

碎屑岩系的八大沉积作用与其油气储层表征

于兴河, 陈永峤

(中国地质大学, 北京 100083)

摘要: 无论是油气田的勘探还是开发都离不开对储层的综合评价、建模及预测。碎屑岩储层的研究, 又离不开对沉积(微)相的分析, 可以说都是在相控基础上的评价、建模及预测。尤其是在油气田的开发中, 对老油田的挖潜和提高采收率, 均涉及到影响剩余油的分布或(和)注入剂波及系数的储层非均质性。然而, 造成所有这一切结果的根本因素是形成沉积砂体的成因机制——即沉积作用(或方式)。在前人的基础上, 系统分析并总结了形成碎屑岩储层的八大沉积作用:“垂、前、侧、漫、筛、选、填、浊”与其所形成砂体的沉积特征、储层特征、构形及地球物理响应关系, 并对各自形成的地质条件进行了探讨, 意在全面更好地表征它们的地质、地球物理及储层特征, 为理解和研究碎屑岩储层的非均质性及其剩余油的分布等提供成因机制分析的依据。

关键词: 采收率; 剩余油; 非均质性; 砂体空间叠置形式; 储层表征; 沉积作用

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

随着全球油气勘探与开发的不断深入, 油气储层的评价、建模及预测显得越来越重要。然而, 目前国内外对储层的研究主要是从高分辨率层序地层格架与沉积相的展布来进行定性分析, 然后再结合各种沉积微相的基本属性或特征进行定量模拟或建模, 即相控建模, 先建储层的骨架型, 再建其属性模型或非均质性模型, 可以说这业已成为现今油气储层评价与预测的主要技术思路与方法体系。但是层序与沉积(微)相的划分主要是依据其地质标志(沉积构造、粒度、岩性与电性等)和垂向沉积韵律或旋回特征, 并结合研究人员知识与头脑中的模式, 这就造成了研究的结果因人而异和操作性不强。为了避免这种现象, 对储层特征及其非均质性的研究更应从其成因机制——沉积作用来考虑。早在 1985 年, 裘怿楠先生就提出了沉积方式(或作用)与储层非均质性响应的观点^[1], 即不同的沉积微相是由不同的沉积作用在一定的环境条件下的产物, 不同沉积作用下形成的沉积砂体具有不同的储层非均质性响应^[1~4]。为此, 在进行储层或砂体的预测评价中, 应更多地考虑形成各种沉积砂体和沉积微相的沉积作用。这就是地学研究应遵循其规律和特色——分类准则: 1) 体现研究目的; 2) 反映成因机制; 3) 表征事物属性(几何特性和物理特性); 4) 拥有可操作性(即界定识别标志); 5) 具备推广价值^[5]。

在油气勘探难度日益加大与对老油区挖潜及提高油气采收率任务与日俱增的今天, 油气储层的科学表征就显得尤为重要。随着我国油田注水开发技术的不断提高和各种三次采油提高采收率技术的实践, 构成储层层内非均质性的内容——影响剩余油分布及注入剂厚度波及系数的储层地质因素, 愈来愈被石油地质学家所关注和认识。裘怿楠^[1]、Miall^[6]、于兴河^[3, 7~9]、郑浚茂^[4]等在这方面做了大量的工作, 尤其是在砂体的沉积作用或与层内非均质性的关系方面, 取得了一些有益的认识。本文正是在前人的基础上, 结合多年对碎屑岩储层的研究, 系统分析并总结了形成碎屑岩系储层的八大沉积作用与其所形成砂体的沉积特征、非均质性、储层特征、构形及地球物理响应等的对应关系, 力图从不同碎屑岩储层可能出现的沉积作用入手, 认识碎屑岩储层的非均质性、构形特征及影响剩余油分布的因素。

1 储层表征的概念

储层表征是指定量确定储层的性质、识别地质信息及空间变化的过程^[10]。这里所指的地质信息(geological information), 笔者认为包含 2 个方面的内容: 1) 储层的几何特性(geometry), 即储层在空间上的外观形体特征——三度空间上岩性的变化特征

收稿日期: 2004-02-27; 修订日期: 2004-09-07.

基金项目: 国家自然科学基金(40242015).

