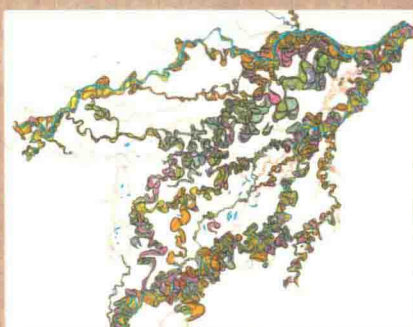


河流相储层构型方法



单敬福/著

Architectural Element Method for Fluvial Reservoir



科学出版社

国家自然科学基金(41372125)
油气资源与勘探技术教育部重点实验室 联合资助

河流相储层构型方法
Architectural Element Method for Fluvial Reservoir

单敬福 著



科学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统介绍了以曲流河、辫状河为主的储层构型理论、方法和技术,着重强调从河流动力学、过程学、地貌形态学和比较形态学等角度实现对古代曲流河结构的恢复和层次解剖,从而指导油田建立精细地质模型,指导油田生产实践。另外,本书提到的河流沉积学理论、构型方法等内容注重多学科的融合与交叉,反映了河流储层构型学在融合相关学科理论与方法方面的新进展。

本书可作为从事油气田开发、沉积学基础研究、河流水动力学和现代沉积学等领域工作者的参考书,也可作为高校相关专业研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

河流相储层构型方法=Architectural Element Method for Fluvial Reservoir / 单敬福著. —北京:科学出版社,2017.5

ISBN 978-7-03-050288-9

I. ①河… II. ①单… III. ①河流相-储集层-油田开发
IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 255146 号

责任编辑:万群霞 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张 伟 / 封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京科印技术咨询服务公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 5 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2017 年 5 月第一次印刷 印张:21 1/4 插页:3

字数:500 000

定价:158.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

河流储层构型学通过吸收与之相关学科的新理论、新方法和新思路,以及不断涌现的沉积储层的新成果而得到蓬勃发展。传统沉积学、地层学、储层地质学和现代沉积学等学科的某些理论与方法已成为储层构型学的重要组成部分。河流储层构型理论是近 30 年提出的新概念,是沉积学进入新世纪以来最为重要的成果之一。

我国石油工业因陆相石油地质理论和陆相沉积盆地产油而著称于世。我国陆相沉积地层地质条件复杂,岩相变化大,且陆相碎屑岩油气储集层具有多物源、近物源、堆积快、横向变化大等特点。自 20 世纪 70 年代以来,随着东部渤海湾盆地和西部众多陆相沉积盆地相继投入勘探开发,遇到的陆相油气储集层类型越来越多,也越来越复杂,同时,开采难度也随之加大。

《河流相储层构型方法》首次完整系统论述了曲流河、辫状河储层构型理论和方法,其中汇集了笔者多年的研究成果,是其成果的全面总结和提升,书中所阐述的内容展示了河流相储层构型技术在我国河流相沉积砂体精细解剖中的作用及其良好的应用前景。

该书强调河流相储层构型的精细解剖必须紧密结合河流沉积动力学过程、成因机制,从成因学、河流动力学、河流地貌形态学及河流沉积过程学角度进行深层次解析,才能建立逼近地下真实地质原型的模型。此外,书中还系统介绍了现代沉积过程动力学特征,如曲流河形态学演化过程,可以更好地为地下古沉积期曲流河储层结构的解剖和恢复提供形态学参考;对河流相储层在深埋过程中的差异压实作用也进行了详细介绍,并提出了去压实校正的理论和方法,并在实践中取得了良好效果。

该著作提到的“去压实效应邻井单期河道标定法”“松弛回弹技术”和“单期砂厚中心连线法”等方法,对曲流河沉积过程恢复和结构解剖起到积极作用,也是作者在该著作中提出的一整套储层构型理论和方法具有先进性和创新性的关键所在。

该著作所依据的基础资料丰富,文字叙述详细,图件精致,引用和借鉴了国内外最新研究成果。此外,书中提到的相关理论和方法还可以有效指导现代沉积和地下河流相砂体建筑结构精细解剖和过程恢复。因此,该著作在河流沉积的理论和研究方法以及对油田精细开发方面,均具有一定的深度和参考意义,是国内有关河流沉积研究中难得的好著作,达到国内外先进水平,对油田剩余油预测、精细储层表征和挖潜都具有重要实用意义。



中国地质大学(北京)教授,博士生导师

2016 年 9 月

前 言

河流相储层构型方法是在储层沉积学基础上,吸收了地层学、构型学、过程沉积学、碎屑岩沉积学等最新成果发展起来的一门新兴学科。Miall(1985a)在 20 世纪 80 年代初提出储层构型学以后,引起全世界沉积学家的普遍关注和响应,许多学者在储层构型学方面做出了卓有成效的工作,发表了大量的论文和专著。经过近几十年的储层研究实践,特别是近年来针对我国油田普遍进入了高含水期,面临从储采基本平衡向严重不平衡过渡的严峻形势,迫使我们对于储层进行更深入的研究。目前,地下油水分布情况发生了巨大变化,呈现高度分散、局部集中,剩余油多分布在储层差、薄和边角部位,开采难度逐年加大等特点,这些都是由储层严重的非均质性及各构型单元复杂的空间叠置规律造成的。因此,为了弄清高含水期地下剩余油分布规律和进一步提高滚动开发和挖潜水平,需要更加精细储层描述井间精细结构预测及各构型定量参数提取,由此建立表征河流相储层的精细地质预测模型。

