页岩气藏的开采

沉积岩中最为丰富的岩石－页岩，终于得到了其应有的重视。长期以来，页岩一直被认为是一种盖岩，因此钻井人员在钻井过程中直接穿越页岩层段开采砂岩或碳酸盐岩储层。然而地质、经济和技术等方面的有机结合正在促使美国的一些作业公司租赁数千英亩矿区的钻井权，以便推动下一个页岩气远景区的发现。

Charles Boyer
美国宾夕法尼亚州匹兹堡

John Kieschnick
Roberto Suarez-Rivera
美国犹他州盐湖城

Richard E. Lewis
George Waters
美国俄克拉何马州俄克拉何马城

在编写本文过程中得到以下人员的帮助，谨表谢意：美国康涅狄格州Ridgefield的Barbara Anderson；巴西里约热内卢的Walter Arias；犹他州盐湖城的Keith Greaves；得克萨斯州College Station的Valerie Jochen；得克萨斯州休斯敦的Barbara Marin和Mark Puckett；俄克拉何马州俄克拉何马城的Camron Miller，以及宾夕法尼亚州匹兹堡的Jeron Williamson。

AIT（阵列感应成像测井仪），ClearFRAC，ECLIPSE，ECS（元素俘获谱探头），ELANPlus，FiberFRAC，FMI（全井眼微电阻率扫描成像测井仪），geoVISION，Platform Express和SpectroLith等是斯伦贝谢公司的商标。

过去150年所钻的数百万口油气井在达到其目标深度之前，都钻透了大量页岩层段。既然页岩层段的暴露如此普遍，是否每口干井实际上都是潜在的页岩气井呢？当然不是，页岩气只有在某些特定条件下才可以被开采出来。

页岩是一种渗透率极其低的沉积岩，通常被认为是油气运移的天然遮挡。在含气油页岩中，气产自其本身，页岩既是气源岩，又是储层。天然气可以储存在页岩岩石颗粒之间的孔隙空间或裂缝中，也可以吸附在页岩中有机物的表面上。对常规气藏而言，天然气从气源岩运移到砂岩或碳酸盐岩地层中，并聚集在构造或地层圈闭内，其下通常是气水界面。因此，与常规气藏相比，将含气页岩看作非常规气藏也就理所当然了。