作者简介: 于兴河(1958-), 男(汉族), 湖北襄樊人, 教授、博士生导师, 主要从事油气储层沉积学及建模技术的研究与教学。

或延伸范围,故也称构形(architecture),在进行储层建模过程中多是指其各向异性(anisotropy);2)储层的物理特性(property),主要是指某一储集体内部物理特征的不均一性——非均质性(heterogeneity)。前者的核心主要是研究储层的沉积微相及其在空间上的展布;而后者则重点分析其内部物性,尤其是孔、渗、饱在储层内部、层间及平面上的分布特点。而控制和影响储层这两大特性的关键,首先是制约其形成的沉积作用,其次是成岩作用,即沉积格局或沉积作用的多样性与成岩作用的复杂性。

因此,储层表征的目的是提供一个储层构形格架,即:具有上述两大信息的储层地质模型。从某种意义上讲,储层地质模型是决定油藏或储层模拟结果的主要因素。

具体而言,储层表征是依据沉积作用或沉积成因把储层分成若干个不同层次或尺度(scale)的单元,如砂层、构形要素单元或成因单元,确定与这些单元有关的全部物性值(“四性”——岩性、物性、含油性及电性),进而建立储层地质模型,研究范围几乎包括了储层特征的各个方面,如地质特征、砂体几何形态和空间展布规律、泥质夹层的频率及大小、物性空间分布的可变性、模拟参数的确定和流体运动等方面。其主要内容是确定储层两大特性——非均质性和各向异性的空间分布,为最大限度提高勘探效率与采收率服务。

2 八大沉积作用与其储层表征

沉积作用是形成各种沉积环境的主要成因机理,本文所指的沉积作用是单个成因单元(砂体)或某种沉积微相形成时的沉积方式,它是研究储层非均质性的重要基础和内容,尤其是层内非均质性,这是由于不同的沉积作用具有不同的非均质性响应关系。为此,在前人的基础上^[1],将碎屑岩的沉积作用归纳为 8 个字,即:垂、前、侧、漫、筛、选、填、浊。

2.1 垂向加积(Vertical Accretion)

广义的垂向加积是指在整个沉积过程中,沉积表面的地形特征只是直接向上延展而不发生任何侧向移动^[1](图 1),因而它包括机械搬运过程中的床沙载荷和悬移载荷 2 种搬运方式。就砂质沉积而言,主要是指沉积物以底负载方式搬运,当沉积物的重量超过流水携带能力时,开始发生沉积并形成沉积物的垂向增长。这种作用的主要结果是形成辫状河砂体——心滩沉积,沉积物的垂向堆积称之为垂向加积。

在垂向加积的过程中,由于不同期次洪泛能量不同,因而携带的沉积物粒度也大小各异,这就表现出垂向上的粒度粗细差异,而且无一定规律可循。故其沉积特点是以粗粒沉积为主(表 1,说明:本文中的含砂率是指砂岩厚度/地层厚度,其中砂岩不含粉砂;这是由于粉砂不能反映沉积格局,但可作为储层。因此,砂岩密度=砂岩厚度/地层厚度,此时的砂岩则含粉砂,主要是用于反映砂体的连通程度);垂向上多为无规律的不明显正韵律和突变正韵律结构,沉积构造以槽状和高角度下截型板状交错层理为主(表 2)。内部不易沉积和保存泥质夹层,但当河道废弃时或贫水期,也可充填悬移质沉积的泥质夹层,即落淤泥,其侧向分布一般不超过一个河谷的宽度,连续性很差。其砂体在空间上的叠置形式为典型的透镜状或宽带状多层式,即反映出河道的迁移与分叉不易发生,主要表现出频繁摆动的特征,其沉积速率具有快而变化大的特点。

2.2 前积或进积作用(Progradation)

广义的前积作用,是指碎屑物于一定环境下不断向前加积,故也称顺流加积(downstream accretion)。通常文献和教科书中的前积,主要是指河流所携带的沉积物在遇到地形突然开阔、坡度变陡时,所形成的顺流向沉积作用,即沉积物在地形开阔和坡度增加的部位,开始卸载并逐渐向前推进或堆积的过程(图 1)。它多见于三角洲环境,是形成各种三角洲沉积体系砂体的主要沉积作用。其它环境也可发育,如:辫状河心滩的前端部位等环境^[1],均可出现前积或顺流加积作用。