本书结合国内外储层构型最新研究理论,综合利用测井、岩心、现代沉积、古代露头及分析化验等资料,对以曲流河和辫状河为典型代表的河流沉积过程进行系统分析和阐述,提出一整套切实可行的河流储层构型解剖思路、流程和方法。指出储层构型学不仅仅是对河流砂体层次结构的解剖,而是要实现对河流沉积过程、各构型单元成因联系、河流水动力学和地貌动力学过程深层次的解析,从而达到成因学、河流动力学和沉积过程的完美统一。

全书共六章。第一章系统介绍储层构型学的起源、发展及研究意义;第二章阐述河流分类及其沉积模式,并重点论述曲流河和辫状河发育控制因素及沉积模式;第三章介绍现代沉积形成过程、分类及形态学特征;第四章以国外典型曲流河露头为例,阐述曲流河储层结构解剖原理、方法,实现对古代曲流河沉积结构恢复;第五章系统介绍河流储层构型的相关概念和术语,以及储层构型表征方法和具体实施步骤;第六章简单介绍砂泥差异理论,并对储层构型应用实例进行了详细论证。全书由单敬福统筹撰写,其中绝大部分图件由硕士研究生林志鹏参与翻译并清绘完成。本书的编写基于前人丰富的储层构型学研究成果,也得益于中国石油天然气股份有限公司的长庆油田分公司和吉林油田分公司多年来为笔者提供储层构型学研究所需的资料;本书还得到了长江大学领导和有关同事的支持;另外,笔者所指导的汤乃千、方伟、张乐、谢莉丽、刘博等研究生也对本书的编写、清绘等工作给予了大力支持,在此一并表示感谢。

由于作者水平有限,时间仓促,书中疏漏与不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

2016 年 9 月

目 录

序

前言

第一章 河流相储层构型研究现状与展望	1
第一节 国内河流相储层构型研究现状	2
一、现代河流沉积研究	2
二、河流沉积露头研究	5
三、地下河流相储层研究	6
四、实验室水槽物理模拟研究	11
第二节 国外河流相储层构型研究现状	14
一、描述性河流地形学	15
二、定量河流地形学	17
三、碎屑颗粒的搬运和沉积作用	18
四、河床底形与古水流	20
五、古水动力学	22
六、河流沉积学特征	23
七、河流相储层构型简介	29
第二章 河流分类及沉积模式	35
第一节 河流分类及其控制因素	36
一、河流河型控制因素	36
二、河流分类	42
第二节 曲流河与辫状河沉积模式	46
一、辫状河	47
二、曲流河	55
第三章 现代河流沉积过程分析	66
第一节 现代河流形态和过程学分类	66
一、截弯取直	66
二、河道复活	70
三、决口改道与分流	70
四、决口废弃	70
五、串沟-主河道与“似心滩”的形成	70
第二节 现代曲流河形态学分析	73
一、横向扩张模式	74
二、平移模式	74

三、扩张+平移模式	74
四、扩张+顺流旋转模式	75
五、收缩+顺流旋转模式	76
六、扩张+逆流旋转模式	76
第三节 现代河流沉积过程分析	77
一、数据来源——UAVSAR	77
二、相关概念和术语	87
三、恢复与重建方法	96
四、过程恢复实例与结果	107
第四章 基于野外露头河流沉积结构恢复	114
第一节 露头观察的工作流程和方法	114
一、露头研究工作流程	115
二、露头研究主要方法	116
第二节 利用露头对古代曲流河沉积结构的恢复	121
一、恢复方法和相关术语	121
二、案例 1: 基于纵向露头剖面古代曲流带结构重建与恢复	126
三、案例 2: 英国约克郡侏罗系曲流地貌动力学和平面结构特征	141
第三节 曲流河沉积结构与动力学响应	159
一、点坝顶部滚轴脊与串沟槽形成机制	159
二、点坝地貌动力学演化特征	159
三、顺流迁移型点坝成因机制与地貌形态学特征	161
第五章 河流储层构型相关概念和术语	192
第一节 储层构型规模认知	192
一、时间尺度与绝对规模	192
二、规模比例	199
第二节 储层构型相关概念和术语	202
一、古水流在储层构型研究中的作用与测量方法	203
二、储层构型界面定义与内涵	207
三、河流构型要素分类	212
四、河道内构型要素特征	214
五、河道外构型要素特征	230
第三节 储层构型表征方法	235
一、储层构型层次分析	235
二、储层构型表征层次确定原则	240
三、储层构型模式拟合	240
第六章 储层构型应用实例	258
第一节 河流相砂泥岩差异压实校正理论和方法	258
一、国内外研究现状	260

二、具有差异压实现象案例	261
三、差异压实对河道间高程影响分析	267
第二节 曲流河沉积过程恢复	271
一、研究区地质概况	273
二、研究思路	273
三、曲流点坝构型解剖	275
四、河道演化过程与历史重建	278
第三节 辫状河复合砂体期次厘定与结构层次解剖	281
一、研究区地质概况	281
二、技术流程	281
三、多期辫状河道沉积过程重建	284
第四节 稀疏井网条件下辫状河心滩预测方法	287
一、预测过程	288
二、实例应用	295
参考文献	301
彩图	

