

华北碳酸盐岩潜山油藏开发

华北石油勘探开发设计研究院编著

石油工业出版社

华北碳酸盐岩潜山油藏开发

华北石油勘探开发设计研究院 编著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以华北碳酸盐岩潜山油藏的开发实践为基础,参考了其它地区及国外碳酸盐岩油藏的开发实例,总结了该类油藏的地质特点及开发中的一些基本问题。

全书共分两大部分。第一部分碳酸盐岩潜山油藏地质研究,包括油藏的基本地质特点、潜山的形态与内幕构造、储集层特性及其非均质性、圈闭类型和储量计算,特别是针对碳酸盐岩油藏具有双重孔隙系统的特征,提出了研究的基本理论及方法。第二部分油藏工程研究,分析了双重孔隙介质油藏渗流特征、水驱油机理及其驱油效率,提出该类油藏开发设计的理论及实施,并根据生产动态特征总结了实用的油藏工程方法及现场分析方法。

本书可供从事油矿地质、开发开采工作的科技人员和现场工作人员、大专院校油田开发专业师生参考。

华北碳酸盐岩潜山油藏开发 华北石油勘探开发设计研究院 编著

石油工业出版社出版
(北京安定门外外馆东后街甲36号)
北京妙峰山印刷厂排版
北京顺义燕华营印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 23³/₄印张 8插页 566千字 印1—3,580

1985年3月北京第1版 1985年3月北京第1次印刷

书号: 15037·2533 定价: 6.10元

前 言

《华北碳酸盐岩潜山油藏开发》，是《潜山油气藏》〔注〕一书的姊妹篇。

《潜山油气藏》一书，比较系统地总结了任丘碳酸盐岩潜山油田发现以来，我国潜山油气藏勘探的经验；比较详细地论证了潜山的形成、发育、分布规律，以及构成油气藏的特殊地质条件；比较具体地介绍了评价、精选、找准潜山构造和有利含油气部位的方法。

本书在前书的基础上，从另一个方面，即从合理开发油田的角度，向读者介绍多年来业已积累的、丰富多采的潜山油藏开发经验和理论研究成果，以便对潜山油藏勘探、开发的全貌有一个系统的了解。

华北地区一批碳酸盐岩潜山油藏的发现和投入开发，不仅使这类油藏迅速成为我国石油生产的重要支柱之一，而且也为我国油田开发科学工作者开辟了一个理论研究和科学实践的广阔的新领域。

碳酸盐岩潜山油藏因其独特的地质结构和有别于碎屑岩油藏的开采动态特征，引起了国内油田开发科学工作者的广泛注意。几年来，有关科研部门、高等院校、生产单位的许多专家和工作人员就碳酸盐岩油藏的合理开发问题发表了不少的文章，这为本书的撰写工作奠定了较为雄厚的基础，创造了较为有利的条件。

《华北碳酸盐岩潜山油藏开发》一书，荟萃各方面的研究成果和实践经验，阐明了碳酸盐岩潜山油藏储集层的地质研究手段和方法；提出了较系统的开发设计理论；论证了分析和预测这类油藏开采动态的可行的方法。

本书提供了一个揭示碳酸盐岩储集层微观结构的模式。这就是从野外露头或矿洞的宏观类比模拟调查、岩芯观察到室内镜下微观分析的一套从感性认识升华到定量统计的研究序列。这种方法已成为实际工作中确定碳酸盐岩储集层性能和物性参数的具体手段。

本书还比较详细地介绍了在厚达数百米的巨型块状碳酸盐岩油藏内的非均质特征、细分层方法以及它们在油藏开发中可能产生的影响和采取的对策，特别是对碳酸盐岩油藏所具有的裂缝系统、岩块系统双重介质的表述、及由此而产生的注水开发过程中两种不同驱油机理的论证、和对碳酸盐岩块状底水潜山油藏所建立的水锥数值模拟方法，更深入地阐明了这类油藏的开发特点。书中确定的有关井网密度、井位部署原则、采油速度、注水方式等技术政策界限，不仅具有一定的理论意义，而且在油田开发的实践中已充分显示出了它们的指导作用。

本书引用了华北油田各有关单位的资料以及胜利油田、辽河油田的一些有关资料。在编写过程中得到了成都地质学院罗蛰潭教授、华东石油学院研究生部张朝琛副教授、中国科学院应用数学研究所秦元勋教授、石油工业部蒋学明高级工程师、石油工业部勘探开发科学研究院陈元千工程师、华北石油管理局于庄敬副总地质师、熊英俊工程师、中国石油

〔注〕《潜山油气藏》一书于1982年12月由石油工业出版社出版。

学会徐旺高级工程师、王志中工程师、石油工业部石宝珩工程师、华北石油管理局叶秉三工程师等同志的热情支持和帮助，他们都对本书初稿提出了重要的修改意见，在此一并表示感谢。

参加本书编写工作的有邓华云（绪论，第七、第十二章，并统编全书），李功治（第十一章），黄正芳、刘珂（第一、第二、第五章），尹定（第十章），朱亚东（第九章），李厚义（第六章），黄代国（第八章），樊哲仁（第三、第四、第五章），杜宗荣（第十三章）等同志。我院油田开发研究室张惠芝同志为全书清绘了插图。高超、吴继龙、郭永昌同志分别为本书作了文字处理和封面设计。我院崔辉、吴华元、蒋永昌同志分别审阅了书稿。

