

储层数据谱分析在段六拨油田的应用

张 兴

(北京石油勘探开发科学研究院, 100083)

本文提出并利用储层数据谱分析新技术, 定量表征储集层微观孔隙结构特征, 建立精确的储集层静、动态模型及微相判断标准图版, 分割不同相带储层代表性格架图, 对各流动单元的非均质性特征、视孔隙结构动态特征进行定量描述, 从而使储层特征描述、微相模式的研究实现了定量化表征。

关键词 储集层 数据谱 视孔隙结构 非均质性 侵蚀-放大

作者简介 张兴 男 36岁 博士生 石油地质

储集层研究技术正在经历着日新月异的变化。早期孔隙度、渗透率、饱和度参数的研究为储集层宏观描述奠定了基础, 七十年代微观孔隙结构参数研究方法的发展, 使储层研究进入新阶段。近年来国外发展的侵蚀-放大新技术^[1]、地质统计技术^[2]等又为储层表征提供了新的手段。国内储层研究也向提高驱油效率、加强油层改造和储量挖潜方向深入发展。笔者在总结已有成果的同时, 提出并应用储层数据谱分析新技术建立段六拨油田储集层静、动态模型, 建立该油田储层数据谱微相判断标准图版, 以不同相带储层代表性格架图、三类直方图等对各流动单元的非均质性特征、视孔隙结构动态特征进行精细描述, 并进行不同相带、不同类型储层含油气特征的定量评价。

1 油田基本地质特征

段六拨油田位于河北省沧州地区南皮县段六拨乡, 处于黄骅坳陷南区孔店构造带与乌马营构造带之间, 东北邻王官屯油田, 东接小集油田, 南、西、西北、紧接南皮凹陷(图1)。该区钻探井揭示自下而上发育有前第三系基底; 下第三系孔店组、沙河街组、东营组; 上第三系馆陶组、明化镇组; 第四系平原组。目的层埋藏深度 2884~3565 m, 含油井段 600 m, 枣Ⅰ油组为泥岩段, 将油层在纵向上分为上部枣零油组; 下部枣Ⅱ、Ⅲ油组。前者属网状河及曲流河沉积, 砂体多且叠加连片; 后者为冲积扇沉积, 相带变化大, 成岩后生作用强烈, 原生孔隙丧失殆尽。

虽然此区已做了大量工作, 探明可观的地质储量; 但由于原油属高凝、高含蜡, 特别是储层属低渗透性、非均质性极强的油藏。因此, 开发工作难度大, 为解决上述问题, 利用储层数据谱分析新技术对该区储层特征进行精细描述。

2 油田储集层评价新方法

2.1 储层数据谱概念

储层数据谱指用视频技术与计算机数字化处理技术相结合,以侵蚀-放大^[3]方法定量计算储层微观孔隙结构参数,该方法将孔隙单元划分为不同大小级别的光滑孔域和喉道域两个系列,并将喉道域与孔隙单元的比值定义为连通系数(图2)。

2.2 储层数据谱参数意义

储层数据谱包括以下基本内容:(1)数据谱长,(2)光滑孔域数据谱,(3)喉道域数据谱,(4)总孔隙数据谱,(5)储层指数,(6)储层孔宽。

数据谱长为处理最大数量级孔隙所需要的

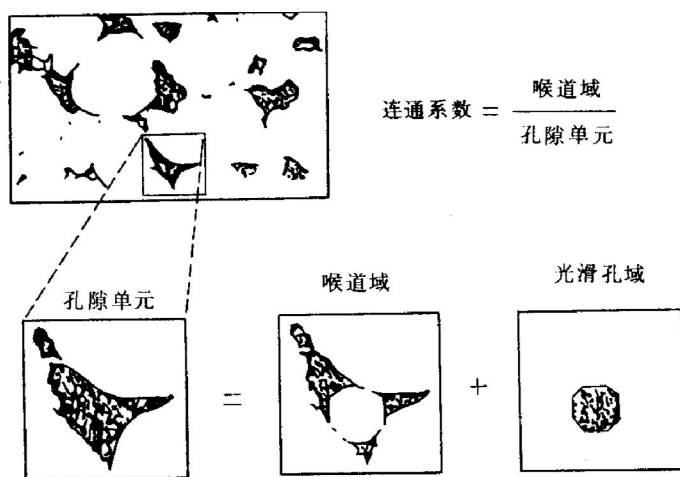


图2 连通系数计算示意图(据[1]修改)