第一章 河流相储层构型研究现状与展望

储层构型亦称建筑结构(reservoir architecture),是指不同级次储层构成单元的形态、规模、方向及其叠置关系(吴胜和,2010),这一概念强调了沉积地质体的结构层次性,沉积体的层次结构可称为沉积构型,油田开发阶段精细表征过程中更多关注的是这一种类型,属于狭义构型概念。另外,构型还有广义概念的延伸,如在盆地级别的层序地层学研究中,低位(lowstand system tract, LST)、湖侵(transgressive system tract, TST)和高位体系域(highstand systems tract, HST)也可称为层序构型;构造解释过程中的构造三维可视化研究,可称为构造构型。显然,研究视角和领域的不同,其构型的定义也有所差异。本书后续讨论的储层构型则属于狭义范畴的河流相沉积砂体构型。

在储层构型研究内容中,构型界面的分析也是储层内部不同级次渗流屏障的分析和刻画,渗流屏障的成因既可以是沉积造成的,如泥质隔夹层,也可以是后期成岩等因素造成的,如地下水活动等形成的钙结层等,都对地下油水运动尤其是剩余油的形成具有重要的控制作用(单敬福等,2015a,2015f)。而沉积形成的渗流屏障又起着绝对的主因和控制作用,因此,地下储层沉积构型研究是提高油气采收率,最大程度挖掘油气资源潜力的关键所在。

传统的沉积相分析和储层构型均是对沉积环境的各类成因相砂体分布特征进行研究,但两者既有区别又有联系(吴胜和,2010),区别主要体现在如下三个方面。

(1) 研究层次级别不同。一般传统的沉积研究主要从相、亚相和微相三个层次进行研究,所谓的微相至多是复合微相(如河道微相,其由多条甚至多期的单一河道叠覆而成),而非单成因的单一河道,而沉积构型的层次划分和级别则更精细。依据油田密集井网,三维分布的最小级别可深入到单一微相内部的增生体层次,且更强调单成因单元空间分布的完整性和独立性。对于河流相沉积而言,小层沉积微相通常反映的是河道砂体总体分布趋势,而构型研究不仅包括单一河道砂体,还要进一步深入刻画河道内部的单一砂坝甚至内部增生体层次。显然,沉积构型研究是沉积微相研究的进一步深化,而沉积微相研究则相当于储层构型研究中的6级构型层次(Miall,1985a)。

(2) 单元界面刻画属性不同。在沉积微相平面图编制过程中,平面相边界是具有统计学意义的边界,而构型则更强调具体的、定量半定量化的物理界面。但沉积相研究过程中也并非都是统计学意义上的边界,如一维的单井综合分析和二维的剖面相分析,所刻画的微相边界就是可量化的物理界面。而平面图则是完全意义上的统计学边界,因此更多体现的是优势相概念,如某个小层垂向有多个微相,但平面图编制时,要选取厚度最大、最为主要的相进行成图,所以构型界面追求的是可量化的物理界面,而相界面则更体现的是统计学意义上的抽象出来的界面。

(3) 空间展布维数差异。沉积微相研究一般以一维和二维为主,如单井相分析属于一维,连井剖面相和平面相分析则属于二维,而具有争议的是沉积相建模,究竟属于沉积

相研究范畴还是属于构型研究范畴,目前还存在诸多争议。对于其归属,笔者更倾向于构型范畴,因为相建模的结果,与传统的相分析方法和思路存在较大差异,且相建模要求每个沉积单元都是定量化的物理界面,每个边界的控制点都有具体数据控制,尽管这些数据点都是基于数理统计而得来的,但其能够对各微相叠置关系进行刻画表征,因此,将其划为构型范畴则显得更为合理。

第一节 国内河流相储层构型研究现状

1985年,Miall发表《构型要素分析:一种新的河流相沉积分析法》一文,标志着储层构型学由此诞生。随即,1986年,柯保嘉将这新技术新方法引入国内,并于同年发表了《一种新的河流沉积分析法——结构要素分析方法》一文,由此开启了新一轮储层构型研究热潮。30余年来,储层构型分析方法在我国取得了长足进步,形成了“层次分析”“模式拟合”和“多维互动”构型解剖思路(何文祥等,2005;岳大力等,2007;吴胜和等,2008;吴胜和,2010),以及综合利用多种资料,运用新技术新手段的储层构型研究方法。我国以陆相储集层为主,而针对陆相储层的构型研究也蓬勃发展起来,形成了“曲流河逐步完善,辫状河进一步探索”这一发展趋势(蒋平等,2013)。

应油藏深入开发和挖潜的需求,储层表征近十几年来开始逐步精细化和定量化。迫切需要知晓地下砂体建筑结构,以指导油田精细开发要求。国内在储层构型研究过程中紧跟国际发展步伐,结合国内陆相储层实际情况,先后经历了地质概念模型认知和储层构型表征方法探索两大阶段。模式认知的手段主要依靠现代沉积(现代河型实地考察、卫星图片、探地雷达、探槽等多种手段)和野外露头观察(主要针对古代河流沉积)、室内室外物理实验模拟(如水槽实验)和基于大型计算机的河流数值模拟(该项技术国外做得相对较多,主要在防灾和水利工程等方面应用居多),而在油田储层表征方法探索过程中,主则要以地震资料解释方法和多井预测方法为主(吴胜和等,2012)。

