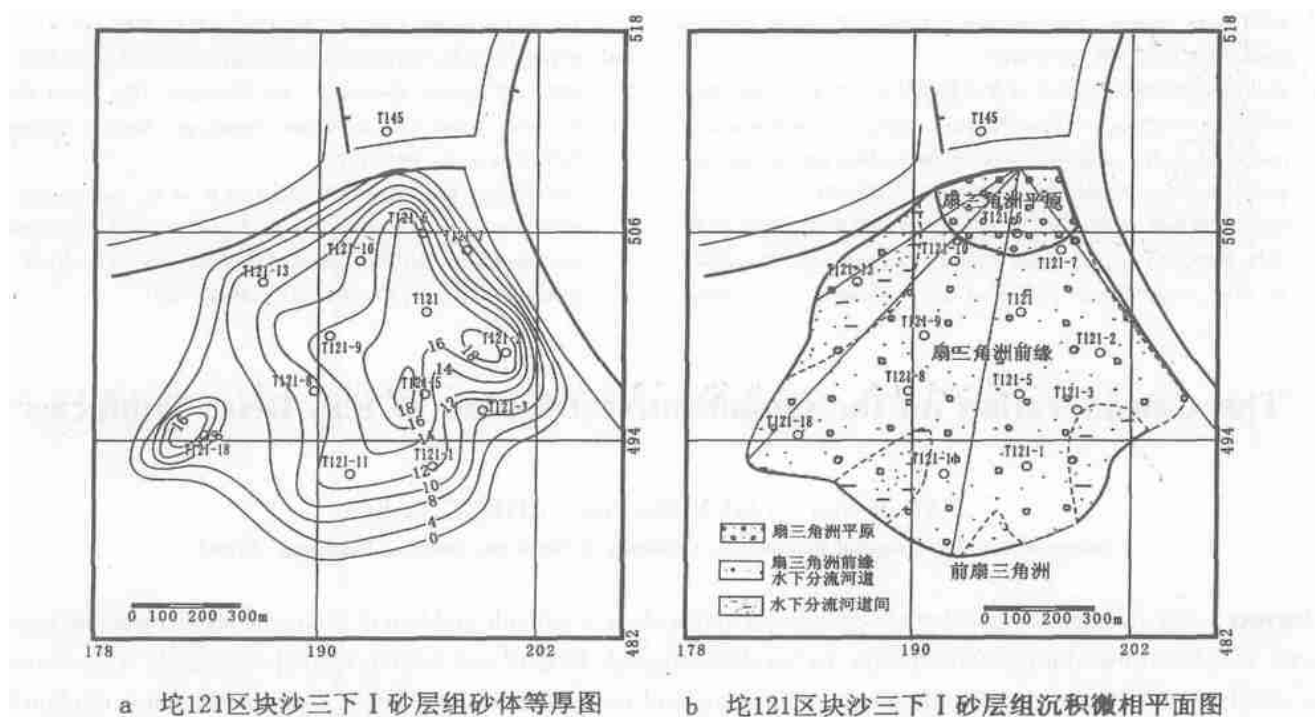


图5 胜坨油田坨121区块砂岩厚度及沉积微相图

Fig. 5 Contour map of sandstone and sedimentary microfacies map of No. 121 zone of Shengtuo oil field

7 结束语

以扇体剖面上前积和加积厚度相等的点作为扇三角洲平原亚相与前缘亚相的厘定界限,可以有效地解决平面上扇三角洲亚相定量划分的问题,并且经过实际的应用和验证,具有一定的可操作性。但是由于该方法是初次提出,在扇三角洲形成的控制因素以及后期扇体的改造等方面考虑的还不够全面,再加上水槽实验模拟条件的限制,使得该方法在理论上还不够完善,应用过程中难免会产生一定偏差,恳请读者批评和指正!

致谢 本文在研究过程中得到了石油大学(华东)海洋馆工作人员的支持和姜在兴教授的指导和帮助,在此表示衷心感谢!