在听取了各方面的意见后，对本书初稿进行了统一修改，经杨培山同志审阅后定稿。

由于我们理论水平不高，视野不够开阔，加之各类资料的局限，书中不可避免有那样那样的不足甚至谬误，望读者批评指正。

华北石油勘探开发设计研究院
一九八四年三月

目 录

绪 论	(1)
-----	-----

第一篇 碳酸盐岩潜山油藏地质研究

第一章 碳酸盐岩储集层的细分层与对比	(7)
第1节 碳酸盐岩细分层与对比的地质依据	(7)
第2节 碳酸盐岩细分层与对比的方法步骤	(18)
第3节 细分层与对比基础地质图件的编制	(21)
第二章 潜山、潜山构造和潜山油藏类型	(23)
第1节 潜山	(23)
第2节 潜山构造	(30)
第3节 断层和裂隙	(35)
第4节 碳酸盐岩潜山油藏类型	(42)
第5节 潜山基础地质图件的编制	(45)
第三章 碳酸盐岩石类型及储集空间几何结构	(49)
第1节 岩石类型及岩石化学组分	(49)
第2节 储集空间几何结构	(54)
第四章 碳酸盐岩储集体	(64)
第1节 储集岩	(64)
第2节 储集层	(69)
第五章 碳酸盐岩储层非均质性	(75)
第1节 储层非均质性	(75)
第2节 非均质性的控制因素	(83)
第六章 碳酸盐岩油藏开发测井	(102)
第1节 碳酸盐岩储集层测井系列	(102)
第2节 应用测井资料划分储集层及储集类型	(112)
第3节 碳酸盐岩地层孔隙度的确定	(115)
第4节 碳酸盐岩含油性解释	(121)
第5节 测井资料在开采分析中其它方面的应用	(129)
第七章 碳酸盐岩潜山油藏储量计算	(130)
第1节 容积法地质储量计算	(130)
第2节 动态法地质储量计算	(140)
第3节 可采储量计算	(146)

第二篇 碳酸盐岩潜山油藏开发研究

第八章 碳酸盐岩储层渗流特性	(159)
第1节 界面张力和润湿性	(159)

第2节	毛管压力曲线	(161)
第3节	多相流体在裂缝性碳酸盐岩储层中的流动	(175)
第九章	裂缝性碳酸盐岩储层试井分析方法及应用	(190)
第1节	裂缝性碳酸盐岩储层试井分析的理论基础	(190)
第2节	裂缝性碳酸盐岩储层压力恢复和压力降落曲线的基本特征	(194)
第3节	裂缝性碳酸盐岩储层压力恢复曲线分析方法	(198)
第4节	其它试井分析方法在裂缝性碳酸盐岩储层中的应用	(202)
第5节	裂缝性碳酸盐岩储层井间干扰测试分析方法	(210)
第十章	碳酸盐岩底水油藏数值模拟	(216)
第1节	碳酸盐岩油藏数值模型的建立	(216)
第2节	数值模拟的计算方法	(224)
第3节	数值模拟的参数要求	(238)
第4节	数值模拟的应用	(244)
第十一章	碳酸盐岩潜山油藏开发设计	(255)
第1节	油田开发的方针和原则	(255)
第2节	油田开发程序	(257)
第3节	开发井网的部署	(261)
第4节	合理采油速度的确定	(265)
第5节	开采方式的选择	(272)
第6节	油井完井方式和油田投产方式	(280)
第7节	油田开发指标预测	(282)
第8节	开发方案的实施	(286)
第9节	开发过程的监测及调整	(289)
第十二章	碳酸盐岩潜山油藏开采动态	(296)
第1节	油井生产能力及其变化规律	(296)
第2节	油藏注水开发见效特点	(303)
第3节	油井井底水锥和油井含水变化规律	(308)
第4节	油水运动状况及水驱油效率	(325)
第5节	油藏连通状况分析	(331)
第6节	碳酸盐岩潜山油藏开发阶段划分	(338)
第7节	油藏动态分析及预测	(343)
第十三章	碳酸盐岩潜山油藏开发中采油工艺的应用	(350)
第1节	油层酸化	(350)
第2节	卡、堵油井的出水层段	(356)
第3节	分层测试工艺	(362)
第4节	排水采油	(370)
第5节	间歇性注水采油	(371)
第6节	机械采油	(372)

结 论

碳酸盐岩油气田在世界油气田分布中占有重要的地位,一些盛产石油的国家都分布有碳酸盐岩的大油田,我国任丘油田也是大型的碳酸盐岩油田。这些油田不仅储量大,而且单井产量高,因此勘探和开发碳酸盐岩油藏,已引起人们越来越广泛的重视。

碳酸盐岩油气高产富集的类型,除大型隆起富集带、生物礁型富集带等外,潜山也是一种重要的富集类型,尤其是断块潜山油气田。这类油田在我国发现较晚,1972年在渤海盆地济阳拗陷钻成沾11井,该井钻至奥陶系灰岩即有放空、井喷现象,测试的日产油量近千吨。随着勘探工作的进展,后来发现了义和庄碳酸盐岩潜山油藏。该油藏为一北倾的单斜断块,中部被一条北东走向的横断层分割为东西两块。潜山由上、下古生界组成,油气主要聚集于高部位的奥陶系碳酸盐岩内。

继后在渤海盆地冀中拗陷中部发现任丘潜山油田。该潜山为北东——西南向,西侧被大断裂所切割,断层落差较大,下第三系覆盖在中上元古界及寒武、奥陶系上。潜山由于长期上升遭受侵蚀,缝洞比较发育。1975年7月任4井首次在中元古界蓟县系雾迷山组白云岩中获得高产油气流,初产达千吨。生产井中最高的单井日产油量可达三千吨左右,而且油藏面积大、含油高度大、储量丰富。目前已在冀中拗陷发现的大小潜山油田有任丘油田、雁翎油田、龙虎庄油田、薛庄油田等。

1979年2月又在渤海盆地辽河断陷西部凹陷内发现曙光潜山油田,亦在雾迷山组白云岩获高产油流。该潜山油藏是在西部斜坡背景上由反向西掉正断层所控制的断块山,整个山被次一级断层切割成两个小山头。组成潜山的碳酸盐岩地层为一风化块体,缝洞发育,连通性好,油井也均高产,自1979年投入开发以来一直稳定生产。

围绕着渤海盆地所发现和投入开发的一批碳酸盐岩潜山油藏,在我国油田开发中已占有越来越重要的地位。过去我国开发的油田以碎屑岩油藏为主,这些油藏的开发经验对碳酸盐岩油藏的开发虽然也有很现实的作用,但碳酸盐岩油藏由于其地质条件的特殊性,在油田开发中也必然有其区别于碎屑岩油藏开发的明显的特点,这些特点将油田开发研究带进了一个新的领域。为了开发好这类油藏,就必须认真分析研究碳酸盐岩储集层的特点和分布规律,掌握其油水渗流特征及水驱油机理,制定符合潜山油藏地质特征的开发原则及开发技术界限,这对编制合理开发方案指导油田生产具有十分重要的意义。

