

陆相低渗透储层 形成机制与区域评价

LUXIANG DISHENTOU CHUCENG
XINGCHENG JIZHI YU QUYU PINGJIA

张 塞
赵霞飞 张百灵 等著
赖生华



地质出版社

陆相低渗透储层形成机制 与区域评价

赵霞飞 张 塞 张百灵 赖生华 李天明 侯启军 詹行礼 著
肖乾华 赵志超 石 和 黄思静 高纪清 游章隆

地 质 出 版 社

· 北 京

内 容 提 要

本书以沉积动力学为基础,从实证出发,分析不同大地构造环境中储层的沉积环境,阐明如何在层序地层格架内完成全盆地储层的沉积相制图;同时利用地震正反演预测砂体分布及物性变化。作者们多年坚持的这个研究路线也是国际上最近肯定的新趋向,并在石油勘探实践中取得了显著效果。围绕这个趋向,书中对裂谷沉积受构造控制的两种(东非和北美东部)模式、裂谷火山岩特征及其构造意义、泥沙动力学有关进展、构造背景和底形-坝形尺度上的沉积条件对储层质量的影响、成岩作用与孔隙演化、毛管压力曲线拟合与模糊数学评价储层都作了介绍。本书是课题组成员十余年来与油田协作研究陆相储层成果的总结与深化,包含许多发现与创见。本书可供从事石油勘探专业的生产、教学和科研人员,以及院校高年级大学生的参考。

图书在版编目(CIP)数据

陆相低渗透储层形成机制与区域评价/赵霞飞等著.-北京:地质出版社,2002.12
ISBN 7-116-03733-0

I. 陆… II. 赵… III. ①陆相油气田-低渗透油层-形成-研究②陆相油气田-低渗透油层-评价
IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 091799 号

责任编辑:陈军中 黎玉战

责任校对:王素荣

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路 31 号,100083

电 话:(010) 82324508(邮购部);(010) 82324574(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京印刷学院实习工厂

开 本:787mm×1092mm^{1/16}

印 张:14.75

字 数:330千字

印 数:1—1000册

版 次:2002年12月北京第一版·第一次印刷

定 价:28.00元

ISBN 7-116-03733-0/P·2329

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

前 言

这本书是我们多年来研究国内几个含油层系成果的总结和深化。

回顾近十余年来的科研经历,有些事物在脑海中的印象特别生动和深刻。天山北麓中生界壮观且有韵律的三角洲层序,特色鲜明的曲流河和低弯度河砂体,都令人对大自然的创造,赞美不已;陆家堡拗陷岩芯中纹理精细的深湖相复理石以及宋家洼陷地下的浪控三角洲整齐规则的砂、砾岩旋回也并不逊色。但是,油田研究中经常见到的还是那些取芯不全的、低成熟度砂、砾岩。要辨认和整理这些零星素材,并形成沉积相模式,是颇不容易而且有点烦人的事。但几经困惑,往往会“柳暗花明又一村”,如是有信心确定对象属于什么沉积环境(相)。有时,面对的现象符合前人的理论模式,完全是这回事,连细节都基本一致,如是你有了真实把握的感觉,觉得这就是地学的准确,是可信的,即便还没有建立起数学表达式。有的情况是前人没涉足过的,你会达到新的“顿悟”,发现新的过程-产物(process-products)关系或新的沉积系统。在石油工业中,与其他场合不同,地质结论和预测很快就会受到钻井的检验。如果储层的预测被钻井证实,出现了新的勘探局面,你心底的宽慰和快乐也是难以用言辞表达的。

所以,本书特别重视第一性资料——露头 and 岩芯的研究,以之作为解释地下资料的基础。这种基础研究,又基于泥沙(沉积)动力学原理和现代沉积的实例研究(Case studies),这是一种物理逼近。沉积学的另一方兴未艾的途径是数值模拟,未包括在本书中。

储层三维分布的圈定,自然涉及对录井和地震勘探资料的把握。现代技术已经发展到这样一种高度,即这些资料对于有经验的研究者来说,几乎都具有真实地质剖面的直观效果。这给人们认识地下情况带来很大便利(如构造和地震地层学解释),不过也容易使人完全依靠新技术方法,反而忽视地质体的本质。这里有一个如何看待基础地质和新技术方法之间关系的问题。例如,运用地震切片、瞬时振幅、瞬时频率等方法已可准确显示地下古河道带,也许不久的将来可以实现直接找油,那么还需要研究储层地质吗?回答是:“需要”。因为认识地下储层和油气藏,不但涉及“where”,也需要回答“what”和“why”。这不但是一个自然哲学问题,更是现实的需要。

本书的基础是陆相储层形成的沉积学和成岩作用机制,而书的主线则是储层评价。全书12章包含了我们的发现与创新、研究成果与工作经验,以至有所悟而发的评论和建议,目的只有一个:为我国陆相盆地的勘探和陆相油气田的开发,为陆相低渗透储层的科学研究抛砖引玉,贡献菲薄之力。

本书涉及众多的作者与参加者。作者分布情况如下:

第二章:赵霞飞、詹行礼。

第四章:赵霞飞、石 和、赖生华、侯启军。

第六章:赵霞飞、张 塞、李天明、肖乾华。

第八章:詹行礼、赵霞飞、黄思静。

第九章:高纪清、张百灵。

第十章：赵志超。

第十一章：赵霞飞、高纪清、张百灵、游章隆。

其他章节的写作以及全书的编纂审核，皆由赵霞飞完成。

原来的研究工作中，有关油田的科技人员徐宏、苏亚荣、唐忠华、孙显义、宁良、王公肃、刘立等同志参加了研究工作。参加工作的还有成都理工学院的教师和研究生们：何开华、赵永胜、李录明、邓启予、楼章华、罗运先、李秀华、范育才、高新生、张林、蒲勇、谭荣、黄芸、许利群、袁琪、章熙华。

