

低渗透油气藏

DISHENTOU
YOUQICANG



甘肃科学技术出版社

责任编辑：毕伟
封面设计：高海军

低渗透油气藏

长庆石油勘探局科委 编译

甘肃科学技术出版社出版发行

(兰州第一新村81号)

长庆石油勘探开发研究院印刷

开本787×1092毫米 1/16 印张13.75 字数250,000

1988年4月第1版 1988年4月第1次印刷

印数：1—3,750

ISBN 7—5424—0102—5/TE·1 定价：4.45元

选译本说明

1985年5月在美国丹佛市召开了一次低渗透油气藏的国际讨论会,会议论文集共收入50篇文章,我们从中选译了部分文章编成此书。

丹佛会议内容丰富,讨论了有关低渗透油气藏的各个方面的问题。50篇会议论文可概括归纳为七组课题:

- (1)低渗透储层地质实例;
- (2)产量预测与油藏工程;
- (3)美国能源部多井实验;
- (4)压裂工艺和裂缝检测技术;
- (5)压裂模拟计算;
- (6)压裂液和支撑剂性质;
- (7)岩石物性与地应力测试。

为了节省篇幅,译本精选了其中部分文章。原则是选择实用性强、内容新颖、论述有秩、条理清楚的文章。对属于理论探讨或内容重复的文章没有选入。因此本书选入的主要是上述七组课题中的前四组中的有关文章。

后三组文章偏重于理论探讨和公式推导,大部分文章未收入本书中。为了满足专门的研究人员需要,这三组课题的有关译文汇集在长庆油田勘探开发研究院情报室编印的内部交流刊物《石油参考资料》1987年1~3期中。

长庆石油勘探局科委委托张伯荣同志组织编译此书;参加本书译校工作的有朱义吾、胡善长、袁家端、喻克强、荣春龙、王宏、许达、柯仲华、蒋立江同志;总审校由张伯荣负责。

特请甘肃省石油学会杨俊杰副理事长撰写序言。

序 言

低渗透油气藏，是指渗透率很低（如小于10毫达西，0.1毫达西）的油、气层所构成的油气藏。从油气藏的分类来说，其属于非构造油气藏的比例较大。

低渗透油气藏较之一般油气藏的主要区别是其储层的孔隙度低、渗透率低、均质性低、采收率低；产出条件除孔隙介质外，往往伴有裂缝和储层成岩后生变化。由于开采工艺复杂、开采成本较高，相应其经济效益也低。但在油气田开发中，低渗透油气藏具有广泛的资源，因此有重要的价值，而且已经积累了一套开采的工艺措施。低渗透油气田越来越受到人们的青睐，美国低渗透油气田的可采量约占总油气量的10~15%。

1985年5月在美国丹佛市召开了“低渗透油气藏开发”会议，所汇集的50篇论文涉及低渗透油气藏地质、水力压裂模拟、压裂工艺方法、完井工艺等内容，它代表了当代研究和开发低渗透油气藏的最新成就，因而引起了我国石油工业界的极大兴趣。

我国的低渗透油气资源相当普遍、相当丰富，而且对低渗透油气藏的开发也有长期的实践经验。大庆油田的低渗透层将为大庆油田稳产到1995年作重要贡献。陕甘宁盆地的低渗透层已建成了可观的开发规模。目前，全国的低渗透油层储量约占石油总储量的五分之一。所以，加快低渗透油气藏的研究、选择针对性强的增产措施、采用合理的开发工艺技术并奉行综合利用的方针，乃是发展油气工业的一大急需。面对这种局面，长庆石油勘探局科委组织选译这一文集，应当说对我国低渗透油气藏的研究水平和工业化步伐都有积极的意义。

杨俊杰

目 录

第一部分 低渗透储层地质

新墨西哥州东南部莫柔层的地质和粘土矿物·····	(3)
得克萨斯州东部和路易斯安那州北部的川维斯(休斯顿)地层·····	(11)
丹佛—扎斯伯格盆地乌布拉拉低渗储层的地质和生产状况·····	(19)
科罗拉多州考代尔砂岩的地质前景·····	(33)

第二部分 产量预测和油藏工程

致密层产气历史与当前产量·····	(41)
俄亥俄州东部致密的克林顿砂岩油藏特征·····	(61)
东得克萨斯盆地川维斯地层致密气田的油藏工程和产量特征·····	(71)
得克萨斯州南部和中南部威尔科克斯地层的完井实践·····	(87)

第三部分 美国能源部多井实验

科罗拉多州西北部梅萨沃德组透镜状储层规模和方位预测·····	(105)
沼泽致密透镜砂岩气层的压裂和试井实例研究·····	(115)
用井间声波资料进行地层模式识别和层面影像·····	(131)