一、碳酸盐岩潜山油藏的主要特点

组成碳酸盐岩油藏的基本岩类为石灰岩、白云岩,在各种类型的碳酸盐岩岩石中除礁灰岩外,一般孔隙均较细小,但潜山油藏由于受长期风化、淋滤及多次构造运动的影响,断裂、裂缝及溶蚀孔洞较发育,从而形成与一般碎屑岩油藏截然不同的孔隙类型,使得这两类油藏在储层结构、油水运动、生产特征上有较大差别。

1. 碳酸盐岩潜山油藏类型以块状底水为主

碳酸盐岩潜山油藏类型较多,但目前渤海盆地已发现的碳酸盐岩潜山油藏中,块状底

水油藏约占百分之七十，其储量占碳酸盐岩潜山油藏总储量的百分之九十以上，故块状底水油藏是主要的潜山油藏类型。

这主要因渤海盆地潜山油藏的主要产油层系为蓟县系雾迷山组及奥陶系，它们都是海侵高潮期的沉积物，多接受了潮间及潮下，中到高能带的沉积，为一套厚度较大、质较纯的碳酸盐岩，如华北雾迷山组即为厚达3500米的典型陆表海碳酸盐沉积，藻迭层石十分发育，间夹有潮上低能带的泥质碳酸盐岩类，但该区此期的区域地壳运动是以持续下降为主，故其水退期时间短、沉积厚度也较小。如任丘油田雾迷山组厚度2500米以上，但最厚的泥质白云岩段仅70米。这套中元古界的碳酸盐岩地层在经受长期的地质构造运动后，断裂、裂缝十分发育，并遭受强裂的风化剥蚀作用，更增添了种类繁多数量极大的溶蚀缝洞，致使这些厚度较薄的泥质白云岩层也都存在一定的缝隙，失去其作为隔层的作用，使整个地层上下串通成一个连通体。由此组成的碳酸盐岩油藏几乎全部为块状底水油藏。奥陶系油藏一般也呈块状底水类型，或呈厚层状边（底）水类型。

2. 具有双重孔隙类型的储集空间

碳酸盐岩的储集空间类型比较复杂，除原生的晶间、粒间等孔隙外，由于受构造应力作用、溶蚀作用、白云岩化作用和再结晶作用等，常形成各种宽度不等的裂缝及孔洞，孔隙结构多样，但都表现为一个由裂缝孔隙和一个为裂缝所切割的岩块孔隙所组成的双重孔隙体系。而不象砂岩油藏那样以粒间孔隙为主且受后期次生变化的影响较小，孔隙大小和分布较均一，孔渗关系较一致。碳酸盐岩储集层，由于其孔隙类型较多且受次生作用的影响严重，储集空间的分布极不均匀，以致其非均质性比砂岩油藏要复杂得多。

碳酸盐岩储集层的非均质性首先反映在两种不同类型的储集空间上。裂缝系统的主要特点是：组系多、延伸远、裂隙宽度较大、渗流能力极高，形成高渗透带。这些裂缝在油藏中主要起通道作用，但它也是重要的有效储油空间，据压力恢复曲线计算的裂缝渗透率可高达1达西以上，其孔隙体积较小，一般不超过1~2%，孔渗之间没有明显关系。岩块系统则不同，一般多为粒间、粒内、晶间孔隙及小型溶蚀孔洞和微细裂缝所组成，总孔隙空间虽小于砂岩储层，但比裂缝系统则明显增大，只是渗流能力极差。其次在岩块之间因受沉积相的控制，差别也较大。以任丘油田取芯井为例，大直径岩芯基本上代表岩块，所分析的孔隙度为1.42~5.11%，渗透率为15~999毫达西，渗透率变异系数达0.95，比冀中拗陷的第三系砂岩油藏（渗透率变异系数为0.79~0.745）要差得多，说明非均质性更为严重。

由于碳酸盐岩储集层严重的非均质性，所以在生产动态上，不仅油井各层段出油状况有很大差别，平面上各油井产量、见水情况也有较大差别，因而研究、认识碳酸盐岩储层的这种特性，并充分利用其有利的条件，是开发好碳酸盐岩潜山油藏的关键问题。

3. 油井生产能力高

碳酸盐岩油藏孔隙度虽不高，但裂缝发育渗透率高，一般单井产量比砂岩油藏可高出几十倍甚至上百倍。高产的主要条件在于裂缝的发育程度，尤其是裂缝的渗流能力。许多资料表明，碳酸盐岩油藏即使是高产井，裂缝的孔隙度一般也小于1%。统计了23口日产大于1000吨的油井，其岩块系统的孔隙度为3.94%，裂缝系统的孔隙度仅0.92%，但裂缝系统渗透率却高达1586毫达西；另外统计了16口平均产量为318吨的油井，岩块孔隙度大于5%，裂缝系统的孔隙度为0.87%，但其裂缝系统渗透率只有600毫达西。从这两类井

的对比,说明油井高产的原因,不在于岩块或裂缝系统孔隙度的高低,主要关键在于裂缝系统的渗透率。它主要受裂缝宽度的影响,即使裂缝孔隙体积相近,但由于裂缝宽度的差别,其渗流能力与产量就会大不相同。这些产量高达千吨的油井,在钻井过程中大多发生过严重井漏,部分井还有钻具放空现象,这些都是钻遇较大缝洞的实证。

油井产能高的另一因素是油藏连通好,整个潜山(包括底水区)为一个被多组系裂缝所沟通的块状体,在井间距离长达20多公里的条件下,仍可以保持良好的连通关系,这就保证了油井有充分的供油条件。