参考文献(References)

- 1 王寿庆. 扇三角洲模式. 北京:石油工业出版社,1993. 87~96 [Wang Shouqing. Fan-delta Model. Beijing: Petroleum Industry Press,1993. 87~96]
- 2 周书欣,赖特 V P,普拉特 N H,等. 湖泊沉积体系与油气. 北京:科学出版社,1991. 137 [Zhou Shuxin, Wright V P, Platt N H, et al. Lacustrine depositional system and oil-gas accumulation. Beijing: Science Press,1991. 137]
- 3 王良忱,张金亮. 沉积环境和沉积相. 北京:石油工业出版社,1996. 179 [Wang Liangchen, Zhang Jinliang. Sedimentary environments and Facies. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996. 179]
- 4 赵澄林. 沉积学原理. 北京:石油工业出版社,2001. 91 [Zhao Chenglin. Principles of sedimentology. Beijing: Petroleum Industry Press,2001. 91]
- 5 陆克政,朱筱敏,漆家福. 含油气盆地分析. 山东东营:石油大学出版社,2001. 225 [Lu Kezheng, Zhu Xiaomin, Qi Jiafu. Analysis of petroliferous basin. Dongying Shandong: Petroleum University Press, 2001. 225]
- 6 赵澄林. 油区岩相古地理. 山东东营:石油大学出版社,2001. 4 [Zhao Chenglin. Lithofacies Paleogeography in Oil Field. Dongying Shandong: Petroleum University Press,2001. 4]
- 7 Jun Tanaka, Wataru Maejima. Fan-delta sedimentation on the basin margin slope of the Cretaceous, strike-slip Izumi Basin, southwestern Japan. Sedimentary Geology,1995,98:205~213
- 8 Wonn Soh, Takeo Tanaka, Asahiko Taira. Geomorphology and sedimentary processes of a modern slope-type fan delta (Fujikawa fan delta), Suruga Trough, Japan. Sedimentary Geology,1995,98:79~95
- 9 赵澄林,吴崇筠. 油区岩相古地理. 北京:石油工业出版社,1987. 238 [Zhao Chenglin. Wu Chongjun. Lithofacies paleogeography in oil field. Beijing: Petroleum Industry Press,1987. 238]
- 10 冯增昭. 单因素分析综合作图法. 沉积学报,1992,10(3):70~77 [Feng Zengzhao. Single factor analysis mapping. Acta Sedimentologica Sinica,1992,10(3):70~77]

- 11 姜在兴. 沉积学. 北京:石油工业出版社,2003. 393~398,491~498 [Jiang Zaixing. Sedimentology. Beijing: Petroleum Industry Press,2003. 393~398,491~498]
- 12 孔凡仙. 东营凹陷北带砂砾岩扇体勘探技术与实践. 石油学报, 2000,21(5):27~31 [Kong Fanxian. Exploration technique and practice of sandy - conglomeratic fan in the northern part of Dongying depression. Acta Petrolei Sinica,2000,21(5):27~31]
- 13 张春生,刘忠保,施冬,等. 扇三角洲形成过程及演变规律. 沉积学报,2000,18(4):521~526 [Zhang Chunsheng, Liu Zhongbao, Shi Dong, et al. Formed proceeding and evolution las of fan delta. Acta Sedimentologica Sinica,2000,18(4):521~526]
- 14 张春生,刘忠保. 现代河湖沉积与模拟实验. 北京:地质出版社, 1997.172 [Zhang Chunsheng, Liu Zhongbao. The recent fluviolacustrine deposit and simulation experiment. Beijing: Geological Publishing House,1997.172]
- 15 L ́pez-Blanco M, Marzo M, Burbank D W,et al. Tectonic and climatic controls on the development of foreland fan deltas: Montserrat and Sant Llorenç del Munt systems (Middle Eocene, Ebro Basin, NE Spain). Sedimentary Geology,2000,138:17~39

The Consideration on the Quantitative Division of Fan Delta Subfacies

YAN Ji-hua CHEN Shi-yue CHENG Li-hua

(College of Geo-Resources and Information, University of Petroleum,Dongying Shandong 257061)

Abstract The quantitative division of sedimentary subfacies is a difficult problem of sedimentology. By flume experiment, it is found that during the formation the fan delta prograde forward and accrete upward constantly. The accretion set and foreset represent respectively the fan delta plain and front subfacies. In the section, the thickness of plain becomes thinner from root to former, and the thickness of front becomes thicker. This paper puts forward that the point where the thicknesses of accretion set and foreset are equal can be regarded as the borderline of fan delta plain and front, which resolves the problem of the quantitative division of fan delta subfacies on the plane. Based on simulation experiment of fan delta in steep slope, the points where the thicknesses of accretion set and foreset are equal change with the development of fan delta, but the ratio of the plain length to the whole fan length is unchangeable, which is affected only by the gradient of original forms and fan surface. The gradient of fan surface is an experiential constant. So, in the exploration, after we get the gradients of original forms by dipmeter and the length of fan delta by seismic profile or the statistics of single-well data, we can calculate the distribution of the front, which provide foundations for the prediction of favorable facies in petroleum exploration.

Key words fan delta, sedimentary subfacies, quantitative division, flume experiment