我们要感谢大庆、辽河、新疆和华北石油管理局的领导同志：丁贵明、肖德铭、陈义贤、李宗飞、李立诚、周德明和杜金虎等教授级高工，以及油田有关的各级领导和同志们，是他们的大力支持才实现了厂校科研协作，使我们有了良好科研条件。我们同时要感谢原成都理工学院贺振华院长、油气藏地质及开发工程国家重点实验室刘树根主任等领导，他们给了我们支持和鼓励。本书初稿曾由国土资源部委托成都理工学院组织评审会予以鉴定。刘宝珺院士和罗平亚院士，王宓君和郭正吾教授级高工，方少仙、侯方浩和邱东洲教授等给本书提出了宝贵意见，使我们获益匪浅。成都理工大学王成善校长、黄润秋副校长、能源学院张哨喃院长、赵锡奎、沈忠民副院长给了我们许多帮助，我们在此一并致谢。

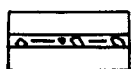
第一作者尤其要感谢他的夫人王淑惠，是她的鼓励和生活上的照顾，才使本书得以顺利完成。

赵霞飞

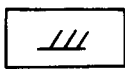
于成都理工大学能源学院、油气藏
地质及开发工程国家重点实验室

2002年11月

图 例



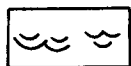
碎屑流



大型板状
交错层



小型沙纹层理



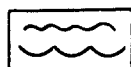
大、小型槽状
交错层



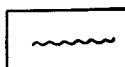
变形构造



包卷层理



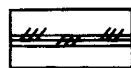
波状层理、
浪成构造



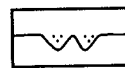
不整合面



叠锥构造



油页岩



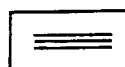
冲刷面



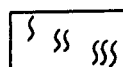
mm 级纹层



炭屑



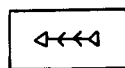
厘米级纹层



生物扰动



叶肢介



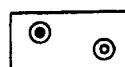
鱼化石



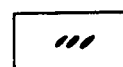
钙质



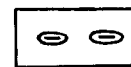
泥质白云岩



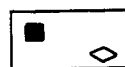
鲕核形石



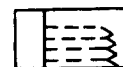
砾石叠复



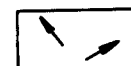
泥砾



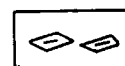
黄铁矿
菱铁矿



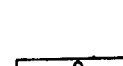
薄层浊积岩



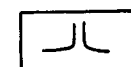
正向、反向
递变



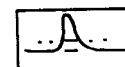
泥岩撕裂屑



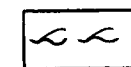
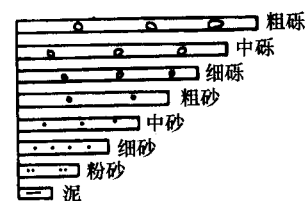
泥



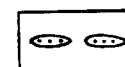
泄水构造



火焰构造



脉状层理



透镜状层理

目 录

前 言

图 例

1 绪论	(1)
1.1 低渗透储层现实与中国石油地质特色	(1)
1.2 存在的问题与求解的理论基础	(3)
1.3 相关学科进展	(5)
1.4 本书目的、内容与工作哲学	(6)
2 盆地及其充填物的大地构造特征	(7)
2.1 沉积盆地的动力学分类	(7)
2.2 构造沉降与沉积充填的时间关系	(13)
2.3 裂谷沉积的构造控制模式	(14)
2.4 火山岩特征及其构造意义	(19)
2.5 储层岩石学与粒度分布	(24)
3 沉积动力学有关进展	(34)
3.1 底形的水槽实验成果	(34)
3.2 硅质碎屑沉积中常见底形(交错层)的特征	(36)
3.3 顺直与弯曲河段的三维水流、坝形	(40)
3.4 浊流沉积构造序列	(45)
4 低渗透储层的沉积环境与相(露头 and 岩芯实证)	(47)
4.1 裂谷拉张期沉积	(47)
4.2 热沉降期(后裂谷期)沉积	(67)
4.3 前陆盆地沉积	(95)
5 等时地层格架与层序地层模式	(104)
5.1 地层记录中的事件与旋回	(104)
5.2 地层单元划分的两种途径	(105)
5.3 建立层序地层格架	(106)
5.4 层序地层模式、体系域特征	(110)
6 地震地层学研究 with 储层平面制图	(115)
6.1 测线质量与分辨率	(115)
6.2 地震层序划分与地震地质层序标定	(117)
6.3 地质地震模型	(120)
6.4 地震相类型	(122)
6.5 典型地震测线的沉积相解释	(129)
6.6 地震相图、沉积相图与沉积系统	(132)