一、现代河流沉积研究

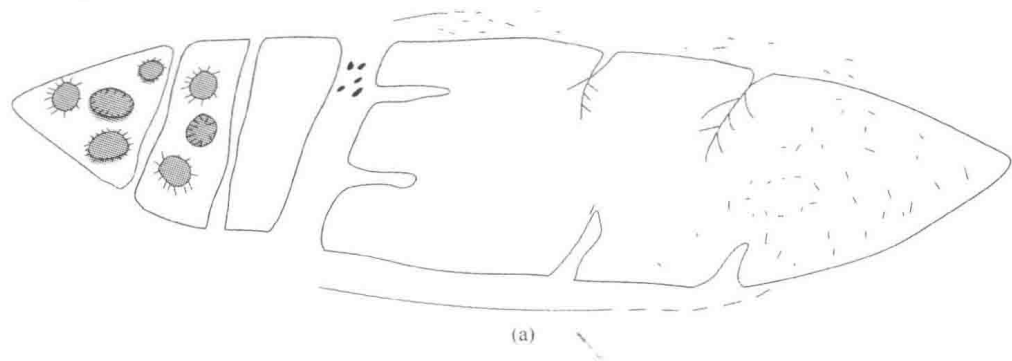
河流相沉积相对于其他沉积类型而言,是较为复杂且重要的沉积体。目前,对曲流河研究已较为成熟,而对于辫状河研究还要不断发展和完善。我国陆上河流发育众多,据不完全统计,我国境内有大小河流1820多个(图1-1),其中较大的河流有数百条,绝大多数为曲流河,其中,至少有38条河流发育典型的低坡降的辫状河段(我国东部居多),14组位于冲积扇区高坡降的辫状河群(主要分布在我国西部)(于兴河等,2004)。

从图1-1可以看出,我国水系流域分布与形态特征与我国东、西部自然地理,以及气候、水文地貌等差异较大有关,西部多山地、东部多平原地貌,是造成西部河流多辫、东部多曲的主控因素。曹耀华(1994)对长江枝江段的凤凰滩进行了详细观察和描述,以构型要素为指导思想,认为凤凰滩主要由纵向砾石坝、纵向砂质坝、斜列粉砂坝、横向河漫滩和弧形砂坝等5种构型要素组成,其中平行水流方向的纵向砂质坝是心滩的主体;孙永传等(1986)对河北省沽源境内的滦河现代辫状河沉积观察,认为其主要由中小型-近物源区为特征的季节性、间歇性河流组成,沉积物在上游主要以砾、砂成分为主,粒度粗,泥质夹层



图 1-1 我国境内主要水系示意图

较少,杂基含量偏高,成熟度低,而河流中上游河道展布宽,内部砂坝发育,垂向为辫状河沉积序列;钟建华和马在平(1998)对黄河三角洲胜利Ⅰ号心滩结构精细研究,认为胜利Ⅰ号心滩是由心滩、水道、水洼和风成沉积组成的复合体,其内部爬升层理发育(图 1-2);廖保方等(1998)对永定河的研究是一个经典案例,这条河垂向上从下至上包含了辫状河→曲流河→网状河一套完整的沉积序列,其中辫状河段又细分为两种类型的辫状河,最下是冲积扇区高坡降的辫状河,上覆的是平原区的低坡降的辫状河,二者在河流地貌形态、沉积物保存等方面存在明显的差别,河道的不固定,最终导致“泛连通体”(stacked connected sandbody)的形成和发育(图 1-3)。



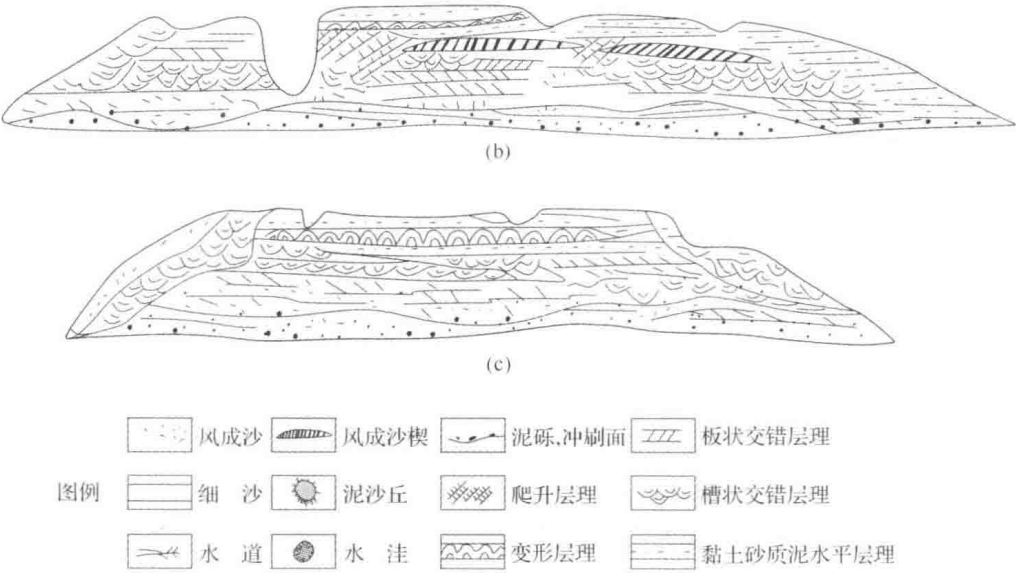


图 1-2 胜利 I 号心滩平面、纵横截面

(a) 1 号心滩平面图 (长 1200m); (b) 1 号心滩纵剖面图 (心滩高 1.8m); (c) 1 号心滩横剖面图 (长度放大 2.5 倍)

