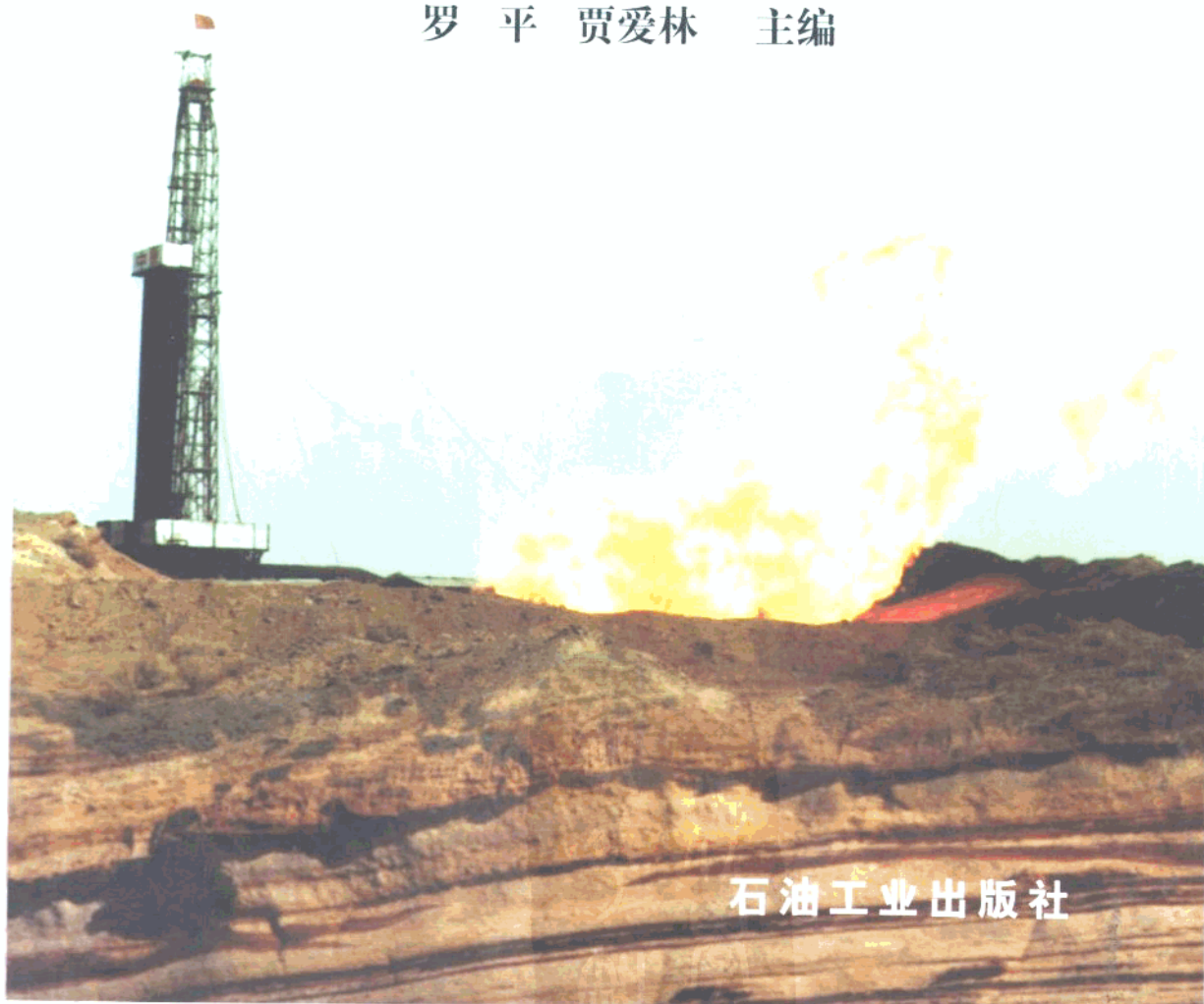




中国石油天然气集团公司
油气储层重点实验室论文集
(2001)

罗 平 贾爱林 主编



石油工业出版社

中国石油天然气集团公司 油气储层重点实验室论文集 (2001)

罗 平 贾爱林 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本论文集围绕陆相层序地层学、盆地成岩系统、储层表征与建模、储层实验方法以及重点地区储层综合研究为主攻方向,对国内外动态作了广泛调研,特别是根据我国陆相含油气盆地储层的具体特点,提出了一些新的论点和技术方法,开拓了一套新的研究思路和方法,为储层评价和预测提供了重要依据。

本论文集适合于从事油气勘探,开发以及相关专业的研究人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

中国石油天然气集团公司油气储层重点实验室
论文集(2001)/罗平,贾爱林主编.
北京:石油工业出版社,2002.6
ISBN 7-5021-3752-1

I. 中…

II. ①罗…②贾…

III. 石油天然气地质-储集层-文集

IV. P618.130.2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 026419 号

石油工业出版社出版
(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 20 印张 1 插页 508 千字 印 1—1000
2002 年 6 月北京第 1 版 2002 年 6 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5021-3752-1/TE·2739
定价:46.00 元

序

从1985年开始,“油气储层评价研究”被列为部级重点科研攻关课题,曾有20多家单位和600多名科技人员投入储层评价研究。通过“七五”、“八五”和“九五”的科技攻关,已经取得可喜成绩,相继出版了《中国油气储层研究论文集》两集、《中国油气储层研究图集》(卷1—卷5)、《油气储层评价技术》以及《中国陆相油气储集层》等专著。

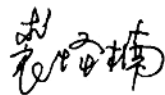
为了进一步加强油气储层的基础研究和应用基础研究,以适应新的油气勘探和开发的要求并促进成果向生产力转化,中国石油集团公司(CNPC)科技发展部于1999年4月批准组建油气储层重点实验室,以北京石油勘探开发科学研究院为主体,联合各油田及石油大学和江汉石油学院等院校的研究力量,形成国内一流的油气储层重点实验室。