蕴含了较全的环境信息。储层常规参数主要描述储层宏观总体特征,忽略了分级差特征,在进行复杂油藏储集层特征描述中代表性不够。

储层数据谱分析新技术,是建立在储层铸体薄片孔、喉域分级系统参数定量计算的基础上,输出参数既有宏观总体特征,也有分级细分段描述。

2.3.1 数据谱长

由沉积环境的能量决定,能量越强侵蚀-放大次数越多,沉积物颗粒越粗,数据谱长也越大。

2.3.2 光滑孔域数据谱

按孔隙内切圆半径由小到大的增长,描述储层环境特征,数据谱前段为细粒级储集层,展

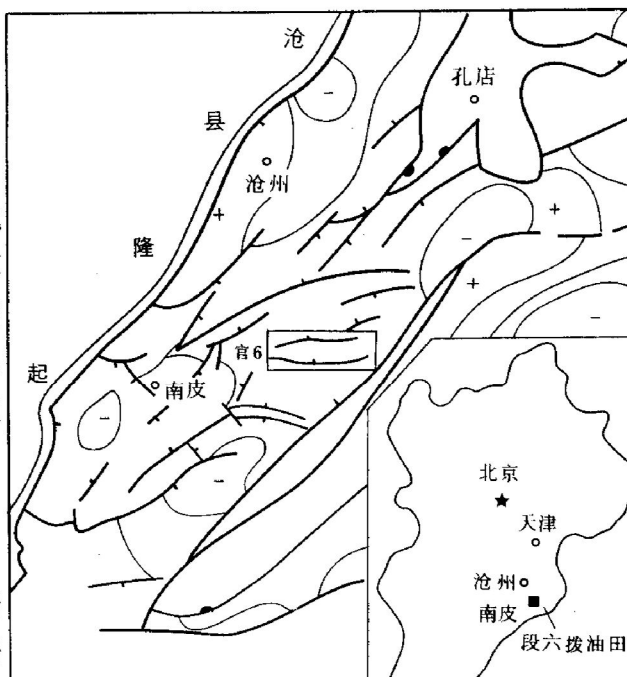


图1 段六拔油田区域构造位置图

侵蚀-放大次数,也即谱中各系列数据的个数;光滑孔域数据系列为样品中按内切圆半径增长,逐级分类计算各级别孔隙面积的数据;喉道域数据系列为分析样品中对应于内切圆半径增长,孔隙中除光滑孔域外所有连通区域(包括喉道)部分;储层指数指单位面积内孔喉连通比与孔宽的乘积^[4];孔宽为孔隙直径的加权平均值^[4](表1)。

2.3 储层数据谱的地质意义

实践表明,储层砂岩的粒度大小、颗粒的磨圆度、分选性、层理、成熟度,都

示低能环境, 后段为粗粒级储层, 展示高能环境。数据集中程度越高, 说明分选性愈好。

2.3.3 喉道域数据谱

随着孔隙内切圆半径由小到大增长, 各级喉道域数量分布描述储层连通性(渗透性)特征。喉道域数据值前段代表低渗透型储层, 后段代表高渗透型储层。若数据段集中程度高, 特别是越集中于后段, 说明沉积物分选性好, 结构成熟度、矿物成熟度高, 储层连通性也越好。

2.3.4 储集层总孔隙面积数据

为测试样品整个孔隙域各级别孔隙大小值。

2.4 储层格架图、直方图的地质应用

在孔隙结构分析中由计算机自动辨认并勾绘每个孔隙单元的格架线, 直观定量反映储集层的连通状况及配位数的大小。与此同时, 以光滑孔域、喉道域或总孔喉数据系列的数据谱长为横坐标, 各级孔、喉域频率大小为纵坐标绘制直方图, 以资定量表征样品中各数据段的变化特征。