第四部分 压裂工艺和测试技术

低渗储层利用支撑剂选择模式进行优选压裂设计·····	(141)
无支撑剂压裂·····	(153)
多层油井的水力压裂设计·····	(165)
特殊脉冲压裂：油气井刺激的一种新方法·····	(173)
科罗拉多州东北部丹佛—扎斯伯格盆地考代尔层使用的各种压裂液·····	(185)
裂缝形状综合判断实验·····	(193)

第一部分

低渗透储层地质

新墨西哥州东南部莫柔

层的地质和粘土矿物

L.J. Mazzullo

J.M. Mazzullo

提要: 新墨西哥州东南部莫柔层砂岩的渗透率和油气产量受储层的碎屑和自生粘土矿物的影响。为了了解粘土矿物在区域岩相结构中的类型、形态、岩类环境和区域分布,作了莫柔砂岩的X射线衍射和扫描电镜分析。

新墨西哥州东南的莫柔层沉积相从陆地河流相到海相,沉积相造成沉积分布和储层层序的变化。在这些岩石中存在的主要粘土是自生和碎屑高岭石和绿泥石,次要粘土是蒙脱石、伊利石和混层粘土。粘土矿物的变异主要反映沉淀粘土的地下水在来源上和化学性质的变异;粘土矿物分布可能酷似区域相分布方式,但不一定受其控制。

对莫柔储层的钻井设计和井下作业设计必须注意井中粘土矿物的垂直变异并且要预料到粘土与钻井液完井液的特殊反应。在新墨西哥州东南,井和岩样的控制点较多足以利于这种预测。

导 言

碎屑和自生粘土矿物在许多砂岩储层中影响渗透率和油气产量。虽然它们通常为岩石的较小成分,但粘土对储层特性有重要影响,特别是接触一定的钻井液完井液之后。例如,微量的颗粒包膜的高岭石可造成渗透率严重降低,这些脆弱的结晶体可能从它们的主岩体析出,并且可能在严重失水的条件下随失控的钻井泥浆运移到孔隙喉道中。不注意设计钻井泥浆和完井方案可造成储层重大损害。

新墨西哥州东南的莫柔层(图1)包括大的天然气和蒸馏液砂岩储层,通常认为是低渗储层。为了了解该层区域地质背景中的粘土矿物类型、形态和区域分布,对这个地区的莫柔储层剖面作了细致的区域地质和粘土矿物研究。

莫柔层中粘土可能引起的问题因这些岩石复杂的沉积史和可能的自生历史而无法判断。莫柔砂岩有多种沉积环境,造成储层的垂直层序具有不同的来源和分布。在这些层序上表现的粘土矿物同样复杂,难以简单地进行区域上的预测。本文目的是在开发莫柔层的方案中调查这些由莫柔层的复杂地质和自生历史引起的问题,提出消除这些问题的方法。

