



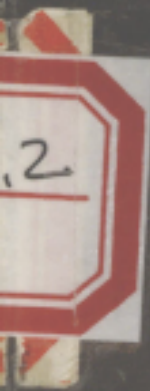
曲流河与湖泊三角洲沉积体系 及典型骨架砂体内部构成分析

——鄂尔多斯盆地东缘精细露头储层研究考察指南

焦养泉 李思田 李祯 杨士恭 付清平 卢宗盛 著



中国地质大学出版社



曲流河与湖泊三角洲沉积体系 及典型骨架砂体内部构成分析

——鄂尔多斯盆地东缘精细露头储层研究考察指南

焦养泉 李思田 李 祯 著
杨士恭 付清平 卢宗盛

中国地质大学出版社

**Meandering River and Delta Systems
and Architectures of Typical
Framework Sandbodies**

— Field Guidebook for Study on Exposed
Reservoirs on East Margin of Ordos Basin

Jiao Yangquan

Li Sitian

Li Zhen

Yang Shigong

Fu Qingping

Lu Zongsheng

Press of China University of Geosciences

• (鄂) 新登字第 12 号 •

内 容 提 要

本书运用了沉积体系、内部构成单位及等级界面分析相结合的方法,在研究了鄂尔多斯盆地东缘大量野外精彩沉积剖面的基础上,建立了研究区曲流河沉积体系和湖泊三角洲沉积体系模式;对两种体系中的典型骨架砂体(如曲流河道砂体、分流河道砂体、水下分流河道砂体和河口坝砂体等)进行了多层次的内部构成剖析,建立了相应的内部构成格架模型;同时,还对盆地东缘精选出的 17 个露头点进行了详细介绍。

本书可供从事沉积学、油气开发和煤田研究的广大生产、科研人员及大专院校师生参阅。同时,亦可作为在该区进行沉积体系及储层沉积学(精细露头储层研究)野外考察的指南。

图书在版编目(CIP)数据

曲流河与湖泊三角洲沉积体系及典型骨架砂体内部构成分析——鄂尔多斯盆地东缘精细露头储层研究考察指南/焦养泉等著. —武汉:中国地质大学出版社, 1995. 7

ISBN 7-5625-1003-2

I. 曲…

II. 焦…

III. 河流环境-湖泊环境-沉积岩相-鄂尔多斯盆地东缘

IV. P51

出版发行 中国地质大学出版社(武汉市·喻家山·邮政编码·430074)

责任编辑 赵颖弘 责任校对 熊华珍

印 刷 中国地质大学印刷厂

开本 787×1092 1/16 印张 2.5 字数 160 千字 插页 5 图版 52

1995 年 7 月第 1 版 1995 年 7 月第 1 次印刷 印数 1—500 册

定价: 25.00 元

作者简介

焦养泉，男，32岁，硕士，副教授。1986年毕业于武汉地质学院煤田地质与勘查专业并留校任教。现在中国地质大学（武汉）资源学院沉积盆地及沉积矿产研究室从事层序地层学、沉积体系分析、储层沉积学及动力学研究工作。几年来，参与并完成国家、部级重点攻关项目8项，其中1项获地质矿产部1994年科技成果一等奖。目前，正在进行的项目有4项，并为其中2项的负责人。以主要作者身份合作出版了专著2部，发表学术论文13篇。