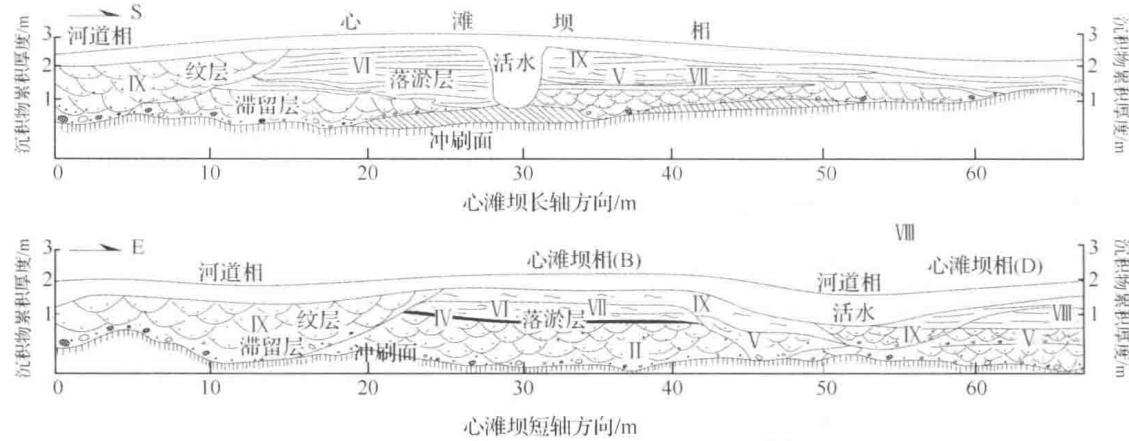


图 1-3 永定河 B 心滩剖面图(兴良铁路桥北)(据廖保方等,1998;略有修改)

在现代河流沉积案例中,很多河流都存在频繁的河型转换现象。于兴河等(1995)对内蒙古凉城县境内的岱海湖周围的辫状河和辫状河三角洲进行了系统研究,对物源、地形坡降、沉积物载荷方式及间歇性水流对沉积序列的影响进行了研究,总结了上述河流参数对河型转换的控制作用。倪晋仁等(2000)对现代冲积河流常见河型进行研究,认为河型转换在自然界中普遍存在,并归纳了不同河段河型转换的模式及其控制因素。在河型转换过程中,辫状河向曲流河转换的频率要比曲流河向辫状河转换的频率高,同时,倪晋仁等(2000)也指出,上下游与河型转换方式无关,只要符合辫状河与曲流河转换的条件,即可在河道的沉降量、坡降、洪水量级及气候等因素发生重大变化条件下,河型就有可能发生转化。

二、河流沉积露头研究

露头研究在储层精细描述中具有重要作用,尤其是利用研究区目的层露头,为建立逼近地下地质真实的地质概念模型提供了优越条件。另外,露头观察相对于地下具有如下几方面优势(穆龙新等,2000)。

(1) 直观性:通过观察露头,可以直接观察储层的类型及各种精细沉积特征,包括岩性、结构构造、岩性体接触关系、垂向岩性序列,以及单成因砂体规模、大小、横向展布等,因此,比用一维井眼的测井和分辨率较低的地震资料解释更具有直观性和可信性。

(2) 精确性:露头实质上是最直观、最具体的一手资料,尤其是研究区目的层的出露,在露头上,研究人员可以按自己的需要和目的在任意尺度上研究砂体的成因、岩性特征及储层的非均质性等,并使数据来源更准确、更可靠。

(3) 相对完整性:尽管露头难以完全展示单一沉积体的全貌,但相对于岩心观察而言,单一增生体的观察更具有完整性,如可以描述一个成因单砂体的大小、规模、形态与空间展布及与围岩接触关系,这在岩心上难以实现的,在露头上却可以很容易地解决,从而使人们能够真正从二维、三维空间角度去认识和了解储层。

(4) 便于地质知识库的建立:因为研究需要和研究层次的不同,可以根据实际情况设计采样密度,必要时可以进行实验室分析化验,建立各类成因储层的原型地质概念模型,从而完成地质知识库的建立,为储层构型及其他科学研究服务。

(5) 可检验性:利用野外露头测量的数据进行储层构型及储层建模等研究,其所建立的原型地质模型能够很方便地检验构型和模型的准确性,这是基于计算机地质统计学地质建模所不具备的优势。

总之,在储层精细表征及储层构型研究过程中,野外露头研究对储层预测方法的探索、检验及地质模型精度的提高具有重要作用。油田生产实践及许多研究证实,利用地面露头研究成果结合钻井资料、地震资料等预测油田地下相似沉积环境的储层分布规律更具有优势。