研究区的位置和地质背景

莫柔层是新墨西哥州东南地下二迭盆地的宾夕法尼亚系底部层位。整个宾夕法尼亚系是在陆地河流到海盆环境中沉积的碳酸盐和硅质碎屑岩。莫柔层下半段是主要的产气

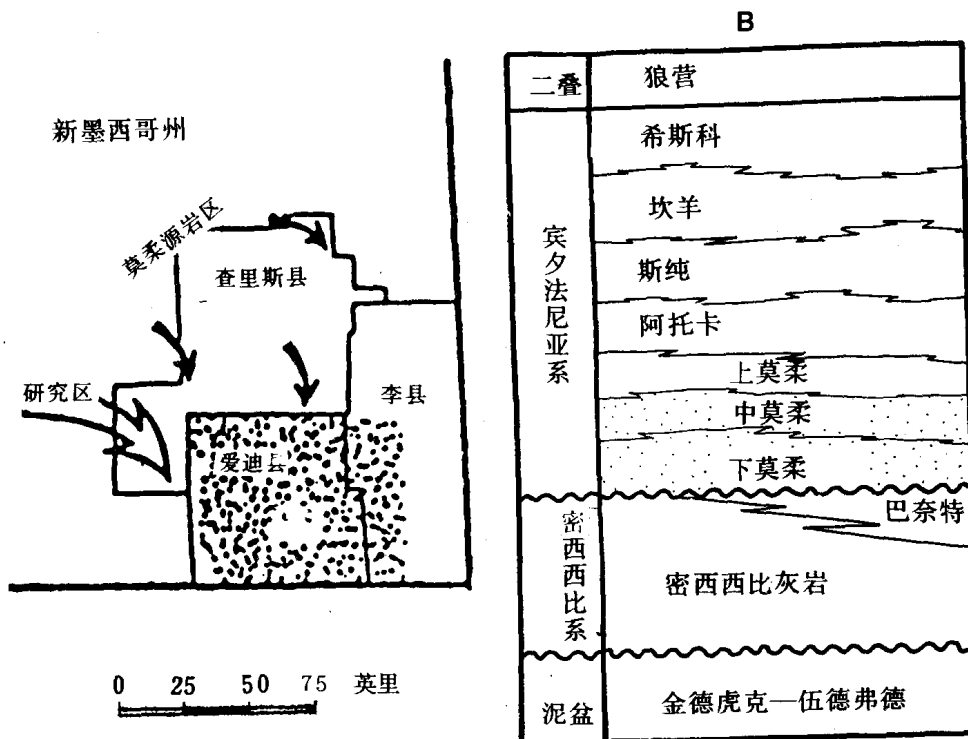


图1 (A) 研究区位置，表明沉积搬运方向 (B) 地层柱状图

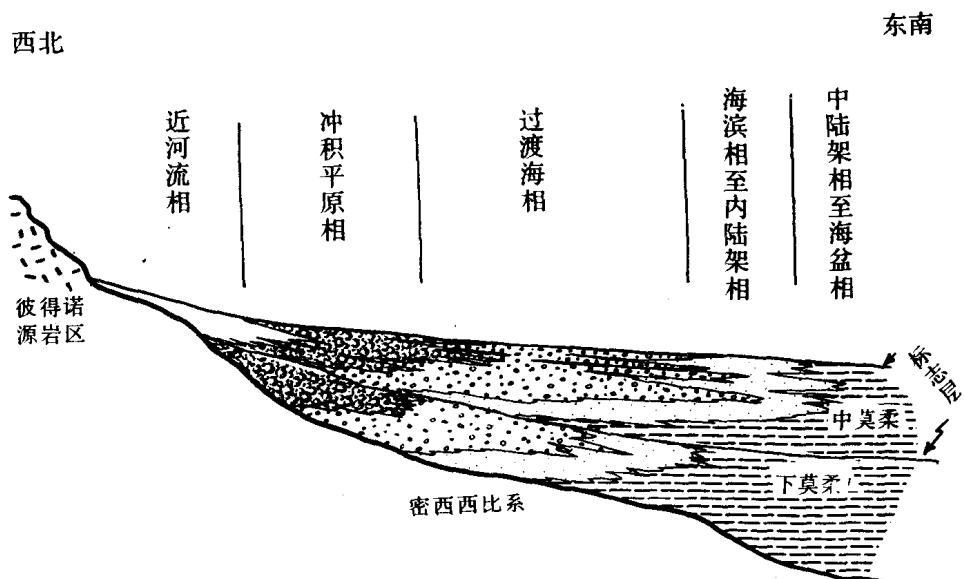


图2 示意的莫柔层区域横剖面，标志层与图3及图6对应

砂岩，由从古彼得诺高地泄出的硅质碎屑控制，源于西北（彼得诺隆起）向南进入浅海。在新墨西哥东南其厚度达518 米。这浅海的古海岸线大致平行于彼得诺隆起（北东向），并在莫柔层沉积作用期间海岸线周期性地偏移数公里，对应与此有关的海平面的变化和碎屑供应的变化。

作为沉积环境定期偏移的结果，就建立了一个复杂的垂向与侧向的岩相。图 2 示意地说明横穿莫柔沉积盆地的一条区域横剖面，并指出在莫柔层中朝盆地推进和垂向上啮合间的五个可识别的大沉积层。

分 析 技 术

（一）地质分析

对新墨西哥州爱迪县和李县的莫柔层下半段，作了全境的细致研究（图 1）。这项研究包括对岩屑、岩心碎片和750 口井岩心的显微镜检验。沿纵向和侧向详细地描述了穿过沉积盆地的岩性联系，直到可以以图 2 的形式预测沉积相。

为作图（图 2）选择了莫柔层内的两个层段的顶部。第一个称为下莫柔的顶，是陆进地层，在顶部被一套区域上相连的海进相切断，直接位于海进标志层以下的岩性提供了下莫柔的沉积环境，表示在图3A。第二个层段称为中莫柔，也是陆进地层，但靠近其顶部比下莫柔有更为广泛的啮合状的岩性（图3B）。另一个区域上相连的海进标志层是在中莫柔之上。这两张图指出沉积环境侧向位置随时间的变化，这只是莫柔储层剖面可能形成的许多状况图中的两张。

（二）粘土矿物分析

为了确定粘土矿物对储层性质的影响，必须知道砂岩中所含粘土的组分和它们在砂岩中的位置——粘土是颗粒包膜还是孔隙充填。在研究区中随便取了98口井砂岩样品集中到每个图示的层位，分析其粘土矿物。

确定砂岩的粘土矿物组分最为精确而有效的技术是X 射线衍射。为此，每个样品要精心制备，然后在菲利浦X 射线衍射仪上分析。粘土矿物的晶体结构是，来自X 射线束最重要的衍射出现在 $2 \sim 26^\circ 2\theta$ 扫描范围内；把这些衍射角换算成d 晶面间隔，把这些d 晶面间隔与标准的粘土矿物的d 间隔进行比较，可以确定每个样品的粘土矿物种类。然后根据这些粘土矿物的衍射主间隔峰值区强度计算出每种粘土矿物的组分百分比。

