



石油高等教育“十一五”规划教材

油气储层地质学

Petroleum Reservoir Geology

■ 主编 纪友亮

第二版



中国石油大学出版社



石油高等教育“十一五”规划教材

Petroleum Reservoir Geology

油气储层地质学

第二版

纪友亮 / 主 编

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

油气储层地质学/纪友亮主编. —2版. —东营:中国石
油大学出版社, 2009. 10
ISBN 978-7-5636-2933-6

I. 油… II. 纪… III. 储集层—石油天然气地质—高等
学校—教材 IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 170858 号



书 名: 油气储层地质学(第二版)
作 者: 纪友亮

责任编辑: 李 锋 王金丽(电话 0532—86981532)
封面设计: 赵志勇

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)
网 址: <http://www.uppbook.com.cn>
电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com
印 刷 者: 青岛锦华信包装有限公司
发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981532, 0546—8392563)
开 本: 185×260 印张: 17 字数: 403 千字
版 次: 2009 年 10 月第 2 版第 1 次印刷
定 价: 25.00 元

内容提要

本书是为石油高等院校地质专业本科生和研究生编写的教材,本书深入浅出地对各种储层的基本性质,储层的沉积学特征、成岩作用、孔隙微观结构,储层非均质性、敏感性,储层描述技术与储层建模、综合评价及测试技术做了较系统的论述;本书还引用了大量国内外近期研究成果,反映了当前储层地质研究领域中的新进展、新技术、新方法。

本书不仅可作为教材使用,还可供石油地质勘探、石油工程、应用地球物理等专业技术人员参考。



储层地质学是综合利用地质、物探、测井、钻井及试油等资料研究储层的学科,是 20 世纪 80 年代以来,随着储层研究的不断发展,而逐渐形成并仍在发展的一门相对独立的分支学科。近十几年来各石油高校相继为研究生及本科生开设了“储层地质学”课程,也陆续出版了各种储层地质学教材。但由于不同作者对储层地质学应该涉及的内容有认识上的区别,因此不同作者所编的储层地质学教材内容上有较大的差异。

1992 年 4 月,当时的中国石油天然气总公司高校教学指导委员会基础地质学科组在石油大学(华东)召开教材会议,决定由石油大学戴启德、纪友亮等编写适合于石油高校本科生教学的《油气储层地质学》教材。该教材编写组成员广泛听取了石油系统有关专家、学者及大学生、研究生对 1991 年石油大学石油地质教研室编写的校内铅印《油气储层地质学》教材的意见和建议,又在收集了大量国内外最新资料和文献的基础上,进行了认真修改、充实,编写了第一版《油气储层地质学》教材。

十多年来,储层地质领域发展迅速,为了适应新形势的需要,决定再版《油气储层地质学》。根据中国石油大学资信学院多年来的教学科研实践,在第一版《油气储层地质学》教材的基础上,对内容又进行了补充,考虑到与其它课程内容上的衔接,本书编写了绪论及储层的基本性质、储层的沉积学特征、储层的成岩演化及其模型、储层的微观孔隙结构、储层非均质性研究、储层敏感性、储层描述与储层地质模型的建立、储层综合分类及评价、储层实验测试技术等九章内容。教材编写组成员的具体分工如下。

纪友亮:前言、绪论、第一章、第二章、第三章、第四章(第四、六、七节)、第五章、第六章、第七章(第一、二、三、四节)、第九章。

吴胜和:第四章第二节、第七章第五节。

张立强:第四章第一节。

李红南:第四章第三节。

徐樟有:第八章。

全书由纪友亮统稿。

在编写过程中,吴元燕教授、陈丽华教授提出了宝贵的建议,并得到了中国石油天然气集团公司储层重点实验室的支持,在此表示感谢。

本教材是在教学、科研的空余时间和假期编写的,由于时间仓促,加之编者水平有限,谬误之处在所难免,敬希专家、老师们不吝指正。

编 者
2009 年 1 月

再

版

前

言

《石油数学地质》自 1998 年出版以来,受到了兄弟院校师生和石油行业生产、科研人员的欢迎,读者们提出了许多宝贵意见,为我们再版《石油数学地质》提供了重要参考,在此深表谢意。

