国外石油勘探开发参考资料

油田开发中的油层研究专集

胜利油田勘探开发规划研究院情报组

1978.4

编 者 按

美国《石油工艺杂志》1977年7月号发表了有关油层研究的专辑，我们将该专辑（砂岩储集层的分布和连续性一文已另行出版外），加上其它两篇有关文章编译成“油田开发中油层研究”专辑，供参考。

目前，美国在油层研究中出现了新动向，进入了多学科—诸如地质，地球物理，开发，采油工程，电子计算机等综合研究的阶段。进行这种综合性研究，可以加深对油层纵横向上分布特点、油层结构变化规律的认识，有利于提高油田开发效果，值得从事油田地质开发研究人员注意，进一步加强这方面研究工作，赶超世界先进水平。

目　　录

1、持续的多学科合作能最大限度提高采收率……（1）

2、合作管理油藏—地质学的前途……（8）

3、碳酸盐岩储集层的分布及连续性……（21）

4、怀俄明州俄勒冈盆地油田廷史列伯
油层研究—油层特征……（33）

5、俄勒冈盆地油田廷史列伯油层研究
—南高点的开发和开采的措施……（44）

6、预测俄克拉荷马埃尔克城油田宾夕法尼亚
油藏储油岩石的几何形态与连续性……（53）

7、金钉油田混相注气的油藏描述和动态分析……（71）

8、碎屑沉积环境及其在油田开发上的应用……（81）

9、阿尔伯达尼比西地区泥盆系基尔
乌德长石砂岩的地质研究……（103）

持续的多学科合作
能最大限度提高采收率

序　　言

随着适用于油气藏开采方法的增多，我们对开采方法的知识也日益增加。油藏工程师用来评价这些方法的技术手段已取得了很大的进展。然而，这些技术手段的应用不仅要求工程师有更熟练的技能，而且需要占有大量的详细资料。现今实践中的油藏工程师依赖于和各学科的紧密合作—和地质学家一起进行更详细的油藏描述，和采油工程师研究动态资料及专门试验的结果，和数学家、化学家、物理学家以及化工工程师持续发展他的方法，和计算机工作者一起应用这些方法。

日益需要的这种合作在油藏工程师所应用的计算方法史上表现得很明显。早期手工计算方法的特点是零维的物质平衡计算。在此计算中，都不需要详细的资料，油藏是按照具有平均性质的简单油潴处理的。注水的应用导致了一维法的出现，如巴克利—莱弗利特方程式。用斯泰尔史提出的那些方法模拟了成层。这些手工计算方法具有两个特点：①在使用已得到解的简单的“理想”系统中的一个系统来近似表示实际油藏时，油藏工程师的技术得到了发挥；②在这过程中，详细的地质和动态资料被抛弃了。我们占有的资料多于能运用的资料。

技术革命已随着数字模拟的出现而到来。目前我们所处的局面是：这些工具运用油藏资料的能力常常超过了取得这些资料的能力。今日油藏工程师决不是抛弃资料，而是感到需要他自己从地质师、采油工程师和石油工程师那里寻找在数量和内容上更多的资料。信息的流通也不是一条唯一的途径。用油藏工程师现有的先进的模拟工具可以把油层构造研究得比以前可能的研究要更详细得多，油藏开采史的匹配又能给地质师回输地质资料。

用二个实例—联合王国北海的莱蒙气田和埃及苏伊士湾的埃尔莫根油田，来说明今日油藏工程师和地质师之间相互关系的程度。

莱蒙气田

北海南部的莱蒙气田位于英吉利海岸外48公里，水深30米。气田的储量为283.2亿米^3，是世界上最大的正在生产的海上气田。该气田于1968年投产，到1976年，产气849.5亿米^3，约为地质储量的30%。

本文讨论的是莱蒙气田的东区。

莱蒙气田东区目前有六个各有12口井的平台在生产(A平台—F平台)。由于已证明含水层是不活跃的，故我们现在研究的是一种最不复杂的情况——一个含有单相干气，水侵量忽略不计的基本封闭的系统，所以油藏的予测工作看来是简单的。唯一可行的予测动态的方法是计算地下气体，先用体积法，后用动态计算，再外推求出P/Z 与累积产量关系曲线，得出将来动态。但这种简单的方法不适用于这个复杂的海上气藏。

莱蒙区的产气层为下二叠纪的罗特利根得斯砂岩，位于海下1970米。罗特利根得斯砂岩为风成砂岩，厚240米。广布的交错层使孔隙度在垂向上多变。渗透率低，为1毫达西或不到1毫达西。

要准确地用体积法确定气体的地质储量是不可能的，因为地震解释有问题，并且由于群式开发造成井的控制有限。正在开采的罗特利根得斯砂岩被蔡奇斯坦碳酸盐岩和蒸发岩超覆。蔡奇斯坦层底部吸收了几乎所有的地震能量，因此，最深的可靠的反射层是上蔡奇斯坦岩盐的底部。因为是群式开发，所以没有足够的井来可靠地描绘出罗特利根得斯构造的形态。复杂的断层系统使这种情况进一步复杂化了。必须假定在上蔡奇斯坦岩盐底部所见到的断层会延续下去，且向罗特利根得斯砂岩延伸30米。即使这些断层存在于罗特利根得斯砂岩，也不能肯定断层是否组成有效的液流遮挡。