油井单井产量高,往往可以使整个油藏的开采速度很快提高,一些中小型油藏几口井的产量就可使全油藏采油速度达到较高水平。如薛庄雾迷山组油藏,投产时只有一口生产井,最高采油速度即达14%。冀中东部5个中小型碳酸盐岩潜山油藏投产初期采油速度都在5%以上,其它碳酸盐岩油藏采油速度也均大于2%。而砂岩油藏由于单井产量较低,有时受油井数量所限,难以达到设计采油速度的要求,要提高采油速度则更困难。碳酸盐岩潜山油藏对于迅速形成较高的原油生产能力非常有利,但碳酸盐岩油藏的采油速度对开发效果的影响十分敏感。大量生产资料表明,采油速度过高常常使底水过早锥进,造成油井提前见水,油井产量明显递减,并导致油水界面上升速度加快,水驱油效率降低,当把采油速度控制在合理范围时,开发效果明显改善。因而在开发碳酸盐岩油藏时,如何确定合理采油速度,既充分利用其初产能力高的特点,在短期内使油田达到较高的开采速度,又能取得较好的最终开发效果,就成为油藏工作者面临的复杂而又迫切需要解决的课题。

4. 含水是影响油藏稳产的主要因素

油藏在天然水驱或人工水驱的条件下开发,油井含水生产是不可避免的。但不同类型油藏含水后对稳产的影响程度截然不同,大量实践资料表明,对一般砂岩油藏即使综合含水达40~50%仍可保持高产稳产,到开发中期虽因主力油层含水较高,使产量逐步递减,但通过各种措施(如加大排液量、分层改造等)使动用状况较差的油层逐步发挥作用,仍可实现接替稳产以保证达到方案设计的采油速度。而碳酸盐岩油藏则不然,尤其是块状底水油藏的油井见水后产量大幅度下降,油藏很难稳产。曾对这类含水油藏或油井采取过多种措施,如间隙开井采油、堵水采油、内部注水和补钻加密井等,除补充加密井对油田稳产比较有效外,其他措施都很难达到保持油井、油藏稳产的目的。即使对砂岩油藏较有效的加大排液量的措施,在碳酸盐岩潜山油藏也未能奏效。冀中拗陷雁翎油田及其它油田均有多口井在不同含水阶段采取加大排液量措施,多数油井放大压差后,虽然日产油量略有增加,但产水量却大幅度增长。从累积产油、累积产水量关系曲线上可见,曲线偏向产水量轴,也即油井的最终可采油量降低,开发效果变差。与冀中潜山油藏特点相似的苏联札曼库尔油田上白垩统裂缝性灰岩油藏,曾分别对二组油井进行试验,一组提高产液量,另一组产量不变。提高产量的一组在试验初期各井产油量都有增加,当这组井采液量平均增加1.5倍时,产油量增加30%之后逐渐下降至提高液量前的水平,而含水却比另一组井高60%。该两组井的井位和采油条件基本相同但井的动态却不同,前一组井由于提高采液量后油井含水率急剧上升直至完全水淹,故认为提高油井采液量对碳酸盐岩油藏是一种低效的强化采油措施。因而在碳酸盐岩油藏开发过程中,合理地控制油水界面均衡推进,有效的降低油井水锥高度,尽量延长油井无水采油期,使油井保持高产稳产是十分重要的。

5. 存在两种不同的驱油机理和驱油效率

碳酸盐岩储集层中存在的双重孔隙体系,其水驱油机理有很大差别,在裂缝系统中,流体服从达西定律,主要驱动力是压力梯度及重力,毛管力的作用很微弱甚至可以忽略,水驱油效率都在90%以上。在岩块系统,因孔喉均甚细小,毛管力渗吸作用是主要驱油动力,根据室内试验及现场实际资料计算,其驱油效率较低,一般只有20%左右。而此类孔隙又是主要的储油空间,其驱油效率的高低直接影响了全油藏的驱油效率和最终采收率。故对于碳酸盐岩油藏开发,如何尽可能的提高岩块系统的驱油效率是一个重要的问题。一方面要制订正确的开发技术政策,保持油藏在临界速度下生产,最大限度地发挥岩块自吸驱油的能力,另一方面要试验各种提高采收率的方法,尽可能采出更多的原油。

二、油藏工程研究的进展

碳酸盐岩潜山油藏由于储集条件与碎屑岩有较大差异,因而用常规方法难以认识其本质,必须针对其特点和须解决的问题提出研究方法及改进各种试验手段。近年来,结合生产实践,在一些有关油田开发的基本理论研究方面取得了一定进展。

1. 碳酸盐岩储集层的研究

碳酸盐岩储集层的储集空间类型复杂,孔隙结构多样,岩石物性变化大,非均质程度高,从实践中提出和采用了五种方法二十多种手段对其进行研究,特别是对岩芯采用了素描、孔洞缝统计、揭片、岩矿薄片、铸体薄片、荧光薄片、扫描电镜、岩石物性、压汞毛管力测定等多种手段进行研究,以期充分认识其特点。大直径岩芯的物性参数测定和压汞法的应用,对碳酸盐岩储层的孔隙空间的大小及岩石微观孔隙分布,孔隙结构等的研究提供了重要资料。通过对华北盆地周边燕山和相邻的辽宁金州石棉矿等地区的野外模拟调查,以类比法来研究储层各类储集空间的组成和所占比例,提出了碳酸盐岩孔隙空间的构成模式,为研究碳酸盐岩储层特性确定有效孔隙度等起了重要作用。

对于孔隙度的测定,现用大直径岩芯测物性参数(认为主要代表岩块系统),解决了在岩性致密,孔隙度较低(一般为2~3%)的条件下比较准确的求得物性参数的分析测定方法。

碳酸盐岩储集层研究的另一个重要方面就是如何在巨厚的碳酸盐岩地层内划分出储层与非储层,这对于计算油田储量及分析油藏开采动态都是至关重要的。几年来该项工作的研究一直在不断深化,渐趋完臻。提出了用岩芯、地质录井(包括放空漏失等)、分层试油、电测等项资料可靠的划分储层级别及储集类型的方法,并总结出了从储集空间类型、岩石种类、岩石物性和储层分布等方面对碳酸盐岩储层非均质性进行系统的描述和评价的方法。对影响储层非均质性的地质因素及非均质性在油藏开采中的作用也都取得了研究成果。如这一研究指出,低渗透的泥质白云岩层及硅质层均为非储层,但由于缝洞的发育,它们对底水上升仅起局部的、暂时的阻滞作用,而对油流不起阻隔作用,故整个油藏在开发过程中仍呈现为一个统一的块体。