7	埋藏前构造、沉积条件对储层质量的影响	(146)
7.1	大地构造背景的意义	(146)
7.2	沉积条件在底形尺度上对储层孔隙度、渗透率的影响	(146)
7.3	河成储层坝形尺度上的物性与非均质性	(149)
8	埋藏后的成岩作用与孔隙演化	(158)
8.1	砂岩成岩作用一般原理	(158)
8.2	成岩作用主要类型	(160)
8.3	成岩阶段与成岩系列	(167)
8.4	孔隙类型与孔隙演化	(171)
9	陆相储层物性与孔隙结构研究	(175)
9.1	陆相储层的物性特征	(175)
9.2	储层孔隙结构研究与毛管压力曲线拟合	(180)
10	利用地震正反演预测储层	(187)
10.1	储层地震模拟技术应用的思路和方法	(187)
10.2	钻井和测井资料的统计与分析	(187)
10.3	用地震波阻抗反演预测储层特征	(191)
10.4	利用地震正演研究特殊储集体的地震特征	(201)
11	储层的油气远景评价	(206)
11.1	油气层微相及其体系域位置	(206)
11.2	油气藏类型	(207)
11.3	区域储层评价与勘探建议	(214)
12	总结与推论	(219)
12.1	总结	(219)
12.2	推论	(223)
	参考文献	(225)
	参考资料	(227)

1 绪论

1.1 低渗透储层现实与中国石油地质特色

我国石油的储量和产量，绝大部分赋存于和出自于陆相地层。陆相储层以其沉积和成岩过程的特殊性而显著不同于海相储层。以储层最直观而又易获得的评估参数——孔隙度、渗透率而言，除一些盆地中埋藏较浅的砂岩具较高孔隙度和渗透率数值（如大庆油田莎-葡-高油层、渤海湾地区油田的沙河街组、玉门油田 L 油层）以外，绝大多数盆地中储层这两个数值，尤其渗透率值偏低。参见表 1-1。

表 1-1 若干陆相储层的物性数据

盆地、地区		孔隙度/%			渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$			资料来源
		最小	最大	一般	最小	最大	一般	
四川盆地西部	T ₃	0.05	15.7	4	<0.001	123	<0.001	张哨楠 (1994)
准噶尔盆地西北缘	T ₂	11	22	13~15	5.2	386		邱东洲等 (1994)
准噶尔盆地彩南油田	J	14	22		5.4	128		赵霞飞等 (1997)
东濮凹陷	E _s	4	33	21	1	2799	157	薛叔浩等 (1991)
辽河盆地西部凹陷	E _s	10	31	14~25	2	3145	99~700	李应暹等 (1994)
陆西凹陷	J ₃	3.5	36	10~26	<1	8528	0.9~19	赵霞飞等 (1993)
陆东洼陷	J ₃	0.8	33	15~25	<1	1497	1.9~58	
宋家洼陷	J ₃	2.7	32	6~15	0	319	3~9	赵霞飞等 (1995)
辽河西部凹陷冷家油田	E _s	1	38.7	11~21	<1	4512	1~1000	赵霞飞等 (1999)
松辽盆地三肇凹陷	K ₁	5	30	10~15	0.001	~1000	0.1~1	赵霞飞等 (1990)

“低渗透储层”是一个相对的，松散的概念。它既指渗透率较低的孔隙性储层，也包括基质致密的裂缝性储层（如并非罕见的裂缝性泥岩层）。这些储层一般渗透率很低，但也可以具有中、高渗透率的地带。这个术语在一定意义上也与经济技术水平有关，有的储层一时不具工业价值，以后技术进步可以使其成为开发对象。

本书所讨论的，只限于孔隙性陆相储层。

表 1-1 中各地区数据的代表性不一，但都包含了大量样品分析的结果，仍旧可以给我们一个客观事实。可见四川盆地的上三叠统须家河组，具低孔隙度，且一般属于致密层。除准噶尔盆地两个地区数据不全外，宋家洼陷上侏罗统属低一中孔隙度及低渗透层外，表中其他各地区的储层都属中等孔隙度，但渗透率变化颇大，一般属特低渗透、低渗透和中渗透层。这里划分的界限是：低渗透层 $(0.1 \sim 1.0) \times 10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，特低渗透层为 $(1.0 \sim$

$0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 致密层为小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。按这个界限, 则今后国内油田勘探开发的对象将主要是低渗透和特低渗透储层, 这是回避不了的现实。

天然气工业同样面临着低渗透储层情况。20 世纪后半叶, 天然气的开发利用日益为各国所重视; 除常规气藏外, 尤其重视对非常规气藏的研究和开发。这类气藏包括致密砂岩气 (含深盆气)、页岩气、煤层气、水溶气、深部来源气、天然气水合物和二氧化碳气等。

致密含气砂岩通常指孔隙度小于 10%, 渗透率小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 含气饱和度大于 40% 的储层。这类气藏在很多国家都有发现, 而美国和加拿大在勘探开发方面处于技术领先的地位。我国也已在许多盆地中发现了这类气藏, 且对川西坳陷、鄂尔多斯盆地和东濮坳陷的致密砂岩气藏作了较深入研究。

东濮坳陷是位于渤海湾盆地南缘的一个新生代断陷盆地, 气藏分布于斜坡上, 圈闭的形成与鼻状背斜和断裂有关, 盖层为膏盐或厚泥岩。储层地下孔隙度为 10% ~ 5% 甚至更小, 渗透率为 $(0.1 \sim 0.01) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 或更小。

鄂尔多斯盆地为克拉通盆地。燕山运动以来, 其西缘由于大规模推覆冲断, 形成前陆盆地, 盆地主体为西倾的大单斜层。20 世纪末, 在榆林、乌审旗一带探明了大型深盆气 (致密砂岩) 气田。储层孔隙度为 5% ~ 10%, 渗透率一般为 $0.4 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 原生孔隙不发育, 主要为次生孔。

川西坳陷是晚三叠世形成的中生代前陆盆地, 近 20 年来在开发 T_3 —J 致密砂岩油气藏中取得了突破和成功。储层平均孔隙度为 3.4% ~ 16.2%, 基质渗透率为 $(0.007 \sim 5.380) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