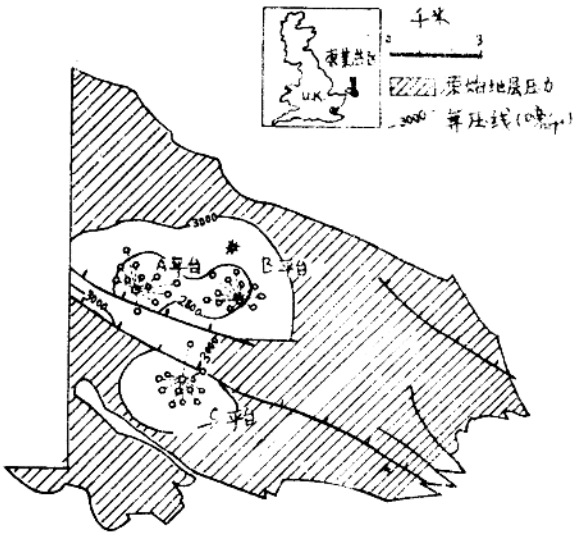


图1：莱蒙东区开采二年后的模型等压图

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

在这种复杂情况下，油藏工程师必须和地质师密切合作，搞出一个能识别误差的实际的油藏模型。制作了一个二维、小网格、单相数字模型，并把这个油藏模型，对照动态作了试验。根据仔细对照，头六年生产的压力对油藏模型作了连续改进。从而非常深入地了解了断层的形态及地下气体，渗透率和储量的关系。然后，与地质师一起检查了达到与动态史符合的断层位置及油藏的边界，以便确实地使它构成一个逻辑上的事后油藏描述。所得的油藏模型已成功地预测了第7—第8年生产的压力。

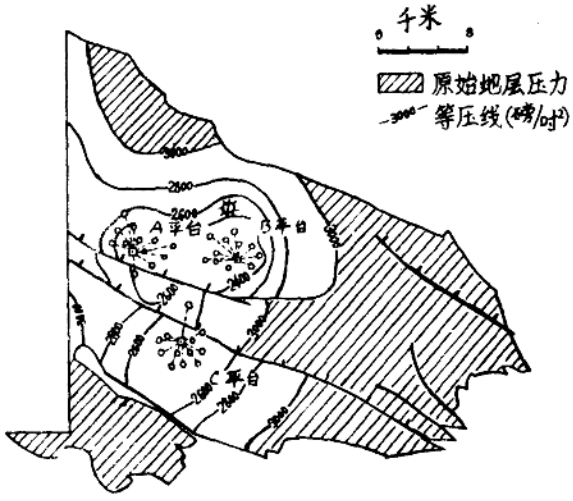


图2： 莱蒙东区开采四年后的模型等压图

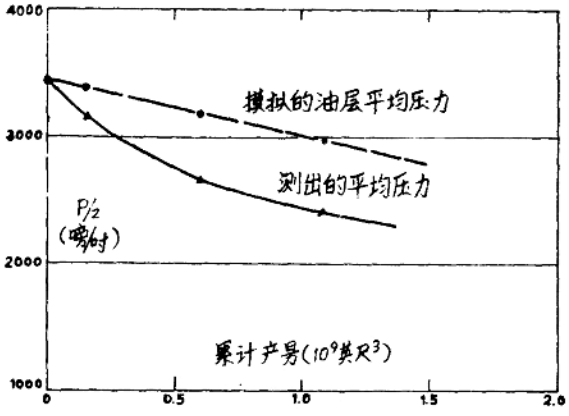


图3：莱蒙气田P/Z与累积产量关系曲线

根据模型可以得到油气藏在任何时候的压力分布等压图。图1为根据模型绘制的莱蒙气田东区等压图，那时A、B、C平台在1970年3月投产后已二年了。因为气藏渗透率低，存在封闭的断层，所以压力变化仅波及到气藏的一小部分，很大部分仍处于原始地层压力。

图2为该气田1974年夏的模型等压图。气藏内继续存在着明显的压力梯度，甚至在一些补充的平台完工之后，压力变化仍未波及全部边界。

气藏中存在明显的压力梯度造成很难直接从各单井测压中测定平均气藏压力。因此，不能用简单的P/Z和累积产量的关系曲线来确定气体的地质储量。为了说明这一点，图3对比了根据测压和匹配模型产量这两者作出的P/Z和累积产量的关系曲线。模型曲线是按照各采气阶段用体积加权平均压力作出的。测量的数据表示莱蒙东区气井在相应的采气阶段中测出的所有压力的算术平均值。每年夏天测这些静压，那时气体需要量少，平台上的气井可以至少关闭三星期。