目 录

一、引 言	(1)
二、曲流河沉积体系及其骨架砂体内部构成分析	(3)
(一) 曲流河沉积体系成因相构成与空间配置研究	
—— 大尺度沉积非均质性研究	(3)
1. 河道充填组合	(4)
2. 河道边缘组合	(4)
3. 泛滥盆地组合	(4)
4. 曲流河沉积体系空间构成格架模式	(5)
(二) 典型曲流河道砂体内部构成分析	
—— 中尺度沉积非均质性研究	(5)
1. 柳林地区曲流河道砂体内部构成特征	(6)
2. 响水地区曲流河道砂体内部构成特征	(7)
(三) 曲流河道砂体内部构成格架模型及其周期发育过程	
的动力学分析	(10)
1. 曲流河道砂体内部构成格架模型	(10)
2. 曲流河道砂体发育周期及其成因解释	(11)
三、湖泊三角洲沉积体系及其骨架砂体内部构成分析	(12)
(一) 湖泊三角洲沉积体系成因相构成与空间配置研究	
—— 大尺度沉积非均质性研究	(12)
1. 前三三角洲组合及开阔湖沉积	(13)
2. 湖泊三角洲前缘组合	(14)
3. 湖泊三角洲平原组合	(14)
(二) 湖泊三角洲典型骨架砂体内部构成分析	
—— 中尺度沉积非均质性研究	(16)
1. 三角洲前缘砂体内部构成分析	(16)
2. 水下分流河道砂体沉积非均质性的成因动力分析	(19)
3. 典型分流河道砂体内部构成分析	(20)
(三) 湖泊三角洲沉积体系骨架砂体内部构成格架模型	(21)
四、河流和湖泊三角洲露头砂体典型实例考察指南	(23)
第一部分 河流沉积体系及其典型砂体	(23)
考察点 1 典型曲流河道砂体 (重点)	(23)

考察点 2	辫状河道砂体 (辅助)	(23)
考察点 3	典型槽状交错层理 (辅助)	(24)
考察点 4	曲流河道群——响水砂体 (重点)	(24)
考察点 5	曲流河道群——泛滥平原沉积 (重点)	(24)
考察点 6	曲流河道群——电站砂体 (辅助)	(24)
考察点 7	曲流河道群——赵石窑砂体 (重点)	(25)
考察点 8	辫状河道砂体 (辅助)	(25)
考察点 9	典型的吉尔伯特型三角洲 (辅助)	(26)
第二部分	湖泊三角洲沉积体系及其典型砂体	(26)
考察点 10	前三角洲及开阔湖沉积 (辅助)	(26)
考察点 11	典型湖泊三角洲前缘组合 (重点)	(27)
考察点 12	典型湖泊三角洲平原组合 (重点)	(27)
考察点 13	决口扇砂体 (辅助)	(27)
考察点 14	废弃分流河道沉积 (辅助)	(28)
考察点 15	典型的三角洲分流间湾沉积组合 (重点)	(28)
考察点 16	大型决口三角洲沉积 (重点)	(28)
考察点 17	大型河道砂体底部的阶梯状冲刷 (辅助)	(29)
致 谢		(29)
参考文献		(30)
图版		(31)

CONTENTS

1. Introduction	(1)
2. Meandering River Systems and Architectures of Framework Sandbodies ...	(3)
2.1 Genetic Facies and Spatial Distribution of Depositional Systems	
— Study on Sedimentary Heterogeneity at the Regional Scale	(3)
2.1.1 Channel Filling Association	(4)
2.1.2 Levee and Overbank Association	(4)
2.1.3 Flood Basin Association	(4)
2.1.4 Spatial Distribution of Meandering River Systems	(5)
2.2 Architectures of Typical Meandering Channel Sandbodies — Study	
on Sedimentary Heterogeneity at the Local Scale	(5)
2.2.1 Architectures of Channel Sandbodies at Liulin Area	(6)
2.2.2 Architectures of Channel Sandbodies at Xiangshui Area	(7)
2.3 Architecture Model and Dynamics of Meandering channel	
Sandbodies	(10)
2.3.1 Architecture Model	(10)
2.3.2 Periodic Development and Genetic Interpretation	(11)
3. Depositional Systems and Architectures of Framework Sandbodies in	
Lacustrine Delta	(12)
3.1 Genetic Facies and Spatial Distribution of Depositional Systems	
— Study on Sedimentary Heterogeneity at the Regional Scale	(12)
3.1.1 Prodelta and Open Lake Deposits	(13)
3.1.2 Deltaic Front Association	(14)
3.1.3 Deltaic Plain Association	(14)
3.2 Architectures of Typical Deltaic Sandbodies — Study on	
Sedimentary Heterogeneity at the Local Scale	(16)
3.2.1 Architectures of Deltaic Front Sandbodies	(16)
3.2.2 Origin and Dynamics of Sedimentary Heterogeneity of	
Subaqueous Distributary Channel Sandbodies	(19)
3.2.3 Architectures of Typical Distributary Channel Sandbodies	(20)
3.3 Framework Model of Lacustrine Deltaic Sandbodies	(21)
4. Field Guidebook for Typical Outcrops of Alluvial and Lacustrine Deltaic	
Sandbodies	(23)