2. 碳酸盐岩储集层渗流特征的研究

为搞清这个问题,作了大量的基础试验,其中包括岩石的孔、渗、饱测定,岩石的润湿性、毛管压力和相对渗透率曲线的测定,原油酸值和油水界面张力的测定,单元岩块的自吸采油特性试验及平面物理模型的水驱油实验等。对于冀中碳酸盐岩的岩石表面润湿特

性这个较有争议的问题，在经过了充分的条件试验基础上，对天然岩芯进行了吸入法实验和主要造岩矿物润湿角的测定，确定碳酸盐岩油藏岩石润湿性基本上是亲水的，极少数出现中性的情况，为油藏的注水开发提供了依据。

对岩块的自吸采油及相对渗透率曲线的测定加深了对岩块系统水驱油特性的认识，实践证明岩块系统微细裂缝的发育程度决定了自吸采油的效果，致密含油岩块有效自吸排油空间仍是微细裂缝和少量较粗的粒间或晶间孔隙。在水驱油试验时都表现了无水采收率较低，水相相对渗透率随含水饱和度增长迅速的特点，且高粘度原油对致密岩块的水驱油效率存在严重的不良影响。

平面物理模型试验模拟了碳酸盐岩油藏几种典型储集类型的底水驱油试验，所取得结果除直观定性的观察到底水驱油过程外，还研究了不同注水速度对采收率的影响，及不同类型储集层的驱油效率和最终采收率。

3. 测井资料解释的方法和应用

碳酸盐岩储集层的储集空间类型复杂，为求得较可靠的储层参数，除在测井系列上作了相应改变外，在测井资料的应用上也进行了较深入的研究，解决了地质及开发中的一些重要问题。利用自然伽玛、中子伽玛、声波、井径等资料提出了储层的定性划分方法及定量划分标准。可以利用这些资料确定所钻开油层的储油层厚度和分布，也可确定非储集层的分布和厚度，这样不仅可以为研究油层非均质性提供依据，也为计算储量打下了基础。在利用电阻法和双孔隙法划分油水界面（包括原始的和开采过程中的油水界面）方面，尤其有明显的实用价值，这些测井资料给分析开采动态，确定开发措施提供了可靠依据；应用裂缝识别井眼几何形状测井及声波电视测井等，可以定性指出裂缝发育部位并确定裂缝的产状。

为确定储集层的孔隙度，应用岩芯资料编制了白云岩的中子孔隙度图版，并根据岩芯提出了三孔隙度模型（即大裂缝孔隙、小裂缝孔隙、晶间-粒间微孔隙），初步建立了确定三种孔隙的电阻率方程，探索了解决碳酸盐岩孔隙度的新的途径。

4. 碳酸盐岩储层的试井分析和数值模拟

自裂缝性储层的试井模型产生以来，国内外对此类储集层试井的分析工作已有很大进展，1977年蒋继光在忽略岩块流动的条件下求得了双重孔隙介质渗流方程组在均质圆形有界定压、有界封闭和无限大三种边界，地层中心一口圆心井条件下的精确解。1979年华北油田勘探开发设计研究院根据此解计算了三种边界条件下的理论曲线，提出了用最优化拟合和半对数分析法来解释双重孔隙介质储层实测压力恢复曲线，求出了岩块系统、裂缝系统的孔隙度，储层厚度等参数，对认识油井、油藏开采动态特征、确定储量计算参数起了重要作用，还分析了裂缝性碳酸盐岩储层直接借用一些常规孔隙性储层试井分析方法的条件。对于不稳定试井的晚期直线段和边界反映段及稳定试井，由于此时岩块系统压力已和裂缝系统压力趋于一致，因而通常单一介质油藏的各种动态分析方法都可直接应用到具有双重孔隙介质的油藏开采分析中，从而为大量常规动态分析方法的应用提供了依据。

数值模拟作为研究油田开发的一种重要手段，目前在国外已广泛应用，五十年代末、六十年代初国外针对裂缝性碳酸盐岩油藏的特点提出了双重连续介质的模型及计算方法。1979年华北油田勘探开发设计研究院对冀中地区碳酸盐岩油藏进行了单井水锥数值模拟工作之后，考虑到这类油藏储集空间的双重孔隙结构特征和呈巨厚块状体并具底水的特点，

重力作用对底水锥进起重要作用，又进一步建立了三维数值模型，并成功地将其应用于冀中各碳酸盐岩油藏，对研究油水运动规律，预测油井、油藏动态，编制及选择开发方案和调整方案都取得了好的效果。

5. 开发方案编制和开发动态分析

由于碳酸盐岩潜山油藏的地质特征明显地区别于碎屑岩油藏，因此，在开发这类油藏时，也必须采取与其相适应的开采方法，这就在开发方案的编制上提出了新的要求。在生产实践和理论研究的基础上，现在已经形成了一套比较完整的碳酸盐岩潜山油藏开发方案的编制方法，它的内容从勘探和开发的衔接、开发程序、井网部署、采油速度的确定、开采方式等直至油井完井方式和开发过程中的调整 and 监测。这些方法既有它的理论基础，又经过了生产实践的检验。通过这些研究还提出了潜山油藏开发中的若干技术界限，它指出了这类油藏开发研究的基本内容，并且较为系统的提出了研究结果的主要观点。这些认识尤其对于碳酸盐岩潜山底水油藏更为深入。