2.5 储层数据谱参数定量评价的界线

应用储层数据谱分析新技术, 分析段六拨油田4口井(D35-53, D37-51, D40-40, G2215)48块铸体薄片(表2), 作储层指数与渗透率参数的回归分析, 得相关关系式为:

$$K = 8.072 \times RES - 77.07$$

表1 “储层数据谱”分析表 单位: μm

谱长	光滑孔域	喉道域	总孔隙域	孔宽	储层指数
3	948.2	2225.6	3173.8	78.9	47.38
6	1917.7	4370.2	6288.0		
9	1729.6	5690.0	7418.6		
12	3781.7	8060.1	11842.2		
16	2625.6	4935.4	7561.0		
19	2841.6	7046.4	9888.0		
22	1469.8	3534.4	5004.2		
25	2302.4	4227.2	6530.0		
28	1866.6	1657.6	3524.2		
32	1756.2	2256.4	4010.6		
35	1152.0	1586.2	2738.2		
38	2234.2	1203.2	3437.4		
41	707.2	367.0	1076.8		
44	1284.8	439.4	1724.2		
48	234.24	76.8	311.0		
51	0.0	40.3	40.3		
54	0.0	129.0	129.0		
57	0.0	285.8	285.8		
60	739.2	5.4	744.6		
64	0.0	25.6	25.6		
67	0.0	17.6	17.6		
70	925.8	0.0	925.8		

* 以 D35-536 号样为例

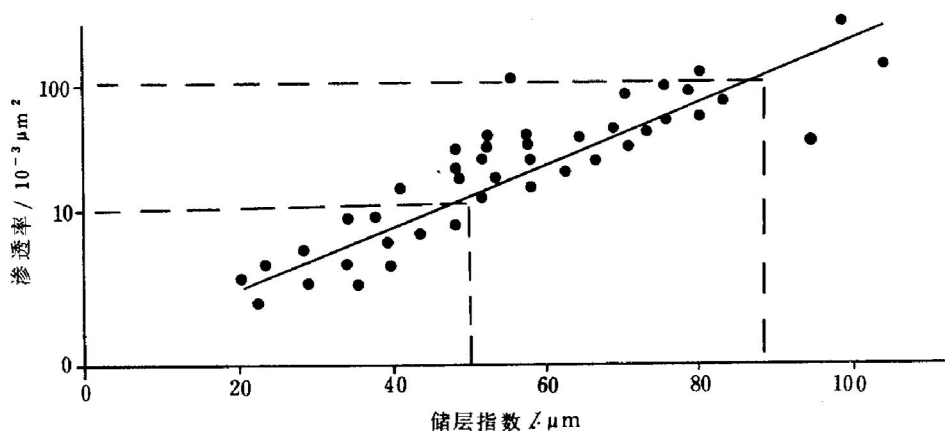


图3 段六拨储层指数与渗透率参数关系图

式中 K —渗透率, RES —储层指数, 相关系数 $R=0.808$ 。

由分析结果看出两者有一定的相关性(图3, 表2), 并由此确定储层数据谱分析参数定量评价界限(表3)。

表2 段六拔油田储层数据谱分析部分参数数据表

样品号	加权孔宽/ μm	谱长/ μm	储层指数/ μm
d351	80.864	57	39.7
d3553	85.944	70	48.2
d3576	81.026	57	49.6
d35113	51.512	38	20.4
d35114	61.477	48	24.2
d35123	63.739	54	24.5
d4087	89.174	83	51.7
d406	73.937	64	45.8
d4040	86.780	83	47.3
d4041	125.566	115	83.3
d40118	78.554	60	48.5
d40117	105.053	28	75.3
d40126	99.590	89	59.2
d40124	106.906	73	66.5
d4090	146.524	115	103.8
d3731	94.176	67	58.1
d3798	74.634	73	34.2
d3740	75.543	70	35.2
d3736	75.746	60	34.4
g221586	123.055	89	70.2
g221585	90.030	99	47.0
g221584	96.381	76	57.4
g221583	90.300	67	48.9
g221581	119.086	99	71.4
g221579	95.180	76	55.2
g221578	84.798	70	47.8
g221577	101.407	80	55.7
g221576	84.365	83	41.2
g221574	92.977	64	52.4
g221572	89.128	70	47.7
g221571	100.285	102	57.6
g221570	94.264	73	53.5
g221569	127.484	102	75.7
g221568	119.208	92	80.1
g221567	150.102	112	98.8
g221566	125.420	86	75.5
g221565	98.196	76	51.6
g221564	88.830	92	48.4
g221563	129.685	92	76.6
g221562	116.566	124	69.2
g221554	85.414	83	44.6
g221553	102.700	83	58.1
g221548	99.847	76	52.5
g221542	89.440	70	48.5
g221541	89.798	70	48.0
g221538	125.145	102	72.9
g221510	100.417	96	55.2
d404	41.492	83	43.9

