

精细地质研究现状及发展趋势

吴诗勇^{1,2}, 李自安¹

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州510640; 2. 中国科学院研究生院, 北京100039)

[摘要] 水驱采油后期, 油层的含水率越来越高, 然而大量的可动剩余油却滞留于地下。要提高这部分油层的采收率, 必须加强对储层微观非均质性的认识。精细地质研究作为一种方法, 在这种背景下, 便得到了快速的发展和运用。旨在对其做一个阶段性的小结, 从储集层砂体几何形态、内部结构以及孔、渗空间变化特征出发, 概述了精细地质研究的内容为细化开发单元、成因单元砂体的连续性和连通性描述、砂体内部建筑结构单元的划分、流动单元的研究、表外储层研究、地质建模等。并提出了今后研究发展的主要方向。为油田的可持续发展提供技术支持。

[关键词] 精细地质; 成因单元; 结构单元; 流动单元; 表外储层; 综述

[中图分类号] TE122.2; P618.130.2 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2006)02-0058-07

Actuality and Development of Fine Geology

WU Shi-yong^{1,2}, LI Zi-an¹

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China;
2. School Graduate, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract At the later stage of water-driven exploitation, some problems appeared, one is the high water content in the oil strata, and the other is a great deal of surplus oil detained in the strata. To enhance recovery ratio, it is necessary to have a better understand on the micro-heterogeneity of reservoir. As a measure to resolve these problems, the study of fine geology gets along very well. Based on the geometric features of reservoir, structure and the spatial variation of bore-seepage, this paper carries out the following six aspects: ① accurate division of exploitation units; ② description of continuity of genetic unit; ③ division of internal structure unit of sand-body; ④ investigation of flow unit of reservoir; ⑤ research of outside-delimited reservoir; ⑥ geologic modeling. At last, three developing trends of fin geology are put forward to afford some ideas for the future researches. So it will offer some effective technologies for the sustainable development of oilfield.

Key words: fine geology; genetic unit; structure unit; flow unit; outside-delimited reservoir; review

0 引言

精细地质是储层表征的重要内容, 其研究得力于石油生产的需要及相应的理论和技术的发展。

(1) 20世纪80年代以来, 世界一些主要产油国的油气田相继进入高成熟开发阶段, 由于勘探成本

的大幅度上升, 提高油气采收率便成为老油田获取最大经济效益的一条有效途径, 因而要求储层地质研究向更精细、量化方向发展。

(2) 新理论和技术的诞生, 特别是计算机技术的快速发展, 为储层精细描述提供了技术上的支持。

中国一些老油田自20世纪90年代以来, 基本

[收稿日期] 2005-05-08

[基金项目] 中国科学院边缘地质重点实验室基金项目(MSGL043)

[作者简介] 吴诗勇(1971—), 男, 安徽太湖人, 博士研究生, 从事油田开发地质学研究。

上都已进入了高含水、高采出的中后期阶段。长期的注水开发, 造成储层的岩性、物性、含油性、电性等特征均发生了较大的变化^[1], 导致部分可动剩余油长期滞留于地下。为了提高采收率, 各大油田及相关的科研院所均开展了以预测剩余油为核心的储层精细地质研究, 取得了相当多的科研成果, 部分成果甚至领先于国际水平。