国内露头研究已陆续开展几十年了,但真正以储层地质建模,服务于油田开发为目的的露头研究,则始于20世纪80年代。国内一些地质工作者在野外地质调查和考察方面做了大量工作,如于兴河等(1992)对华北二叠系辫状河露头进行了详细观察,对辫状河沉积序列、岩性特征和水动力进行了系统分析和研究;薛培华(1991)对拒马河进行了详细野外调查,对曲流点坝的沉积特征进行了详细观察和描述,提出了点坝沉积模式;于兴河等(1995)详细观察了内蒙古岱海湖周边的各类陆相沉积体系,尤其与岸线垂直的辫状河控的三角洲分流河道砂体的成因进行了详细分析和描述;张昌民等(1996)在青海的油砂山进行了辫状河三角洲分流河道砂体野外露头调查,对出露的曲流河、辫状河和三角洲砂体露头进行了详细观察和描述,并对其沉积规模进行了表征;王建国等(1995)在阜新盆地进行辫状河和三角洲露头观察,并论证了其沉积规模及特征;单敬福等(2015e)对鄂尔多斯盆地东部二叠系盒8段辫状河露头进行了为期一个月的调研与现场取样,对辫状河的各构型要素进行了详细观察,包括古水流测量等工作,尤其重点观察和调研心滩与辫流水道的交切关系,并由此提出了“宽滩窄道”、心滩侧翼岩性韵律中小型“先反后正”、心滩尾部

(顺流前倾面)“先正后反”和心滩头部(迎水面)大型“先反后正”辫状河构型模式,为鄂尔多斯盆地辫状河地质原型模型的建立及砂体建筑解剖提供了重要理论依据。

科研工作者都对了解河流相储层的宏观和微观的构型空间展布规律做出了贡献。河流相砂体是由不同级别、不同层次的沉积界面所限定的沉积单元,这些具有不同规模、不同物性的单成因砂体在空间上具有多级式、多层次叠覆的结构特点。尽管国内科研工作者在野外观察也做了大量基础性工作,但研究成果与国外相比尚有较大差距,主要体现在与油田生产结合不够,或者由于研究手段单调或深入程度不够,相关研究成果都没得到进一步推广。鉴于此,我国也曾经在“九五”将露头储层和现代沉积研究列为国家项目,并由中国石油勘探开发研究院牵头,以露头为研究对象,开展全三维、大规模的露头描述,以及定量测量等研究,可以说是国内第一次对露头进行如此大规模的研究,试图发展一套适应我国陆相储层的预测方法和技术,为老油田剩余油挖潜和精细油藏描述提供依据和方法。最终形成一套能有效指导老油田储层、剩余油分布深入研究的理论、方法和技术。然而,露头研究与地下储层研究相比,由于受间接性、可用性、艰苦性和投资巨大等诸多不利因素的影响,这项工作的深入开展受到了一定程度的限制(穆龙新等,2000)。

三、地下河流相储层研究

传统的地下河流相储层研究,首先是进行岩心观察,了解岩性粗细及颗粒大小、韵律、层理结构及古生物类型,确立沉积环境发育模式。将建立的沉积模式与传统经典的沉积模式进行对比,结合测井相建立的相识别图版,应用到未取芯的勘探开发区块中,从而完成对研究区块沉积相的恢复和预测。随着地下河流沉积砂体的深入研究,李庆忠(1998)认为河流在平面迁移摆动过程中是不断通过改道将沉积物卸载在平原低洼地带,而盆地的沉降速率相对于河流沉积过程却是非常缓慢的。另外,曲流河道在平坦地貌条件下具有侧向迁移性,导致沉积物不停地被搬运、侵蚀和改造,从而造成埋藏地下河道缺乏完整性;赵翰卿等(1995)对大庆油田喇嘛甸至萨中地区的葡 I 2 油层研究时,应用精细地层对比方法准确识别出了古代河流砂体。然而,在应用该方法之前,由于喇嘛甸至萨中地区的葡 I 2 油层处于盆地内大型河流-三角洲沉积体系前缘末端,内部发育两种截然不同的河流砂体,用传统的地质方法始终难以准确识别,困扰了石油地质工作者很长时间。赵翰卿等(1995)利用长期积累的精细沉积相研究的经验,以及对河流沉积的深刻认识,充分利用大庆油田密井网资料的优势,打破传统观念的束缚,采用精细而又不受传统方法约束的新的描述方法,逐级对砂体建筑结构进行解剖,从而建立了精细的地质模型,更为客观地恢复和重建了地下各类河道砂体的本来面貌,为正确认识古代河流砂体成因及平面展布规律提供了可靠理论依据。就地下河流相储层研究而言,存在两个层次:①高精度地层对比(也包括油田的小层对比技术)横向等时性,垂向的高分辨,强调单成因砂体同期对比的精度,追求横向等时性对比的绝对等时性;②单成因沉积砂体的建筑结构及其空间展布样式,不仅强调地层对比横向的高精度与垂向的高分辨率,而且要定量明确各构型要素空间彼此接触关系及三维空间展布特征。对于后者,经过我国科研工作者的不懈努力,在借鉴国外成熟的储层构型技术和方法基础上,结合我国油田地质特点,逐步总结了一套地下河流相砂体储层构型表征技术。其发展历程及最新进展简述如下。

(一) 高分辨率小层河流相砂体对比

高分辨率层序地层学自 20 世纪 80 年代末期开始,被我国学者陆续引入国内,其在油田得到了广泛的应用,在地层对比中,徐怀大(1997)认为,这种对比方法不能简单地砂对砂、泥对泥,或简单地旋回对比,而是根据旋回所处的不同相带位置发育特点进行对比。邓宏文等(1996,1997,2000)和郑荣才等(1997)运用高分辨率层序地层学方法对油田高含水油田地层进行对比,建立高分辨率层序地层对比格架,避免了传统的砂对砂、泥对泥违反沉积学原理的错误对比,使对比结果更合理,更好地指导油田生产和挖潜。