油气资源评价的概念贯穿于油气勘探的始终。随着国民经济的发展,找油领域越来越广,难度越来越大,对石油资源评价的要求也越来越高,这就促使油气资源评价工作从定性研究向定量评价发展。20 世纪 70 年代初,油气资源评价开始进入定量化阶段,同时,数学地质的理论和方法在地质定量研究和油气资源定量评价中发挥了越来越重要的作用。鉴于科学技术不断发展的形势,在这次再版工作中,我们保留了一些常规的地质多元统计分析方法,重点补充了与地质定量研究和油气资源定量评价关系密切的地质统计学、模糊数学和神经网络等方面的新内容。另外,教材所附计算程序由 FORTRAN 语言改为 C 语言。

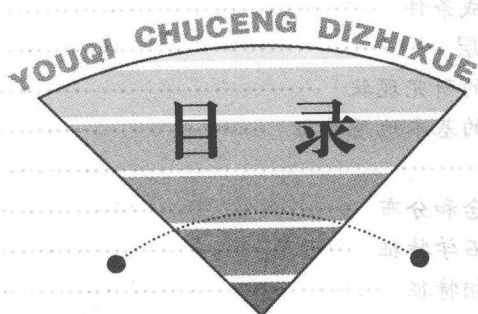
本书由李汉林、赵永军、王海起等修订和编写。其中第三、第四、第五、第六、第十一、第十二章由李汉林完成;第一、第八、第九、第十章由赵永军完成;第二、第七章由王海起完成;第十三章由赵永军、李自超、王新完成。FORTRAN 源程序由李汉林、赵永军共同修订后,由王海起、马士坤、翟汝霞(新编模糊聚类、模糊识别和模糊综合评判)、傅晓宁、连承波等将其改写为 C 语言程序,最后由王海起、傅晓宁调试定稿,附于随教材所赠送的光盘上。全书由李汉林、赵永军共同审查定稿。

本教材可作为资源勘查专业本科生及研究生的教材,也可作为相关专业学生及科研人员的参考用书。

限于时间和人力,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2008 年 6 月



绪 论	1
第一章 储层的基本性质	3
第一节 储层的概念及分类	3
一、储层的概念	3
二、储层的分类	3
第二节 储集岩的孔隙性	6
一、孔隙空间的大小	7
二、孔隙度和裂隙率	7
第三节 储集岩的渗透性	9
一、绝对渗透率	9
二、有效渗透率和相对渗透率	11
第四节 储集岩的流体饱和度	12
一、流体饱和度的概念	12
二、有效含油饱和度与剩余油饱和度	13
第二章 储层的沉积学特征	14
第一节 碎屑岩储层的沉积学特征	14
一、碎屑岩储层的岩石类型	14
二、碎屑岩储层的储集空间	15
三、碎屑岩储层中的胶结物及对物性的影响	15
四、碎屑岩储层的成分、结构和构造及其对物性的影响	16
五、碎屑岩储层的成因类型及分布特征	18
第二节 碳酸盐岩储层及其特点	30
一、岩石类型	31
二、物性特征	31
三、储集空间	31
四、孔隙的成因	32