表3 段六拔油田储层数据谱参数评价界限

储层类型	数据谱参数范围		渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}$
	储层指数/ μm	孔宽/ μm	
低孔、渗型	0~50	<85	<10
中孔、渗型	50~85	85~125	10~100
高孔、渗型	>85	>125	>100

3 段六拔油田储集层特征的描述

3.1 储集层参数研究的静态特征

3.1.1 枣零油组

储层加权平均孔宽 $80\sim 150\mu\text{m}$, 面孔率 $7\%\sim 30\%$, 平均 14% ; 分选系数 $1.0\sim 1.2$, 变异系数 $0.292\sim 0.394$, 峰态 $3.5\sim 4.0$; 储层指数 $41\sim 104\mu\text{m}$, 平均值 $60.23\mu\text{m}$ 。格架图显示配位数为3, 最大4。

3.1.2 枣Ⅱ、Ⅲ油组

加权孔宽 $51\sim 94\mu\text{m}$, 面孔率 $5\%\sim 10\%$, 平均值 7.7% , 分选系数 $1.0\sim 1.2$, 变异系数 $0.244\sim 0.359$, 峰态 $2.4\sim 3.6$, 储层指数 $20\sim 58\mu\text{m}$, 平均值 $37\mu\text{m}$, 从骨架图上直接读得配位数为2~3。

3.1.3 自生矿物含量

选取4口井不同微相带的20块代表性样品鉴定分析, 镜下所见该区储层含大量的自生方解石, 计算结果其自生矿物含量 $5.8\%\sim 23.3\%$, 占原生孔隙的 $10\%\sim 50\%$ (表4)。而且, 冲积扇环境的样品成岩后生作用较强烈。

3.2 储集层动态孔隙结构动态参数模型

油藏工程的实践表明, 在油气水多相混驱

的过程中, 决定驱油效率的重要因素是储层的动态孔隙结构, 即储层孔喉网络、毛管压力、流体性质、排替压力等多种因素所构成的动态参数。

以 DA40-40 号样品的光刻模型的油水混驱试验为例,试验中改变排替压力及介质条件,定量计算模型中各流动单元的常规参数变化情况如下:在排替压力为 4×10^{-3} Mpa 时,残余油饱和度为 52%、模型面孔率为 36.9%、油相面孔率为 18.8%、孔宽 $187.6\text{ }\mu\text{m}$ 、储层指数 $151.34\text{ }\mu\text{m}$;在驱替压力增加到 8×10^{-3} Mpa 时,残余油饱和度为 30.34%、模型面孔率为 37.1%、油相面孔率 11.5%、孔宽 $106.8\text{ }\mu\text{m}$ 、储层指数为 $69.44\text{ }\mu\text{m}$,反映了储集层宏观动态特征.又以储层数据谱参数进一步定量表定,图 4A, C 为驱替前后总孔隙域特征直方图; B, D 为油相特征直方图.在驱油过程中随排替压力的改变,前者主频范围、频率大小均无明显地改变,说明在短期驱油过程中储层物性特征稳定.而后者高孔段 $224\sim 288\text{ }\mu\text{m}$ 区间的剩余油已大量的排出,而 $32\sim 160\text{ }\mu\text{m}$ 区间的残余油仍滞留在孔隙中.在改变孔喉网络,用不同的介质做驱替试验其结果都有大的差别.为此,重视储层动态孔隙结构特征的研究,是油藏精细描述的新课题.