1985 年 Miall 在研究河流砂体的空间特征时,首次提出了构形(architecture)的概念^[1],并划分出河流的 8 种构形要素,其中之一就是前积大型底形(FM——foreset macroforms),然而,到 1988 年他在 AAPG 上发表河流砂岩储层非均质性一文中,则将 FM 改成了 DA(downstream accreting macroforms),即顺流加积大型底形,而在图上并没有改动。这足以说明前积与顺流加积的内涵有所差别,前者多指三角洲形成的沉积作用,但后者的外延则更为广泛。

这种作用的沉积特点是,常常形成具有向上变粗的反韵律结构特征的前积层(foreset);沉积构造以下切型板状交错层理为主,可见流水或浪成小型沙纹交错层理。其垂向沉积序列的代表为三角洲前缘的河口坝层序。粒度下细上粗,渗透率下小上大,多呈现出有规律的向上变化,其孔、渗的相应关系也为反韵律,是油气田注水开发的良好储集砂层(表 1)。

| 沉积作用 | 粒度特征与测井响应特征 | 非均质特征 | | 剖面沉积方式 | | 平面特征 | | 砂体叠置 |
|------|-------------|----------|---|--------------------------|----------------------------|----------------|----------|------|
| | | 10 μm | 100 200 500 μm 砂当量/10 20 50 10' μm | → 沉积物的堆积方向 → 沉积物的加积方向 | → 主流方向 → 潜水方向 → 径流方向 | | | |
| 垂积 | | | | | | | 顶平底凹状多层式 | |
| 前积 | | | | | | 多边合并式 多边分叉式 | | |
| 侧积 | | | | | | 单边迁移式 | | |
| 漫积 | | | | | | 透镜状-席状交叉式 | | |
| 筛积 | | | | | | 透镜状多层式 | | |
| 选积 | | | | | | 层状延展式 | | |
| 填积 | | | | | | 孤立式 多边分叉式 | | |
| 浊积 | | | | | | 釜状多层式 | | |

图1 碎屑岩八大沉积作用储层响应的三维构形与非均质特征

Fig. 1 The 3D architecture and heterogeneity of reservoir response dominated by 8 major depositional processes of clastic rocks

夹层一般出现于砂体的中下部,其侧向连续性较好,往上出现的频率急剧减少;无底层相伴生时,一般泥质夹层不发育。该沉积作用形成的砂体在测井曲线上表现为倒钟形或漏斗形。其砂体在空间上的叠置形式表明,横向上为多边合并式,而纵向上为梯状延

展式。

2.3 侧向加积(Lateral Accretion)

广义的侧向加积是指沉积物堆积于一个斜坡地貌上,而整个加积过程中并不改变斜坡的地形特征,只引起沉积物向下坡方向进行侧向移动或堆积^[11]。

Table 1 Reservoir characterization and problems of petroleum exploration and development dominated by 8 major depositional processes of clastic rocks