实验室在中国石油集团公司和股份有限公司领导下,并在学术委员会的具体组织下,在短短3年中,重点实验室能紧密结合生产实际存在的难题,以5个重点研究领域为攻关方向,其研究内容涵盖了勘探储层、开发储层、储层模拟、特殊类型储层以及新技术、新方法的开发等方面。

本论文集围绕陆相层序地层学、盆地成岩系统、储层表征与建模、储层实验方法以及重点地区储层综合研究为主攻方向,对国内外动态作了广泛调研,特别是根据我国陆相含油气盆地储层的具体特点,提出了一些新的论点和技术方法,开拓了一套新的研究思路和方法,为储层评价和预测提供了重要依据。研究成果具有较高理论水平,为西气东输增加后备储量以及稳定东部和老油田挖潜,并为提高采收率水平作出了应有贡献,论文集中也指出了近期全国油气储层研究方向和重点。随着油气勘探的深入,储层研究工作面临的主要难题是如何突破低渗透储层及碳酸盐岩储层的油气勘探寻找“甜点”,对有利孔隙带的分布和形成机理有待进一步探索和总结。这对增加油气产量和储量具有重大现实意义。

目前,储层地质研究在勘探开发中越来越受到重视,这一论文集的出版,是“八五”期间《中国油气储层论文集》的延续,一定将会在促进我国储层地质学的发展上起到重要作用。

CNPC 油气储层重点实验室学术委员会主任



2001年12月

前 言

我国的石油工业已发展到一个新的阶段。东部老油区的可开采油气储量进一步下降,储量的品质不断变差,如何提高采收率和动用低品质储量是稳定东部石油生产主战场的关键;西部是寻找新的油气储量的战略接替区,这里地质条件复杂,勘探程度低,地质认识尚不充分。东、西部地区的油气勘探生产给油气储层研究提出了众多的问题和挑战。为此,受中国石油天然气集团公司科技发展部的委托,油气储层重点实验室与中国地质学会沉积专业委员会联合于2000年11月20日至23日在桂林举办了“2000年油气储层学术研讨会”。

参加这次会议的代表有来自各科研院所和油田生产第一线的代表约60名,共有28位专家作演讲。这些学术报告反映了我国储层研究当前的热点、难点和发展方向。会议结束后,油气储层重点实验室学术委员会认为应将这些论文结集发表,使广大储层研究工作者了解目前的进展和发展方向。下面是本论文集的几个要点:

(1) 层序地层学应用研究在蓬勃发展,尤其近年来我国陆相沉积层序地层学的发展,取得了令人瞩目的成绩。总结了层序的六个级别的划分方法,厘定了勘探层序和开发层序的级次规模。提出了层序界面控油的观点,并形成了一套勘探层序地层研究的工作方法。

(2) 成岩研究向定量化和综合化方向发展,在不断完善成岩机理和地质模型的基础上,将一维纵向的储层成岩演化向二维和三维空间预测过渡,提高了储层的预测性。机理研究也在向盆地成岩系统方向迈进。

(3) 在储层表征方面,提出了视储集空间的新观点,进一步发展了储层岩石物理相的概念。储层沉积模拟向全三维和多物源两个方面发展,使储层表征更精细、更准确,可视化水平大大提高,为油气田开发、提高资源采收率水平打下了基础。

(4) 湖相碳酸盐岩储层是一个新的油气勘探领域,对它的形成环境、储层性质、孔隙发育机理作了充分的研究,展示了这是一种新型的油气储层类型。

(5) 储层研究方法和技术走向多元化。利用高精度显微手段,对储层的古流体和孔隙图像进行技术开发,宏观上用测井、地震技术描述裂缝、断层、孔缝洞系统、储层砂体展布和剩余油预测,形成了新的技术手段。

(6) 对各个油区的具体储层类型和预测进行了研究,尤其是在塔里木盆地等重点油区的实际应用和各种类型储层的有利相带预测都有各自的创新之处。

此外,刘宝珺院士和袁道先院士以及储层研究界的老专家作了即席发言,强调应该加强储层基础研究,加强非常规储层的研究,加强多学科交叉综合研究,目前应该着重于以下几个方面:

(1) 应用盆地动力学观点研究储层,加强水岩反应与储层发育机理关系的研究。

(2) 层序地层学已引入我国十余年,发展很快,在陆相层序地层学研究方面具有我国独特的特点,但是没有形成统一的名词和层序界面划分的标准,希望今后召开专门会议制定标准,使之成为现场人员可操作的技术。

(3) 进一步提高储层研究的技术水平,加强定量化、可视性研究,提高储层质量的预测水平。

该论文集还收录了“中国油气储层地质研究现状与发展前瞻”一文，这篇文章是在油气储层重点实验室及各分室人员大量调研的基础上写成的。该文涵盖了我国储层地质学五个主要的发展方面，即储层成岩动力学、储层沉积模拟、陆相层序地层学、海相碳酸盐岩储层以及储层表征与油藏描述。本文总结了近年来该领域的发展现状，并指出了未来5~10年我国油气田勘探开发所面临的储层研究方向和研究重点。它们围绕着两个重要的应用主题，一是在低渗透储层中如何寻找甜点，二是碳酸盐岩储层非均质性。

储层地质是勘探开发生产不可缺少的基础地质研究，需要多学科的交叉结合，才能提高研究水平，迈向新的台阶。本论文集的出版是“九五”期间储层研究的一个小结，是“八五”期间储层研究总结的延续，“十五”更是储层地质研究有更大发展的时期，我们展望在下一论文集中将收录代表我国更高水平的研究文章，不断促进我国油气地质研究的发展。