表 4 段六拔油田自生矿物含量分析数据表

样号	含量/%	微相	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$
D3718	23.3	扇端	1.7
D3738	14.3	扇中	2.7
D3771	11.2	扇根	28
D372	7.5	扇端	9.9
D3740	15.2	扇中	2.6
D351	5.8	扇端	3.5
D35113	12.6	扇中	2.7
D35114	13.7	扇中	2.5
D35123	12.2	扇中	0.6
D4041	7.1	点砂坝	72
D40126	11.3	河漫滩	23
D4087	6.8	河漫滩	25
G221577	12.2	点砂坝	104
G221569	19	点砂坝	52
G221565	9.7	点砂坝	13
G221584	15.6	点砂坝	38

3.3 储层数据谱分析在沉积微相建模中的应用

储集层微相描述通常是建立在野外露头区观察和井下地质研究基础上,但随着勘探、开发工作的深入,应重视建立、应用地质模式的专家系统.储层数据谱分析技术在对微观孔隙结构定量分析表征、分类计算的基础上,结合统计分析方法提取环境信息,建立微相模型.

3.3.1 纵向有利相带评价

3.3.1.1 冲积扇环境 (图 5)

应用储层数据谱光滑孔域与喉道孔域的数据谱的两类直方图,对沉积环境的纵向特征进行定量表征.

扇根相:自然电位曲线形态为箱状或钟状,储层数据谱长 $74\text{ }\mu\text{m}$ (图版 I-1),光滑孔域数据出现 $57\sim 70,76\sim 90\text{ }\mu\text{m}$ 两个主频段,反映粒度变化较大.喉道域数据主频仅在 $44\sim 57\text{ }\mu\text{m}$ 范围,反映连通性欠佳,该环境水体能量强,沉积物粗,但因沉积速度快,砂泥混杂,分选性差,物性条件受到一定限制.镜下鉴定自生方解石含量高,反映了较强的成岩后生作用.

扇中相:自然电位曲线形态呈钟形,储层数据谱长 $67\text{ }\mu\text{m}$ (图版 I-2),光滑孔域数据主频跨度大 $32\sim 57\text{ }\mu\text{m}$ 范围,喉道域数据也为多峰状特征,主频起伏于 $32\sim 63\text{ }\mu\text{m}$ 范围.自生方解石的形成极大地改变了原生孔隙,造成喉道域数据系列不连续.

扇端相:该微相带水体能量弱,沉积物细,自然电位曲线形态为尖刀状或锯齿状,储层数据谱长值 $61\text{ }\mu\text{m}$ (图版 I-3),光滑孔域、喉道域数据都集中于前段,显示低值,主频分别