从图3可以清楚地看到，甚至在这样长的关井时间内，在P/Z与累积产量曲线中应用实测的压力也会低估了莱蒙东区的储量，当然已作过手画等压图的努力，但其结果是人为的，因为平台区外没有观察井。

虽然这种局面会随时间得到改善，但是在对更多的平台位置和定期的压产作出决定以前，这种简单的P/Z和累积产量的关系曲线是不可靠的。在东区的边区，接连完成的平台证明该模拟模型正确地描述了油藏动态。

莱蒙气田是一个情况十分简单的单相干气气藏。它是一个说明如何因为地质解释的问题以及由于从陆地转移到海上而引起开采实践的变化而变得复杂化的实例。随着复杂性的增加，对准确预测的要求也增加。这样的预测要求地质师和油藏工程师广泛合作，而且要使用先进的计算方法。

埃尔莫根油田

埃尔莫根油田位于苏伊士湾，距埃及大陆约20公里。油田所在位置的水深38米，含油面积40·5平方公里。主要产油层是中新世的卡里姆组，深约1829米（海下）。卡里姆组为一由胶结的到疏松的细到粗粒的砂岩，并与页岩互层。发现北区的砂岩粒度较细，胶结较好，孔隙度和渗透率较低，泥质含量较高。

南区和小得多的北区之间的传导性十分有限，也可能不传导。两个地区的原始压力相同，但南区原油在发现时为欠饱和的，而在北区较低构造隆起发现小气顶下的原油为饱和的。从开采角度来看，这两个地区被认为是分隔的两个油藏。南区约占储量的80%。

油田于1965年2月发现，二年后开始采油。到1969年中期，22口井日产油2·78万米^3，到1971年1月止，累积产量为1190万米^3。基于压力和开采动态作的物质平衡计算证明南区的水驱有限，水侵速度不足以维持经济的油量。计算还指出北区水驱有限，或没有水驱。很清楚，如果北区和南区要得到较高的采收率，就需要注水。

因为埃尔莫根厚的蒸发岩剖面遮盖了较深的产油层的反射，所以地震解释很难。卡里姆组有一侵蚀面，上覆层的厚度只是在有井的位置上才能准确知道。早先，莫根构造被认为是断层背斜。早期图件在可能的地方以构造等高线图方式绘制的；只是在构造等高线看来不合理的地方画出小断层。从地震资料中可辨别的大断层，当然尽可能准确地圈定。图4为早期的构造解释及相应的横剖面图。根据构造解释、埃尔莫根油田的南区的原油地质储量为2·2亿米^3

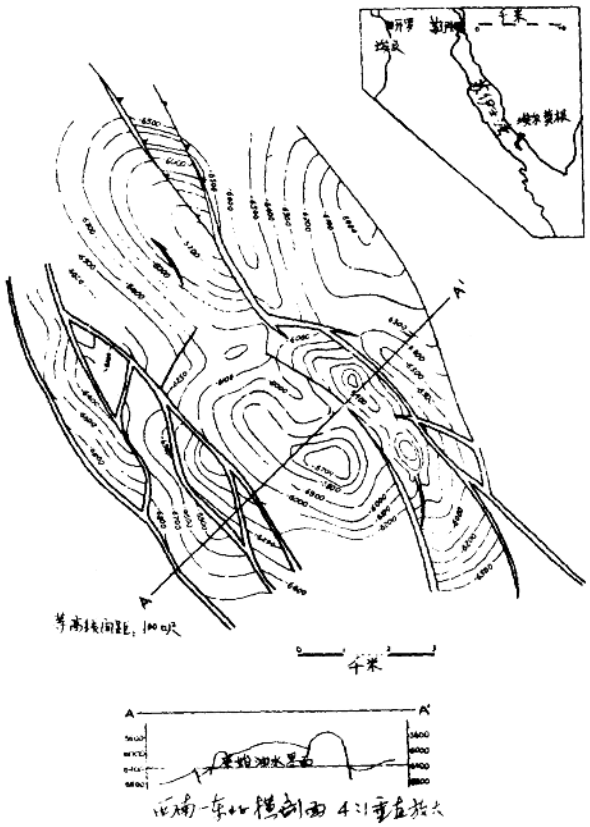


图4：1974年埃尔莫根油田卡里姆组构造图

制作了一个简单的一维模型来研究水区形状和注水速度对南区将来动态的影响。虽然合理的动态模拟得出了水区形状和原油地质储量的变化范围很大，但最好的模拟得出的原始地质储量为3·6亿米^3，比体积法计算多65%，在重新检验所有的产油层，测井计算和动态资料后，得出的结论是，在开发区外面，一定还存在大量原油。详细研究地震和钻井资料后指出，"未发现的油"的唯一的合理的位置在西南面。于是在1973年钻了一口开发井。因打在构造低部位，打空而报废了。