4.1 Alluvial Depositional Systems and Typical Sandbodies	(23)
Obversation Point No.1 Typical Sandbodies in Meandering Stream System(Emphasis)	(23)
Obversation Point No.2 Braided Stream Sandbody(Assistant)	(23)
Obversation Point No.3 Typical Trough Cross Bedding (Assistant)...	(24)
Obversation Point No.4 Meandering Channel Sandbody Complex —— Xiangshui Sandbody(Emphasis).....	(24)
Obversation Point No.5 Meandering Channel Sandbody Complex —— Flood Plain Deposits(Emphasis)	(24)
Obversation Point No.6 Meandering Channel Sandbody Complex —— Dianzhan Sandbody(Assistant)	(24)
Obversation Point No.7 Meandering Channel Sandbody Complex —— Zhaoshiyao Sandbody(Emphasis)	(25)
Obversation Point No.8 Braided Stream Sandbody(Assistant)	(25)
Obversation Point No.9 Typical Gilbert Delta(Assistant)	(26)
4.2 Depositional Systems and Typical Sandbodies of Lacustrine Delta ...	(26)
Obversation Point No.10 Prodelta and Open Lake Deposits (Assistant)	(26)
Obversation Point No.11 Typical Lacustrine Deltaic Front Association (Emphasis)	(27)
Obversation Point No.12 Typical Lacustrine Deltaic Plain Association(Emphasis)	(27)
Obversation Point No.13 Crevasse Sandbody(Assistant)	(27)
Obversation Point No.14 Abandoned Distributary Channnel Deposits(Assistant)	(28)
Obversation Point No.15 Typical Interdistributary Bay Association (Emphasis)	(28)
Obversation Point No.16 Large Scale Crevasse Delta Deposits (Emphasis)	(28)
Obversation Point No.17 Stepping Scours at Bottom of Large Scale Channel Deposits(Assistant)	(29)
Acknowledgments	(29)
References	(30)
Plants	(31)

一、引言

鄂尔多斯盆地是我国重要的能源盆地。由于该盆地基底稳定,盆内中生代地层几乎没有发生构造变形。沿盆地东缘大量的现代深切沟谷及公路断面使几乎水平的三叠纪地层与侏罗纪地层大面积裸露,在许多精彩的峭壁断面上可以很清晰地观察到河流沉积体系与湖泊三角洲沉积体系中各种内部构成单位(成因相)的几何形态、沉积特征及其空间配置关系等。该区是进行内陆湖盆露头层序地层学、沉积体系分析及精细露头储层研究的最佳天然场所。

为了让油田开发的第一线骨干人员建立起河道砂体的基本几何形态、内部构成单位及沉积界面的感性认识,了解曲流河沉积体系、湖泊三角洲沉积体系的整体空间构成格架,中国石油天然气总公司开发生产局于1995年1月特设立了油田开发导向技术项目“鄂尔多斯盆地精细露头储层研究典型实例考察”。此项目的设立为向油田工作人员介绍鄂尔多斯的精彩地质露头提供了条件,也为作者在此地参与并完成了4个部级研究项目^①之后设立露头沉积学和储层沉积学考察路线提供了条件。本书是作者们集体在进行了大量沉积学和储层沉积学研究的基础上,系统地总结了进行精细露头储层沉积非均质性大尺度和中尺度研究的思路、手段和方法,并着重多层次地剖析了两种沉积体系及其内部一些典型骨架砂体的内部结构,建立了相应的内部构成格架模型,同时还介绍了一些沿主干公路出露的地质剖面,因而此书亦可作为在该区进行沉积体系和储层沉积学野外考察的指南。该考察路线南起陕西省耀县,北至神木县,集中考察3个地区,即陕西省耀县、横山县和神木县。在前两个地区重点考察曲流河沉积体系及其骨架砂体,在后一个地区重点考察湖泊三角洲沉积体系及其骨架砂体(图1-1)。野外路线上共精选了8个重点考察点,由于路途较长,而且要进行不同类型砂体的比较研究,中途还穿插了包括辫状河道砂体及吉尔伯特型三角洲在内的9个辅助性的考察点。