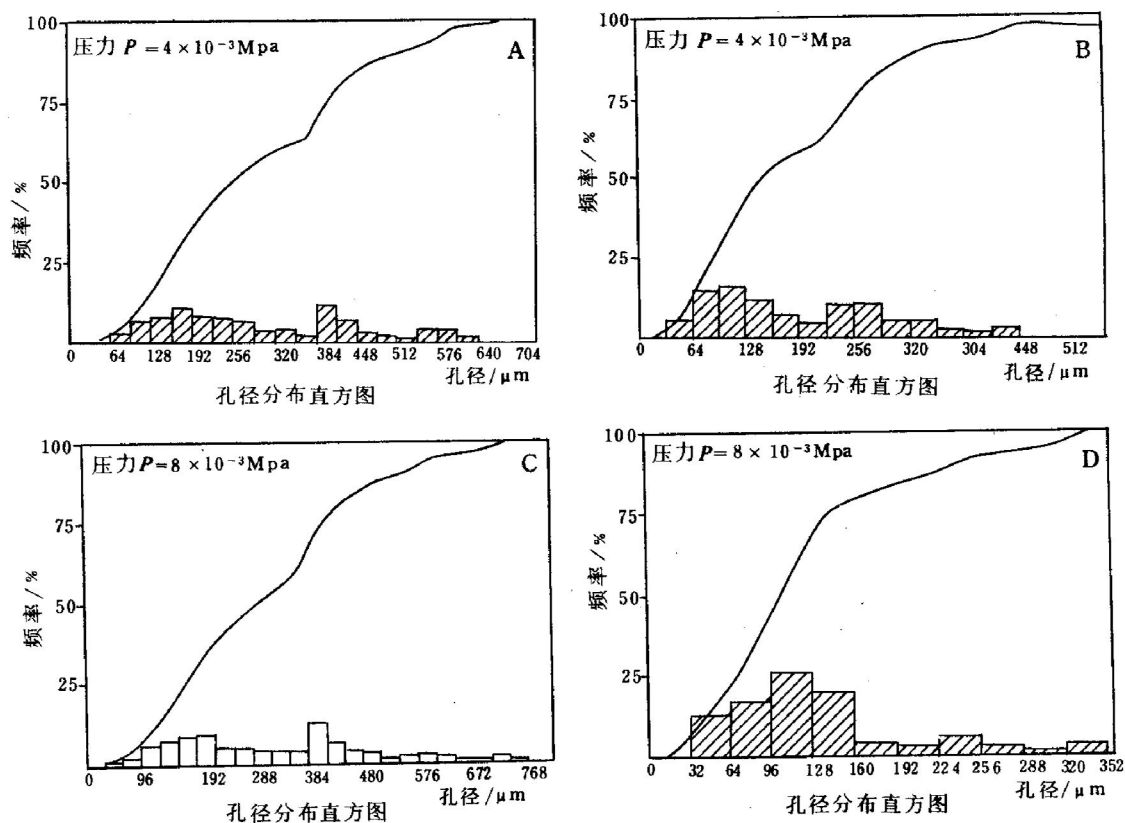


图4 段六拔油田储集层视孔隙结构动态参数模型

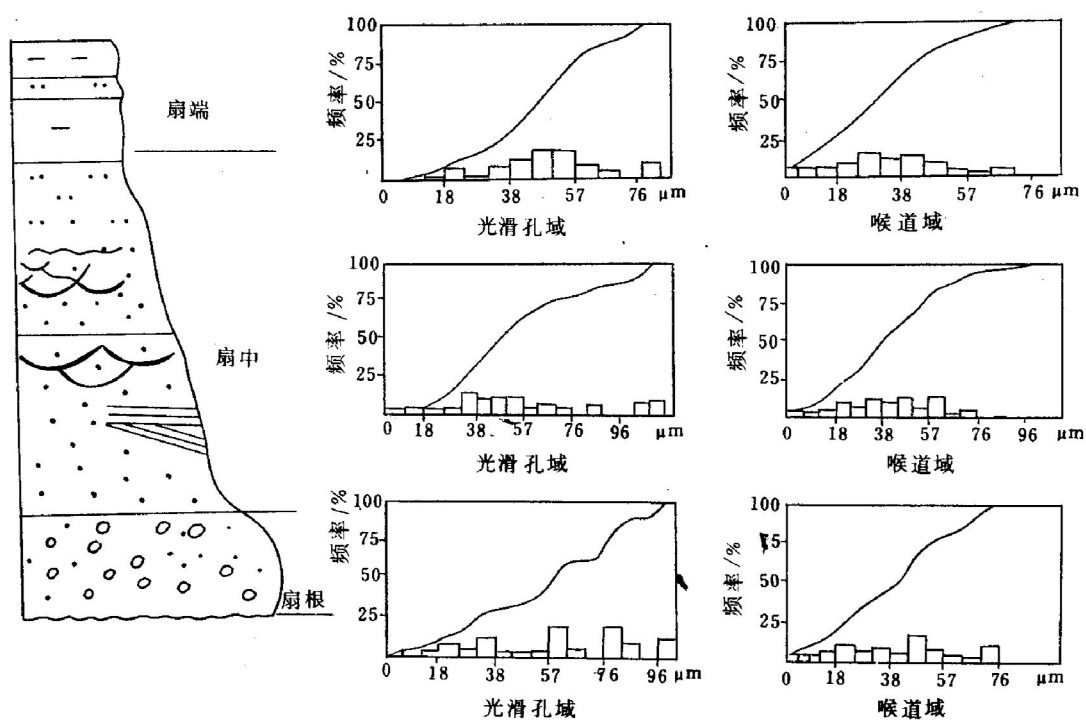


图5 冲积扇环境储层数据谱直方图标定 (D3751井)