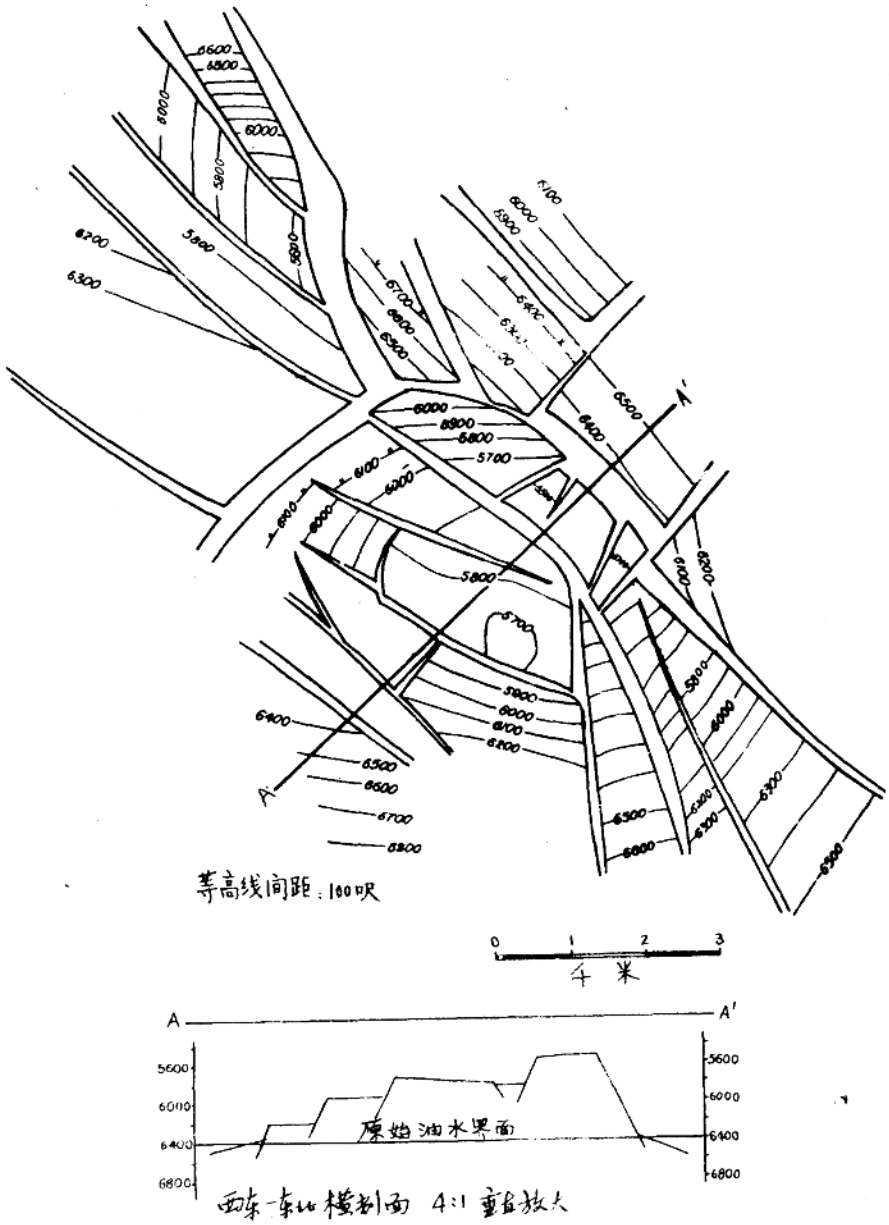


图5： 1975年埃尔莫根油田卡里姆组构造图

目前区域性地质研究已表明海湾地质的特点是有一系列的"阶梯断层"，断层间构造基本平坦。在过去几年间，莫根构造是鉴于这个修正的基本观点而重新解释的。图5所表示的图件和横剖面表明了断层广布，褶皱轻微。根据对比得出的原油地质储量是3·3亿米^3，与动

态估计的相当吻合。因此，增进对地质环境的认识，能更深入一步了解油田动态。

油田已实施了注边水方案。注水量在垂向上的分配是按照地质研究中识别的成层性予以确定的。其目的在于分层注水。由于采用了分层注水，所观察到的动态结合了提高油藏描述的精度和基于那种描述而得到的适当的工程计算，就能作出取得油田最佳采收率的完善的开发决定。

将来的应用

将来，我们需要更有效的和更完整的油藏描述的资料，这必须从少量的数据抽样点来得到。更多的依靠必须立足于地质和地球物理的推测上，以便了解井间油层的几何形态。此外，在油藏开采早期，在与计算动态对比的开采史（资料）很少情况下，我们希望看到实施更多的提高采收率的方案。懂得沉积过程和掌握地球物理手段的勘探人员将会被请来，让他们提供更多的用于工程计算方面的油藏描述。油藏工程师，必须以他对流体流动机理的了解，把采用的压力及开采资料和这些描述结合起来，这样，可以考虑到最有希望的可能性。

提高采收率的方案特别需要更精确的油藏描述，以尽可能减少失败的可能性。

储油岩石在垂向和横向上的变化可以引起大量的死油和注入液的过早侵入。天然的和人为造成的裂缝也构成了注入液优先流动的通道。由于这些注入液成本往往和原油成本一样甚至超过原油成本，所以这种注液方案未得到推广。如果在实施注入方案前就进行了油藏非均质性的详细描述，就可以采取予防性的措施，如象予先注水或聚合物或改变注水井网。