国内外的致密砂岩气藏具有一些共同特征: 异常 (高或低的) 流体压力、重力分异不明显 (往往气水关系倒置) 等。它们主要为河流沉积, 包括三角洲分流河道和盆底的沉积物重力流, 储层砂岩往往呈透镜状, 连续性很差。可见, 对于方兴未艾的非常规天然气藏的勘探开发, 陆相储层成因、演化的基础研究也是有根本意义的。

低渗透是一种表象, 反映这些岩层也许沉积时的原始孔隙度就低, 也许在成岩过程中, 孔隙被压缩和堵塞了。

不过, 低渗透储层, 仍旧是油气产层, 而且在低渗透背景中, 还有中等以至高渗透的地带 (表 1-1), 这就是我国目前年产 1.5 亿 t 以上原油的根据。

低渗透储层既是难点, 又是中国石油地质的特色。“陆相生油”以及由此而来的勘探、开发科学和技术, 自然为我之所长, 为我之特色。发现大庆油田后的 40 年来, 中国科技人员和职工走出了自己的路, 勘探开发了成百的陆相中低渗透油气田, 也总结出了较系统的理论和规律。石油地质方面, 各油区、油田近来出版了一大批专著, 就是很好的说明。

陆相石油地质学是正在发展的学科, 认识没有止境, 它总在不断地探索和前进。“陆相低渗透储层形成机制和区域评价”, 则属于我国科技创新体系的一个子系统, 其内容浩大, 其义理深远, 它所提出的任务对于本书似乎有些过重。

不过, 千里之行, 始于足下。我们之所以有信心, 一是几十年来, 坚持从露头 and 岩芯观察作起, 研究了国内多个盆地和储层, 有所创新; 二是基本能及时掌握国际上有关学科的进展。在本书中, 我们准备由特定储层的个性出发, 总结出陆相低渗透储层的一些规律性认识。

1.2 存在的问题与求解的理论基础

1.2.1 目前存在的问题

面对中国陆相盆地的个性，我们如何去认识、去掌握它，这是中国油气勘探开发中的不变的主题。勘探开发中的困难，往往是对地下“情况不明”。从我们多年来国内许多油田工作的经验看，最大的不明是不了解地下的复杂储层网络；也就是说，对储层的成因、特性和分布所知有限。这涉及沉积学基础：水（河）道类型、砂体构型与结构、水（河）道间特征、湖泊动力学及沉积物分带，以及基准面变化的影响等。基础方面不清楚，必然使包含丰富储层信息的录井、地震资料难以有效利用，也就无法在平面上追踪储层。随着3D地震资料的出现，地震剖面显示了更丰富的地下地质信息，一般的情况是构造图作得更精细了，但沉积学解释较少进展。这与沉积学研究更多地依靠对实证的观察、分析和归纳，并需具一定的工作经验（如对现代沉积的经验）有关。如何使我们的认识更加接近于地下的客观实际，自然要企望于技术进步（如提高地震分辨率，发展直接找油技术），但同时也需要改善我们对现有大量信息的分析利用水平，改善我们的思维和工作方式；后者也许是更重要的现实途径。

1.2.2 储层质量的控制因素

是什么因素控制盆地中油气储层的孔隙度、渗透率、非均质性和开发特征，从而决定储层的产能和效率？

这个问题要从储层的形成机制来分析。我们所面对的储层之所以具有今日的面貌，乃是“先天”和“后天”多种因素相互作用的结果。“先天”指沉积物被埋藏以前的经历，“后天”则指埋藏以后的成岩过程。

陆相储层形成的示意性框图，见图 1-1。

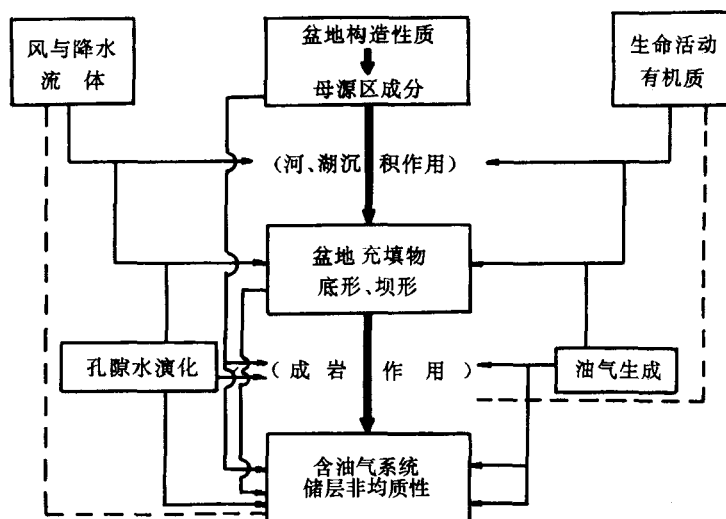


图 1-1 陆相储层形成的示意框图

由该图可见,影响储层质量的先天因素有大地构造条件、母岩成分和沉积作用,其后天因素有随埋深增加(t , p 增大)而演进的成岩作用。对各种因素所起作用的评估,是相对的,不可绝对化。

大体可以说,大地构造条件(tectonics)具有Ⅰ级因素的性质。具体分析一个盆地某一储层,沉积过程往往是主要控制因素,而且影响深远,许多经历强烈成岩变化的储层,其质量仍受原始沉积相控制。当储层达到某一特定埋深,原生孔隙大大减少以后,出现次出孔隙带,这时溶蚀成岩作用自然就是主要控制因素了。