笔者就储层精细地质研究现状及发展趋势做了概括性介绍, 目的是为了明确今后的攻关方向, 为油田可持续发展提供新的技术支持。

1 储层精细地质研究现状

1.1 细化开发单元

细化开发单元是精细地质研究的一项重要内容, 油田开发从来都没停止过这方面的研究。细化开发单元包括在平面上细分沉积微相和在垂向上细划成因单元 2 方面内容。

(1) 油田开发中的储层研究, 关键是必须逐级分析到微环境和微相^[2]。在油田开发后期, 控制剩余油分布的往往是沉积微相的特征和展布规律, 必须对储层沉积相进行精细地质研究。美国在 20 世纪 80 年代初提出了微环境的概念, 而中国大庆油田在 60~70 年代就已将微相应用到储层地质开发中, 进而提出了“旋回对比, 分级控制, 不同相态区别对待^[3]”的指导思想。当前阶段沉积微相的细分主要是建立在密井网测井资料及现代沉积学特征的基础上, 应用层次分析法^[4], 将每个沉积体在平面上逐级精细对比到单一的沉积环境。谢辉^[5]通过对焉耆盆地宝浪油田研究, 将该区域侏罗系三工河组划分出 12 种有成因意义的岩石相, 并研究了各类沉积微相特征与油气产能之间的关系。大庆油田在储层地质开发过程中, 将泛滥-分流平原亚相分为河道、河间和三角洲内、外前缘 4 种微相^[6]; 将河道相细分为主河道和废弃河道微相^[7], 河间相细分为决口水道、决口扇、天然堤及河漫滩等微相^[8-9], 三角洲内、外前缘相细分为水下分流河道、砂坝微相及席状砂微相等^[6-7, 10]。这里值得一提的是, 尽管很多研究者强调微相和微环境, 但很难真正做到这种程度。

(2) 垂向上细分沉积单元是建立在微相研究的基础上, 主要依据沉积单元或单砂层内测井曲线形态的微小差异、砂体旋回的沉积特征及隔夹层的分

布等特点来进行详细划分。例如在泛滥-分流平原相的砂层组内, 依据河流旋回特征及夹层发育状况, 把互相叠置的厚层河道砂岩细分对比到井间可以体现的单一河流沉积单元; 在侧向复合型河道砂体中, 可根据复合砂体的分布模式、河间微相与废弃河道微相的分布位置以及砂体发育的层位、发育程度的差异, 结合每条河道砂体的可能宽度、厚度、河曲形态演变趋势等资料来综合判断识别单一河道砂的分布特征^[11]。国外则更多的是依据 Cross 的高分辨率层序地层学来对地层进行精细划分对比。如 Posamentier 等^[12]就曾对一条路边沟渠进行了极高分辨率的层序地层学研究, 该体系最厚处也就是 50 cm, 但却伴随着可容空间的变化形成了一系列沉积体系城。

从目前研究情况来看, 细化单元的基本原则主要有^[10, 13-14]:

- (1) 以沉积学特别是现代河湖沉积学理论为指导。
- (2) 单砂层旋回特征明显, 易于划分对比。
- (3) 细分单元间泥岩隔层应具有稳定分布。
- (4) 细分的单层应具有一定的地层厚度。
- (5) 细分单层的总层数与单井平均钻遇的自然砂层数应保持一定的比例。
- (6) 细分单元应与当前采油条件及工艺水平相适应。

1.2 成因单元砂体的连续性及连通性研究

成因单元砂体的连续性是指砂体在各向上的规模大小。通常用砂体实际延伸的长度、宽度、砂体的宽厚比、砂体宽度与井距之比、钻遇率等来表示。夏位荣等^[15]按延伸的长度和宽度将砂体分为五级: 一级为极好(砂体延伸大于 2 000 m); 二级为好(2 000 m 大于砂体延伸大于 1 200 m); 三级为中等(1 200 m 大于砂体延伸大于 600 m); 四级为差(600 m 大于砂体延伸大于 300 m); 五级为极差(砂体延伸小于 300 m)。

1.2.1 成因单元砂体连续性

研究成因单元连续性, 常用的方法有:

(1) 岩相分析法。相同成因的岩相单元具有相同或相近的几何形态和连续性。裘怿楠^[16](1987)通过对各类河道砂体的研究, 揭示出高弯度曲流河的宽厚比为 130~170, 低弯度曲流河为 30~60, 短流程辫状河为 40~80, 长流程辫状河为 100 左右。

(2) 井眼资料法。吕晓光等^[17]提出以细分微相

为基础,充分利用密井网资料提供的信息,结合动态差异变化,来研究河流相储层的平面连续性。

(3)定量分析法。Allen(1970)、Leeder(1978)和 Schum(1972)等提出了计算砂体分布规模和古水文、古地貌的经验公式^[15]。一些研究者如 Davies D K 等^[18]应用这些公式预测了单个点坝和低弯度辫状河砂体的规模。Lowry Philip(1993)等则利用数理统计方法对河控三角洲前缘砂体进行了研究,并找到了各种砂体的宽度、长度以及宽厚比的定量关系^[19]。