所有这些因素强烈要求地质师和工程师必须为最大限度提高采收率而保持密切而有效的联系。

译自美《石油工艺杂志》，1977年7月，753—760页

（姚士玉译、张宏逵校、王平审核）

合作管理油藏—地质学的前途

序　　言

除了块状或层状均质油藏而外的大多数油藏都显示出它的厚度、孔隙分布（孔隙度、渗透率和毛管压力性质）以及连续性的复杂变化。油层段一般在纵向和横向上可细分成被不渗透岩石隔开的“产油带”。产油带本身含有薄的泥岩或致密碳酸盐岩的夹层。产油带的厚度分布可能呈席状或呈线状。在岩石骨架内，孔隙性质的变化可能是可予测的或任意的。正是这种岩石骨架和孔隙变化的复杂性向石油科技人员提出了挑战，以便使他们的经验和技术应用于油层描述，借以提高采收率。

识别岩石骨架和孔隙空间的变化并使其定量化的最好途径，是通过对工程和地学技术的仔细研究和综合应用。当地质师和工程师们一开始就联合确定研究的课题、油层描述队伍中每一种学科的工作范围以及综合成果的期限时，则油层描述的工作就更为有效。象这样的油层描述方法，需要了解其它学科所应用的方法，并懂得这些方法所根据的原理和概念。而且，了解和懂得这些方法和知识会促进认识上的毫无拘束的交流—这就是合作活动的基础。

本文介绍的是地质方法及指导其应用的概念和原理。全文共分四个方面。首先将用于油层描述的地质方法和简述各种开采方案要求的重点一起介绍。后两个方面是关于方法的具体内容及指导用于描述砂岩和碳酸盐岩的原理和概念。最后论述将来需要的合作。

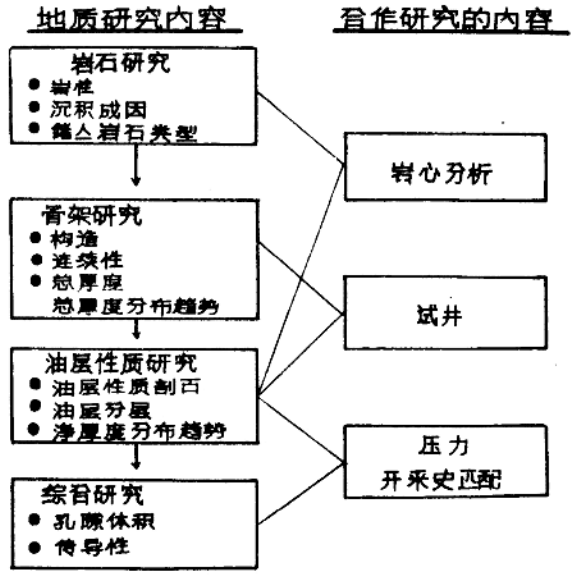


图1　油层研究中地质研究程序和其他石油科学家参加研究的课题

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

油层描述中的地质工作

一般工作

图1说明地质师一般所要遵循的步骤，以及地质师需要将他的努力和油矿工程师的努力结合在一起的一些工作范围。这些步骤按其完成的先后列出。有时候在完成某一步骤前要预先作好准备。

岩石研究包括应用岩屑、岩心、测井曲线、常规岩心分析资料来鉴定岩石类型（组成油层段的储集层和非储集层类型）和解释油层段的沉积成因。这些资料为预测油层的连续性和厚度（分布）以及孔隙性质的变化提供了基础资料。这一步得到的典型资料是岩心描述图件和孔隙度—渗透率交会曲线。

骨架研究确定圈闭的几何形状以及岩石类型在纵向和横向上的分布。根据对同一沉积成因的位置中出现的形态的了解来指导作横剖面图和平面图是很费时间的，但却是油层研究中不可缺少的一步。横剖面图和平面图常常要重复绘制，使这两类图件相互符合并和试井资料一致。在复杂的骨架内，平面图和栅状图是有用的图件，尤其在产油带中页岩或其它致密夹层影响其驱替效率的情况下，更是如此。

油层性质的研究要利用测井曲线、岩心分析和试井资料来确定孔隙的性质和分布。可能要求作专门的岩心分析和岩石物性的研究来确定产油带和预测流体饱和度分布。根据这些研究和以前的图件和横剖面图，就能作净砂层或“净油层”平面图。

综合研究工作是地质家和油矿工程师努力的一个缩影，因为必须用两者的资料和专业知识来使人满意地完成描述工作。孔隙度和/或渗透率图可以和净厚度图结合起来提供在复杂情况下所需要的孔隙体积图或连通图。有了这些资料和其它的资料，可以用油层模拟法来模拟开采动态和予测将来动态。地质学家通晓产油带内或产油带之间的页岩分布，是确定最有效的开采计划的关键。