一旦定量测出每一样品粘土的组分后，再用扫描电镜检测每个样品以确定粘土矿物所处位置。为此，把每种样品切开一小片以便暴露出一个新鲜的岩石表面，再固定在铝塞上并用金——钼合金涂一薄层。然后用JSM-35U扫描电镜检测。

分 析 结 果

（一）粘土岩类和组分

下莫柔层和中莫柔层砂岩的粘土矿物由大量的高岭石和绿泥石、中等含量的伊利石还有少量的蒙脱石和蒙脱——伊利石混层所组成。下莫柔层和中莫柔层砂岩平均含48 % 高岭石、29 % 绿泥石、14 % 伊利石、9 % 蒙脱石及蒙脱——伊利石混层。

下莫柔和中莫柔砂岩的高岭石和绿泥石是自生的，这可由它们脆弱的、结晶很好的形态以及它们普遍分布于砂岩中（图 4）来说明。高岭石通常表现为结晶很好的假六方

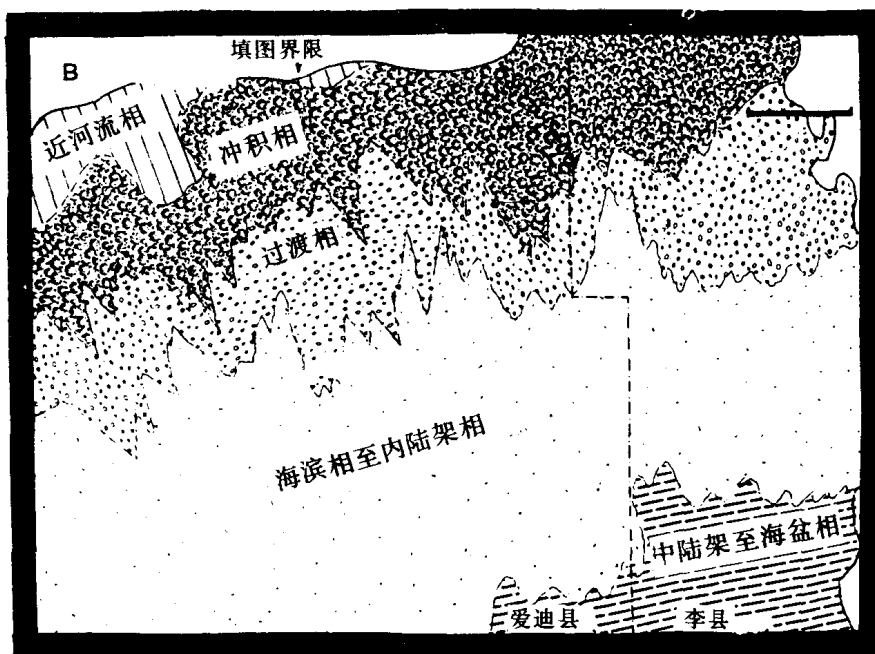
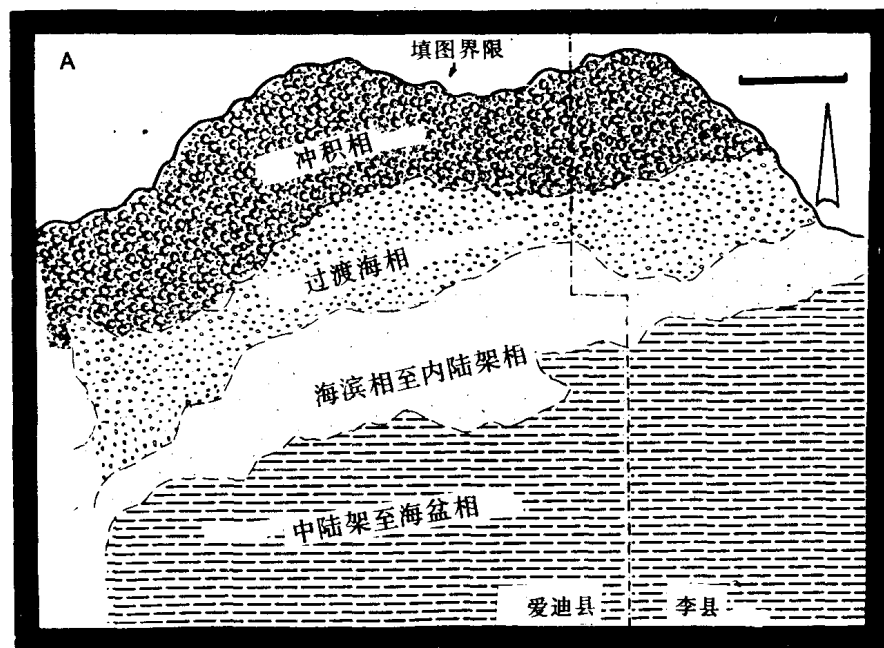


图3 (A) 下莫柔层的沉积环境 (B) 中莫柔层的沉积环境

短杠比例尺=10英里(16km)