| 沉积作用 | 粒度特征 | 沉积构造 | 韵律及规模 | 砂、泥岩发育状况 | 测井曲线形态 | 地震反射特征 | 孔、渗与粒度的对应关系 | 层内非均质性 | 勘探开发问题 | 注采问题 |
|---|-------------------------|------------------------------------|---|------------------------------|--------------|-------------|--------------------------------------|---------------------------|--|-----------------------------|
| 垂积 (vertical accretion) | 以粗粒沉积为主,通常为砾岩或含砾粗砂岩 | 以大型板状、槽状交错层理为主,小型流水纹一般不太发育 | 不明显的韵律,以及突叠韵律(复合韵律);通常规模较大 | 粗粒部分达85%或90%以上,“砂包泥” | 高幅锯齿状箱形 | 中强振幅的下凹,下切谷 | 中等偏好,对应关系天然,明显的韵律,最大渗透率通常位于底部,但无明显韵律 | 无规则或叠加正韵律,非均质性,变导系数中等,级差大 | 防止出砂,速敏问题较为严重,开采太块,砂随油而出,防止出水,即防止水锥或水窜现象 | 有利于注聚合物,降低中下部的渗透率,开采速度应是稳态求 |
| 前积 (progradation) | 粒度可粗可细,但通常为中粗砂岩,可见大量的云母 | 以低角度板状交错层理为主,可见流水纹或浪成小型交错层理及槽状交错层理 | 向上变粗的韵律,韵律结构特征;规模的大小取决于地形的陡缓、位置及沉积物的供给量 | 上、下可发育良好的泥岩,下部泥岩色深质纯,而上部色浅质杂 | 典型的漏斗形 | 强振幅反S形或雁行排列 | 好而大,最大渗透率位于顶部 | 明显的反韵律非均质性,变导系数中等偏大 | 如何确定砂体的走向与范围 | 良好的注水开发层段 |
| 侧积 (lateral accretion) | 可粗可细,常以中粗砂岩为主 | 沉积构造种类齐全,以多组低角度下切型板状交错层理为特色 | 向上变细的折变韵律结构;规模中等偏大 | 砂岩占50%~70%;砂岩间互 | 典型的钟形或锯齿状的钟形 | | 极好,中等偏大 | 强烈的正韵律非均质性,变导系数和级差大 | 勘探前缘位于两侧,取块摩擦与惯性因素的强弱 | 注聚合物的良好层段 |
| 漫积 (overbank accretion) | 以粉、细砂岩为主 | 以小型流水沙纹为特点,可见小型槽状交错层理 | 韵律不明显,多为小型反韵律,厚度小范围广 | 大套泥岩,夹砂岩或薄砂泥互层“泥包砂” | 指状或小舌状 | | 孔、渗关系变化不大,与粒度不明显 | 似均质层,变导系数和级差小 | 开发中如果小层可作均质层考虑 | |
| 筛积 (sieve accretion) | 粒级变化大,双众态或多众态分布,多级颗粒支撑 | 块状砾石可呈叠瓦状排列 | 无明显的韵律特征 | 粗粒部分达90%以上,为泥,范围受限于弱体 | 高幅锯齿状尖形或楔形 | 杂乱反射,丘状叠置 | 无明显的孔、渗对应关系,最高渗透率位置不确定 | “贼层”的严重非均质性,变导系数和级差极大 | 勘探开发中问题类似于垂向加积,缺乏泥,防止出砂,防止出水太快 | 注意水敏问题 |
| 选积 (winnowing accretion) | 粒度中等偏细,分选好 | 冲洗层理、浪成小型沙纹及不同方向的交错层理 | 以反韵律为主,可见正韵律及复合韵律 | 90%以上为砂,缺泥 | 幅度不大的漏斗形或箱形 | 强反射席状 | 孔、渗对应关系一般很好 | 反或复合韵律非均质性 | 有利于注水开发,高能高产水锥 | 良好的注水开发层段 |
| 充填 (aggradation and channel filling) | 粒度一般偏细,个别可达中粗砂 | 以槽状交错层理为主,板状交错层理不发育 | 小型渐变韵律 | 砂岩不足40%,“泥包砂” | 中幅锯齿状钟形 | | 孔隙对应较好 | 较弱的正韵律非均质性 | 厚度偏小,储量不大 | 难于开采 |
| 浊积 (turbidity accretion) | 粒度变化大,混杂集 | 多具鲍玛序列或粗尾递变 | 韵律类型多样 | 层序多,规模较大,砂多于泥 | 多个中等幅锯齿状钟形 | 丘状下超,较为杂乱 | 孔、渗通常变化大,难以预测,与粒度的关系不好 | 无明显韵律,多为偏正的复合韵律非均质性 | 寻找低位扇体的分布与空间叠置 | 开采速度要稳,防止出砂 |

表 2 板状交错层理的分类

Table 2 Classification of planar tabular cross beddings

| 层系的多少 | 纹层与层系的交角 | 纹层与层系的接触关系 | 成因解释 | |
|----------------|---------------------|------------|-------|---------|
| | | | 作用 | 产物 |
| 单组 | 高角度($> 15^\circ$) | 下切型 | 顺流加积 | 纵向坝 |
| | | 下截型 | 垂积 | 横向坝 |
| | 低角度($< 15^\circ$) | 下切型 | 侧积 | 斜列坝或点砂坝 |
| | | 下截型 | 垂积 | 横向坝 |
| 多组(≥ 2) | 高角度($> 15^\circ$) | 下切型 | 侧积或前积 | 斜列坝或河口坝 |
| | | 下截型 | 垂积 | 横向坝 |
| | 低角度($< 15^\circ$) | 下切型 | 侧积 | 点砂坝 |
| | | 下截型 | 垂积 | 横向坝 |