应用于开发方案

由于研究油层的目的改变而重点也改变，所以不同的管理方案需要不同的地质研究方法。例如，在所有的方案中，都从事岩石和骨架研究，但其详细内容和输入资料却不同。一次开采方案需要油田和含水层的总的连续性和厚度资料。地球物理研究可以用于确定油田和含水层中的圈闭和评价地层骨架。而二次和三次开采方案需要详细的资料来预测注产井之间的状态。露头研究在确定井距方面可能有用，地球物理资料的加入可能有助于寻找水源。

表1—岩石对注液方案的影响

岩石骨架参数	受影响的开采参数
表面积和孔隙几何形态	面积驱油效率
渗透率剖面	垂直扫油效率
定向渗透率	前缘定向移动

表2—岩石对火烧油层方案的影响

岩石骨架参数	受影响的开采参数
表面积，煤和黄铁矿	燃料和空气的需要量
渗透率剖面	点火条件和垂直扫油效率
定向渗透率和构造倾角	前缘定向移动

在二次和三次开采方案中，油层性质的研究是重要的。在注液体方案中，岩石骨架参数（包括孔隙）影响各种开发参数（表1），特别从孔隙度和渗透率分布这个角度来看，更是如此。同样，如果注入水矿化度不一致，膨胀性粘土会使地层破坏。在火烧油层方案中，孔隙度和渗透率固然是重要的，但其他因素也重要（表2）。例如，煤和黄铁矿影响火烧采油的效率和性质，因这些物质在其氧化时消耗燃料。

综合研究工作对三次采油方案（包括注液、表面活性剂、化学剂 或蒸汽），特别重要。在矿场和小型试验区方案中，它对于采用输入到油层模拟程序中去的三维定量地质描述是重要的。

砂岩储集层的研究准则

砂岩连续性和厚度分布型式综述

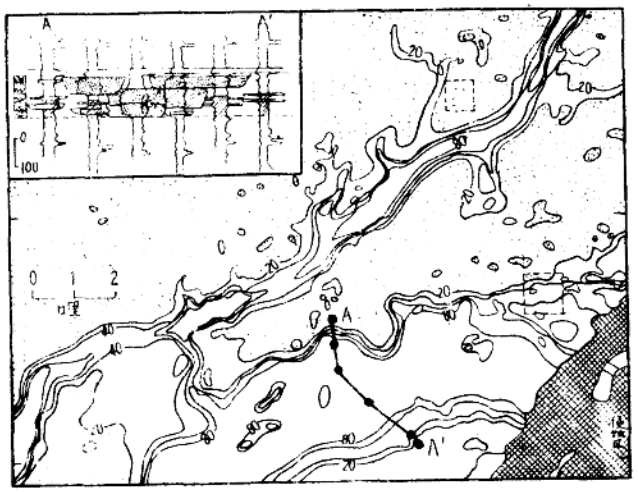
因为地质条件在时间或空间方面从来不完全相同，所以砂岩的连续性和厚度分布在油田

和油田之间都不同，而且在某一油田内，油层组与油层组之间也不同。能共同显示储集层特征的因素有许多，包括：沉积机理、沉积物质的供应数量、物源区和接受沉积的盆地的大地构造的稳定性等等。因此我们必须知道对管理油藏来说是重要的储集层分布类型，必须研究统一的准则，这能使我们在储集层非均质方面作出预测。

砂岩连续性型式的实例

象宾夕法尼亚勃拉得福特砂岩在局部地方显示的良好的连续性就是典型的海相地层。在这样的沉积中，砂岩和页岩单元在很大距离内（通常几千英尺到几英里）是可对比的。页岩，甚至只有几英尺厚，就能始终分隔开砂层，阻碍层间交渗。许多三角洲沉积和其它近海相沉积（海滩、堤岛、潮汐台地）已显示了这个连续性型式，虽然连续性保持的实际距离可能因不同的地区而有所不同。

伊里诺斯盆地罗宾逊砂岩就是在同一个储集层内，砂层连续性有差有好的一个例子。有些典型的河流沉积，如罗宾逊主区的罗宾逊砂岩延伸的距离不同。在该油田的某些部分，较厚的砂层15·7米可延伸几千米，且可对比；较薄的砂层（3—6米）一般延伸300米左右。在经济条件不允许采用密井网时，薄砂层的采收率就低。



等值线距、20呎

图2　德戈尼业砂岩平面图和对比剖面，
表明古河流沉积的厚度和连续性型式

厚度分布型式的实例

介绍两个实例以说明厚度分布型式并指出其重要性。第一个实例是伊里诺斯盆地的德戈尼亚砂岩（图2）。呈线性状和厚度均匀分布的型式是古网状河和现代网状河的典型。它的沉积范围宽达1·6—16公里，长16—几百公里。延伸范围和分水岭中的所有重要的河流有关。这些沉积物的构造，在横剖面上已清楚表示，它包含有许多代表古河道各个部位的较小部分；这些充填的聚结形成了图上画出的厚度分布型式。