1.2.3 解题的理论基础

由上所述,可见陆相低渗透(硅质碎屑)储层研究与区域评价的理论基础,包括沉积学及相关的层序地层学,也包括成岩作用原理。

当代地学中,沉积学研究极为活跃,在能源、矿产资源及环境地质等方面均已显示其强大的生命力。这个学科有两个重要方面或支柱:(a)现代沉积学。大规模的海洋地质考察促使了板块学说的诞生,而陆上湖泊、河流的沉积学研究在古气候、盆地分析、人类文明史研究中显示出其重要意义。例如,我们关于浊流的知识源于对一些瑞士湖泊沉积的研究;通过东非裂谷湖的调查,我们今日对断陷盆地才有了比较确切的了解。(b)动力沉积学。它是20世纪60~70年代发展起来的,研究泥沙质点起动、搬运和堆积的物理规律及其地质应用,是水力学中泥沙动力学、地貌学和地质学结合而产生的一门边缘学科。

沉积作用既然是一种物理现象,它自然遵循一定的物理规律。因此,国外在20世纪60年代初期,就开始利用水槽研究底形以解释沉积构造,并且获得很大成功。同时出版了一批重要著作,如SEPM(1969)的《原生沉积构造的水力学解释》、Middleton和Southard(1978)的《沉积动力学》、Allen(1982)的《沉积构造—特征与物理基础》(上、下两卷)等等。

国内地学界这方面起步较晚。20世纪80年代初原长春地质学院建立第一个实验水槽。同时,成都地质学院开设《动力沉积学》课程,并出版专著《动力沉积学与陆相沉积》(1992,科学出版社)。此外,中国石油天然气工业总公司在江汉石油学院建立大型水槽水盆实验室,准备从物理实验和数值模拟出发,研究我国复杂的陆相储层。

动力沉积学在储层研究中的意义,可举出如下几方面。

(1)解释原生沉积构造。在水槽中随着流速增加,床沙总是顺序地产生出一系列底形。底形迁移就形成常见的沉积构造。现已清楚,古河道砂体中的沉积构造序列就是这种顺序的逆演。现在的交错层理论已能将交错层特征与其生成时的底形运动联系起来,重建古代大型复合砂坝。一些模拟实验已获得意想不到的结果,并用来解释古代河谷变化。

(2)古代水文地貌条件的重塑。如用一套经验公式重塑古河流,用浪波痕特征恢复古代波浪条件。

(3)研究储层非均质性。非均质性是由储层的多级(曲流河砂体达6级)原生构造(构型)决定的。只有了解不同类型河流、湖泊的水动力特征及其沉积响应,才能认识地下的储层网络。这方面的研究方兴未艾。

十余年来,我们这个课题组在国内许多含油区工作过,作过自然科学基金的基础性项目和国际合作项目,但大部分课题还是来自油田。这就直接面对了勘探的现实:地下油层怎样分布的?具何种特征?质量如何?应往何处钻井?我们正是依靠了动力沉积学原理和现代沉积(苏黎世湖、滇池、星云湖等)研究经验,从露头 and 岩芯观察做起,直到地震解

释与成图,不畏艰难,尽心竭力,终于在各个油区取得了成功,往往有新的突破和发现,取得了较大的社会经济效果。

其次为层序地层学,这是 20 世纪 80 年代以来地学的革命性进展,在被动大陆边缘等海相盆地获得极大成功。尽管陆相盆地中控制层序发育的因素与海相盆地有所不同,层序地层学原理还是被用来分析陆相地层,并得到普遍的认可。划分陆相沉积不同级别的层序和体系域,建立等时地层格架,已经成为油气勘探开发工作的必需和前提。我们在许多盆地的储层研究中,都是首先建立层序地层框架,以之作为储层质量研究、储层制图和远景预测的基础,取得了良好效果。

第三方面的理论基础是成岩作用原理。我们每一次油田的研究中,都包含成岩作用方面。由于油田已积累了大量而系统的储层成分、物性分析数据,我们作了较深入研究,所以从火山岩分析、成岩过程,以至粘土矿物等方面,都取得较好成果。

1.3 相关学科进展

当前,沉积学和盆地研究都取得了长足的进步。显著方面略举如下。

(1) 层序地层学。沉积层序是“顶、底以不整合及其可对比的整合面为界的相对统一的,成因上有联系的地层序列”(Mitchum 等, 1977)。这是一种基本层序,其体系域由 4 级准层序组构成。以后,认出了三级复合层序(Mitchum 和 Van Wagoner, 1990, 1991)。它由叠置的 4 级简单层序构成。由各级准层序组和层序组的叠积方式,可解析盆地的构造运动幕。同时,对不同构造环境盆地,得出了更可信的层序地层模式,如对墨西哥湾晚新生代的研究(Mitchum 等, 1994)就提供了分析断陷盆地的很好参考。因此,层序地层学已成功地用于地下资料解释,并大大地改善了对岩相几何形态和储层构型的认识(Aitken 和 Howell, 1996)。陆相层序多为哑层,地层对比往往是难以解决的问题。层序界面(SB)和各级洪泛面(尤其最大洪泛面, mfs)的识别,使这个问题迎刃而解。不同级别层序、体系域、准层序组的等时格架的建立,为盆地群、盆地以至油藏的研究打下了基础。高分辨率层序地层学已进入到石油工业的日常应用中。