1.2.2 成因单元砂体连通性

砂体的连通性指各成因单元砂体在垂向和侧向上相互接触连通的方式和程度,其连通方式通常有多边式、多层式和孤立式等^[2]。研究方法可分为 3 种:

(1)静态分析法。用钻井资料结合测井解释资料,统计砂体连通性参数,绘制储层连通图。对于较简单的河道砂体,Allen^[19]提出根据河道砂体的密度临界值来确定砂体的连通性。裘怿楠^[6]根据中国湖盆的实际资料对艾伦的临界值作了补充修改,认为当河道砂体密度大于 50% 时,砂体大面积连通,且宽度超过数千米;在 30%~50% 时,则要作具体分析,可能会有局部连通;当小于 30% 时,属孤立河道。这种定量判断只能适用于较简单的地质模型。对于复杂河流相储层,大庆油田提出了三类砂体连通方式^[20]:一类连通,为同一河道砂体的连通,连通状况良好;二类连通,同一时期不同河道砂体之间的连通,连通关系较为复杂;三类连通,河道砂与河间砂之间的连通,连通关系更为复杂。

(2)动态分析法。常用的有干扰试井、示踪技术等。

(3)综合分析法。采用动态与静态数据相结合,从多个方面研究井间地层连通性。邓英尔等^[21]从地层各处原始折算压力近似相等、各井原始地层压力与深度成线性关系、在开采期间,各井地层压力同步下降、各井产量递减总体趋势类似、某井工作制度发生变化时,邻近井有干扰反映、各井原油密度、组分等一致对 TH 油田井间地层连通性等作了实例分析。结果表明该方法得出的认识不仅可靠,而且对于复杂多重介质中井间地层连通性的确定尤为有效。

1.3 砂体内部建筑结构研究

砂体内部建筑结构是指沉积砂体内部由各级次沉积界面所限定的砂质单元和不连续“薄夹层”

的几何形态、规模大小、相互排列方式与接触关系等结构特征。属储层非均质体系较深层次的研究范畴。研究的总体思路是:以层次分析法为指导,应用 Miall 的层次界面和结构要素分析法^[22,23],结合露头研究,来解剖砂体内部结构,揭示其非均质性特征。

Miall 在研究河流砂体时,针对河流储层的严重非均质特征,提出用 6 级界面系列,将储层划分为由 8 种基本结构要素组成的不同级次的相对均一体,通过对结构要素的特征及其相互组合关系的表征来描述储层的非均质性^[22]。国内学者则运用 Miall 的结构要素分析法,建立了许多储集体的建筑结构储层非均质模式^[24-27]。目前,砂体内部建筑结构研究的重点是厚层河道砂岩,它是各种沉积砂体中内部建筑结构最为复杂的一种砂体,对厚油层内部剩余油分布及 3 次采油效果的影响尤其显著。大庆油田在这方面的做法是:首先确定砂体的成因类型;然后在地下井网条件下,识别和预测出单井中相当于 Miall 提出的 4 级界面及其上夹层的发育状况;最后建立井间界面和夹层分布模式^[28]。

1.4 储层流动单元研究

流动单元,又称作水力单元是指一个在侧向和垂向上连续的储层单元,并且具有相似的渗透率、孔隙度和层理特征^[29],最早由 Heam C L 等于 1984 年提出。可见,一个流动单元就是一个岩相单元,其内部具有连续的岩石物理特征。但岩相单元的边界却未必就是流动单元的边界,其内部可能包含一个或几个流动单元。

国内外对储层流动单元的认识和划分还很不一致。Ebanks^[30]认为流动单元是一个影响流体流动的岩性和岩石物理性质在单元内部相似的储集岩体。Amaefule 等^[31]认为流动单元是给定岩石中水力特征相似的层段。焦养泉等^[32-33]则把流动单元归为建筑结构的一部分,指出流动单元在河道复合体内部是以隔挡层为界的,一个流体流动单元的规模可能相当于一个点坝侧积体。穆龙新等^[34]则认为流动单元是指一个油砂体及其内部因受边界限制,不连续薄隔挡层、各种沉积微界面、小断层及渗透率差异等因素造成的渗透特征相同、水淹特征一致的储层单元。赵翰卿等^[35]则建议直接选用测井解释渗透率来划分流动单元,这样可以避免造成大厚度低渗透层与小厚度高渗透层可能划为同一流动单元的错误。吕晓光等^[36]认为储层流动单元