第三节 泥质岩储层	32
一、储集空间类型	32
二、泥质岩储层的形成条件	33
第四节 低渗透致密储层	34
一、低渗透致密储层的研究现状	34
二、低渗透致密储层的基本地质特征	35
第五节 岩浆岩储层	41
一、岩浆岩储层的概念和分布	41
二、岩浆岩储层的岩石学特征	42
三、岩浆岩储层的岩相特征	44
四、岩浆岩储层的电性和地震反射特征	46
五、岩浆岩储层储集条件的控制因素	50
第六节 变质岩储层	52
一、变质岩储层的储集空间类型	52
二、按成因分类的储集空间特点	52
三、变质岩储层储集空间形成及演化的控制因素	53
第三章 储层的成岩演化及其模型	55
第一节 砂岩储层的主要成岩作用	55
一、压实作用和压溶作用	55
二、胶结作用	56
三、交代作用	58
四、粘土矿物的转化	58
五、溶蚀作用	61
第二节 成岩相划分	61
一、强压实成岩相	61
二、弱压实成岩相	62
三、弱压实弱胶结成岩相	62
四、强压溶成岩相	62
五、早期碳酸盐胶结成岩相	62
六、晚期碳酸盐胶结成岩相	62
七、二氧化硅胶结成岩相	62
八、溶蚀成岩相	62
第三节 成岩阶段的划分	63
一、术语和定义	63
二、成岩阶段划分依据	63
三、成岩阶段的划分	64
四、各成岩阶段标志	64
第四节 成岩作用的影响因素	72
一、埋藏深度的影响	72

二、砂岩的成分、结构、构造等因素对成岩作用的影响	74
三、生物扰动构造对成岩作用的影响	77
四、有机质演化对成岩作用的影响	78
五、油气的聚集对成岩作用的影响	80
六、构造位置和断层活动对成岩作用的影响	82
七、埋藏热效应-构造应力对成岩作用的影响	86
第五节 成岩演化模式	92
一、东得克萨斯棉花谷砂岩(上侏罗统致密含气储层)成岩作用模式	92
二、大气水埋藏成岩作用模式	93
三、中国东部断陷湖盆碎屑岩储层成岩作用综合模式	94
四、不同地温场盆地碎屑岩储层成岩演化模式	95
五、不同成岩环境下的成岩作用模式	98
六、以微观方式表达的成岩演化模式	101
第六节 碳酸盐岩储层成岩作用	102
一、白云岩化作用	102
二、溶解作用	102
三、胶结作用	103
四、压实作用	103
五、重结晶作用	104
第七节 碳酸盐岩储层成岩阶段的划分及主要标志	105
一、成岩阶段划分的依据和方案	105
二、成岩标志的选择	105
三、成岩阶段及标志的描述	105
第八节 影响碳酸盐岩储集空间的主要因素及其演化模式	108
一、主要因素	108
二、碳酸盐岩矿物的特点	109
三、成岩作用及埋藏历史	109
四、成岩作用模式	109
五、碳酸盐岩岩溶的发育特征、成因类型及发育模式	111
第四章 储层的微观孔隙结构	135
第一节 储层的孔隙空间和孔隙结构	135
一、储层的孔隙空间	135
二、储层的孔隙结构	135
第二节 碎屑岩储层的孔隙类型	136
一、原生孔隙	136
二、混合孔隙	136
三、次生孔隙	137
四、碎屑岩储层的孔隙和喉道	143
第三节 碳酸盐岩储层的孔隙类型及孔隙结构特征	144

一、碳酸盐岩储层的孔隙类型	144
二、碳酸盐岩储层的喉道及孔隙结构类型	148
第四节 岩浆岩和变质岩储层的孔隙类型及孔隙结构	152
一、岩浆岩储层的孔隙类型	152
二、岩浆岩储层的孔隙结构特征	155
三、变质岩储层的孔隙类型	155
第五节 研究孔隙结构的方法	156
一、压汞法的实验装置及操作	156
二、压汞法研究孔隙结构的基本原理	157
三、毛管压力曲线	158
第六节 毛管压力资料在研究孔隙结构中的应用	160
一、孔隙结构和孔隙喉道分布的定量评价	160
二、评价储层	162
三、应用排驱毛管压力曲线和相对渗透率曲线确定油水分布	163
第七节 孔隙结构对石油采收率的影响	164
一、基本概念	165
二、剩余油的状态	165
三、油藏中剩余油的形成与分布	166
四、孔隙结构和采收率	168
第五章 储层非均质性研究	173
第一节 储层非均质性的分类	173
一、Pettijohn 的分类	173
二、Haldorseth 的分类	174
三、裘亦楠的分类	175
四、其它分类方案	176
第二节 储层非均质性的研究内容和方法	176
一、层内非均质性	176
二、层间非均质性	181
三、平面非均质性和三维非均质性	185
四、储层非均质性的影响因素	187
第三节 储层非均质性对储层开发的影响	187
一、泛滥河道砂岩体的开发特征	187
二、三角洲平原分流河道砂岩体的开发特征	189
三、河口砂坝的开发特征	190
第六章 储层敏感性	192
第一节 油气储层损害的机理	193
一、岩石成分及孔隙结构对储层损害的影响	193
二、外来流体与储层相互作用导致储层的损害	195
第二节 储层敏感性评价	197