油藏开发动态特征，也是油田地质特征的反映，因而总结和研究油藏的开发动态，不仅可以掌握油藏开发变化情况，分析和预测开发效果，而且能够认识油藏的某些主要的地质特征。如通过单井动态来研究油藏在原始状况下的地质参数（压力、油水界面、物性等）和油藏类型，并通过油藏动态来研究和预测其今后的变化，都取得了明显的效果。如在预测油井见水时间、油藏压力变化和油水界面上升幅度等方面，都使理论和实际几乎达到了完全的一致，这就为调整油田开发过程，改善油田开发效果提供了可靠的手段。

碳酸盐岩潜山油藏的发现和开发，丰富了油藏工程研究的内容，开辟了一个新的探索领域。随着生产的发展人们的认识将会更加深入。

第一篇 碳酸盐岩潜山油藏地质研究

第一章 碳酸盐岩储集层的细分层与对比

碳酸盐岩油藏，特别是古老的潜山碳酸盐岩油藏的显著地质特征之一是储层厚度大，一般数十米到数百米甚至可达千米以上，其间少有甚至没有不具储渗能力的隔层。如任丘油田雾迷山组含油层系厚达2500米以上，显然仅在如此巨厚的储集层的基础上获得的一些笼统的对油藏的认识是无济于事的，它远远不能作为合理开发油田的基础。因此对这种巨厚储集层必须进行细分层，细分后通过对比找出井间的层位关系，这是油田开发地质工作中首先要解决的一个关键问题，也是油田地质工作的基础。

在开发地质工作中进一步细分和对比碳酸盐岩地层的目的和作用主要是：

1. 认识储集层完整的地层层序和主要岩性特征。
2. 研究潜山构造形态和断裂特征。
3. 掌握储层特征及纵横向变化规律。
4. 确定岩溶特征及溶蚀孔洞的分布规律。
5. 进行储层非均质性的研究。
6. 为油田动态分析和油田开发方案的编制及调整提供依据。

总之，这是描述和深入研究油藏的首要条件之一，在油藏研究和油田生产中都具有重要的实际意义。

第1节 碳酸盐岩细分层与对比的地质依据

碳酸盐岩和其它沉积岩一样，它的形成是内外地质营力经过长期而复杂的相互作用的结果。其中内力作用是主要的，特别是地壳的长期升降作用，它不仅决定了剥蚀区和沉积区的地理位置，而且影响沉积物的物质成分、结构、构造和厚度等。结果形成了造岩矿物简单但结构构造类型繁多，生物化石十分丰富的各种碳酸盐岩。在碳酸盐岩地层剖面中也存在有其它沉积岩剖面所具有的那种旋回性和韵律性。

在石油勘探开发工作中，详细研究碳酸盐岩层的旋回性和韵律性是地层划分与对比的重要基础。

一、细分层的地质依据

1. 碳酸盐岩层的旋回性和韵律性

在构造运动中地壳的振荡运动是一种重要形式。在同一地区，当地壳隆起时，由于水退而成为侵蚀区，经过一些时间后，又因地壳下沉产生水侵成为沉积区。这种隆起与下沉随时间的进展产生有节奏的重复变化，就必然导致沉积地层剖面上，岩性相似的岩层产生

有规律地重复出现现象，这就是沉积岩的旋回性和韵律性。其中每一次振荡，即地壳下沉时水侵的和上隆时水退的不同沉积物组合，称为一个沉积旋回。

在实际工作中，常认为韵律性主要表现在相邻岩石的组合关系和岩石结构构造的递变关系上（如颗粒由粗变细），其规模和厚度都比较小。旋回性则主要表现在相邻岩性段，相近沉积相类型的组合关系上，其规模和厚度远比沉积韵律要大。

碳酸盐岩主要是在海洋环境里经过复杂的生物作用、化学作用和机械作用而形成的。它的组分大多数是在盆地内原地形成的内碎屑、藻粒、晶粒等，其次是盆地以外通过搬运来的陆源碎屑物质。这种盆外颗粒中，一般以泥级碎屑物较多，砂、砾成分较少。因此碳酸盐岩沉积旋回的特点之一是岩石类型较简单但岩石结构较复杂，其旋回性不如碎屑岩那样显著易于辨认，特别是在井下录井剖面中准确地划分沉积旋回或韵律是比较困难的。

碳酸盐岩的沉积旋回与其沉积环境有着密切的关系。本世纪五十年代始，国内外学者广泛开展了现代碳酸盐岩沉积的调查研究工作，从而促进了古代碳酸盐岩沉积环境和沉积相的研究，并取得许多新的成果和认识。目前国外常用海水能量，潮汐作用和古地理特征来划分碳酸盐岩沉积相带，尽管划分的原则和方法有些不同，但划分的结果却大致相似。各种相带划分结果如图（1-1）所示。