(二) 地下储层构型技术进展

目前,地下储层构型技术依据采用数据资料的差异,大致可以分为两大类:一是地震资料,二是测录井资料,由此发展了地震资料解释方法和多井预测方法(吴胜和等,2012)。

1. 地震资料解释方法

地震资料具有测井资料所不具备的优势,即横向资料的连续性,而测井数据仅限于井筒周围,井间存在盲区,因此,地震资料是测井资料的有效补充,但地震资料也存在缺陷,即分辨率较低,具体是否能够识别出地下单砂体,目前还存在诸多争议。但自从基于地震资料的储层预测以来,Zeng 等(2007a,2007b)在 Posamentier 等(2003)和 Kolla 等(2007)地震地貌学研究基础上,采用三维地震数据切片等技术,实现了对砂体空间分布的预测。核心技术主要有 3 个内容,即 90° 相位转换技术、分频技术和地层切片技术,这类方法的理论基础是以承认地质体平面展布的规模远远大于垂向为前提的,剖面上垂向受分辨率限制不能识别的砂体,通过平面地层切片就可以识别出来。另外,这一方法的理论基石主要体现在如下几方面:①地层切片具有更高分辨率:理论上三维地震资料极限分辨率是 $1/4$ 波长(按现在一般地震资料品质而言,大约是 25m),而根据 Zeng 等(2007a)的切片技术理论,切片检测却可以检测到 $1/25$ 波长(大约 4m),如果地震资料分辨率更高,则单次检测的厚度间隔会更小,从而达到更高的平面砂体检测效率,从而提高了垂向砂体检测能力,间接实现了高分辨率;②分频技术提取有用的频率信息:地震波的子波是一个时变与空变的函数,并非单一频率,对于单一地震波而言,存在频带宽度,地震波的频率成分控制了地震反射同向轴的内部倾角和反射结构,因此,在频带宽度内,通过滤波器调整到有用的频率范围,从而达到准确定位和识别地质体目的;③零相位地震资料 90° 相位转换(这里的 90° 并非严格的 90° ,有可能是 60° 或其他角度,要根据实际地震的标定结果而定,很多地震资料并非标准的零相位);通过这样的转换,可以避免子波旁瓣效应所带来的地震资料解释陷阱,使地震子波的顶底更连续,方便解释,另外,也避免因同向轴不连续造成的解释误差。在进行相位转换时,所用的地震数据体还可以选择经过属性体、波阻抗反演体、频谱分析体或能够提高岩性解释精度的任何地震数据体,并不一定采用原始的保幅保频的 Segy 数据体。朱筱敏等(2013)也利用该方法在国内渤海湾盆地冀东油田进行了尝试,取得了不错的效果。

2. 多井预测方法

目前在储层构型过程中,应用最多的是多井预测方法,前提条件是在进行河流相储层构型过程中具备密井网资料,这种利用密井网资料进行储层构型,也是近十几年来才新兴发展起来的一项技术。多井预测方法最早应用在沉积相图的编制,并非严格意义上的储层构型,如采用砂地比井间插值法,结合单井-连井剖面相分析及其他分析结果,进行平面相图的编制,这种方法在 20 世纪 90 年代之前被广泛应用到冲积扇、河流、三角洲和湖泊相图的编制中。另一种方法是油田开发阶段比较常用的方法,如利用砂岩厚度插值和测井相结合的方法,这种方法在 20 世纪 60 年代提出,是当时还处于国际领先的油藏描述方法,对开发阶段注采关系的调整和井网优化具有重大指导意义。这种方法仍然没有体现储层构型理念,虽然砂体刻画较细,但仍属于微相层次,并没有揭示微相内各构型要素空间叠置关系。近十几年来,国内一些学者对开发井网条件下的砂体的建筑结构进行了精细解剖,并探索出了单层划分、构型单元侧向划界等方法(尹太举等,2002;赵翰卿,2002,赵翰卿等,2004;李阳等,2002;陈清华等,2004;于兴河等,2004;单敬福等,2015a,2015f,2015g)。吴胜和等(2012)在此基础上,提出了一套系统的井间构型模式预测思路和方法,即层次约束、模式拟合和多维互动。所谓层次约束,就是分层次对储层进行逐级构型解剖,一般采用由大到小,由粗到细研究思路;模式拟合,就是用油田生产动态资料校准构型模式边界,使构型结果既与井点吻合,有符合沉积学地质概念模式;多维互动,就是一维切二维,二维切三维的检验思路。所谓一维切二维,就是将一维井点资料置于二维剖面或平面中,进行交叉验证,同理将二维置于三维体中,反复交替验证最终达到构型结果无限逼近地下真实的目的。