体书状，横宽 5 ~ 25 微米，长 75 微米，或者是孤立的或者是叠起的（图 4A），全为孔隙充填型粘土。绿泥石表现有多种形式，最常见是任意排列的假六方体结晶，或者绿泥石丛生，也可能作为颗粒包膜或孔隙充填出现（图 4B-D）。

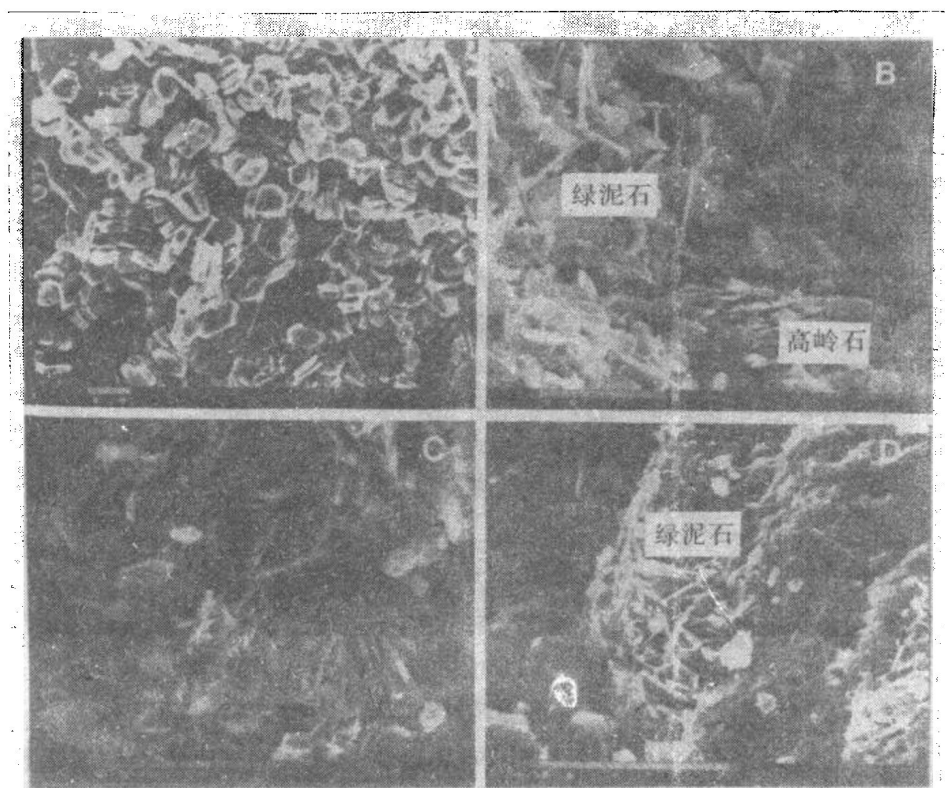


图4 扫描电镜相片 (A) 孔隙填充型高岭石 (B) 颗粒镶嵌型绿泥石
(C) 孔隙填充型绿泥石 (D) 蜂窝状颗粒镶嵌型绿泥石 短杠长=10微米

下莫柔和中莫柔砂岩中的蒙脱石、伊利石、蒙脱——伊利石通常为碎屑生成，显示为孔隙型或孔隙喉道型充填的叶片状和透镜状、结晶不好到中等程度结晶的粘土和粉砂（图 5）。在这些砂岩中很少看到自生的蒙脱石和伊利石，即使找到，也只能见到颗粒包膜型蜂窝状蒙脱石和板状伊利石。

（二）粘土矿物组的区域分布

下莫柔和中莫柔砂岩中大的粘土矿物组的区域分布表示在图 6A 和 6B。这些图点出了最高比值的粘土种类，分析了 98 口井的样品。在这两个图中，碎屑粘土（蒙脱石、伊利石、蒙脱——伊利石）组成一组“伊利石——伊利蒙脱石”。

大的粘土种类的区域分布酷似下莫柔层的岩相分布型式（图 3A 和图 6A）。总趋势表明朝盆地方向高岭石相对于绿泥石在量上减少，并且紧靠源区伊利石和蒙脱石粘土占优势（图 6A）。