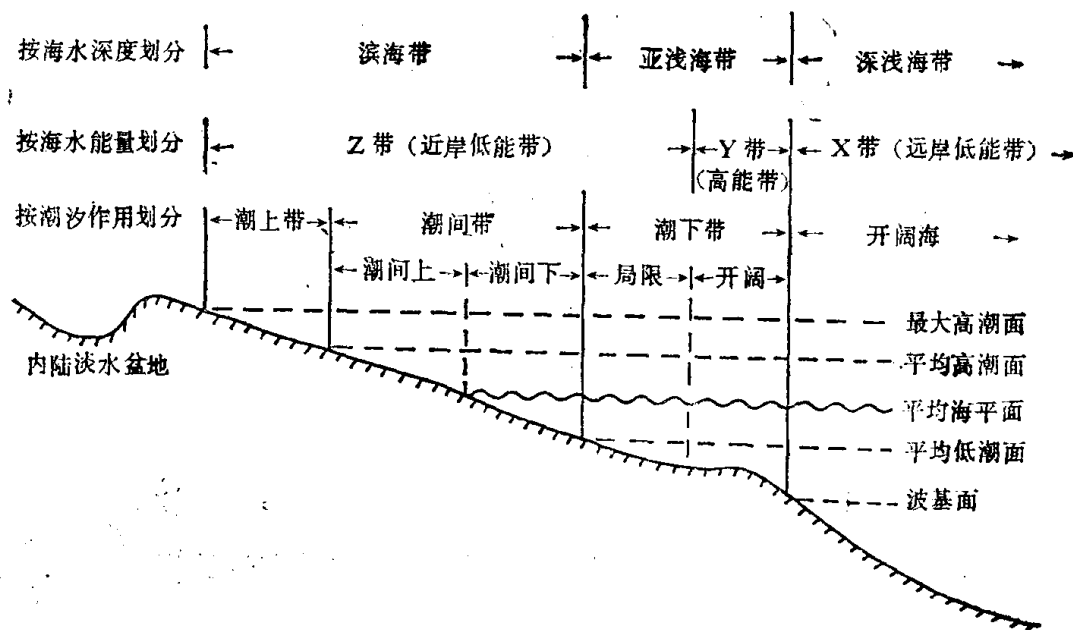


图 1-1 碳酸盐岩沉积相带不同划分方式对比图

在地质历史进程中，地壳运动使碳酸盐岩的沉积环境产生周期性的变迁。各种沉积相带不断地有规律地发生相互过渡与转换。如图(1-2)所示，水进时各沉积相带从海盆向海岸方向移动，较深水沉积物超覆在原较浅水沉积物之上，反之水退时，各沉积相带自海岸向海盆方向移动，较浅水沉积物覆盖在较深水沉积物之上，在纵向上自下而上形成潮上→潮间→潮下→潮间→潮上的沉积相序列，每个沉积相都具有各自的相标志和沉积物特征，这样在地层剖面内岩性相似的岩层即呈现出有规律的重复出现现象，这就是碳酸盐岩的沉积旋回。