和德戈尼亚厚度分布型式相反，俄克拉何马布切砂岩显示出不规则的、扇形型式。很不规则的面积分布型式，和该三角洲的分流河道的间距有关，和河道的相对大小有关。其产量等值线可以画成和厚度图相同的型式。

这些实例，无论是表示连续性还是表示厚度分布型式，都指出了砂岩储集层的分布范围很大。因此，需要有一些统一的概念，以便有助于解释井的资料。

确定连续性和厚度分布型式的基础

连续性和厚度分布型式一般通过绘制横剖面和各种图件来确定，主要掌握三个方面：①储集层和非储集层的沉积成因的识别；②与根据详细的露头的观察和地下研究作的储集层模型对比；③识别沉积后的变化。

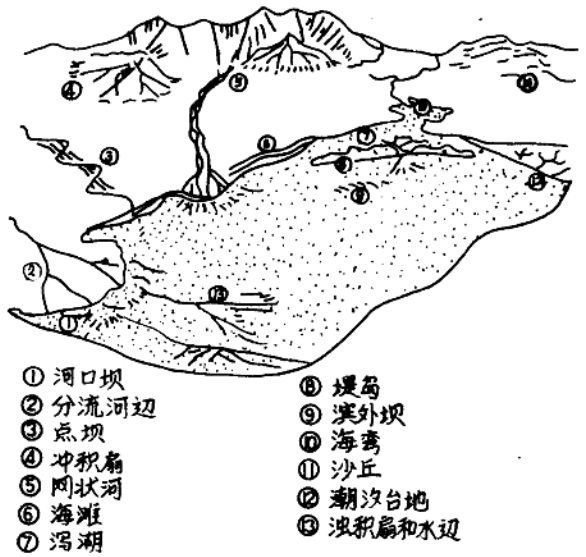


图3　砂层沉积位置及砂体类型的名称

砂层是在各种各样沉积部位堆积起来的（图3）；每一堆积部位砂岩的连续性及厚度分布型式都有所不同，而且与砂体有关的孔隙特征也不同。虽然每一部位对石油的分布都很重要，但海岸，特别是三角洲位置最为重要。这是因为砂大量堆积在海岸，通过物理作用使砂

形成大面积分布。同样，许多海岸地区是整个地质时期重复出现砂沉积的场所。

根据岩性和古生物学资料，包括矿物学、粒度和层理类型的确定，以及对动植物残骸的鉴定，来解释沉积成因。岩心、岩屑和测井资料提供了基本资料。用现代沉积的观察来指导基本资料的解释。

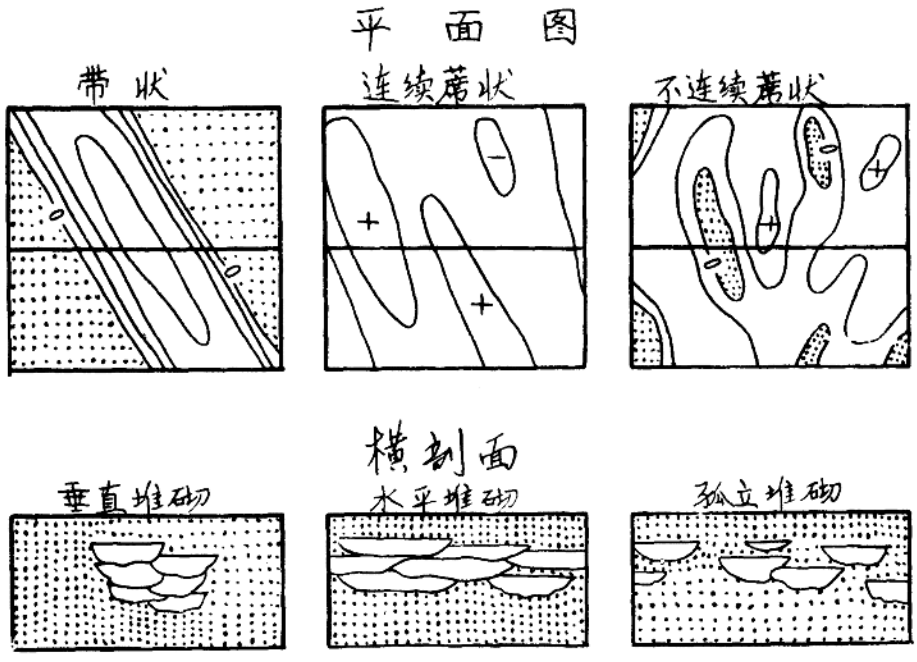


图 4　几种主要类型的砂岩油层几何形态

砂岩储集层的连续性与沉积成因有关，如罗宾逊和勃拉得福特砂岩。为了设法使砂岩和页岩连续性有个定量的概念，蔡托对露头中选择的沉积砂体作了系统的研究。虽然样品小，但还是有明显迹象表明海相沉积的连续性比非海相沉积的更好。其他研究人员证实了蔡托的研究，但关于特殊砂体类型尚需更多的资料来证实。