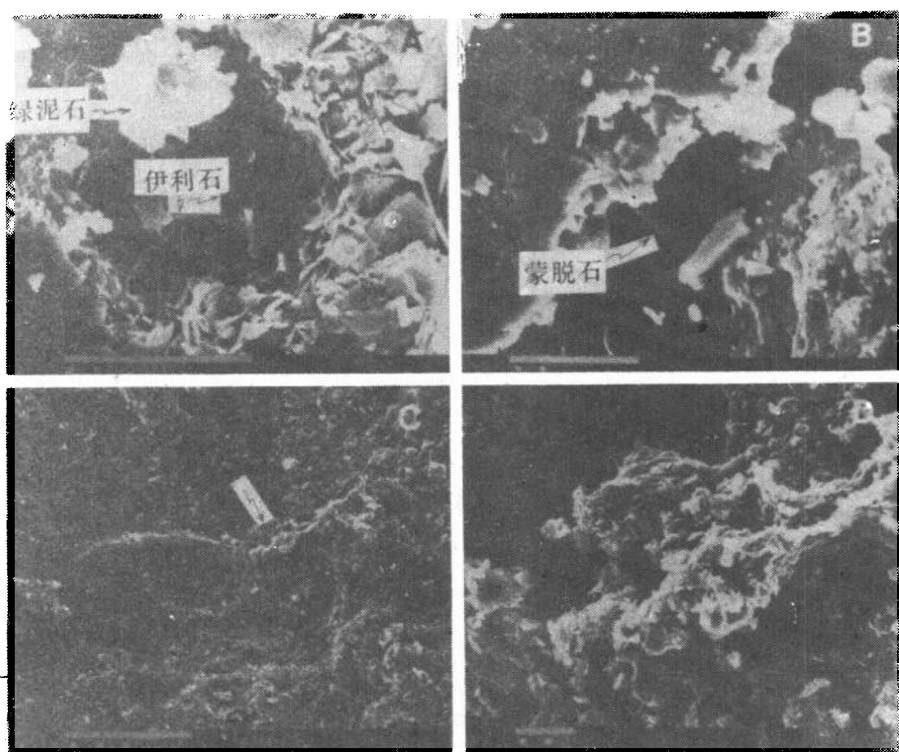


图5 (A) 具有绿泥石丛生的自生伊利石薄片 (B) 蒙脱石薄片
(C) 碎屑型蒙脱—伊利石薄片 (D) C图局部放大
(A)(B)(D) 短杠比例尺=10微米 (C) 短杠比例尺=100微米

另一方面，中莫柔层的粘土矿物分布表明与总的岩相分布形式不是明显的相关（图3B和图6B）。在中莫柔层分布的区域范围上高岭石是主要的种类，但在远源近源处都有绿泥石（图6B）。碎屑粘土零星分布，不局限于近源处。

伊利石和蒙脱石粘土被认为代表了莫柔储层中原始碎屑粘土成分，其分布通常受不同沉积相的沉积过程的控制。下莫柔层中，在**高能海滨相至内海陆架相**的纯净的、粗粒的、再沉积的砂岩中，碎屑粘土的百分比含量最低，在紧靠源区的粗糙的河流相砂岩中含量增加。中莫柔层中，在较大的、低能量的、冲积的沉积中心附近，碎屑粘土最为丰富。但是，高岭石和绿泥石的分布在其沉积期间不受沉积相的作用控制。这些粘土既不是置换碎屑粘土也不是重结晶的碎屑粘土，而显然是自生的。高岭石和绿泥石的分布被认为代表着莫柔层中沉淀粘土的地下水源的变化。

液体敏感性

在钻井和完井期间，莫柔砂岩遇到能量很强的有害液体。这些砂岩的粘土矿物可能亲近这些液体以致人为地降低渗透率，因而减少气井的生产能力。特殊粘土还程度不同地与钻井完井液起反应。