一、速敏性实验及评价	200
二、水敏性实验及评价	201
三、盐敏性实验及评价	202
四、酸敏性实验及评价	203
五、碱敏性实验及评价	204
六、正反向流动实验及评价	204
七、体积流量敏感性实验及评价	205
八、系列流体敏感性实验及评价	205
第七章 储层描述与储层地质模型的建立	207
第一节 测井资料数据标准化	208
一、直方图平移法	208
二、趋势面分析法	209
三、均值校正法	212
四、变异函数分析法	212
第二节 关键井的选择与“四性”关系研究	212
一、关键井的选择及其研究内容	213
二、研究“四性”关系的方法及测井解释模型的建立	213
第三节 有效厚度划分及夹层扣除标准研究	219
一、有效含油层界限的确定	220
二、有效厚度划分标准	220
三、夹层扣除标准及方法	221
第四节 储层横向追踪的地震技术	222
一、波阻抗反演法(合成声波测井法)	222
二、波形振幅分析方法	223
三、三维地震技术	224
四、VSP 技术	224
五、一维和二维地震模型技术	224
六、频谱分析方法	225
第五节 储层地质模型	226
一、概念与意义	226
二、储层地质模型的分类	228
三、储层建模基本步骤	231
四、河流相储层模型的建立实例	233
第八章 储层综合分类及评价	236
第一节 碎屑岩储层的综合分类评价	236
一、根据砂岩的孔隙类型和毛管压力特征的分类评价方法	236
二、根据砂岩的厚度、连续性、物性、孔隙结构及产能等参数进行分类评价方法	239
第二节 碳酸盐岩储层的分类评价	243

一、分类依据	243
二、分类方案	245
第九章 储层实验测试技术	246
第一节 薄片鉴定中的新技术	246
一、铸体薄片的制作	247
二、一片多用分析技术	247
第二节 扫描电子显微镜	247
一、基本原理	247
二、扫描电镜下应搜集的资料	249
第三节 电子探针及能谱仪对自生矿物成分的测定	251
一、基本原理	251
二、用途	251
第四节 X衍射分析技术	252
一、基本原理	252
二、用途	252
第五节 阴极发光技术	253
一、阴极发光显微镜	253
二、应用	253
第六节 沉积岩矿物包裹体分析技术	254
一、基本概念	254
二、包裹体的研究方法及应用	254
第七节 稳定同位素分析	256
一、沉积环境的恢复	256
二、介质盐度分析	256
三、矿物成分及成因分析	256
四、油气生成与运移分析	257
第八节 图像分析仪	257
一、岩石铸体薄片平面上孔隙特征参数的提取	257
二、应用	258
第九节 粘土阳离子交换容量及盐基分量的测试	258
一、基本概念	258
二、方法及原理	258
三、阳离子交换容量分析的应用与意义	259
第十节 砂岩中粘土矿物绝对含量测定及其地质应用	260
参考文献	261

绪 论

储层是地下石油和天然气储集的空间和聚集的场所,是油气勘探和开发的主要对象和目的层。储层地质学又名开发地质学,指油气田投入开发后,地质工作者应用地质、地球物理、油层物理、分析化验等资料,利用计算机等先进的技术和设备对储层和地下流体习性进行详细描述和预测的一门学科。