(2) 20 世纪后期发展起来的河流沉积学、湖泊沉积学一方面仍在积累现代沉积研究资料,一方面也在深化。Mial (1985、1995)对河流沉积多级界面和各种构型要素的认识,以及由此概括出来的河流沉积类型,对研究古代河流无疑有重要意义。但河成储层要求更深入的认识,现在,在河成储层描述(如 North 和 Prosser, 1993),以及从河流动力学出发解释河流沉积与地层(如 Carling 和 Dawson, 1996)方面,都在取得进展。湖泊沉积日益受到重视,20 世纪 80 年代对东非裂谷湖的研究(如 Rosendahl, 1987)已成为半地堑构造和沉积分析的成功实例。随着国际地科联 IGCP-219、324 项目的完成, Gierlowski-Kordesch 和 Kelts 发表他们主编的两卷湖泊沉积专著:《Global geological record of lake basins》(Cambridge University Press, 1994)和《Lake Basins Through Space And Time》(AAPG Studies in Geology # 46, 2001),无疑将有力推动湖成储层的研究,使这一学科方向具有更广阔视野和更坚实基础。海洋和湖泊水下扇系统的研究取得了长足进展。其代表是 Galloway (1998)对斜坡和坡底沉积系统的总结。

(3) 沉积学、层序地层学的进步加上 3D 地震和先进计算机处理,使储层研究越出了

概念性模式阶段,能在盆地规模上详细制图。这是承认客体复杂性的更现实的途径,因而也更符合勘探需要 (Galloway, 1998)。

(4) 沉积学家开始从复杂的储层构型解释储层的非均质性。事实上,储层具有多个等级的非均质性,这是通过样品分析资料 (ϕ 、 k) 所无法认识的。成功的例子有对点砂坝 (Jordan 和 Pryor, 1992)、辫状河三角洲 (Hamlin, 1996)、低弯度河等类储层的非均质性的研究。沿着这一思路发展下去,将建立起真正符合地质条件的油藏工程学,从而大大提高油藏采收率。

(5) 为适应地学量化要求和油气勘探的实际需要,沉积学中最近出现了研究地质体规模 (尺寸) 的趋势。如 Reynolds (1999) 对近海砂岩体尺寸, Bridge 和 Tye (1998) 关于用录井资料和岩芯求解古代河道坝、河道和河道带尺度的研究,以及 Allen (1998) 关于沉积补给量与冲积扇面积和推进距离关系的研究,都是很好的例子。这个趋势在石油地质方面十分重要。

(6) 沉积过程的物理模拟和数值模拟。两个方面都有许多进展。物理模拟方面,国内有 CNPC 沉积模拟重点实验室对冲积扇、河流与三角洲的模拟 (张春生, 2001), 国外有层序发育的水槽实验研究 (Milana, 1998), 等等。数值模拟更是方兴未艾,如雨后春笋,成为研究的热点。

1.4 本书目的、内容与工作哲学

编写本书的目的:概括和提高我们近十余年来的研究成果,阐明不同类型盆地中陆相储层的形成机制、特征和分布规律,同时总结这种低渗透储层的区域评价方法。

本书内容涉及我们深入研究过的 6 个含油气层系。举例时要按这些层系沉积时盆地的构造性质,予以分组。很多盆地都属于裂陷型盆地,即经历过前期断陷阶段 (裂谷伸展期) 和后期拗陷阶段 (后裂谷热沉降期),两期的沉积建造不同,自然分别叙述。书中涉及三类沉积及所包括的地层如下。

(1) 裂谷伸展期含油气层系:开鲁盆地陆家堡拗陷上侏罗统、辽河盆地宋家洼陷上侏罗统、辽河盆地西部凹陷中段沙河街组三段和二连盆地洪浩尔舒特凹陷下白垩统。

(2) 热沉降期含油气层系:松辽盆地东北部白垩系泉头组三、四段。

(3) 前陆盆地含油气层系:准噶尔盆地侏罗系。

还有一个方法论 (methodology) 或工作哲学的问题。地质学属于实证科学,一切认识都来自对客体的如实反映和严谨分析,而不是来自书本上的或主观推测的模式。比如说,根据盆地的大地构造类型,你不能确定一个具体盆地的储层分布;根据现有的扇三角洲模式,你不可能预见所面对盆地的粗粒三角洲储层成因。这是一个共性与个性,主观与客观,理论与实践的矛盾统一问题。沉积相分析必需立足于实证,露头、岩芯观测是第一位的。此外,也需要借助测井曲线,弥补岩芯零星不全的缺陷。20 多年来,我们在许多盆地研究各种成因的含油层系,不断地有发现和突破,原因就在于坚持作好露头和 (或) 岩芯的研究,把基点立在实证上。

认识总是由已知到未知,由局部到整体。有了井点的认识,然后发展到线——地震测线的沉积学解释,然后再到面——在测井网上作地震地层学制图以及用地震正反演预测储层。

2 盆地及其充填物的大地构造特征

2.1 沉积盆地的动力学分类

Allen, P. A. 和 Allen, J. R. (1990) 的专著《盆地分析：原理与应用》首次将沉积盆地作为实体进行地球动力学的综合研究，从而把盆地分析带入一个新境界。他们将盆地分成三类：

- 由岩石圈伸展形成的盆地
- 岩石圈挠曲作用形成的盆地
- 与走滑变形或巨型剪切有关的盆地

(a) 岩石圈伸展形成的盆地，由大陆岩石圈拉张（变薄）形成的盆地具有一定演化顺序。早期为克拉通内裂谷，伴有地壳穹状隆起，如今日东非裂谷。随着拉张作用的进行，盆地可经历年青大洋阶段（如今日红海），进化成大洋扩张中心（大西洋），也可能停止发育，形成夭折裂谷或坳拉槽（aulacogen）。当盆地生成真正的大洋壳底板以及大陆边缘长期漂离大洋扩张中心，就形成被动大陆边缘盆地；这时沉降机制以热收缩为主，断裂作用不象裂谷阶段那样广泛，盆地的变形主要是下凹。