-
- ①1. 李思田等, 1986~1990, 鄂尔多斯盆地东北部层序地层及沉积体系分析, 系“七五”地质矿产部重点科技攻关项目二级课题(此项目荣获1994年地质矿产部科技成果一等奖)。
2. 李思田等, 1989~1991, 鄂尔多斯盆地侏罗纪延安组三角洲及河道砂体内部构成及不均一性研究, 系“七五”中国石油天然气总公司重点科技攻关项目“中国油气储层研究”之专题。
3. 李思田等, 1989~1993, 含能源盆地沉积体系——中国主要沉积体系类型的典型分析, 系地质矿产部重要基础理论课题。
4. 李思田等, 1991~1994, 陕甘宁盆地河流砂体露头调查及地质知识库基础研究, 系“八五”中国石油天然气总公司重点科技攻关项目“中国油气储层研究”之专题。

古代曲流河砂体和湖泊三角洲砂体通常是良好的油气储集体，但其复杂的内部结构常常给油气田开发造成困难。对地下河道型储层砂体结构的认识可以通过类似露头砂体的精细研究而加以完善，因此重点剖析古代露头河道砂体的内部构成单位、划分流体的流动单元并建立其空间配置的格架模型具有重要的理论和实际意义。作者运用沉积体系分析、内部构成单位和等级界面分析相结合的方法，重点对鄂尔多斯盆地东缘中生代的曲流河沉积体系和湖泊三角洲沉积体系进行了全面分析和描述，建立了曲流河沉积体系和湖泊三角洲沉积体系模式及其骨架砂体的内部构成格架模型。

沉积体系分析 (Fisher 和 McGowen, 1967)、内部构成单位和等级界面分析 (Miall, 1985, 1988, 1989) 方法的实质是把沉积体系作为一个系统，按大尺度、中尺度和微尺度依沉积体系和成因相内部的各级界面将其分解成不同级别和规模的构成单位——建造单元。野外储层描述则着重开展大尺度和中尺度的沉积非均质性研究，其中中尺度是研究重点。在此，“大尺度”的含义系指整个大型复合砂体和整个沉积体系，后者超出了单砂体的范围，包括研究沉积体系内砂体的空间配置模型；“中尺度”的研究则指剖析和划分同一砂体内部的各级构成单位，识别沉积界面以及研究沉积界面起隔挡作用的特殊薄夹层等 (李思田等, 1994)。不同成因相及其内部不同级别的构成单位与储层物性的关系非常密切 (李思田等, 1993; 焦养泉等, 1993)，因此上述分级别的研究方法非常适合于河道型储层砂体内部构成与非均质性描述，是建立河道型储层地质模型不可缺少的方法之一。

由于作为中尺度的砂体内部构成分析是在沉积体系内部进行的，而且它与沉积体系分析密不可分，故本指南的基本结构是，首先详细描述研究区的两种典型沉积体系及其骨架砂体的内部构成并建立整体的格架模型，然后再逐一介绍各个露头考察点。

二、曲流河沉积体系及其 骨架砂体内部构成分析

研究区曲流河沉积体系的基本素材主要来源于两个地区的两个时代地层，即陕西省耀县柳林镇中三叠统二马营组顶部的曲流河沉积（焦养泉等，1995）^①和陕西省横山县响水地区中侏罗统延安组第Ⅰ成因地层单元的曲流河道群（李智民，1992；李祯等，1993）^②。下面将综合描述其大、中尺度的内部构成与沉积非均质性特征。