许多常见的油层砂体类型可分成三类主要的砂岩几何模型，它们能帮助预测连续性及厚度分布型式（图 4）。这些模型，如在图件和横剖面上所见，可按其几何形状表证。带状储集层的模型具有棱柱特征，其内部构造是由组成单元垂直堆砌而成。连续分布的席状模型具有板状特征，是由组成单元横向堆砌而成，不连续的席状模型是孤立堆砌而成。当然这些模型适用于开采区及其周围的含水层。

不是所有的油层都完全和图 4 中的各图相吻合的。例如，在影响压力传导的组成单元中，有各种类型的接触。图 4 所示的单元代表不同类型的河道，它们切入了较老的单元，形成良好的物理接触。其他类型沉积物（特别是浅滩附近的沉积物）的特点是添加接触，在这种接触中，组成单元是通过叠覆在以前形成的组成单元之上堆砌而成的。因为河道的下切作用被叠覆作用所取代，所以大面积的水力传导可能较差些。

虽然有些油田只有一种类型形状的油层，但在其他一些油田则常见有多种类型形状的油层。例如，伊利诺斯盆地罗敦油田是由一部分带状和不连续的席状交织而成的背斜圈闭组成。图5所示的油田总厚度分布型式是根据4公顷井距而作的。油田的最南部，带状和连续的席状几何形态的储集层的采收率比北部不连续的席状的要高。因此，采收率高低和生成砂岩单元的分布有关，并且可以从这些单元的图件和横剖面中予以预测。

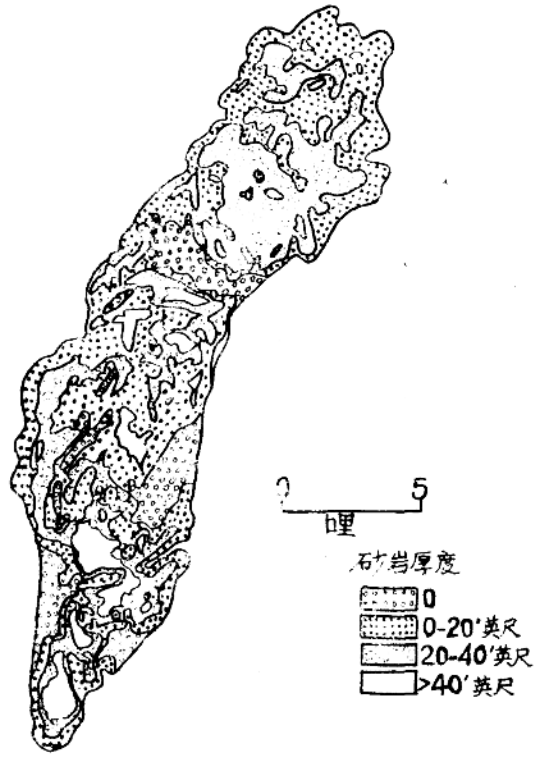


图5　罗敦油田西普顿斯砂岩的厚度分布型式

孔隙空间特性的变化

在单独的砂层单元中，和在单个砂层单元之间，孔隙度、渗透率和毛细管压力的特点是变化范围很大，变化的程度取决于岩石骨架的特殊的沉积过程。在这种情况下，我们研究的是砂体内的小范围的特性。

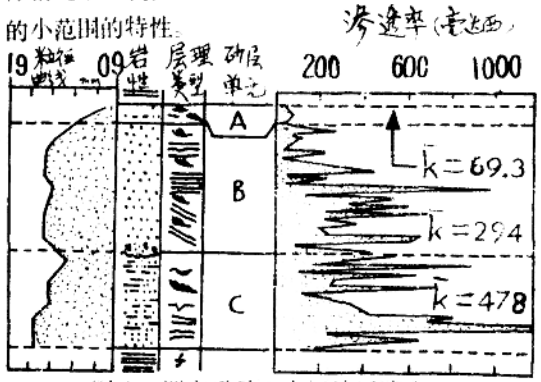


图6　罗宾逊砂岩火烧油层试验区岩性和渗透率变化示意图

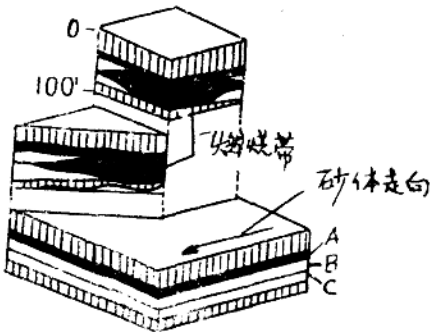


图7　FFY火烧油层试验区的燃烧带剖面

粒度和层理对油层动态的影响可以用FFY火烧油层试验区来说明。罗宾逊砂岩渗透率的变化（图6）和组成河流相沉积的各种砂层单元中和砂层单元之间的粒度变化有关。砂层单元内和砂层单元之间的渗透率从底部向上减小，孔隙度也有相同的变化。岩石物理学家和岩心分析家深知粒度和岩层类型对岩心分析和测井资料的影响，

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com