目 录

中国油气储层地质研究现状与发展前瞻	罗 平 等 (1)
酒西盆地湖相纹层泥质白云岩储层的形成条件与特征	罗 平 等 (32)
扇三角洲地质知识库	贾爱林 等 (45)
激光扫描共聚焦显微镜研究储层孔隙结构	应凤祥 等 (55)
碳酸盐岩储层储集空间预测及质量评价	王志章 等 (61)
陕北志丹三角洲长 6 油层组高分辨率层序分析与等时对比	郑荣才 彭 军 (67)
百色盆地那读组层序分析与生储盖组合	彭 军 陈景山 郑荣才 (79)
论层序地层界面对地层含油性的控制	姜在兴 等 (87)
油气勘探储层研究方法及其在吐鲁番盆地的应用	吴因业 等 (94)
预测裂缝分布规律的神经网络方法	彭仕宓 等 (104)
中国东部东濮凹陷异常高压对储层成岩作用的制约	费卫红 李 忠 (109)
东濮凹陷层序地层与油气富集规律	陈业全 等 (119)
多物源方向沉积储层的随机建模方法研究	胡雪涛 黄健全 (128)
酒西盆地青西凹陷湖相纹层状泥质白云岩中泥级斜长石成因、特征与油 气勘探意义	罗 平 等 (138)
库车坳陷东部下侏罗统储层非均质性及控制因素研究	邱宏利 杨帆 (142)
塔里木盆地上泥盆统一石炭系碎屑岩储层评价	朱如凯 等 (151)
南堡凹陷老爷庙地区东营组层序地层发育特征	刘 晓 等 (163)
应用成岩岩相分析法评价和预测非均质性储层及其含油性 ——以哈得逊地区为例	孙玉善 等 (170)
广西十万大山盆地的构造古地理及其有关油气前景	吴浩若 (179)
吐哈盆地台北凹陷粘土矿物各成岩阶段的异常演化与成因	李 伟 等 (186)
鄂尔多斯盆地三叠系延长统浊沸石的形成机理、分布规律与油气关系	杨晓萍 裴泽楠 (193)
利用荧光显微图像对储层流体性质预测应用研究	宋荣华 杨国奇 张彦民 (201)
四川盆地地下二叠统气藏储渗空间研究	陆正元 周建平 罗 平 (209)
四川盆地东北部下三叠统飞仙关组鲕粒白云岩的混合水白云石化	王一刚 等 (215)
唐家河开发区东三段储层精细描述	芦凤明 等 (225)
板桥凹陷沙河街组碎屑岩成岩作用特征	张文才 等 (232)
冀中坳陷苏桥潜山带中奥陶统古岩溶研究	史卜庆 等 (236)
黄骅坳陷千米桥潜山奥陶系碳酸盐岩储层特征研究及形成机制探讨	张莉华 等 (243)
扇三角洲岩相模拟不确定性的动态评价	贾爱林 张传禄 郭建林 (248)
中原油田胡十二块非均质性研究	张加友 等 (257)
临清坳陷冀南地区新生代构造样式及其对沉积的控制	王金友 等 (262)

渤海湾盆地北部奥陶纪岩相古地理	金振奎	等 (270)
东濮凹陷沙三段高频湖平面变化及低位砂体预测	纪友亮	等 (282)
东濮凹陷下第三系沙三段盐膏岩的成因及其意义	纪友亮	等 (293)
涌流型浊流形成及发展的实验模拟	张春生	等 (301)
储层含油性解释模型及其应用	孟元林	等 (309)

中国油气储层地质研究现状与发展前瞻

罗 平 贾爱林 王雪松 纪友亮 张春生 寿建峰

王一刚 罗 忠 史卜庆 张兴阳 苏立萍

(CNPC 油气储层重点实验室)

油气储层是油气最终的赋存产出之处,储层的性质、分布和产状直接关系到油气勘探的难易和生产的效益。经过新中国 50 多年的油气工业发展,老一辈石油地质学家已积累了丰富的储层研究的成果和认识,形成了储层地质学这门新兴的学科。随着大规模的油气勘探开发的发展,中国油气工业已进入成熟期,简单、易于寻找和开采的油气已经被发现、采掘。因此,寻找赋存于复杂和更隐蔽条件的储层中的油气愈来愈重要,最为突出的是低渗透储层、深部储层以及久攻不克的碳酸盐岩储层。据统计每年找到的油气中,低渗透储层占了一半。在开发方面,低渗透储量动用程度愈来愈高。随着中浅层油气资源越找越少,勘探的目光愈来愈瞄准了 3500m 以下的深层。综合来说,依据上述勘探开发的形势和需要,我国的储层地质学将在这五个方面发展:储层成岩动力学、储层沉积模拟、陆相层序地层学、海相碳酸盐岩储层以及储层表征与油藏描述。

一、碎屑岩储层成岩动力学

1. 国内外发展趋势

硅质碎屑岩在埋藏成岩过程中受到上覆载荷、温度、压力和盆地流体等诸多因素的复合改造,但不同地区或不同时间内储层演化的主控因素不一样,或以区域应力为主导,或以地热流体为主体。不同盆地的成岩主控因素决定了储层有不同的演化路径,其储层的流体分布可以通过已知的遵循物理化学规则的地质过程加以预测。

国外的研究已扩展到了盆地范围的成岩变化和地质流体两大基本问题,对这两个问题的研究,逐步由定性向定量方向发展。国内也将构造应力场、温度场等影响因素综合,使用成岩场、成岩相等概念逐步由定性向定量化方向发展。比较起来,国内成岩研究较系统,已有工业化的标准,但以温度热演化作为指标,对地质流体方面的研究尚处于起步阶段。这主要是储层流体地球化学方面的基础研究在理论和技术手段上处于相对滞后状态。

1) 流体地质学与成岩—成藏动力学

地质时期中的地层流体与岩石之间的相互作用近来引起不少学者的兴趣,并正在逐步形成“流体地质学”学科。近 10 年来,国际上召开了一系列学术会议,专门讨论“水—岩相互作用”与“地质流体”。无疑,流体在储层成岩—成孔和油气成藏中起着十分重要的作用。但由于流体地质作用是一个复杂的地质过程,还有许多理论和技术难题需要进一步解决,如流体作用的过程、规模和自组织动力机制等。随着流体包裹体、稳定同位素及各种岩矿测试技术的进步,该学科在石油地质学领域的应用初步取得了一些认识。已经初步认识到,高压振荡流体活动可能对某些自生硅酸盐环带矿物、大尺度条带状“穿层”的碳酸盐胶结分带、