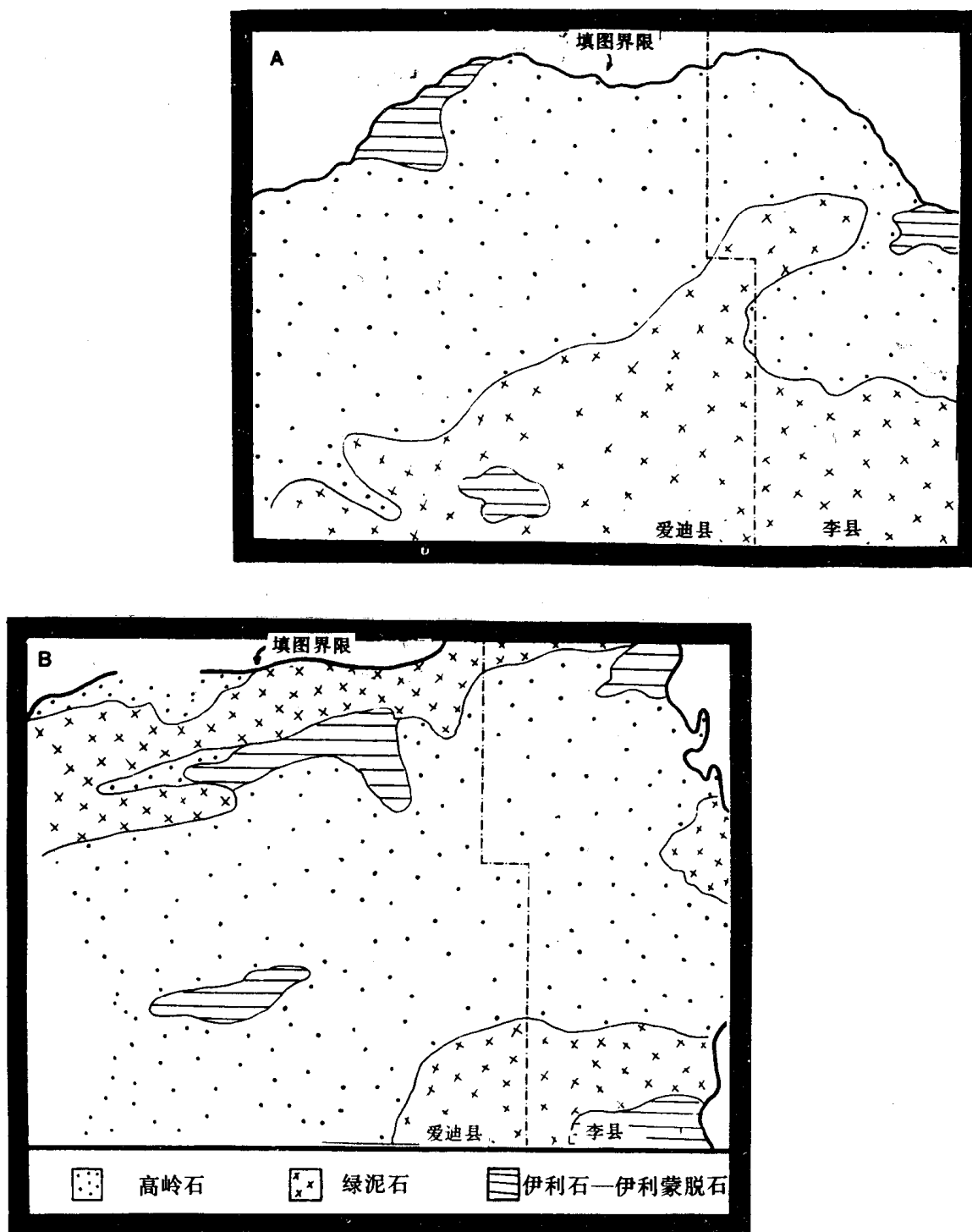


图6 (A) 下莫柔层主要粘土种类的区域分布
(B) 中莫柔层主要粘土种类的区域分布
比例尺同图3

砂岩中孔隙度的减少是由于沉积后的压实固结作用，后一过程包括硅化作用和自生粘土沉淀作用。硅化作用在莫柔层是个难以预测的过程，可局部地说明中等到粗粒砂岩中孔隙度减少直至完全丧失的原因。但是，可以预测莫柔砂岩的粘土矿物的变化，在储层砂岩孔隙未受其他方法破坏的井中了解岩石的粘土含量很有用，这是为了避免在钻井或完井时进一步减少其生产能力。

Almon和Davies总结了液体与地层粘土相互作用造成的地层损害，本文的研究引用了他们的结论。大量的胶结不好的孔隙充填型高岭石（图4A）造成在强液流情况下液体进入孔隙喉道的问题，强液流可能由钻井时高度失水条件下造成。绿泥石（图4B—4D）对含氧水和盐酸敏感，绿泥石如果接触酸则将分解并作为氢氧化铁凝胶沉淀，可能阻塞孔隙喉道。蒙脱——伊利石粘土（如图5B）遇到淡水时易于膨胀。伊利石薄片（如图5A）遇到淡水时可能相结成块，或者可能自然破碎进入孔隙喉道。

当在新墨西哥州东南钻莫柔层井时必须考虑几个基本的预防粘土问题的措施。液体滤失要保证尽可能的低，在钻井时最好是8~10cc。用粘土稳定剂有助于高岭石或伊利石最少进入喉道。酸与绿泥石反应带来的问题可通过加入铁螯合剂来避免，亦可通过回收在完井时注入井孔的大量清洗酸来避免。为避免人为地造成边缘井和不产油井，谨慎地设计泥浆和完井方案至为重要，在单一砂岩中有丰富的多种粘土的情况下就更为重要。

结 论

新墨西哥州东南莫柔层岩石代表了不同时间的沉积环境侧向移动，移动造成了复杂的砂岩储层类型的垂直层序和分布。这些砂岩的碎屑粘土和自生粘土成分同样显示复杂的垂直变化。这样在一个井孔内常见几个储层砂岩可能有不同的分布，不同的碎屑粘土组分和自生粘土组分。勘探与开发方案应注意不同的莫柔产层在井中将与注入井内的液体起不同反应的可能性。

新墨西哥州东南大量的莫柔层资料来自许多的检验井和生产井。在预测一个储层的有利地质部位时，细致地分析沉积相是基础。在特定砂岩中粘土问题的信息可通过细致的源岩层的地质填图结合附近井中岩样的岩类及粘土矿物分析来获得。在钻井期间，可以不理会遇到的粘土而采取基本的以把地层损害减小到最低限度而普遍适用的预防措施，但要通过对每个储层悉心设计的完井方案才能获得最佳的采收率。