（一）曲流河沉积体系成因相构成与空间配置研究 ——大尺度沉积非均质性研究

曲流河沉积体系的成因相构成以河道为中心，根据沉积作用类型可以将其分为河道充填组合、河道边缘组合和泛滥盆地组合3部分。目前，在研究区已识别出9种主要成因相（表2-1）。

表 2-1 曲流河沉积体系内部成因相构成

成因相组合	成因相	沉积作用类型
河道充填组合	点坝 (PB)	河道水流作用
	河道底部沉积 (CBF)	
河道边缘组合	天然堤沉积 (LV)	漫滩流作用
	决口河道砂体 (CCH)	决口作用
	决口扇砂体 (CVS)	
泛滥盆地组合	泛滥平原沉积 (FP)	漫滩流作用
	越岸沉积 (OB)	越岸作用
	泛滥平原小型湖沉积 (PL)	浅水湖泊作用、 生物作用等
	废弃河道沉积 (ACH)	

①焦养泉，1993，河道型储层地质模型的露头研究，硕士论文。

②李思田等，1994，陕甘宁盆地河流砂体露头调查及地质知识库基础研究，“八五”中国石油天然气总公司重点科技攻关项目专题研究成果报告（编号85-103-01-02）。

1. 河道充填组合

河道充填组合是该体系的骨架部分和核心部分，其沉积时期的原始水道是形成其它所有成因相的根源所在。河道中的点坝（PB）是曲流河体系中具有最好储集性能的成因相之一，也是区别于其它河道类型的关键和特色部分。与点坝密切相关的另一种成因相是河道底部沉积（CBF），它位于点坝下部。典型的沉积剖面有柳林砂体（剖面 YL-1，图 2-1）和赵石窑砂体（剖面 HX-5，图 2-2A）。对该部分的描述详见本章“典型曲流河道砂体内部构成分析——中尺度沉积非均质性研究”一节。

2. 河道边缘组合

①天然堤沉积（LV）位于河道单元两侧，一般厚度 $1\text{m} \pm$ ，呈互层状并向泛滥平原尖灭（图 2-1）。其内部攀升层理发育，偶尔可见代表周期性暴露的泥裂（图 2-3）。它向远端通常与薄层越岸沉积相连。

②决口河道砂体（CCH）呈透镜状，一端连接主河道，而另一端与决口扇砂体相连。它是在短暂强烈的洪水溢岸决口时形成的。如剖面 HX-6 所示的大型决口河道砂体有时也具有小型点坝，其厚度可达 2.5m ，宽 40m （图 2-4）。它是输送泛滥平原沉积物的最主要通道。

③决口扇砂体（CVS）具有席状分布的特征，其上、下界面比较平整，一般厚度 $20 \sim 100\text{cm} \pm$ ，总体具有向泛滥盆地变薄的趋势（图 2-1、4）。响水地区赵石窑决口河道砂体与决口扇砂体之间的冲刷组合关系精彩地展示了后者系前者所形成（图 2-2A、4）。在决口扇砂体远端，即在决口扇砂体进入泛滥平原小型湖部位，生物活动的遗迹构造比较丰富，以 *Skolithos* 为主（图 2-5），同时也有 *Scoyenia gracilis* 与之共生。

在该组合中，决口河道砂体和决口扇砂体具有较好的储集性能。

3. 泛滥盆地组合

泛滥盆地组合实际上是由决口扇砂体、越岸沉积、泛滥平原小型湖沉积等构成的频繁互层，剖面 HX-2 是其典型代表（图 2-6）。

①泛滥平原沉积（FP）和泛滥平原小型湖沉积（PL）以富含有机质细粒沉积物为特征。它们在曲流河沉积体系中占有的比例是较高的。从更大范围来看，它们通常包容着曲流河道砂体（图 2-1、2A），这是冲积平原下游曲流河沉积体系的特色之一。