这里主要是指发生在河道内部, 由于河道的弯曲使水流形成侧向运动并造成沉积物重新分布的过程, 它是形成曲流点沙坝(也称边滩)的主要成因机理。沉积物的搬运方式以混合负载为主, 沉积物粒度可粗可细, 其关键是在河道的弯曲部位, 表现出凹岸侵蚀、凸岸加积。

沉积物的特点是形成典型的、向上变细的渐变正韵律结构特征, 在整个垂向沉积序列中粗粒部分所占的比率在 50%~70%之间, 沉积构造以低角度下切型板状交错层理为主。测井曲线表现为钟型或锯齿状钟型, 垂向沉积序列的代表为砂质曲流河的点砂坝沉积, 其孔、渗的对应关系一般很好, 而其层内非均质特点属强烈的正韵律非均质, 这种储层在进行油气田开发时, 是最容易造成水窜的流动单元。其砂体在空间上的叠置形式为典型的单向或双向阶梯式(图 1), 即单边式或多边式, 反映出河道的侧向迁移、分叉与合并较为频繁。

以上 3 种沉积作用也是盆地充填的 3 种最基本形式^[12], 并已被大多数地质学家和油田工作者广泛采纳和使用, 可以说它们是碎屑岩形成过程中最基本的 3 种沉积物堆积方式, 也是牵引流沉积体的 3 种主要沉积物卸载方式。

2.4 漫积(Overbank or Sheetflow Accretion)

漫积通常是指冲积扇环境的漫流沉积作用, 即形成冲积扇端的片汜沉积。现今已把它拓展为由于河水或洪水漫过堤岸, 远离河道, 流速减慢, 大量悬浮物质卸载形成的泛滥平原沉积^[8, 15], 或简称为漫溢沉积。这种定义与国外文献中的 sheetflow deposition 相当, 主要是由于漫岸流将悬浮物携带到泛滥平原堆积而成, 沉积物在垂向上可以逐渐增厚, 其搬运方式为悬浮负载。1985 年, Maill^[13] 将其定义为: 越岸细粒沉积(overbank fines), 因而, 此作用既可形成各类扇端的片汜沉积, 也可形成河道两侧

的(天然)堤岸和决口扇沉积体。

此类沉积的间歇性强, 多形成薄层细粒的沉积物, 以粉细砂为主。垂向上, 沉积物可以逐渐增厚, 无明显的韵律特点。沉积构造以流水小型沙纹(current ripple)交错层理为主。当与其它砂体叠合连通时, 通常以细粒的较低渗透薄层(细砂和粉细砂)面貌出现; 当以独立砂体作为储层时, 由于层薄、孔、渗变化不大, 非均质程度很弱, 可视为层内均质体来对待。由于这种作用多为基准面缓慢下降条件下所发生的沉积, 故砂体在空间的叠置形式为透镜-席状交叉式, 即剖面上表现为条带状, 平面上为席状。

2.5 筛积(Sieve Accretion)

主要是指发生在冲积扇的扇中平原, 大量砾石已堆积的前提下, 细粒物质沉积在搬运卸载的过程中, 因前期堆积的砾石形似筛子一样具高渗透性, 使细粒物向下渗透并产生选择性沉积的过程。

从其定义来看, 筛积也称筛状沉积(sieve deposition), 是从洪水开始形成的早期就开始发育了, 它在交汇点处形成河道或河谷中的障碍物, 后来的片流经过这些障碍物时, 由于水流能量的变化而发生分叉或选择性沉积。

因而, 筛积物主要是由次棱角状的粗-巨砾所组成, 砾石本身的分选较好, 砾石很少呈叠瓦状排列。砾间充填的主要是砂粒级沉积, 使最后的沉积物呈明显的双众数或多众数分布, 属多级颗粒支撑。它们在冲积扇砂砾岩体中以特高渗透率的簿层(“贼层”)形式出现, 尽管厚度不大、展布不广, 仍使得冲积扇砂砾岩的层内非均质性严重复杂化。

2.6 选积(Winnowing or Swashing Accretion)