促进烃类生成以及烃类的幕式运移—聚集的形成产生重要控制 (Nur et al., 1990; Dever et al., 1988, 1990; Chen et al., 1990; Tigert et al., 1990; Williamsom, 1995)。Wang Chiyuen (1999) 等用北海油田泥岩样品进行了高压振荡流体的幕式作用的模拟实验, 表明泥页岩中流体、热流的振荡性释放导致孔隙度的振荡性变化的现象确实存在, 对储层的成岩作用和机理得到了更深入的认识; Wilson (1988) 较系统地讨论了挪威 VENTURE 气田异常高压流体与砂岩孔隙生成之间的关系, 认为深层 (大于 4500m) 优质储层的成因与异常高压流体作用和溶蚀作用有关。

2) 砂岩孔隙类型

砂岩的储集空间类型是储层地质学的基本问题, 也是油气勘探中的重要问题。一些学者认为砂岩中次生孔隙的形成是有一定条件的, Surdam 和 C. Rossey 等在 20 世纪 80 年代提出次生孔隙有机成因说时就明确指出次生孔隙形成和保存的 5 个限制条件: ①富烃源岩与储层相邻 (短途运移); ②储层地质年代晚于白垩纪 (时代新); ③储层经历简单的埋藏史 (单旋回); ④有机酸在泥岩中居留时间不长 (反应时间短); ⑤有流体流动和运移通道。

Miller (1952) 指出当温度小于 120°C 、 P_{CO_2} 不变的条件下, 方解石溶解度随温度升高而降低。J. T. Smith 指出如果有有机质成熟过程在 100°C 左右所释放的 CO_2 超过了反应平衡常数所要求的数量, 那么这些过量的 CO_2 将会由于碳酸盐矿物的沉淀作用而清除。同时, 在碎屑岩储层中, pH 值受控于铝硅酸盐的平衡, 而不受控于碳酸氢根离子的离解。因此, 在低于 $100\sim 120^{\circ}\text{C}$ 的温度下, CO_2 丰度的增大一般情况下将引起碳酸盐的沉淀。

砂岩中碳酸盐的溶蚀问题是次生与原生观点争论的焦点之一。从化学平衡反应的原理上讲, 在封闭成岩体系中, 砂岩中一般趋向于碳酸盐的沉淀, 而不是溶解。实际上, 砂岩中被溶解的多为铝硅酸盐矿物, 这已从大量实际资料所证实。Gils (1990) 也认为要形成大规模的次生孔隙, 还必须发生大规模的质量传递, 而在封闭体系下, 这种质量传递往往是有限的。

3) 成岩场与控制因素

一些学者建立了时间、温度或镜质组反射率与储集性质的经验关系, 也试图从室内实验建立它们之间的相关性 (Schmoer et al., 1988; Maxwell, 1964), 指出岩石成分、地层温度和时间对储层性质的控制作用。S. Bloch, J. H. McGowen (1990) 讨论了地层埋藏史对砂岩孔隙度的影响。1993 年 AAPG 组织出版了《Diagenesis and Basin Development》专著, 认为成岩事件是盆地演化过程中某一时间的产物, 而不一定对应某一深度。

4) 储层成岩动力与定量地质预测

应凤祥、赵澄林、陈丽华、朱国华、寿建峰等经多年研究, 指出地温场在砂岩成岩和孔隙演化中起着十分重要的作用, 它不仅加快砂岩的化学成岩作用, 而且大大加速了砂岩的成岩压实作用, 并建立了岩屑砂岩类的定量预测模型。这些认识可以反映正常埋藏成岩作用的储层特征。寿建峰、朱国华 (1989, 1990) 在研究库车坳陷下侏罗统和吐哈盆地前侏罗系砂岩的成岩现象时进一步提出储层成岩作用和孔隙演化不仅与垂向上的地质作用有关, 还受水平地质作用控制, 包括盆内和盆外传递于盆内的构造侧向作用。这种作用与盆山的耦合有很大关系, 并且在时空上表现出较强的分异性, 如库车坳陷和吐哈盆地, 晚期侧向构造挤压作用在不同地区其构造变形强度可以差异很大, 同一地区的不同构造层所受的构造挤压变形也可以有变化。在研究吐哈盆地前侏罗系储层控制因素也观察到了类似现象。应凤祥、何东博 (2001) 等研究塔里木盆地库车坳陷下侏罗统储层时, 定量地计算出侧向挤压应力造成的库

车西部成岩强度相当于 500m 上覆载荷的影响。

2.21 世纪的发展方向

1) 盆地古流体的恢复技术

盆地流体类型及其驱动机制研究是近些年地学方面研究的热点之一,流体的流动机制可分为重力驱动、压实驱动和密度驱动(包括温度差引起的热对流和流体浓度差引起的流动)。流体的温度梯度、压力梯度和密度梯度的差别,引起流体的不同流动方式。流体与岩石之间在长期地质历史时期中所产生的反应,出现压实、胶结和溶解等物理化学以及生物化学等反应,从而导致不同时期产生不同的溶解和胶结作用等成岩事件,它们对物性的变化都有直接影响。恢复盆地古流体是解释深部异常孔隙发育机理的关键,也是对深部异常孔隙进行预测的基础。

2) 成岩量化及成岩圈闭厘定技术

以往的成岩作用研究只能进行温度—深度—时间的一维剖面研究,我们将建立考虑复杂成岩过程的二维剖面模型并力争建立三维定量模型。成岩作用的量化研究处于起步阶段,在生产中已初步见到成果,重点实验室要在前面研究的基础上,将成岩作用中的物理化学过程软件化,不断将新发现的成岩研究成果融于量化的软件,提高预测的科学性和可操作性。

3) 盆地成岩系统与储层质量数值模拟

分析地温场、压力场、流体场及其与水岩反应的化学场以及构造应力场等盆地成岩要素,完善和发展成岩模拟技术以及应用新的测试技术,结合不同类型盆地,总结构造史、埋藏史、成岩史、生烃史和孔隙演化史,分盆地类型进行五史的成岩数值模拟,由一维、二维发展到三维的多要素模拟,达到成岩研究量化,查明不同次生孔隙发育带的成因,以评价东部裂谷盆地深层和西部挤压型盆地的储层质量和有利地区,为油气勘探提供依据。