②越岸沉积 (OB) 相对较细, 以薄层砂体为特征, 其内部发育小型的水流波痕交错纹理, 横向延伸较远。它是在洪水季节由越岸水流形成的 (图 2-7)。

③废弃河道沉积 (ACH) 是曲流河道截弯取直被废弃后的一种泥质充填体。它往往被保留于河道复合砂体的上部。其几何形态通常为上平下凹, 它准确记录了曲流河原始水道的几何形态和规模。赵石窑砂体的废弃河道沉积宽 10m, 厚 0.6m (图 2-2A)。

泛滥盆地组合中动、植物遗迹化石十分丰富, 它们主要发育于泛滥平原小型湖泥质沉积中, 而且以大量的 *Scoyenia gracilis* 为特征 (图 2-8), 植物根化石及其碎屑常见 (图 2-9)。

4. 曲流河沉积体系空间构成格架模式

通过详细的露头追索和断面写实, 可以清楚地看到, 上述成因相以固有的共生组合关系配置组合成曲流河沉积体系的整体结构框架 (图 2-10): 在最下部是河道底部沉积, 通常都以明显的冲刷关系超覆于下伏的早期沉积物之上; 而后出现河道充填沉积的主体——点坝, 随着河道不断侧向迁移, 以不同的侧积方向和叠置方式组成河道砂体的基本格架; 天然堤沉积出现在河道充填沉积 (即河道砂体) 的边缘, 由于频繁的洪水决口和河道迁移, 天然堤沉积常常被越岸沉积和决口河道砂体破坏或取代, 因此其保存不完整, 规模也很小; 决口扇砂体是沿河道砂体的两侧垂直分布的, 并以其稳定的厚度延伸到泛滥盆地中呈夹层形式出现; 决口河道砂体由于受洪水的突发性影响, 其发育规模以及它与其它成因相共生的关系随机性较大, 并经常以较大的幅度冲刷下伏的早期沉积和切割决口扇砂体; 越岸沉积也是沿河道砂体两侧分布, 覆盖面积很广; 泛滥平原沉积和泛滥平原小型湖沉积位于河道间部位, 为低能量的泥质沉积物; 废弃河道沉积则以特有的顶面平直、底面下凹的形状分布于河道砂体侧上方, 一般规模很小, 主要为泥质充填 (李祯等, 1994)。

(二) 典型曲流河道砂体内部构成分析

——中尺度沉积非均质性研究

如图 2-1、2-2A 所示, 曲流河道复合砂体的底部被第 5 级界面 (即底冲刷面) 所限定。该界面具有较大的起伏, 其最大起伏幅度局部可达 4m 以上。底冲刷面上局部发育有深达 40cm 且具有良好充填结构的纵向冲刷沟 (图 2-11)。这种对下伏泛滥平原沉积的不均衡冲刷作用表明, 河道发育过程中古水流能量参差

不齐。

在底冲刷面之上通常包含着几个河道单元。作者赋予河道单元的基本含意是，它具有独立的三维几何形态，与周围地质体边界清楚，是一次相对连续的河道强化事件的完整记录，即包含了河道的发生、发展、衰退和消亡的全过程。由于河道单元间的底冲刷面所代表的时间和沉积过程是不连续的，因而它成为河道型复合砂体内部基本的构成单位（李思田、焦养泉、付清平，1993；焦养泉、李思田、杨士恭、陈俊亮，1993）。河道单元间为第5级界面所限定。

1. 柳林地区曲流河道砂体内部构成特征

陕西省耀县柳林镇的曲流河道复合砂体具有复杂的内部构成，但内部的结构层次非常清楚，而且级别齐全。它由两个河道单元组成。河道单元间的冲刷关系表明，河道单元Ⅰ发育时期先于河道单元Ⅱ（剖面YL-1，图2-1）。