图 2-1 表示坳陷、裂谷、坳拉槽和被动大陆边缘的关系。坳陷也是岩石圈拉张变薄所引起，只是张性偏应力较小，不足以生成大型张性断层。坳陷既没有经历裂谷发育阶段，又没有经历大洋扩张中心形成的阶段，所以是发育不完全的大陆盆地。图中 β 为拉张系数。

(b) 岩石圈挠曲作用形成的盆地有两类：大洋岩石圈接近俯冲带处由挠曲形成的深海沟，以及大陆碰撞带中岩石圈挠曲产生的前陆盆地。挠曲作用及板块变形特征，已经用于弱流体之上的弹性薄板受力变形模式予以研究，建立了综合挠曲公式（McKenzie, 1978）。对于不同的动力学环境，只需相应改变其边界条件，就可以求解。

(c) 与走滑变形有关的盆地，其形成机制比较复杂。每一转换边界涉及一定的拉张（扭张作用）和一定的挤压（扭压作用）。走滑带中的片段可能经历明显水平旋转，而断裂活动将产生一些小盆地，包括走滑拉分盆地和走滑挤压挠曲盆地。

按照这一分类，本书涉及的储层层系位于四个盆地中，除准噶尔盆地二叠系、三叠系和侏罗系属（b）类的前陆盆地外，其他都属（a）类。它们的主要地质结构特征如下。

A. 准噶尔盆地。对准噶尔盆地的大地构造性质，仍有争议。基于日益丰富的深层地质、地球物理资料，可以认为该盆地具有前寒武纪陆核，其上为早古生代的地台型沉积。之后，这个大陆板块核心破裂、解体，大部分转变成弧后盆地。纳缪尔期（ C_1^q ）之末，弧后盆地闭合和褶皱。威斯特伐利亚期（ C_2^q ）以后，盆地开始形成。Coleman (1989) 称之为合成地体。在整个中生代，它属于山间前陆盆地，则是普遍一致的看法。

如图 2-2 所示，侏罗纪时盆地南缘沿天山埋深最大，向北逐渐抬升，为天山的前陆盆地。

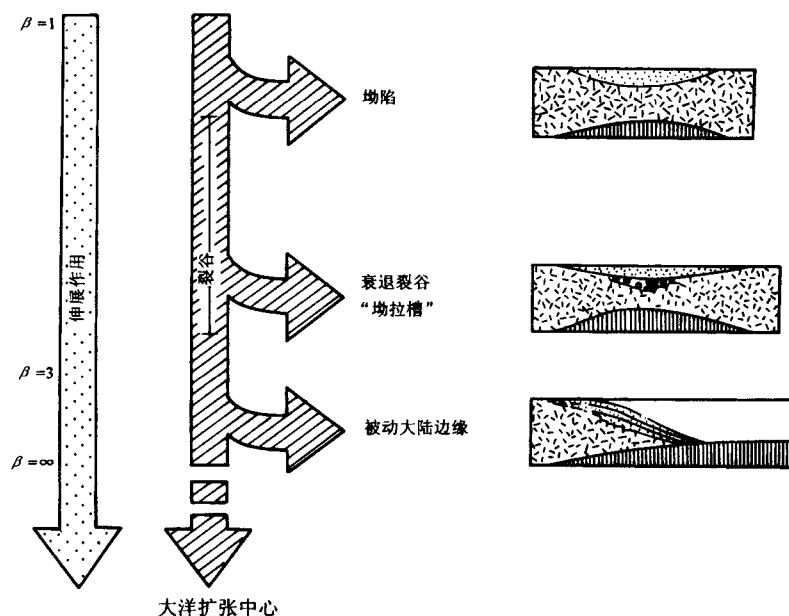


图 2-1 坳陷、裂谷、坳拉槽与被动大陆边缘之间的关系
(Allen and Allen, 1990)