二、储层沉积模拟

1. 研究现状

储层沉积模拟是通过水槽实验实现的。1995 年以前,我国的水槽实验室主要集中于水利、水电和地理部门的有关院校和研究单位,从事泥沙运动规律、河道演变和大型水利水电枢纽工程等的实验研究。20 世纪 70 年代末,长春地质学院建成了第一个用于沉积学研究的小型玻璃水槽,这个水槽长 6m,高 80cm,宽 25cm,主要研究底形的形成与发展。80 年代,中国科学院地质所也用自己的小型水槽做了一部分研究工作。这是我国曾经仅有的两条以沉积学研究为主而建立的实验室,虽然在研究内容、深度和广度上与国际水平相比还有一定差距,并且后来因种种原因而废弃,但为我国沉积模拟实验的发展迈开了第一步。

随着沉积学理论的发展和科学技术必须转化为生产力的需要,我国的油气勘探开发形势对定量沉积学、储层沉积学和沉积模拟实验提出了一些急待解决的实际问题。多年来,在我国东部陆相断陷湖盆的研究中,一直存在一些争论不休的问题,如潮盆陡坡沉积体系、扇三角洲、水下扇的形成条件和分布规律以及裂谷湖盆与坳陷湖盆沉积体系的区别等,都期待着沉积模拟实验予以验证;不同类型的单砂层的形态、规模和延伸方向等也需要沉积模拟实验予以定量解决。因此,1990 年以后,许多沉积学家积极呼吁,根据当前世界沉积学发展的动向以及我国油气勘探开发的生产实际和今后发展的需要,应建立我国的沉积模拟实验室。

专家认为该实验室应以模拟陆相盆地沉积砂体为主要对象,以储层研究为重点解决生产实际中的问题;应以陆相湖盆中砂体的分布、各类砂体规模和性能的定量预测,提高勘探成功率和开发效益为主要目标。因此,于“八五”期间在江汉石油学院建立了 CNPC 沉积模拟实验室。

CNPC 沉积模拟研究室实验装置长 16m,宽 6m,深 0.8m,面积 96m²。湖盆四周设置 6 个进水口或出水口,以逼近多支分流河道入湖的情况。水的运动过程可自动测量,分别给出流速、流向、流量等参数。沉积物的供给过程(加砂过程)可以自动控制,并可按模拟靶区的实际资料进行分级组合。在湖盆上设置有高精度砂体测量系统,该系统可在纵向(Y 方向)16m 范围内自由运动,其中检测小车可在横向(X 方向)6m 范围内运动并跟踪检测录制砂体搬运及沉积过程、沉积物的厚度变化、砂体分布及演变规律、某一质点在流速场内的动力学过程等,并可沿任一方向切片给出沉积物组成的变化。另外,在湖盆纵向 7~12m 范围内设置有 5m×5m=25m²的盆地基底活动区,该活动区的运动过程由计算机控制,可自由升降形成隆起、拗陷或断陷,可自由向任一方向倾斜形成斜坡,断陷的过程可形成同生或边界断裂,同时可形成盆地阶梯状断块等。

2. 沉积模拟研究的发展趋势

20 世纪 90 年代以后,沉积模拟研究出现了一些新的发展动态和趋势,这些发展趋势可概括为以下五个方面:

1) 物理模拟与数值模拟的日益结合

沉积模拟研究经过了一个世纪的发展历程,取得了一批优秀的学术成果。然而这些成果主要集中在物理模拟研究方面,随着计算机在地学领域内的普遍应用,碎屑砂体沉积过程的数值模拟研究正逐渐发展成为沉积模拟技术的一个重要分支,并且日益与物理模拟相互渗透,二者相辅相成,相互依赖,相互促进,现在看来,碎屑沉积过程的物理模拟与数值模拟的多层面结合是沉积模拟技术的一个重要发展方向。通过物理模拟与数值模拟的结合,使数值模拟研究摆脱人为因素的干扰,物理模拟过程可为计算机数值模拟提供定量的参数,使数值模拟有可靠的物理基础,更接近于油田生产实际,从而更有效地指导油气勘探开发。

2) 提供勘探早期储层预测的新方法

在一个盆地或区块勘探早期,一般钻井较少,仅有几口评价井,但是往往有相对比较详细的地震资料。通过地震资料的解释,可以明确盆地或区块的边界类型及条件以及沉积体系的类型,结合钻井资料,可以建立概化的地质模型,并抽取主要控制因素建立物理模型,在物理模型指导下就可开展物理模拟实验。由物理模拟提供的参数可以开展数值模拟研究,从而可以较准确地预测盆地沉积体系的展布规律,以及优质储层的分布,为勘探目标选择提供依据,这是沉积模拟研究为油气勘探开发服务的一个重要方面,正逐渐成为沉积模拟技术发展的一个显著趋势。2001 年 1 月至 2 月,利用该研究思路,对山西大同辨状河储层进行了预测,其准确率达到 71.6%。

3) 提供开发后期砂体非均质性描述的新技术

油田开发后期一般静态资料较多,可以利用较丰富的油田开发生产资料,建立精细的地质模型,分砂层组成单砂层开展模拟实验,并把实验结果与已有的静态资料进行对比,如果在井点上实验结果与静态资料所反映的砂体特征吻合程度较高,就可以认为实验结果是可靠的。对于井点之间原型砂体的特征可由实验砂体(模型砂体)对应井点之间的特征来描述,从而定量预测井间储层分布和非均质特征以及剩余油的分布规律,这是沉积模拟技术