(1) 河道单元Ⅰ

河道单元Ⅰ现保存宽度120m，厚5m。其内部由a、b、c、d、e和f 6个依次向东增生的点坝构成，其间均被第4级界面分开（图2-1、12）。在每个点坝内部都各自具有若干个由第3级界面限定的点坝增生单元。点坝增生单元的边界面（即第3级界面）通常向下收敛于点坝底部的第4级界面上，而向上则被点坝顶部的第4级界面所削截（图2-13）。这是判别曲流河道砂体内部关键界面等级的良好标志。河道单元Ⅰ中各点坝增生单元的内部结构均一，均由分选极好的块状中粒砂岩组成，显示了古水流能量较强且较稳定的特征。

(2) 河道单元Ⅱ

河道单元Ⅱ位于河道单元Ⅰ西侧，总宽度260m，厚 $5\text{m} \pm$ 。它由a、b、c、d、e、f和g 7个向西侧向加积的点坝和规模较小的废弃河道沉积构成，点坝之间同样被第4级界面限定（图2-1、14）。

严格地讲，在点坝的最下部（第4级界面或第5级界面上）是河道底部沉积和滞留沉积，它们具有大量泥砾，局部甚至构成泥砾层，以致成为各点坝砂体间的严重不渗透或低渗透夹层。河道底部沉积中大型冲刷充填交错层理和块状构造丰富（图2-15），它们是河道中最高古水流能量的标志。河道底部沉积和滞留沉积与点坝间呈过渡接触。

由于点坝发育时古水流能量和持续时间以及后期冲刷的非均质性，它们最终保存的规模相差很大。大者宽达150m，厚近2.5m；小者宽仅61m，厚仅50cm。这两种极端规模与古河道鼎盛期与衰退期的发育规模相当。

各点坝内部具有更细微的构成特征。如点坝c的完整垂向层序写实图所示（图2-16），被3条第3级界面圈定的4个点坝增生单元是点坝周期性增生和活化

的记录。点坝增生单元厚度一般在 1m 以下。形成第 3 级界面时,河道古水流也具有一定的冲刷作用,界面上通常也含泥砾,但是泥砾的厚度远小于第 4 级界面上的泥砾层。4 个点坝增生单元具有相似的岩性相组合,其演化规律从下向上通常由 MSe (具内碎屑泥砾的中砂岩) → MSm (具块状构造的中砂岩) → FSt (具槽状交错层理的细砂岩) → FSr (具波痕纹理的细砂岩) 过渡,总体呈现正递变特征。上述特征表明,在点坝增生单元发育期,古水流能量有由强变弱的周期性变化趋势。

点坝增生单元通常具有大规模的 ϵ 交错层理,其纹层向河心倾斜,但在平行古水流方向上却具有相互平行的纹层结构特征 (图 2-17),这反映了点坝增生单元持续地向河心和下游侧向加积的增长过程。

点坝增生单元内部的交错层系组边界 (第 2 级界面) 将点坝增生单元划分为若干个岩性相区 (图 2-16),不同的岩性相区所代表的古水流能量差别很大,其间没有明显的时间间断。

在同一交错层系组中,层系边界是最小级别的界面——第 1 级边界,其上、下岩性相一致 (图 2-16)。

相对而言,河道单元 II 的粒度细,且构造和粒度都具有正递变性,表明其形成时期古水流能量相对较弱,且具有波动性,周期性变化明显。

隔挡层在河道单元 I 与河道单元 II 中是不相同的。在前者中为泥质隔挡层;而在后者中既有泥质隔挡层,又有泥砾隔挡层 (图 2-1)。

2. 响水地区曲流河道砂体内部构成特征

在横山县响水地区,无定河两岸的峭壁断面上揭露了一个非常完整的、能够连续追索的曲流河道群。这个曲流河道群共包含了 3 个规模较大的曲流河道砂体,它们由东向西依次是赵石窑砂体、电站砂体和响水砂体,其间发育了良好的泛滥平原沉积 (图 2-18)。这 3 个砂体具有与耀县柳林砂体相似的内部结构特征。但是,响水砂体是一个单砂体,而赵石窑砂体和电站砂体都由 3 个河道单元组成。比较而言,电站砂体是一个低能量的曲流河道砂体。

(1) 响水砂体 (剖面 HX-1)