应是一个动态的概念, 它的划分应综合考虑沉积地质、开发阶段、并网阶段、并网形式、开采措施、强度等诸多因素, 单凭一种性质不能划分流动单元。流动单元研究方法基本上可分为 2 种:

1.4.1 定量方法

应用各种地质参数, 通过回归分析或聚类分析来划分流动单元。常用的地质参数有 R_{35} 、油藏品质系数 RQI 、孔隙体积与颗粒体积之比 Φ_2 、流动层段指标 FZI 等。

1.4.2 定性-半定量方法

在岩性相详细划分的基础上, 再结合一二种岩石物理参数来划分流动单元。

总之, 流动单元仍是油田一个亟待解决的难题。中国流动单元研究存在的主要问题是:

(1) 划分的参数种类繁多, 不便于操作。

(2) 没有解决好单砂体与流动单元划分的关系, 尤其是在侧向复合型河道砂体中没有首先描述清楚单砂体的分布状况。

(3) 没有解决好流动单元在层内的划分问题, 无法建立起以流动单元为基础的精细三维地质模型。

1.5 表外储层研究

表外储层是指由于有效厚度没有达到计算标准而未被列入储量的那部分储层, 是砂岩储层在空间上的自然延续, 其岩性以泥质粉砂岩为主, 属低能环境下沉积的产物。主要分布于砂岩储层的顶、底、周边及内部变差带, 平面上常位于表内储层的周边或物性变差部位, 具有岩性细、含泥量高、胶结致密、物性差、单层厚度薄和含油不饱满等特点^[37]。表外储层与表内储层相比, 井间属“非实体连通”方式^[38]。其微观结构可分为条带状、薄层状和斑块状; 宏观上分为决口泛滥条带型、局部变差连片型、充填连片型和稳定砂席型^[38]。

随着并网加密和开采工艺水平的提高, 人们已认识到表外储层同样具有工业开采价值。油层增划表外储层后, 分布面积显著增大, 油层井间可分性明显提高。喇萨杏油田的表外储层研究表明, 占喇萨杏油田储层厚度 50% 的表外储层若能成为挖潜对象, 将对油田延长稳产期具有非常重要的作用^[37]。目前, 国内对表外储层的岩(电)性、物性、沉积特征及动用状况的研究, 均取得了较显著成果, 国外则未见相关的文献报道, 如通过深入分析研究表外储层的地质特征和影响因素, 制定了表外储层

电性标准^[37]。对喇萨杏油田动用状况进行了深入探讨, 为大规模 3 次加密提供了理论依据^[39]。对喇萨杏油田动用机制进行了分析, 认为非实体连通是导致表外储层难采的地质因素, 层间干扰是导致表外储层难采的动力因素, 表外储层动用状况取决于基质与压裂裂缝间能量交换的能力, 压力下降导致裂缝渗透性下降影响了表外储层的渗流等^[40]。

1.6 地质建模

随着计算机技术的不断进步, 中国储层地质模型经历了从手工绘图到三维可视化定量模型的建立、建模技术从确定性到随机性的快速发展, 从而对精细地质起到了很好的促进作用。

储层地质模型是油藏描述的核心内容, 也是精细地质的最终目标所在。习惯上将储层地质模型分为概念模型、静态模型和预测模型 3 大类型^[41]。

1.6.1 概念模型

主要应用于油田早期地质开发阶段, 是把油田储层的某一类特征(非均质性、连续性等)抽象出来加以典型化和概念化。

1.6.2 静态模型

该类型实地描述了储层参数特征在空间上的变化和分布, 一般需要较密的并网, 主要应用于油田中、后期地质开发阶段。国外在 20 世纪中后期, 就逐步形成了利用计算机存储和显示的三维静态模型, 如美国埃克森公司用 Geoset 软件为大庆油田西二断块萨葡油层所建立的静态模型^[41]。中国概念模型和静态模型进展也很快, 并取得了相当成功, 在各油田已得到了广泛应用。如马利民等^[7]以大庆油田密井网的测井曲线形态为基本依据, 以不同河流沉积模式为理论指导, 将萨北油田北三区西部东块主力油层精细地质模型分为: 顺直河流砂体模型、低弯曲河流砂体模型、高弯曲河流砂体模型、辫状河砂体模型。