发展的另一个重要动向。在濮阳凹陷胡状集构造胡 5 断块的研究中探索了该项技术的实用价值,非均质分布特征预测的准确程度为 69%,并通过调整井得到了证实。

4) 与储层建筑结构要素分析方法的结合

储层建筑结构要素分析方法的实质是储层的层次,层次性是储层形成过程的一个重要特征,也是地质现象的普遍规律。每个层次都具有两个要素,即层次界面和层次实体。沉积模拟实验的主要优势就是可以按形成过程的时间单元详细地描述这些界面的形态、起伏、连续性、分布范围和厚度变化以及它们所代表的级别,并与现代沉积和露头调查成果相互印证,建立储层预测的地质知识库和储层参数模型,提出砂体形成和分布的控制因素以及演变的地质规律,这是其它研究方法所不具备的。近两年内国内外的部分文献都在努力探索二者结合的可能性,并取得了一些创新性成果,形成沉积模拟技术发展的一个新动向。

5) 与流动单元划分及高分辨率层序地层研究相结合

油气田开发后期,研究剩余油分布规律的一个重要手段就是对流动单元进行重新划分和识别。在该过程中,高分辨率层序的研究是一个基础,近来沉积模拟技术也在该项研究中扮演相当重要角色。因为高分辨率层序地层研究的关键就是对等时界面进行精细划分,而沉积模拟技术正好具备这一优势,无论是砂体形成过程的物理模拟实验或是数值模拟研究都可以提供砂体形成过程中任一阶段的时间界面以及该时间段内的储层分布和内部结构特征,同时可以指出下一时间段内的储层演化趋势及生长变化特征。所以说沉积模拟技术与高分辨率层序地层研究相结合,必将在细分流动单元和剩余油预测方面显示出强大的生命力。国内外不少学者在以不同方式开展此方面的工作,有理由相信,在未来几年内该方法会发展成为剩余油分布预测的一项实用技术。

综上所述,进入新世纪后,沉积模拟研究除了保持其原有的沉积学理论研究的优势之外,主要的发展趋势是与计算机及其它地质研究方法相结合,在预测储层生长变化及演化趋势方面形成综合性的实用技术。

三、陆相层序地层学

国外对于层序地层学的研究主要的重点是海相层序地层,已经建立了一套科学的理论和工作方法,而且产生了三种不同的学派观点。

20 世纪 90 年代以来,层序地层学进入了理论研究和生产应用全面发展的新时期,在理论上出现了诸如高分辨率层序地层学、成因地层学、旋回地层学等学派;在实践应用中,层序地层学不但研究海相沉积,也开始迈向非海相沉积,同时开始深入到油气勘探开发的各个阶段和层次。如从盆地分析到圈闭的成因解释,从油藏描述、数值模拟到后续动态模拟,从勘探开发各个阶段的软件开发到油藏管理,都应用了层序地层学的理论、方法和研究成果。层序地层理论的系统化,给沉积学和地层学研究带来了革命性的飞跃。并认为层序地层学是“把地质学从定性转变为定量科学的推动力”。

1. 陆相层序地层学研究现状

进入 20 世纪 90 年代,国外层序地层学的理论研究和实践的焦点已从海相盆地转移到陆相盆地,并成为层序地层学目前发展的一个重要方面。

在层序地层学的经典理论中,层序的成因与海平面的变化紧密联系在一起。然而,近年来陆相层序地层研究表明,陆相层序形成的主要控制因素是构造沉降、沉积物通量和气候,

而不能完全用全球海平面变化因素加以解释,此外陆相层序在界面特征、沉积体系的时空配置以及区域和全球对比均有别于海相层序地层。因此,将层序地层学理论应用到陆相沉积盆地,必须重新认识层序的成因机制及划分规则,并对源于大陆边缘的层序地层模型进行必要的修改。

1) 构造对层序发育的控制作用

陆相断陷湖盆层序形成具有下面几个特点:①陆相盆地层序的形成和演化主要受控于区域性构造事件或幕式构造旋回,断陷盆地则主要受盆缘断裂的控制。由于受区域构造应力场的影响,在盆地演化过程中可能伴有扭动以及构造反转,因而层序样式及其构成更加复杂。②陆相湖盆扩展和萎缩旋回以幕式变化为主。大陆边缘盆地海平面变化包括周期性和幕式变化,且以前者为重要,同样湖面变化也存在周期性和幕式变化两种形式。湖面周期性变化与气候和季节性周期变化有关。显然,在地史记录中陆相盆地较大规模的湖盆扩展和萎缩旋回大多为幕式,并非周期性,这主要与幕式构造旋回有关。③在断陷盆地中体系域的面貌明显地受控于构造格架。由于断陷盆地具有多物源、多沉积中心、相带窄、相变快、水域面积小、变化大等特点,沉积体系空间配置的样式较多,加之断陷盆地内构造分异大,沉降及沉积速率差异较大,这样断陷盆地沉积体系域内部构成比大陆边缘盆地更多样化和复杂化。④陆相盆地具有物源近、堆积快等特点,沉积物中含突发性事件沉积所占比例较大,其气候变化对沉积物供给影响更明显。鉴于陆相断陷盆地层序地层分析的基本特点,在断陷盆地分析中重要的是在于运用层序地层学的分析思路和方法,而不能直接套用大陆边缘盆地的层序地层模式。

2) 湖平面变化对层序的控制作用

纪友亮教授(1996)在对华北盆地中的济阳拗陷东部地区下第三系进行层序地层学研究时,认真分析了海平面变化、湖平面变化、沉积物供给、构造运动及气候等因素对陆相沉积层序的影响。他把陆相湖盆分为敞流湖盆、闭流湖盆两种类型,两种湖盆具有不同的相对湖平面变化特征,分别控制了不同的地层沉积格式。他认为陆相湖盆地层层序的形成及特征受构造运动、气候变化、沉积物供应和湖平面变化的控制。构造运动是决定陆相湖平面变化的最主要因素。构造运动决定着盆地蓄水空间的形成与消亡。气候的变化对大气降水量有很大影响。潮湿气候条件将使淡水供给充沛,可使闭流湖盆的相对湖平面上升,直至形成敞流湖盆,此后潮湿气候不再对其产生影响;而在干旱气候条件下淡水补给少,使敞流湖盆变为闭流湖盆,长期下去将导致闭流湖盆湖平面的下降。依据前两个因素可将层序类型划分为构造层序和气候层序两种。