在 $38 \sim 57 \mu\text{m}$ 范围和 $24 \sim 51 \mu\text{m}$ 范围。

由以上分析看出, 冲积扇环境各微相带储层主频孔宽段在小于 $80 \mu\text{m}$ 以下的范围, 为低

孔、低渗型储集层，对油气聚集不利。

3.3.1.2 河流环境 (图 6)

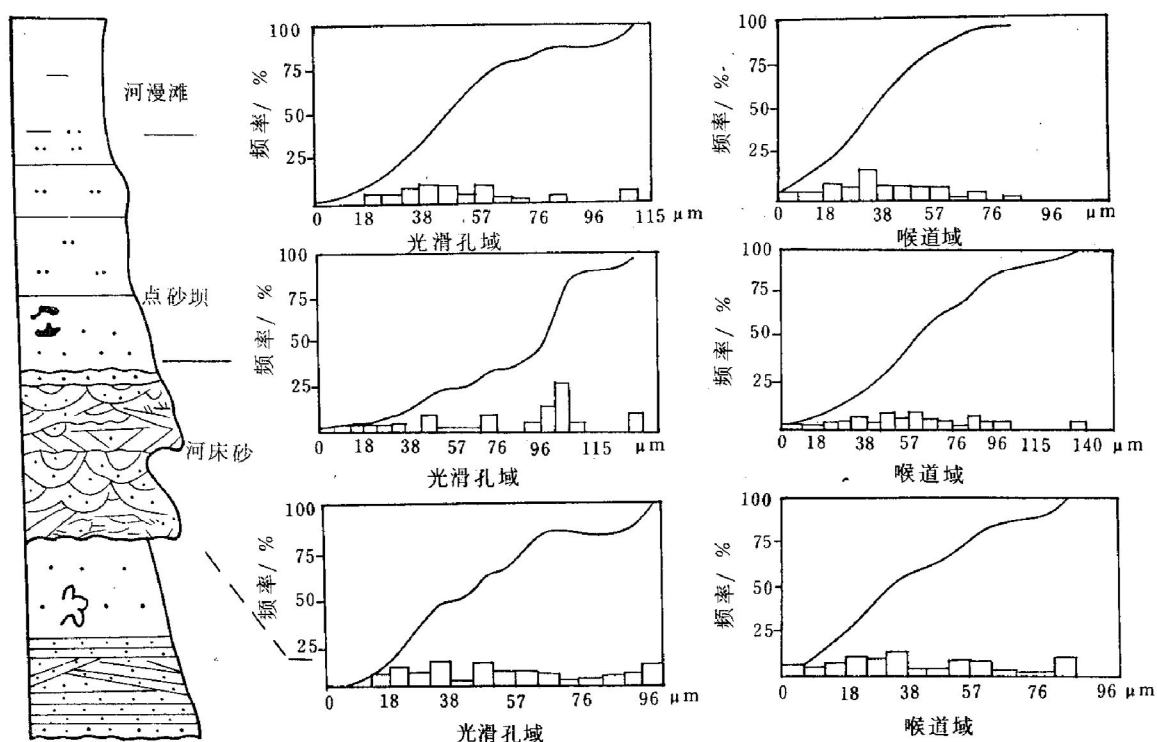
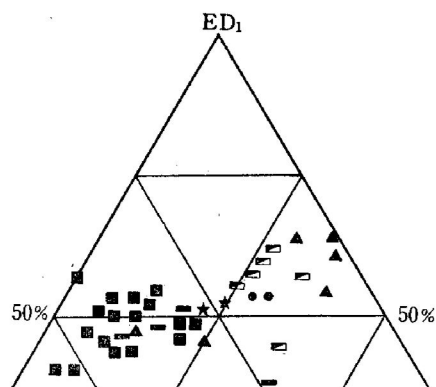


图 6 河流环境储层数据谱直方图标定 (G2215 井)

河床相：水体能量强，沉积物粗，自然电位曲线形态为桶状，储层数据谱长 $112\ \mu\text{m}$ (图版 I-4)，光滑孔域及喉道域数据都显示多峰状特征，前者主频 $32\sim 70\ \mu\text{m}$ 范围，出现 $82\sim 102\ \mu\text{m}$ 的孔隙段储层，后者主频在 $18\sim 38, 51\sim 63\ \mu\text{m}$ 范围，反映该相带储层有一定的储集能力，但储层结构