尹太举等^[42]利用 7 口取心井分层段的渗透率、渗透率垂向变异系数、孔隙度、厚度、有效厚度、束缚水饱和度、地层系数、储集系数、有效储集系数进行流动单元的聚类分析, 得到了双河油田厚层扇三角洲砂砾岩的储层流动单元模型, 将该区块储层划分为极好型(E)、好型(G)、一般型(F)、差型(P)。

1.6.3 预测模型

该类型对储层参数在控制点间及以外区域作一定精度的内插外推, 是比静态模型精度更高的地质模型, 为研究开发后期剩余油分布和三次采油提

高采收率服务。国外储层预测模型较国内成熟,如 Deutsch 等^[43] 基于河流储层的层次目标模拟法对不同相河流相的预测, Rogers^[44] 利用神经网络建立的储层渗透率的预测以及 Ahmed Ouenes^[45] 利用模糊理论和神经网络来预测储层的裂缝分布等。这些研究成果在预测精确性方面都有很大的提高。

储层地质建模方法主要分为确定性建模法和随机性建模法。

(1)确定性建模法,其试图从已知确定资料的控制点出发,给出确定的、唯一的储层结构和参数分布^[46]。

目前,确定性建模所应用的储层预测方法主要有^[47]:储层地震学方法,包括三维地震和井间地震方法、储层沉积学方法、克里格方法。目前情况下,基于密井网资料的建模技术是建立油田实用性地质模型的一种有效途径,但这种方法受建模者主观因素的影响较大,在建模过程中必须充分考虑沉积环境、过程和条件。

(2)随机建模法,该法是以已知的信息为基础,以随机函数为理论,应用随机模拟方法,产生可选的、等概率的储层模型方法^[47]。

随机建模法承认控制点以外的储层参数具有一定的不确定性,即具有一定的随机性。随机建模在表征储层非均质性、不确定性评价、风险分析、方案优选等方面具有很大优势。自从第 1 篇与油气储层随机建模相关的论文(1984)出现以来,有关随机建模方法的论文数不胜数。1994 年 Srivastava^[48] 对不同的模拟算法作了简要介绍,并给出了较中肯的评述。总的来看,随机建模方法可以分为 3 类^[49]:以目标对象为模拟单元,用于模拟与几何形态有关的储层非均质性;以相元为单元,用来模拟各种连续性参数及离散参数;结合 2 种以上随机建模方法的综合方法。目前,储层随机建模较前沿的领域是马尔可夫半马尔可夫域模拟、分形模拟、示性点过程模拟以及综合方法等。

2 发展趋势

2.1 高分辨率层序地层学、结构单元和流动单元三位一体技术

高分辨率层序地层学是近些年来迅速发展起来的更为精确的层序地层分析方法。高分辨率层序地层学运用于油气储集层分析,不仅有助于建立

高精度的储层地层格架及三维建造,还可以更好地确定和预测储集层及遮挡层的空间展布,并使井间储集层的描述更符合地质实际。但是,随着油田开发的进一步深入,要求储集层的划分越来越细,尤其是河道侧向复合砂体及厚油层,有必要在其内部进一步划分结构单元和流动单元,来满足油田后期对剩余油开发的需要。

2.1.1 结构单元

结构单元是由形态、相组成及其规模所表征的同成因的沉积体,是在一个沉积体系内部一种或一组特定的沉积作用过程的产物^[11]。

结构单元的提出,从静态的角度为地层的进一步细分和储集层非均质性研究提供了沉积学依据和新的研究途径,其向上可与层序地层学兼容,向下可与成因地层学分析相衔接。

2.1.2 流动单元

流动单元是在现有的采油工艺技术条件下控制油水运动最小的成因单元。

流动单元的提出既反映了储集层研究的精细化,又能紧密地与储集层中的油水运动规律相结合,是层次界面分析思想的自然延续。层次界面划分是基础,结构单元是实体,流动单元是结构单元在开发中的一种表现形式^[49]。