3) 河流冲积环境中层序地层学的应用

加拿大陆相层序地层学研究组的成员们通过对大量近海陆相冲积野外露头与钻井资料的分析与研究,把陆相近海冲积层的发育与海平面的升降联系起来,建立了陆相近海冲积层的层序地层学模式。

在近海河流冲积环境下,相对海平面变化是控制河流体系中地层基准面—河流均衡剖面的主要因素。Shanley 和 McCabe (1991a、b, 1993) 对犹他州南部 Kaiparowits 高原的研究表明,河流冲积体几何形态的变化与同期海相地层的变化相联系,水进体系域和高位体系域可以根据冲积层内的几何标志和沉积标志识别出来。Mancilla 等 (1988)、Legarreta 和 Gulisan (1989)、Kokogian (1991) 以及 Legarreta 和 Uliana (1991) 在阿根廷几个内陆盆地勘查了三叠纪和白垩纪冲积层中的低位体系域、水进体系域和高位体系域。

低位体系域受地区限制,并向盆地边缘超覆。该体系域内部结构的特征为构成叠置的、向上变粗并加厚的河道充填复合体的砂质至砾质推移质沉积。水进体系域的特征为由向上变细变薄的层组构成的推移质和悬浮质沉积混合体。这些地层在低位期沉积广泛,说明在基准面_{上升}期间可容性增加。高位体系域由悬浮质沉积和较厚的土壤层组成。

4) 事件地层学与层序地层学的结合

事件地层学也称灾变或幕式沉积,它主要指地质历史中发生的突然性、瞬时超常态变化的罕见事件,具有一定时空范围和延伸性的沉积作用及正负记录。

对一个沉积盆地来说,地层记录往往是正常沉积和幕式沉积并存,且往往以不连续沉积为主。这是由于沉积作用表现的不仅仅是垂向加积,大量的侧向加积。这种侧向加积具有几种特点:一是堆积物的沉积面一般是倾斜的;二是由于横向堆积和进积,沉积物一般是在搬运方向上堆积,通过这些作用,沉积斜坡可能变得过陡,使不稳定的沉积体通过滑塌、蠕动而顺坡变形;三是地层主要通过侧向加积而堆积在这些沉积面上,成为有成因联系的单元,这已被三角洲河流和海相不同环境的沉积作用所证实。这种横向堆积作用发育广泛,既可以发生在海相陆棚以及斜坡地带,也可以发生在绝大多数的陆相环境。从一个盆地来看,从盆缘到盆地中心,各部位各自的基本层序、岩性特征都会发生很大变化。这是因为盆地边缘具有较大的构造不稳定性,易出现盆地中心所没有的侵蚀面和不整合,沉积特点表现为随时间向斜坡方向迁移,这种迁移是通过侧向加积作用叠置,因而往往出现幕式沉积。盆地中心相对比较稳定,沉积作用以垂向加积实现沉积物的上下叠覆,因而以正常、渐变沉积为主。因此,一个沉积盆地的发展史往往就是以事件沉积,不连续沉积为主的演化历史。

事件沉积可分为两类:一类是高于正常强度的事件,如风暴作用、重力流、火山爆发等作用,可以形成沉积物,称为正偏离;第二类是低于正常强度的事件,但无沉积作用,如古侵蚀面和低强度的无沉积作用面,称为负偏离。这种负偏离在盆地内比较多见,所反映的时间间隔往往比连续沉积的正记录的沉积时间要长。负偏离与层序地层学大界面类型关系密切,而正偏离形成的沉积作用是事件地层学强调的重点。

5) 煤层作为层序边界

煤层的区域性分布和等时性使之成为良好的成因层序边界。从煤沼环境的沉积作用可以看出,在多数情况下煤层的聚集具有分布上的区域性。碎屑物质的供给减少乃至不供给时,煤层的分布具有相对稳定性。碎屑物质经由水道开始供给时,煤层则可能被碎屑物质所切断,但煤层之间仍具有可对比性。特别在构造活动较稳定、古地形较均一的湖沼环境下,区域性分布的煤层更具可对比性。

煤层的聚集具有等时性。从概念上讲,煤层可理解为与 Frazier (1994) 的间断沉积相当,这个面记录了沉积事件的终止或者说一个沉积幕的终止。小范围分布的煤层可以分隔一次沉积事件,大范围分布的煤层则分隔一次沉积幕,实际上是碎屑物质的注入破坏了煤层聚集的持续性。因此煤沼环境中的沉积事件与 Frazier 的海侵海退引起的沉积事件基本上是对应的,具有等时概念,可以作为准层序边界 (Parasequence boundary)。同样地,大范围分布的煤层可以与 Frazier 沉积幕的最大海侵时所形成的泥质层相比拟,同样具有等时性,可以作为成因层序边界。

6) 成因地层学

以 Cross 为核心的科罗拉多矿业学院成因地层学研究组等指出基准面旋回可以用 Walther 定律和 Wisdom 面取代定律进行识别。由于这一进展为盆地中沉积物的堆积、侵蚀、

无沉积作用和沉积物迁移的历史提供了一个与沉积环境和海平面变化无关的参考框架,从而使层序地层分析摆脱了“必须与海平面变化相联系”的束缚,为等时地层格架高频层序划分和对比提供了客观的自然法则。这对陆相盆地中的高分辨率层序地层学研究尤其重要。由于高分辨率层序地层学以岩心、三维露头、测井和高分辨率地震剖面为基础,运用精细层序划分和对比技术对三维地层关系进行预测,建立区域、油田乃至油藏级储层的层序地层对比格架,对储层、隔层及油源层分布进行评价,因而具有客观、动态、精细等特点,成为地学界研究的新热点。