选积是由于汇水盆地的波浪作用使浪基面以上的沙质颗粒产生来回的淘洗而形成滩坝的沉积作用, 通常可发育较好的冲洗层理, 这是由于波浪、沿

岸流及回流共同作用的结果。

这一沉积方式的产物有滨岸环境的滩砂、堡坝及沿岸坝等。由于其特殊的沉积作用,造成沉积物的韵律特征一般并不十分明显,尤其是滩砂沉积。但滨岸砂坝则多为反韵律结构特征,这是由于此作用将坝顶部的细粒物质簸选到边缘,使得顶部颗粒较粗所致。岩性特点是粒度可粗可细,粗者可达砾岩(砾石滩),但以中细砂岩为多、分选磨圆很好。在粉砂岩和泥岩中可见大量的生物扰动构造。其孔、渗对应关系良好,渗透率的级差和变异系数并不大,层内非均质性较弱,即比较均匀;当滩砂中由于回流作用而发育滩砂水道(beach channel)或回流水道时,其储层的非均质性也表现出较强的特点。储层的物性特点多为高孔高渗型,通常这类储层有利于高产注水开采。测井曲线上通常表现为幅度不大的箱形或似漏斗形,砂体的空间叠置形式为层状延展式。

2.7 填积(Aggradation and Channel Filling)

主要是指河道内的充填沉积,这一过程是河流携带的大量沉积物在流水能量小于颗粒自身重量时,沉积物发生卸载并充填于河道内的堆积形式。这种加积常形成于顺直河、网状河与三角洲分流河道之中,是机械分异作用的结果,形成的沉积构造以(同心)槽状交错层理为主,反映了河道的下切与充填。由于机械分异作用,在垂向上形成正韵律,表现在测井曲线上为幅度中等的锯齿状钟形,粒度范围从粗砂到细砂,其分选中等偏差,其孔、渗在垂向上也为正韵律的特点,而渗透率的级差和变异系数中等偏小,表现为较弱的正韵律非均质性,层内可存在不连续的泥质夹层。沉积物多呈带状或网状出现,砂体的叠置在横切剖面上表现为透镜状孤立式或多边分叉式。

2.8 浊积(Turbidity Accretion or Deposition)

广义上讲,应着重谈重力流,但与重力流所对应的是牵引流,就流体动力学的概念而言,前 7 种沉积作用均为牵引流下的沉积作用;而重力流又可进一步划分为:1)碎屑流(泥石流);2)颗粒流;3)液化(沉积)流;4)浊流。前 3 种形成的储层类型在生产实践中较少,因而着重谈浊流的特征。

浊积是指沉积物和水的混合物中由流体紊动向上的分力支撑颗粒,使沉积呈悬浮状态,并与上覆水体形成明显的密度差,在密度差引起的重力作用下,沉积物沿着(水下)陡斜坡流动并向前堆积的过程。鲍马认为浊流的形成与活动可分成 4 个阶段^[14]:1)三角洲阶段;2)滑动阶段;3)流动阶段;4)浊流阶段。

浊流的垂向层序特点为典型的鲍马序列,其水动力条件从底到顶代表了高流态到低流态(即弗劳德数从 >1 到 ≤ 1 的逐渐减弱过程)。垂向上通常为多个中一小正韵律的叠加,其非均质程度可大、可小,多数情况下为中等偏弱的非均质特征,孔、渗对应关系一般,无明显的最高渗透率段,其代表为偏正的复合韵律非均质性。测井上为多个高幅度的锯齿状钟形或箱形叠加。此类储层的最大特点是多层系与多韵律的叠加,砂体在空间的叠置形式以垒状多层式为主,当为多期沉积时,可以形成很厚的储集体。

3 讨论

长期以来,人们对沉积过程与沉积作用并没有明显的界定,尽管英文中只有一个词:process,但在汉语中则存在着明显的差异。“过程”是指事物进行或发展所经历的程序,而“作用”则是指对事物产生影响的活动^[15]。前者强调的是一段时间内事物的变化与发展,而后者强调的是产生影响的活动方式。因此沉积过程与沉积作用有着明显的不同。前者在某种程度上控制着沉积作用,而不同的沉积作用组合则反映出沉积过程的变化及其规律。

沉积过程是指沉积物或地层对于盆地岸线或水平面的进退在剖面与平面上的表现形式,就层序地层学而论,沉积过程是指准层序组在空间上的表现形式,因此,它主要反映地层的叠置形式;而沉积作用则是指沉积物沉积中的加积方式,即控制粒度在垂向上变化的加积方式或地层中沉积砂体的叠置方式。因此,沉积过程主要受沉积速率(R_d)与盆地的沉降速率(R_s)之间相互作用的制约;由于不同的沉积环境形成于不同的构造背景之下,因而,不同的沉积作用也受制于其构造沉积环境下沉积过程的变化,即沉积过程(R_d/R_s)与 A/S 的关系,以及沉积物的搬运方式共同决定着沉积作用(表 3),这就说明沉积过程是比沉积作用更高一级的层次规模。就油气储层而论,沉积过程与沉积作用共同控制着储集砂体的各向异性;但其砂体内的非均质性则与沉积作用通常有着良好的响应关系。