高分辨率层序地层学、结构单元和流动单元三位一体技术,可形成由宏观到微观、静态地质实体与动态开发过程的综合研究体系,能够较好地解决储层描述中的非均质性及油水运动规律等问题,是储集层精细描述的一种新思路^[11]。

2.2 储层露头精细研究

储层露头精细研究是国际上储层精细地质研究的一个热点,国内外学者都很重视地质原型模型和地质知识库的建立。这是因为高含水阶段要想对储层进行更准确地预测,必须建立比开发井网数据点更加密集的地质原型模型和地质知识库。而野外露头具有钻井和地震资料所不具备的高分辨率特点,而且直观、可测,便于大比例尺研究。储层露头精细研究为建立精确的地质模型提供了一条新的途径。

由于露头储层研究在储层精细描述中的重要性,国内外在地质原型模型和地质知识库方面做了很多卓有成效的研究工作^[50-53]。在实际应用过程中,要注意露头调查类比方法的局限性。凡是用于地下的类比,必须经过沉积条件和成因类型相似性

的严格分析,否则会产生很大的误差。赵翰卿^[28]提倡建立各类河流砂体内部建筑结构定量表征的模型谱,或者尽可能地收集国内外学者关于河流露头的详细描述资料,从中选取可类比的实例。当前,中国必须继续开展野外露头调查工作,积极建立能针对各类储集层特别是碎屑岩储层类型特点的一系列原型模型和地质知识库,同时要发展露头实验室的研究。

2.3 随机建模技术

储层分布本身具有确定性,但由于资料及工艺水平的不足,造成人们认识上的差距,从而认为储层具有随机性。随机建模方法给出了控制点以外的一组等概率事件,更能客观地反映储层的非均质性。特别是中国,陆相碎屑岩在油气储集层中占有重要的地位,其成因复杂,非均质性严重,即使在密井网条件下,对储层认识也不可能完全确定,必须采用随机建模方法,来保证油藏动态预测结果更合理、更客观。近些年来,随机建模技术发展很快,各种模拟算法种类繁多。在建模过程中,必须考虑到每种方法的适用性及实效性,尽量降低模拟过程中的不确定性,提高模型精度。今后随机建模的发展方向是各种随机建模方法的综合和对算法中不同类型信息的综合^[49]。

3 结论

介绍了当前精细地质研究6个方面的基本内容及相应的研究方法,在此基础上概括了精细地质发展趋势的3个研究方向。从目前研究情况来看,油田精细地质研究技术无论是从研究内容及精度上,还是技术手段上都仍需进一步的发展和完善。研究工作要逐步从定性描述向半定量、量化方向发展。精细地质理论和方法不仅要能够满足当前油田开发调整的需要,而且应具有一定的超前性。坚持利用大量的加密井资料并结合储层的沉积学特征,全面开展储层精细地质研究,是搞好高含水期油田深度开发调整的最一般性思路。

[参 考 文 献]