2. 陆相地层的层序地层学发展前景

Keith W. Shanley 等 1991 年在 AAPG 上发表论文,介绍了加拿大班夫(Banfu)举行的 NUNA 会议上成立的陆相层序地层学工作组的研究成果。认为尽管非海相中以不整合为界面的单元早已被认识到,但是层序地层学的概念仍主要运用在海相领域。要成功地在陆相地层中运用层序地层学的概念,必须对基准面和沉积物的供给有全面仔细的考虑。与浅海环境一样,对近海非海相环境来说,相对海平面既可被认为是地层基准面,也可认为是地形基准面。而对内陆盆地,决定可容空间的地层基准面则要复杂且有各种形式。如河流地层为倾斜剖面,某些风成地层为潜水面,而山间盆地沉积物则为湖平面。由于非海相沉积距源区近,因而其沉积物供给通常比海域也更为复杂多变。在很多大陆沉积物中,可以见到气候和构造对沉积物供给有明显影响。气候、构造和海平面升降这几个主要的控制因素在某种程度上是相互影响的。一个因素的变化极有可能是其它因素的变化所引起的,这在陆相地层中更为显而易见。尽管层序地层学的概念还处于初期阶段,但是它已被广泛地运用于各类陆相地层来解释沉积相建造的差异。

在陆相层序地层学中,冲积沉积地层对于层序地层学提出了挑战,而体系域的延伸和适应性也是一个问题。在陆相盆地中,大地构造背景复杂,盆地的形成受海平面变化影响较小,具近物源、多物源、多沉积沉降中心及高沉积速率,导致陆相盆地层序内部体系域的分布样式和叠置形式比海相盆地复杂的多。同样,对陆相地层的冲积地层的识别,就出现了有时可行有时不可行的状况。

在高分辨层序地层学中,有很多问题等待研究:①基准面旋回的控制因素及诸因素之间的辩证关系,以及陆相盆地中基准面旋回的识别标志和对比准则;②高频层序之间的叠置模式与长期基准面旋回的关系,高频层序单元内体积划分及空间配置与短期基准面旋回的关系;③高频旋回的等时对比技术及其内部构成的空间预测方法。

以地层基准面旋回、体积划分、相分异原理为基础的成因地层学,由于其客观、动态、准确、精细等特点,在盆地内对地层的了解有限时,也可对相对位置及几何形态进行较准确的预测,对研究陆相石油储层具有重要意义。

四、储层表征与建模

1. 研究现状

油藏精细描述主要是解决油田进入高含水期后,为了经济有效地开发和提高采收率而进行的储层量化精细研究。要达到这个目的,必须要做两个方面的工作,一是要建立各类储层的原型模型和地质知识库,其次要有一套确定可行的地质统计学的随机建模方法。

纵观当今世界储层表征的发展趋势具有组织方式向多学科协同的集约化方向发展,建模

软件向集成化、多功能可视化方向发展,研究向理论化和定量方向发展,应用新技术新方法,节奏迅速加快等特点。具体来看表现在三大方面:①宏观研究规模更大,向理论化和系统化方向发展,而微观研究更加深入和精细;②从定性向定量和预测方向发展;③从单学科向多学科协同综合方向发展。

我国在引进国外储层表征思想的基础上,迅速吸收和消化国外现代储层表征的理论、方法和技术,并针对中国陆相油藏特点发展了一系列实用、有效和先进的储层表征技术和方法,如精细沉积微相研究技术、微构造研究技术、储层综合预测技术、地质建模技术、薄互层解释技术等方面有长足的进步,并对油田经济高效开发起到重要作用。

我国储层研究与国际水平在某些方面还存在着一些差距,主要表现在:①软件和各种测试手段,包括地震和测井解释的精度等方面与国际水平相比还有一定差距;②多学科协同攻关的观念薄弱。虽然大家已经明确了地质、地震、测井、油藏、数模及计算机等多学科协同攻关的优势和必要性,但长期单学科独立作战的习惯和观念尚待扭转;③新理论和新方法及计算机技术主要是跟着国外走,还没有形成自己的储层精细研究和预测的方法和理论;④地质建模的理论和方法还没有真正普及。新的以露头储层和现代沉积研究为基础的储层精细研究和预测的方法和理论研究方法还有待进一步推广应用。

2. 发展方向

储层表征与建模技术是针对我国主要老油田的实际开发状况而开展的工作。众所周知,油田开发到一定的阶段将会面临两个方面的主要问题,一方面,油田的含水率越来越高,另一方面,大量的可动剩余油却滞留于地下。造成这一现象的主要原因是我们对所开发的地质体的储层非均质性的认识总有一定的不确定性。而油田的钻井密度又不能无限地加密,这样迫切需要发展一套精细的储层表征与建模技术,在非常精细的尺度上认识储层不同级别的非均质特征,为油田地下的实际应用作好准备。

在未来5~10年间,储层表征与建模技术主要在以下几个方面发展。

1) 厚砂层叠置形式和层内夹层建模

在自然界的砂体沉积中,很多厚砂体是有一些次一级的小砂体通过侧向和垂向不同的堆叠方式衔接起来的,油田地下的实际情况也是这样。通过对露头和油田地下的实际深入解剖,了解砂体的叠置形式和这样的叠置形式对流体流动的影响,可以在很大程度上掌握厚油层内部的剩余油分布状况和形式,并建立储层夹层的建模技术,为老油田的挖潜提供技术支持。

2) 地质、测井、油藏综合建模技术

老油田生产到一定的程度,单纯依靠某一项技术已经很难解决问题,同时测井、地质和油藏的相互结合也给我们进行综合建模提供了技术可能,在该研究内容中,主要依靠地质提供的沉积环境和砂体的连续性与连通性的资料,测井所提供的砂体、物性和流体解释结果,油藏所提供的生产动态资料并结合地震所提供的井间砂体的可能变化情况,集成最大的信息建立精细的储层地质模型。

3) 随机建模技术与方法

在具有相当数量的开发井的油田,在开发中后期和钻井密度较小的油田开发初期,同样都面临由钻井所揭示的地质信息预测井间储层展布特征和规律的问题。通过该研究技术和方法的深入研究,建立不同随机预测方法对不同的开发阶段和不同的储层类型进行可靠预测,指导实际开发部署。