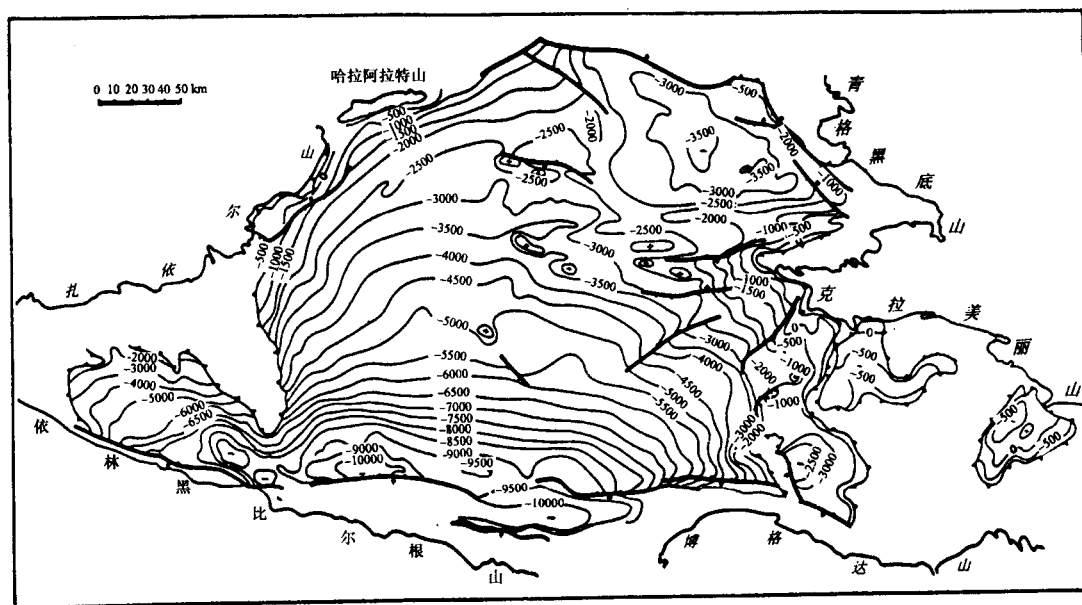


图 2-2 准噶尔盆地侏罗系底界地震反射层构造图
(数字单位 m, 资料据新疆石油管理局)

B. 松辽盆地。为典型大陆裂陷盆地 (张功成等, 1996), 经历裂谷伸展期、后裂谷热沉降期、反转褶陷期等几个阶段。

(a) 古生代, 中国东北位于西伯利亚板块与华北板块间的大洋板块上。海西末期的板块碰撞形成褶皱, 同时莫霍面隆起。三叠纪时经侵蚀夷平, 接近准平原化。

(b) 初始张裂(热断陷)阶段(J_2-J_3)。前期地表剥蚀,莫霍面隆起较高。上地幔的局部热点导致盆地初始张裂,形成规模不等的断陷,沿断裂有强烈的岩浆活动。

(c) 热沉降开始阶段($J_3-K_1^1$)。侏罗纪末期,盆地中部莫霍面拱起,拉张继续。盆地中央隆起上发育类似今日贝加尔湖的裂谷,其中堆积复理石,形成目前盆地的雏形。 K_1 时此裂谷封闭。

(d) 热沉降盛行阶段($K_1^2-K_2^1$)。即泉头组至嫩江组沉积时期,岩石圈冷却,热收缩引起更大范围的沉陷,在 35 Ma 内堆积一套厚 3000 m 的河-湖沉积。 K_2 末,日本海开始扩张,其压扭应力使松辽盆地上隆并褶皱(嫩江运动)。

(e) 萎缩平衡阶段(K_2-Q)。此时盆地全面上升,湖盆面积大大缩小。日本海的进一步扩张伴有轻微褶皱,盆地东、中部的正向构造进一步加大。新生代盆地活动程度低,显示渐趋消亡。

据大庆油田作的“东北裂谷系莫霍面深度图”,大庆长垣莫霍面埋深 30 km,其外的盆地中为 32~35 km,大兴安岭在 40 km 左右,小兴安岭为 35~36 km。可见松辽盆地亦是大陆断陷盆地。唯它在中生代后期和新生代,构造活动微弱,表现为大型拗陷,其地理面貌与沉积过程有别于小型断陷盆地而已。

C. 辽河盆地。辽河盆地为大陆内裂谷,是渤海湾裂谷系的一部分。后者是亚洲东部重要的郯庐断裂系的中部。渤中地幔隆起区分三支,北支经辽东湾至辽河盆地,更往北为伊兰—伊通断裂。渤中区地壳厚度小于 28~30 km,而辽东半岛和燕山地区地壳厚约 35 km。幔隆与其上方的裂谷盆地呈镜像对应关系。幔隆上的三条岩石圈断裂,大致对应于盆地东部凹陷和西部凹陷的主干深断裂。

图 2-3 为辽河盆地深断裂分布及构造单元划分图。

图 2-4 为地震测深的解释剖面,清楚显示地幔隆起与其上方辽河盆地的镜像关系。

晚中生代的拱升张裂期,有山间盆地陆相碎屑含煤沉积。早第三纪裂陷期,有沙河街组、东营组的河流、三角洲和湖泊沉积,伴有强烈火山活动。晚第三纪以后,为后裂谷阶段的拗陷期,冲积平原、三角洲平原沉积。第四纪初,渤海湾海侵。

D. 开鲁盆地。开鲁盆地是在古生代褶皱基础上发育的一个中生代盆地(图 2-5)。由上侏罗统断陷群和叠置其上的白垩系拗陷所组成,故为断拗盆地。

图 2-5 示开鲁地区构造纲要。太古宙早期,向阳—康平断裂以北有一东西向的海沟,北面洋壳向南俯冲,形成一条东西向的火山岛弧。海槽于早古生代末碰撞关闭,留下沿西拉木仑河延伸的缝合线(蛇绿岩带)。这一过程产生一系列东西向褶皱和广布的岩浆岩带。

晚古生界(C—P)为大陆裂谷建造。

三叠纪至侏罗纪早期,为侵蚀夷平阶段,无沉积。

晚侏罗世,开鲁地区与松辽盆地同属陆内的张广才岭—长白山岩浆弧后裂谷。由于太平洋板块俯冲和地幔上隆,产生一系列 NNE、NS 向正断层,形成许多小盆地,如北部的陆家堡拗陷,依次堆积义县组火山岩系(J_{3y})和九佛堂组深水扇沉积(J_{3j});这一阶段属盆地的张裂阶段。

J_3 后期,火山活动只限于东部一些凹陷,沉积亦较稳定,以沙海组(J_{3s})和阜新组(J_{3f})为代表。如陆东凹陷有间歇性的火山喷发,呈 10~20 m 厚的夹层,而陆西凹陷不见火山岩。这一阶段为裂陷阶段。