- [1] 张伟峰,刘守军,李拥安. 孤岛馆陶组注水开发储层性质动态变化特征研究[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(2): 51-53.
- [2] 裴亦楠. 储层沉积学研究工作流程[J]. 石油勘探与开发, 1990, 17(1): 85-90.
- [3] 赵翰卿. 大庆油田河流—三角洲沉积的油层对比方法[J]. 大庆石油地质与开发, 1988, 7(4): 25-31.
- [4] 张昌民. 储层研究中的层次分析法[J]. 石油与天然气地质, 1991, 13(3): 344-350.
- [5] 谢辉. 浅水粗粒辫状河三角洲沉积微相特征与油气产能的关系——以焉耆盆地宝浪油田为例[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(4): 37-40.
- [6] 赵翰卿,付志国,吕晓光,等. 大型河流—三角洲沉积储层精细描述方法[J]. 石油学报, 2000, 21(4): 109-113.
- [7] 吕晓光,于洪文,田东辉,等. 高含水后期油田细分单砂层的地质研究[J]. 新疆石油地质, 1993, 14(4): 345-349.
- [8] 张红薇,赵翰卿,麻成斗. 泛滥—分流平原相储层中河间砂体的精细描述[J]. 大庆石油地质与开发, 1998, 17(6): 22-24.
- [9] 马利民,齐玉柱,高尔双. 北三区主力油层精细地质研究及剩余油分布探讨[J]. 大庆石油地质与开发, 2000, 19(1): 22-26.
- [10] 王雷,郭雷,宋杰. 精细地质研究在大庆萨中南一区丙块挖潜中的应用[J]. 西安石油学院学报:自然科学版, 2002, 17(6): 4-8.
- [11] 曹树春. 储集层精细描述的新思路[J]. 地质科技情报, 2001, 20(1): 39-43.
- [12] Posamentier H W, Allen G P, James D P. High Resolution Sequence Stratigraphy the East Coulee Delta, Alberta[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1992, 62(2): 310-317.
- [13] 撒利明,王天琦,师永民,等. 油田开发中后期岩相单元的细分研究[J]. 沉积学报, 2002, 20(4): 595-599.
- [14] 宋保全,李音,席国兴,等. 储层精细描述技术在杏北油田开发调整中的应用[J]. 石油学报, 2001, 22(1): 72-77.
- [15] 夏位荣,张占峰,程时清. 油气田开发地质学[M]. 北京:石油工业出版社, 1999.
- [16] Qiu Yinan. Fluvial Sandstone Bodies as Hydrocarbon Reservoirs in Lake Basins. Recent Developments in Fluvial Sedimentology[J]. SEPM, 1987, 39: 329-342.
- [17] 吕晓光,赵翰卿,付志国,等. 河流相储层平面连续性精细描述[J]. 石油学报, 1997, 18(2): 66-71.
- [18] Davies D K, Williams B P J, Vessell R K. Reservoir Geometry and Internal Permeability Distribution in Fluvial, Tight, Gas Sandstones. Travis Peak Formation, Texas[J]. SPE Reservoir Engineering, 1993, 8(1): 7-12.
- [19] Allen J R L. Studies in Fluviate Sedimentation: An Exploratory Quantitative Model for the Architecture of Avulsion-Controlled Alluvial suites[J]. Sed Geo, 1978, 21: 129-147.
- [20] 吕晓光,田东辉,李伯虎. 厚油层平面宏观非均质性 & 挖潜方法的探讨[J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(4): 58-63.
- [21] 邓英尔,刘树根,麻翠杰. 井间连通性的综合分析方法[J]. 断块油气田, 2003, 10(5): 50-53.
- [22] Miall A D. Architecture Element Analysis: A New Method of Facies Analysis Applied to Fluvial Deposits[J]. Earth Science Review, 1985, 22: 261-268.
- [23] Miall A D. Architecture Element and Bounding Surfaces in