在 $32\sim 63\ \mu\text{m}$ 范围。

由以上分析看出,河流环境,特别是点砂坝微相带的储集层,其主频孔宽段在大于 $80\ \mu\text{m}$ 的范围,为中孔、中渗型储集层,有利于油气储集。

3.3.2 沉积环境的微相模型

选取全区不同相带的48个样品,以光滑孔域、喉道域两组数据为基础建立微相判别定量模型,先将原始数据进行变量合并,整理为九个(由精度要求定)区间,组成数据矩阵。

为解特征样品庞大的相似矩阵,采用对应分析法,由 R 型因子分析导出 Q 型因子分析的结果,通过坐标平移,使所有的点都位于第一象限,再把每个点向圆点投影到 $X+Y+Z=1$ 的平面上(图7,表5),就得到段六拨油田储层数据谱微相判别图版。

表5 段六拨油田微相分析数据表 %

微相	端 点 值			备 注
	ED ₁	ED ₂	ED ₃	
点砂坝	0~55	0~40	30~60	以 ED ₃ 为主
天然堤	45~65	25~35	0~45	以 ED ₁ 及 ED ₃ 为主
扇 根	50~60	15~30	15~45	以 ED ₁ 及 ED ₃ 为主
扇 中	45~65	25~40	10~20	以 ED ₁ 为主
扇 端	50~55	20~25	20~30	以 ED ₁ 为主

通常若分析样品分布偏向端点值 ED₁ 表示为低能相带的低孔、渗储集层,偏向 ED₃ 为高能相带的高孔、渗储集层,ED₂ 为过渡相带储集层。段六拨油田河漫滩、冲积扇各微相储层的样品大都偏向 ED₁ 分布,说明这些环境储层孔、喉不发育,连通性、渗透条件差,含油气条件受到一定的限制。点砂坝、河床砂相带的样品主要分布在 ED₂、ED₃ 区,反映这些环境储层孔、喉发育,连通性、渗透性条件相对较好,有一定的储油能力。为此,点砂坝、河床相带是油气开

发工作中研究的重要领域。

4 结论

(1)网状河、曲流河相带的点砂坝及河床相沉积砂体,有较好的油气储集能力。

(2)储层各流动单元非均质性强,纵、横向变化大,砂体分布常呈点块状,连通性差。因此,该区油气层的分布为点块状叠合连片。

(3)储层各流动单元的非均质性强,加之低渗透、高凝、高含蜡量的多重因素,造成油相渗透率低。驱油模型的试验表明,改善生产工艺是优化储层视孔隙结构特性的重要途径。

致谢:本文在研制过程中,赵旭华工程师编写软件,宋治、冯庆贤、李学勇同志参加分析样品及编制图件,在成文中大港油田研究院朱光院长提出重要修改意见,采收率室、地质室给予工作之便,在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 Yuan L P, Strobl R, Cuthiell D. Variograms and reservoir continuity. In Third international reservoir characterization technical conference. Tulsa, Oklahoma, 1991
- 2 Deutsch C V, Journel A G. Geostatistical software library and user's guide. Oxford University, 1992
- 3 Ehrlich R, Crabtree S J, Horkowitz K O, et al. Petrography and reservoir physics I: Objective classification of reservoir porosity. *Bull AAPG*, 1991, 75(10): 1547~1562
- 4 张兴, 赵旭华. MVP 真彩色图像分析在泌阳凹陷储层描述中的应用. 石油勘探与开发, 1993, 20(1): 182~188

APPLICATION OF RESERVOIR DATA SPECTRUM ANALYSIS IN DUANLIUBUO OILFIELD,

Zhang Xing

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing)

Abstract

A new technique—reservoir data spectrum analysis is proposed in this paper and it is used to quantitatively demonstrate the characteristics of reservoir micropore structures, establish static and dynamic reservoir models and standard microfacies charts, segment typical reservoir skeleton maps of different facies zones. It also describes the heterogeneities of varied flow units, the dynamic property of apparent pore structures. The reservoir properties and microfacies model study thus quantitatively demonstrated.