张伯荣 译

得克萨斯州东部和路易斯安那 州北部的川维斯斯(休斯顿)地层

A.E.Saucier
R.J.Finley
S.P.Dutton

提要: 川维斯斯地层(在路易斯安那州叫休斯顿层)是朝盆地加厚的陆源碎屑楔体,该楔体呈弧形延伸,从得克萨斯州东部穿过阿肯色州南部和路易斯安那州北部到密西西比州南部。该层是大储气层,气在低渗透砂岩中,属于致密的含气砂岩。因为下白垩统地层复杂以及过去经济效益有限,其中有生产能力的砂岩的分布或沉积环境鲜为人知。川维斯斯地层以及斯利高地层的地下研究利用了分布在东得克萨斯盆地东部、北路易斯安那盆地和阿肯色州南部约90000平方公里内的1300条电测曲线。

加上标准等厚图和构造图、几种岩相图和6条近区域范围的地层横剖面图可以识别川维斯斯地层有五种沉积体系:河流三角洲系,三角洲边缘系,局限海陆架系,陆架边缘系,广海系。富含砂岩的体系是河流三角洲系和陆架边缘系。

在研究区找出了两个大的高建设性三角洲复合体。这两个三角洲复合体位于现今萨宾(Sabine)和芒柔(Monroe)隆起之上。北路易斯安那盐盆地(川维斯斯时期为海湾)在局限的礁后或砂坝后陆架区堆积了厚层的页岩灰岩交错层。穿过路易斯安那州中部早白垩纪陆架边缘延伸着一个碳酸盐或砂岩屏障。

三角洲边缘系虽然含极少砂岩,但它由沉积在过渡带(范围从三角洲平原到浅海陆架环境)的多种岩相组成,并且显然与川维斯斯地层的产油气有关。在东得克萨斯和北路易斯安那,川维斯斯地层的油气聚集与盐核构造紧密相联。本文对预测有希望的致密气走向将会有帮助。

导 言

东得克萨斯下白垩统川维斯斯地层(在北路易斯安那是休斯顿地层,下同)构成150~750米厚的陆源碎屑平覆层一部分,从得克萨斯州到密西西比州该层产气(图1、图2)。不经过压裂,在这个走向带内很难得到有经济效益的气;大多数地层具有低渗透率而需要水力压裂。川维斯斯(Travis Peak)地层由中、细和极细的砂岩组成,砂岩多为致密胶结,夹有丰富的红、灰色页岩和粉砂岩,还有少量的砾岩和褐煤。该层横向缺乏固定的内部标志层,在地层富含砂岩时难以找出相互关系。由盐构造造成了地层突然的厚度变异。

系	统	组	地 层
白 垩 系	考 汇 兰	纽 沃 里 昂	斯 利 高 — — 皮 泰 特
			川 维 斯 — — 休 斯 顿
侏 罗 系	上 侏 罗 统	棉 花 谷	棉 花 谷 砂 岩
			包 瑟 尔 页 岩
		娄 阿 克	棉 花 谷 灰 岩
			巴 克 诺
			斯 麦 考 文

图1. 东得克萨斯和北路易斯安那
上侏罗统和下白垩统部分地
层（根据Finley）

川维斯层在3000米深度内可以钻到，这个深度超过了产气走向在得克萨斯州和路易斯安那州的大多数深度；仅在得克萨斯州，估计有原生气5600~7000亿立方米。与盐构造有关的大多数地质构造从浅层产油气并可能在川维斯层致密层含气。在东得克萨斯盆地深部，由于渗透率堤和水动力条件圈闭的气可能提供了另外的致密气聚集可供开发。在发现的川维斯层中最初的日产量在570~7600万立方米之间，这就部分地表明在储层性质方面以及可能在钻井完井过程中存在重大差别，说明了进一步研究的必要。

川维斯层的沉积体系

川维斯地层被描述为三角洲沉积或扇形三角洲体系。但是，最近研究表明，没有获得证据以说明除局部地区外盆地边缘被抬高到足以产生扇形三角洲。更确切地说，一个高建设性三角洲舌状复合体由于在160多公里宽的浅碎屑岩和碳酸盐陆架之上急速地推进形成了川维斯层。这与当代密西西比高建设性三角洲不同，密西西比三角洲急速建造的厚层透镜体砂是由于其沉入前三角洲软泥中，而川维斯三角洲推进在较硬的地层上并且三角洲体系既横向延伸也纵向延伸。当沉积中心在稳定的浅陆架上前后移动的时候，最初的三角洲沉积被河流作用重新牵动。海相粉砂和粘土颗粒物质多被侵蚀，留下富含砂粒的三角洲平原堆积和冲积层，在东得克萨斯厚度超过600米。

三角洲边缘系环绕着河流三角洲碎屑楔状体边缘形成。离海岸更远一些，局限海陆架、陆架边缘、广海体系发育。富含砂粒的体系是河流三角洲和陆架边缘系。