- Fluvial Deposits: Anatomy of the Kayenta Formation (Lower Jurassic), Southeast Colorado [J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 55: 233-262.
- [24] 张昌民, 林克湘, 徐 龙. 储层砂体建筑结构分析 [J]. 江汉石油学院学报, 1994, 16(2): 1-7.
- [25] 尹太举, 张昌民, 樊中海. 地下储层建筑结构预测模型的建立 [J]. 西安石油学院学报: 自然科学版, 2002, 17(3): 7-10.
- [26] 孙玉生, 司尚举, 刘 华. 马厂油田沙三下二储层建筑结构特征研究 [J]. 断块油气田, 1999, 6(2): 39-41.
- [27] 王俊玲, 任纪舜. 嫩江现代河流沉积体岩相及内部构形要素分析 [J]. 地质科学, 2001, 36(4): 385-394.
- [28] 赵翰卿. 储层非均质体系、砂体内部建筑结构和流动单元研究思路探讨 [J]. 大庆石油地质与开发, 2002, 21(6): 16-18.
- [29] Hearn C L, Ebank W J Jr, Tye R S, et al. Geological Factors Influencing Reservoir Performance of the Hartzog Draw Field, Wyoming [J]. *JPT*, 1984, 36(9): 1334-1335.
- [30] Ebanks W J Jr. Flow unit Concept-integrated Approach to Reservoir Description for Engineering Projects [J]. *AAPG Annual Meeting, AAPG Bulletin*, 1987, 71(5): 551-552.
- [31] Amaefule J O, Altunbay M. Enhanced Reservoir Description; Using Core and Log Data to Identify Hydraulic (Flow) Units And predict Permeability in Uncored Intervals/Well [C] // *R SPE26436 Presented at the 68th Annual SPE Conference and Exhibition*. Houston, Texas, 1993.
- [32] 焦养泉, 李 祯. 河道储层砂体中隔挡层的成因与分布规律 [J]. 石油勘探与开发, 1995, 22(4): 78-81.
- [33] 焦养泉, 李思田, 李 祯, 等. 碎屑岩储层物性非均质性的层次结构 [J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(2): 89-92.
- [34] 穆龙新, 黄石岩, 贾爱林. 油藏描述新技术 [C] // 中国石油天然气总公司. 油气田开发工作会议文集. 北京: 石油工业出版社, 1996.
- [35] 赵翰卿. 对储层流动单元研究的认识与建议 [J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(3): 8-10.
- [36] 吕晓光, 赵永胜, 王世勇. 储层流动单元的概念及研究方法评述 [J]. 世界石油工业, 1998, 5(6): 38-43.
- [37] 吕 晶, 俞 静, 杨根锁. 表外储层厚度电性标准的确定 [J]. 大庆石油地质与开发, 1996, 15(1): 17-20.
- [38] 隋 军, 吕晓光, 赵翰卿, 等. 大庆油田河流-三角洲相储层研究 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- [39] 林 影, 麻成斗, 郭玮琪. 喇萨杏油田表外储层动用状况及动用途径 [J]. 大庆石油地质与开发, 1999, 18(5): 25-27.
- [40] 赵永胜, 兰玉波, 李 强. 喇萨杏油田表外储层动用机制分析 [J]. 大庆石油地质与开发, 2001, 20(3): 31-33.
- [41] 裘亦楠. 储层地质模型 [J]. 石油学报, 1991, 12(4): 55-62.
- [42] 尹太举, 张昌民, 陈 程, 等. 建立储层流动单元模型的新方法 [J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(2): 170-175.
- [43] Deutscha C V, Tranb T T. FLUVSIM: A Program for Object-Based Stochastic Modeling of Uvial Depositional Systems [J]. *Computers and Geosciences*, 2002, 28: 525-535.
- [44] Rogers S J. Predicting Permeability from Porosity Using Artificial Neural Networks [J]. *AAPG*, 1995, 79 (12): 1786-1797.
- [45] Ahmed Ouenes. Practical Application of Fuzzy Logic and Neural Networks to Fractured Reservoir Characterization [J]. *Computers and Geosciences*, 2000, 26: 953-962.
- [46] 吕晓光, 王德发, 姜洪福. 储层地质模型及随机建模技术 [J]. 大庆石油地质与开发, 2000, 19(1): 10-13.
- [47] 胡向阳, 熊琦华, 吴胜和. 储层建模方法研究进展 [J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2001, 25(1): 107-112.
- [48] Srivastava R M. An Overview of Stochastic Methods for Reservoir Characterization [J]. *AAPG Computer Application in Geology*, 1994, 3: 3-20.
- [49] 穆龙新. 油藏描述技术的一些发展动向 [J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(6): 42-46.
- [50] Miall A D. Reservoir Heterogeneity in Fluvial Sandstone Lessons from Outcrops Studies [J]. *AAPG*, 1988, 72(6): 682-697.
- [51] Doyle J D, Sweet M L. Three Dimensional Distribution of Lithofacies, Bounding Surface, Porosity and Permeability in A Fluvial Sandstone-gypsy Sandstone of Northern Oklahoma [J]. *AAPG*, 1995, 79(1): 70-76.
- [52] 林克湘. 青海油砂山分流河道砂体储层骨架模型 [J]. 江汉石油学院学报, 1994, 16(2): 8-13.
- [53] 张昌民, 徐龙, 林克湘, 等. 青海油砂山油田第 68 层分流河道砂体解剖学 [J]. 沉积学报, 1996, 14(4): 70-76.