响水砂体是一个单砂体 (即具有一个河道单元),最厚处达 11.74m,横宽 500m,它由 3 个自西向东依次斜列叠置的点坝及其上部的废弃河道沉积构成 (图 2-19)。从点坝 a → 点坝 b → 点坝 c,沉积物的粒度和沉积构造的规模逐渐变细、变小。这说明河道古水流能量由早期到晚期逐渐变弱。由于点坝 a 和点坝 b 形成后,分别受到上覆河流的侵蚀作用而残缺不全,故不能再按第 3 级界面划分出点坝增生单元,仅点坝 c 可据其侧积增生体顶部保留的泥质隔挡层分为两个点坝增

生单元 (李智民, 1992; 李祯等, 1993)。

(2) 赵石窑砂体 (剖面 HX-5、剖面 HX-6)

赵石窑砂体是一个复合砂体, 它由 3 个河道单元组成。河道单元及其内部构成单位的侧向加积方向是不同的。从河道单元 I 到河道单元 II 是向东侧向加积的, 而从河道单元 II 开始到河道单元 III 是向西侧向加积的 (图 2-2A)。通过实际观察、追索和沉积断面写实发现, 在赵石窑复合砂体内部亦可识别和划分出 5 级界面和 6 级内部构成单位, 即第 5、4、3、2 和 1 级界面及其相对应的复合河道、河道单元、点坝、点坝增生单元、交错层系组 (储层岩性相区) 和交错层系 (储层岩性相) 等一应俱全。

① 河道单元 I 的两端遭到上覆河道单元 II 和 III 的冲刷侵蚀, 现保存宽度 200m, 最大厚度 5.1m。其内部的第 4 级界面将其分为 4 个点坝, 依次从点坝 a 到点坝 b、c 和 d 自西向东侧向叠置。每个点坝内部又被若干条第 3 级界面圈定出一些点坝增生单元 (图 2-2A、20)。在点坝增生单元内部又可以根据第 2 级和第 1 级界面分别划分出储层岩性相区和储层岩性相。

岩性相是根据沉积构造和沉积物粒度所划分的一种地质单位, 它已为野外沉积学研究普遍使用。鉴于储层描述需要更细微的岩性相划分, 并进而建立岩性相与储层物性之间的相应关系, 作者在此使用了储层岩性相的概念 (李思田等, 1993; 李祯等, 1993; 焦养泉等, 1993)。储层岩性相是沉积条件的综合反映, 是一种能量-物质单元。其划分与传统的岩性相类似, 但对其又作了必要的补充, 即增加了杂基含量、分选度等有效定量的衡量参数。这样, 储层岩性相既能反映物质构成、古水流强度及成因特征, 又能有效地解释储层物性特征。其表示方法是在传统的岩性相简称之前加上粒度符号, 即 C 代表粗粒, M 代表中粒, F 代表细粒, S 代表粉砂。如 MSt 代表具有槽状交错层理的中砂岩。根据上述原则, 在曲流河沉积体系中共划分出 12 种储层岩性相 (表 2-2)。

如果点坝增生单元比较完整的话, 那么其中的储层岩性相组合就具有规律性和相似性。通常情况下, MSe 或 FSe 位于最底部; MSt、FSt 位于中下部, 且占据了相当大的空间; FSr、SSl 和 SSr 等分布于顶部或两侧边缘。这种规律性分布受沉积条件制约。储层岩性相是河道砂体最基本的构成单位, 由于它与储层物性之间的关系非常密切, 加之又是钻孔岩心中能清楚识别的一种沉积地质单元, 所以在野外对其进行认真划分和研究是必要的。

② 河道单元 II 几乎全部裸露, 保存相对完整, 总宽 230m, 厚度 3.7m。内部被 4 条第 4 级界面划分为自东向西侧向加积的 e、f、g、h 和 i 等 5 个点坝及一个废弃河道沉积 (图 2-2A)。点坝 e 和 f 相对简单。点坝 e 内仅有一条第 3 级界面, 分开了两个点坝增生单元; 点坝 f 有两条第 3 级界面, 3 个点坝增生单元。这