4 结论

1)碎屑岩的 8 种沉积作用是决定层内非均质性的根本因素,而制约不同沉积作用的因素是盆地不同沉积速率与沉降速率的相对关系,即 3 种基本的

表 3 准层序组与沉积作用形成的
主要地质条件与相互响应

Table 3 Main geological conditions and each other
response of parasequence and depositional process formation

| 准层序组 | R_d / R_s | A/S | 搬运方式 | 沉积作用 |
|------|-------------|-------------|------|------|
| 进积 | > 1 | < 1 | 底负载 | 前积 |
| | | ≤ 1 | 悬浮负载 | 漫积 |
| 加积 | $= 1$ | ≈ 1 | 底负载 | 筛积 |
| | | ≈ 1 | 底负载 | 选积 |
| | | ≈ 1 | 底负载 | 垂积 |
| 退积 | < 1 | ≥ 1 | 混合负载 | 侧积 |
| | | ≥ 1 | 悬浮负载 | 填积 |
| | | ∞ | 悬浮负载 | 浊积 |

沉积过程(层序地层称准层序组): 进积、退积及加积。因而沉积盆中的各种碎屑沉积是由 3 种沉积过程与 8 种沉积作用在不同的构造背景下, 制约着沉积物在横向上以不同方式相互交叉, 纵向上进、退与加积变化以及垂向上的交叉叠置。

2) 沉积储层的划分与对比, 应以成因机制分析和属性表征为主要依据; 而储层表征的核心体现在 2 个层次上, 一是三维空间的构形, 即骨架模型; 二是内部物性特征分布, 即属性模型。

3) 碎屑岩不同沉积作用的非均质性响应表现在: 垂积——无规则非均质性; 前积——明显的反韵律非均质性; 侧积——强烈的正韵律非均质性; 漫积——似均质层; 筛积——出现“贼层”的严重非均质性; 选积——反韵律非均质性; 填积——较弱的正韵律非均质性; 浊积——复合非均质性。

4) 在一定的沉积过程中, 通常不同沉积作用具有一定的构形响应: 垂积——透镜状或宽带状多层式; 前积——横向为多边合并式, 纵向多为梯状延展式; 侧积——单边或多边式; 漫积——透镜状与席状交叉式; 筛积——多层式向多边式的过渡; 选积——层状延展式; 填积——透镜状孤立式或多边分叉式;

浊积——垒状多层式。

参考文献:

- 1 裘怿楠, 许仕策, 肖敬修. 沉积方式与碎屑岩储层的层内非均质性 [J]. 石油勘探与开发, 1985, 12(2): 72~74
- 2 裘怿楠. 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 于兴河, 李剑峰. 油气储层研究所面临的挑战与新动向 [J]. 地学前缘, 1995, 2(3~4): 213~219
- 4 郑浚茂, 于兴河, 谢承强等. 不同沉积环境储层的层内非均质性 [J]. 现代地质, 1995, 9(4): 501~508
- 5 于兴河. 地学研究的思维方法、过程、特点及目标 [J]. 学位与研究生教育, 1998, 80(3): 17~19
- 6 Miall A D. Reservoir heterogeneities in fluvial sandstones: lessons from outcrop studies [J]. AAPG Bulletin, 1988, 72(6): 682~697
- 7 于兴河, 王德发, 郑浚茂. 华北地区二叠系岩相组合类型、剖面特点及沉积体系 [J]. 沉积学报, 1992, 10(1): 27~35
- 8 于兴河, 王德发, 郑浚茂等. 辫状河三角洲砂体的特征及砂体展布模型 [J]. 石油学报, 1994, 15(1): 26~37
- 9 于兴河, 王德发. 陆相断陷盆地三角洲的构形要素及其储层地质模型 [J]. 地质论评, 1997, 43(3): 225~231
- 10 Lake L W, Carroll H B Jr. Reservoir Characterization [M]. Orlando: Academic Press, 1986. 1~5
- 11 Fairbridge R W, Bourgeois J. The Encyclopedia of Sedimentology [M]. Stroudsburg, P A; Dowden, Hutchinson and Ross, 1978. 430~432
- 12 Galloway W E, Hobday D K. Terrigenous Clastic Depositional Systems [M]. New York: Springer Verlag, 1983
- 13 Maill A D. Architecture element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits [A]. In: Flores R M, ed. Recognition of Fluvial Depositional System and Their Resource Potential; Lecture Notes for Short Course No. 19 [M]. Tulsa: SEPM, 1985. 35~81
- 14 Bouma A H. Sedimentology of Some Flysch Deposits [M]. Amsterdam: Elsevier Pub, 1962. 168
- 15 中国社会科学院语言研究所词典编辑室编. 现代汉语词典 [M]. 第 2 版. 北京: 商务印书馆, 1983. 427