融合上述研究思路和方法,国内学者在实际应用过程也进行了诸多尝试,如在曲流河构型过程中,在借鉴国外研究成果基础上,结合现代沉积调研(现场勘测,也可以是卫星照片),对各构型要素的展布规模采用地质统计学方法进行拟合,得到相关构型单元的估算经验公式。值得注意的是,对于曲流河而言,这些经验公式都是在曲率大于 1.7 条件下提出的。除了国外成熟的宽深比公式外,国内学者对曲流河的其他与构型有关的关键参数进行了估算,如岳大力(2006)通过卫星图片提取的多条现代河流的河宽与点坝跨度进行数据拟合,得到了估算点坝跨度的经验公式;马世忠等(2008)提出利用水深和侧积倾角估算侧积泥岩夹层展宽的经验公式;单敬福等(2015a)利用对子井揭示的泥质夹层倾角,结合空间结合关系,换算出了点坝侧积体间距的经验公式,这些公式的提取,为曲流河砂体的构型与定量表征提供了理论基础。国内学者近十几年来除了在曲流河方面取得了一定的进展外,辫状河也逐渐引起了国内学者的关注,并在储层构型方面进行了探索。辫状河相对曲流河而言,更复杂,类型更多,沉积模式多样化,导致储层构型的研究也大多停留在定性半定量化探索阶段。大部分学者的研究主要集中在心滩发育模式、心滩内部落淤层分布规律和心滩河道连通性等领域。目前,针对辫状河储层的研究也主要采用层次约束、模式拟合等研究方法,应用最多的就是垂向加积型近水平落淤层构型模式。马世忠等(2008)(转引蒋平等,2013)在对松花江某段 61 个心滩深入考察研究后认为,辫状河主要由河道和心滩组成,心滩类型可进一步细分为活动心滩(包括冲沟、滩脊和滩槽)、活动河

道(包括主河道、次河道、切割河道和早期河道)、废弃河道、废弃心滩和底部滞留沉积,此外,根据现代沉积学与地貌学特征,又进一步把心滩分为原地心滩、迁移心滩、边部心滩、切滩和废弃心滩,同时提出了心滩平缓前积模式和心滩陡倾角前积模式(图 1-4)。

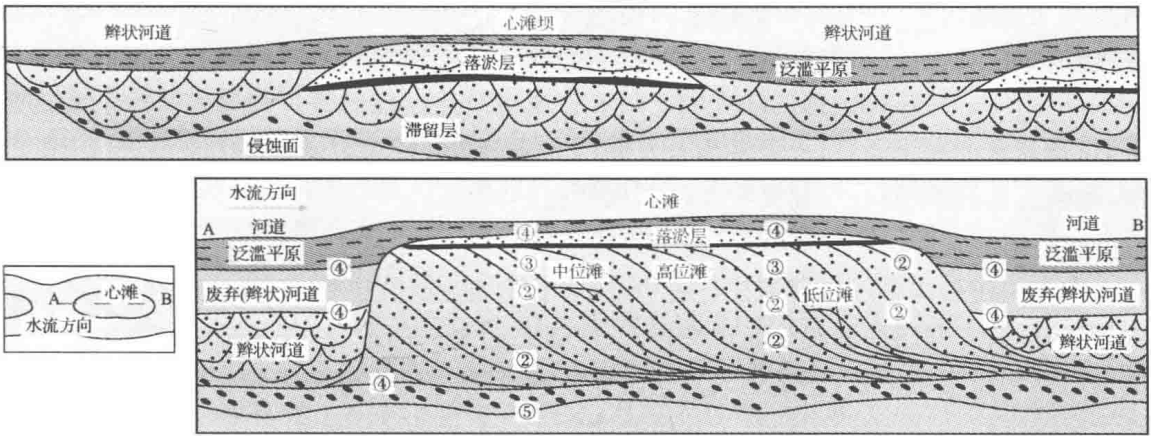


图 1-4 辫状河储层顺流和横切水流方向的构型模式(据马世忠,2008)
②为 2 级构型界面;③为 3 级构型界面;④为 4 级构型界面;⑤为 5 级构型界面

尽管辫状河长期受到国内学者的广泛关注,但辫状河河道和心滩的空间叠置关系、心滩内部落淤层展布范围及展布形式仍存在诸多疑问,仍需进一步深入研究和探索。单敬福等(2015g)通过对鄂尔多斯二叠系盒 8 段的辫状河露头进行仔细观察,提出了一套心滩河道叠置模式,该模式的提出尽管为辫状河的构型进行了初步尝试和有益的补充,但还需要实际资料验证其叠置模式的准确性。

3. 地下储层构型存在的问题与展望

近十几年来,尽管地下储层构型表征技术取得较大的进步,但是从其历史发展来看,目前仍处于起步阶段,依然有许多问题有待进一步深入研究,吴胜和等(2012)曾就此问题发表《地下储层构型表征:现状与展望》一文,强调目前储层构型存在 3 个问题,即储层构型模式认知、储层构型地震资料响应和多井模式拟合方法问题。笔者认为除了上述 3 个问题外,还有差异压实对储层构型影响、河流古水动力和古环境对河流砂体的制约等问题。因此,正确认知上述问题,是进一步提高储层构型准确预测的基础和前提。

1) 储层构型模式需进一步完善

目前储层构型模式的建立,人为因素依然占有很大的比重,尤其在多井资料拟合过程中,存在一些不确定因素,虽然构型模式在曲流河和辫状河建立过程中取得了长足进步,但就已有的模式尚难以满足地下精细构型表征的需要。

(1) 储层构型空展布规模。

许多古沉积环境的地下河流相储层构型都是参考现代沉积模式建立起来的,然而前者是沉积结果,后者是沉积过程,显然,两者有时候未必是一回事。另外,辫状河沉积砂体中,心滩和河道空间叠置关系和分布目前仍未完全明确,究竟哪种样式更符合地下真实,还要不断进行实践检验。