石油生成与储集是石油地质学中的两大核心问题,因此,储层地质学是石油地质学的一个重要分支和发展方向,是在油气田勘探与开发长期实践中逐渐兴起和完善的一门综合性、实践性较强的边缘学科。

目前,世界上大部分主力油气田生产高峰期已过,相当一部分油田进入了中、高含水期,油气田勘探、开发的难度越来越大。石油地质工作者面临着在勘探成熟区增加油气储量,在开发成熟区提高采收率的挑战。即充分利用地质、地震、测井等资料对储层进行研究,预测砂体的几何形态和空间分布特征,寻找隐蔽的复杂油气藏,增加油气后备储量。同时还要结合开发动态资料对储层进行精细描述,建立储层地质模型,预测剩余油的分布规律,为提高最终采收率提供可靠的地质依据。因此,储层地质学日益受到石油界的关注。它的研究已正式列入油田地质师、石油工程师的工作日程。近年来,多次召开国际储层表征技术研究讨论会,并出版了论文集。美国石油地质学家协会通报主编、莫比尔石油公司地质学家詹姆斯 A·赫维格呼吁石油地质家们:在勘探发现油气、建立储量阶段,在油气开采的各个阶段,都要彻底了解储层地质,而不致有误。

我国是油气资源十分丰富的国家之一,由于大多数油田采用注水保持长期稳定高产的开发方针,所以各油田对储层描述工作都给予了高度的重视,20 世纪 60 年代大庆油田的小层对比和油砂体研究技术,不仅为大庆油田的长期稳定高产奠定了坚实的基础,而且在科学技术水平上已处在当时的世界前列。20 世纪 80 年代石油地质基础理论的不断完善和边缘学科的广泛应用,改变了许多传统观念,为储层地质学的发展提供了丰富的理论依据。1985 年以来,油气储层评价研究和油藏描述技术,被列为部级和国家级重点科研课题,取得了一批优秀的科研成果,某些技术已达到世界先进水平,这些科研成果的推广和应用,使我国储层研究、储层描述、储层评价等技术大大前进了一步。

目前,新的勘探方法和分析手段提供了详尽而可靠的地质、地球物理、地球化学、油层物理、测试分析等数据。为储层地质学向多学科、多手段综合研究方向发展创造了条件,使储层研究成为一个系统工程,即从勘探到开发各个阶段,从宏观到微观,从定性到定量全方位地对储层进行描述和预测。并将基础研究与工程工艺相结合,协同地球物理、油藏工程等各专业共同攻关,高水平、高效率地为油田勘探、开发服务。

储层地质学是以基础地质学、石油地质学等学科为理论基础,与油矿地质学在内容上互相渗透、彼此结合的一门综合学科。

通过本课程的学习,使学生可以综合应用地质、测井、地震、测试等方法,对储层进行详细描述,掌握流体在储层中的分布和变化规律,为扩大油田后备储量,稳定产量,提高最终采收率提供可靠的地质依据。

第一章 储层的基本性质

地下石油和天然气都是储存在各类储层之中,储层的孔隙性、渗透性及流体饱和度是油气储层的基本属性,也是划分油气层的重要依据,它们直接控制了地下油气的储量和产能,是油气田勘探、开发的基础资料之一。

第一节 储层的概念及分类

一、储层的概念

油田开发实践表明,地下流体主要储存在岩石的孔隙、裂缝和洞穴之中,并且在一定条件下,流体可以在其中流动。地下流体主要指的是石油、天然气和地层水;油、气经运移聚集,在特殊地质条件下可形成油气藏。

凡是能够储存和渗滤流体的岩石均称为储集岩。储存流体主要由岩石的孔隙性决定,而渗滤流体则由岩石的渗透性决定。由储集岩所构成的地层称为储集层或储层。

若储集层中含有工业价值的油、气流则称为油层、气层或油气层。

勘探实践证明,在组成地壳的沉积岩、岩浆岩和变质岩中都发现有油气田,但 99% 以上的储量集中在沉积岩中,其中又以砂岩和碳酸盐岩储集层为主。近年来,随着石油地质理论的发展和完善、油气田勘探水平的提高,人们在岩浆岩、变质岩及泥页岩中找到油气藏的数量越来越多,不久的将来,人们可望在上述岩类储集层中找到更多的油气储量。