EIGHT MAJOR DEPOSITIONAL PROCESSES OF CLASTIC ROCKS AND THEIR PETROLEUM RESERVOIR CHARACTERIZATION

YU Xing he, CHEN Yong qiao

(China University of Geosciences, Beijing 100083 China)

Abstract: Comprehensive evaluation, modeling and prediction of petroleum reservoir are always concerned in the oil and gas field exploration and development. Moreover, study of reservoir characteristics is related to analysis of depositional facies or microfacies. It revolves occurrence of residual petroleum and sweep efficiency or conformance factor of injectant to find new reservoirs and enhance oil recovery during the

stage of reservoir management and development in maturing oil fields, and this is related to the study on reservoirs heterogeneity. The fundamental reason of all these results is the mechanisms forming depositional sandbody depositional processes. The relationship between depositional process and response of reservoir heterogeneity is for the geologists and petroleum engineers to resolve. Based on the previous research, 8 major depositional processes (vertical accretion, progradation, lateral accretion, overbank accretion, sieve accretion, winnowing accretion, channel filling, and turbidity deposition) have been defined and the sedimentary features, reservoir characteristics, architecture, log and seismic responsibility of the sediments formed mainly by these depositional processes have been described in detail, in order to get a better understanding of reservoir heterogeneity and occurrences of residual petroleum on clastic rocks and to provide basis for analyzing genetic mechanism.

Key words: sweep efficiency; residual oil; heterogeneity; spatial stacking pattern of sandbody; reservoir characterization; depositional processes

(continued from page 516)

crust. The petroliferous basins in the Qinghai Tibet Plateau can be divided into three basic types as the marine compound basin, the superposed basin of marine and continent and the continental overlapped basin etc. These basins have some notable features such as high geothermal field, low formation pressure, tight reservoirs, deep oxidized hydrocarbon boundaries and so on, which were resulted from impressions brought about the re combinations and overriding of multiple petroliferous strata, the reconstruction of multiple structural movements and the activities of hot magma.

Key words: structural knot; convergence boundary; shear system; sutured belt; block; petroliferous basin; plate structure; the Tethys in the Qinghai Tibet Plateau

《石油实验地质》影响因子大幅提升

据中国科学技术信息研究所最新公布的 2004 年中国科技期刊引证报告,由中石化石油勘探开发研究院主办、无锡实验地质研究所承办的《石油实验地质》期刊影响因子为 0.741,比去年提高了 0.189,在全国 30 种“地质科学类”期刊中列第 14 位,在 1 576 种中国科技论文统计源期刊中列第 133 位;总被引频次为 574,比去年提高了 252,在全国 30 种“地质科学类”期刊中列第 9 位,在 1 576 种中国科技论文统计源期刊中列第 262 位。这表明,该刊的学术地位与学术影响力日益提高,越来越受到我国地学界及广大读者的关注与厚爱。

中国科技期刊引证报告,是中国科学技术信息研究所受国家科技部的委托,从 1987 年开始对中国科技人员在国内外发表的论文数量和被引用情况等进行分析,从而评价出期刊的学术水平、学科地位、编辑状况、交流范围以及读者满意程度。影响因子和总被引频次是两个国际通行的期刊评价指标。通过期刊的影响因子排序表和总被引频次排序表可确定该期刊在同类期刊中所处的位置,从而对该期刊的学术影响力和学科地位进行评价和评估,是确定核心期刊的重要指标。

(杨建超)