例如在天津蓟县露头区雾迷山组地层的沉积旋回大致是：泥质白云岩或砂质白云岩→含屑或粒屑白云岩→含燧石的隐晶或微晶白云岩→纹层藻或波纹藻白云岩→藻团或锥状

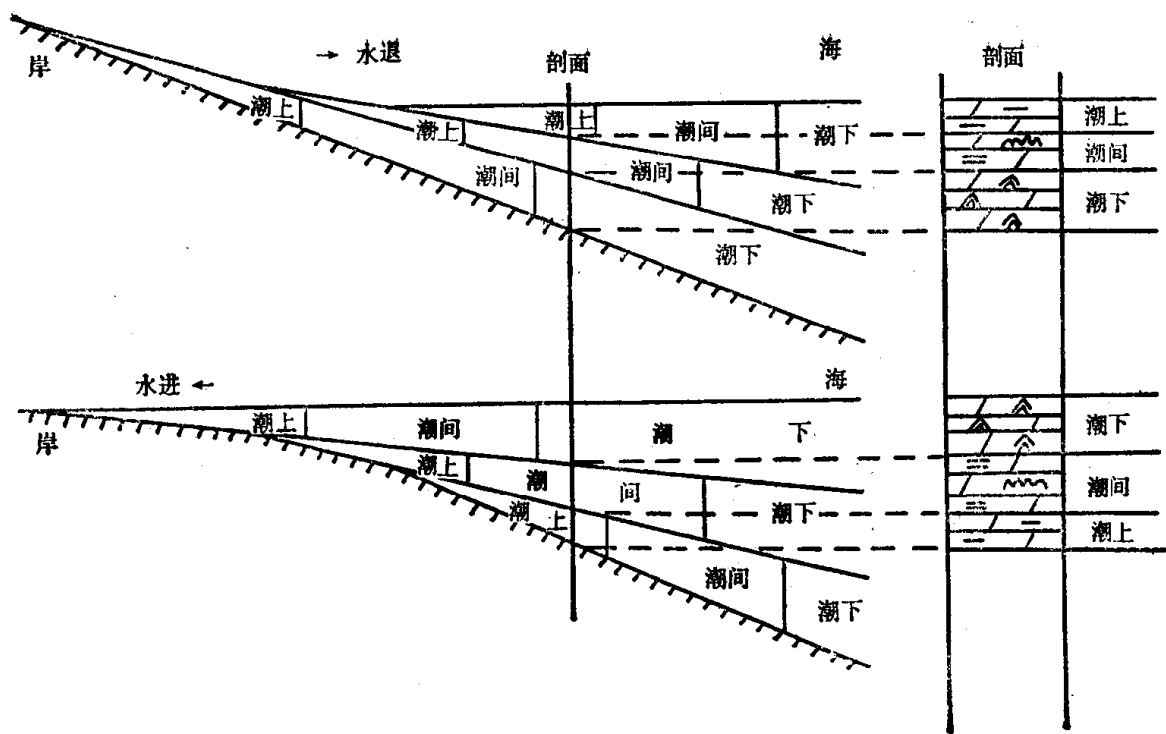


图 1-2 碳酸盐岩沉积相带变化示意图

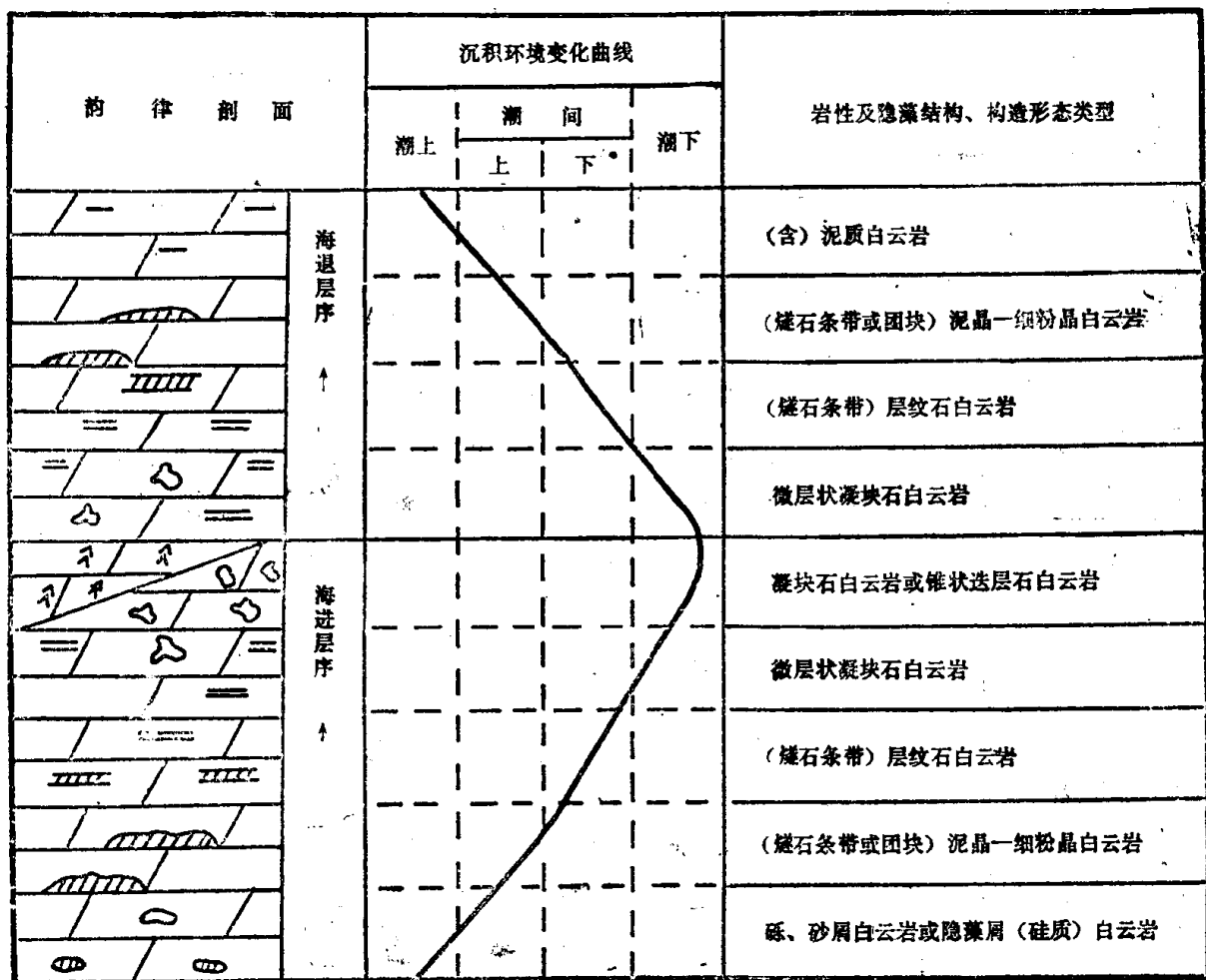


图 1-3 任丘油田雾二组白云岩韵律剖面图

(柱状)藻白云岩→纹层藻或波纹藻白云岩→隐或微晶白云岩→含屑或粒屑白云岩。

在研究任丘油田雾迷山组上部岩芯剖面中发现锥状迭层石、凝块石、核形石、微层状凝块石白云岩都位于韵律的中部；层纹石白云岩、泥晶细粉晶白云岩都位于韵律的上部或下部；砾屑白云岩一般位于韵律的底部见图(1-3)。

因此碳酸盐地层的沉积旋回与碎屑岩不完全相同，前者主要表现在相同岩类（如白云岩、灰岩）中，由于相似结构、构造的重复出现而形成的韵律沉积，主要是相带的旋回，后者则主要表现为相似岩性的重复出现而形成的沉积旋回。

2. 碳酸盐岩层沉积旋回的多级次性

如前所述，沉积旋回是周期性地壳运动在沉积物上的反映。因构造运动引起地壳相对升降的规模不同，形成沉积旋回级次也不同。一般规模大的时间长的地壳运动，造成沉积厚度大分布面积广的大旋回；规模小的时间短的地壳运动，则造成沉积厚度小分布面积也较小的小旋回，而且在一次大的升降运动中，常包含着许多规模较小的次一级升降运动，在次一级升降运动中又包含着一系列更次一级的升降运动，这样就形成了沉积旋回的多级次性。

大的沉积旋回常是划分地层系、统、组的依据之一。以华北地区为例来研究沉积旋回的多级次性。

华北地区中上元古界是一次大规模海侵后形成的连续式沉积旋回。根据大套岩性特征和地层接触关系可划分为五个大沉积旋回，自下而上：

第一个大旋回，为常州村组——团山子组。下部常州村组不整合在早元古界变质岩系地层之上。

第二个大旋回，为大红峪组——高于庄组。已发现高于庄组是一个好的含油层系。

第三个大旋回，为杨庄——雾迷山组。雾迷山组白云岩缝洞孔十分发育是良好的储油层，目前已形成冀中拗陷潜山油田的重要产油层系。如任丘潜山油田和其它许多中小潜山油田。

第四个大旋回，是洪水庄组——铁岭组。下部洪水庄组页岩可以超覆沉积在雾迷山组之上，甚至此旋回沉积全部被超覆而缺失，如任丘潜山的上元古界龙山组直接超覆沉积在雾迷山组地层之上，缺失上元古界的下马岭组及中元古界铁岭组、洪水庄组。此旋回仅在个别地区如霸县潜山带见有少量油气显示。

第五个大旋回，是上元古界的青白口系。旋回下部下马岭组与铁岭组成假整合接触。此旋回亦仅在任丘潜山见有少量油气显示。

上述第四、五两个大旋回是海盆收缩后海退期的沉积，陆源物质显著增加，到元古代末期地壳继续上升成陆地，出现一段剥蚀期与上覆的寒武系成假整合接触。

在地层的划分与对比工作中，我们把上述大旋回称作一级旋回。

二级旋回是一级旋回内的次一级旋回，主要是区域性构造运动中的次一级地壳活动所引起沉积环境周期性的变迁而产生的一套旋回沉积。在碳酸盐沉积中它主要表现为沉积相的旋回，如当海水入侵时，海水由浅→深，海水运动能量由近岸低能带→缓坡高能带→远岸低能带；海洋潮汐作用由潮上带→潮间带→潮下带，见图(1-1)。故碳酸盐岩沉积多是由许多大小不等的沉积相旋回所组成。

划分沉积相旋回，首先要研究本区域的相标志并建立沉积相模式。七十年代末赵澄林