二、储层的分类

根据研究目的及油田生产实践的需要,对储层有各种分类方案,常见的方案有以下几种。

1. 岩性分类

岩性分类,即根据储集层的岩石基本类型进行分类,是一种简单而实用的分类方法,通常可将储集层分为三种基本类型。

(1) 碎屑岩储集层

指的是由砾岩、砂岩、粉砂岩组成的油气储集层。主要由砂岩组成的储集层称为砂岩储层,是世界上分布最广的一类储层。

(2) 碳酸盐岩储集层

指的是由石灰岩、白云岩等碳酸盐岩组成的油气储集层。如礁灰岩储层,是世界上单井日产量最高的一类储层。

(3) 其它岩类储集层

指的是由火成岩、变质岩或泥页岩组成的油气储集层。近年来世界各地都发现了一些岩浆岩、变质岩、泥页岩为储层的油气田。该类储层的岩石类型、储集空间类型及其形成机制都很复杂。目前,其油气储量仅占世界总储量的一小部分,但随着常规储层的不断开发,为了寻找石油及天然气的后备储量,这类储层的研究将会变得越来越重要。

形成这类储层的主要地质原因是风化作用和构造断裂作用。岩浆岩、变质岩经过风化作用都可以形成风化壳,从而成为缝洞比较发育的储集体。但风化作用只能在地面附近一定深度内进行,到达基岩内部逐渐消失。

风化壳储层在纵面上分带性明显,自上而下分为崩解带、淋滤带、水解带(图 1-1)。

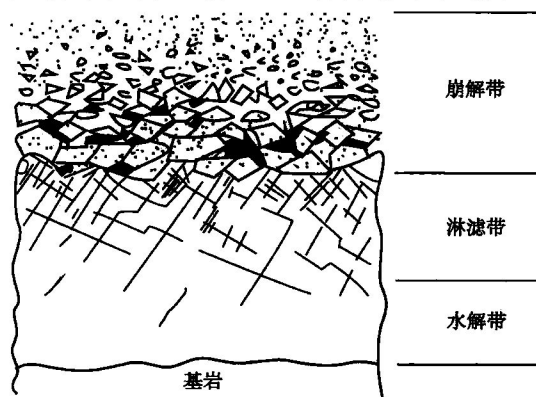


图 1-1 风化壳储层在纵向分带示意图

崩解带位于风化壳的表层,崩解产物在风化壳表面形成残积层,厚度可达 150 m。下部常由角砾岩、砂泥质角砾岩组成,向上逐渐变细。

淋滤带位于崩解带的下部,由于大气淡水的淋滤作用形成各种不规则的溶缝和溶洞。这些裂缝可能是在构造裂缝的基础上形成的。溶缝、溶洞可被后来的碳酸盐胶结物、硅质胶结物充填和半充填。此带的厚度为几十米到上百米。例如辽河油田兴隆台花岗片麻岩风化壳淋滤带,厚度为 76~191.5 m。

水解带位于淋滤带之下,在此带之内,由于矿物的水解作用,形成新的矿物,只产生微量的小孔隙。

风化壳储层储集空间的大小、形态及分布规律与岩性有关,不同的岩性其风化难易程度不同,溶蚀作用的结果亦千差万别。

此外,还与古地形和古气候有关,古地形决定着溶解和风化的产物是否能被及时搬走。湿润的气候条件以化学风化为主,化学风化易形成溶蚀孔洞。而在干燥的气候条件下则以物理风化为主,易形成碎屑角砾岩内的粒间孔隙。

裂缝是岩浆岩、变质岩、泥页岩的主要储集空间。除构造断裂作用形成的构造裂缝外,还有节理和成岩裂缝。如鸭儿峡油田志留系变质岩储层的储集空间主要为节理和裂