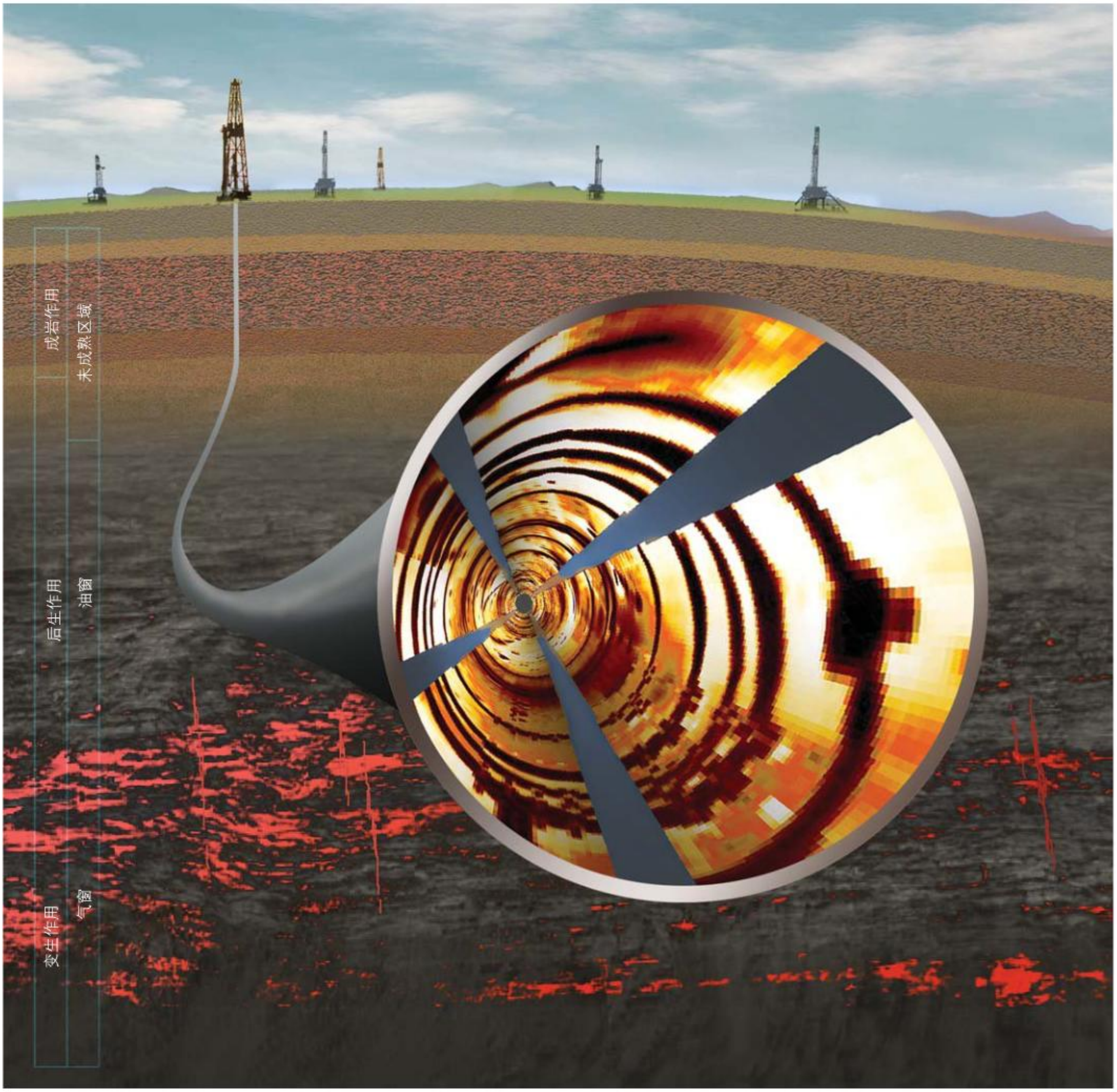
美国地质调查局（USGS）认为，页岩气产自连续的气藏[1]。USGS列举了16个特征，所有这些特征都可能在连续气藏中出现[2]。与含气页岩有关的独特特征包括区域性分布，缺少明显的盖层和圈闭，无清晰的气水界面，天然裂缝发育，估算最终采收率（EUR）通常低于常规气藏，以及极低的基岩渗透率[3]。此外，其经济产量在很大程度上还依赖于完井技术。

尽管页岩具有很多明显的不利因素，但是美国已经将某些具有合适页岩类型、有机质含量、成熟度、孔隙度、渗透率、含气饱和度以及裂缝发育等综合条件的页岩作为开采目标。一旦经济上可行，非常规天然气开采活动将呈现出一派繁荣的景象。

天然气需求的日益增长以及油田新技术的不断发展，促进了页岩气远景区的勘探与开发。在美国这一趋势正在扩大，天然气价格的不断上扬和每年23万亿英尺^3（651.82亿米^3）的天然气消耗量推动了其陆上钻井活动的发展。勘探与生产公司正在租赁数十万英亩的矿区钻井权，而先进的钻完井技术正在帮助作业者扩大已知页岩气盆地的范围。这些远景区同时也促进了技术的发展，使人们对这种普通的碎屑岩有了更深入的认识，并且推动了评价页岩资源的新设备、新技术的发展。

本文将对页岩产生烃类所需的条件、形成页岩气藏的条件以及开发和开采这类气藏所需的技术进行讨论。同时还将对得克萨斯中北部Barnett页岩开采过程中采用的各种作业实践进行回顾。

1. USGS列出的其它类型连续天然气资源包括盆地中心气，致密地层气和煤层气等。
2. Schenk CJ:“Geologic Definition of Conventional and Continous Accumulations in Select U.S. Basins – The 2001 Approach”，提交给AAPG Hedberg关于了解、勘探和开发致密气砂岩研究大会的文章摘要，美国科罗拉多州Vail，2005年4月24-29日。
3. 基岩渗透率是指流体通过岩石的能力，主要是指流过组成岩石的矿物颗粒之间间隙的能力，但不包括流体在岩石裂缝中的流动。

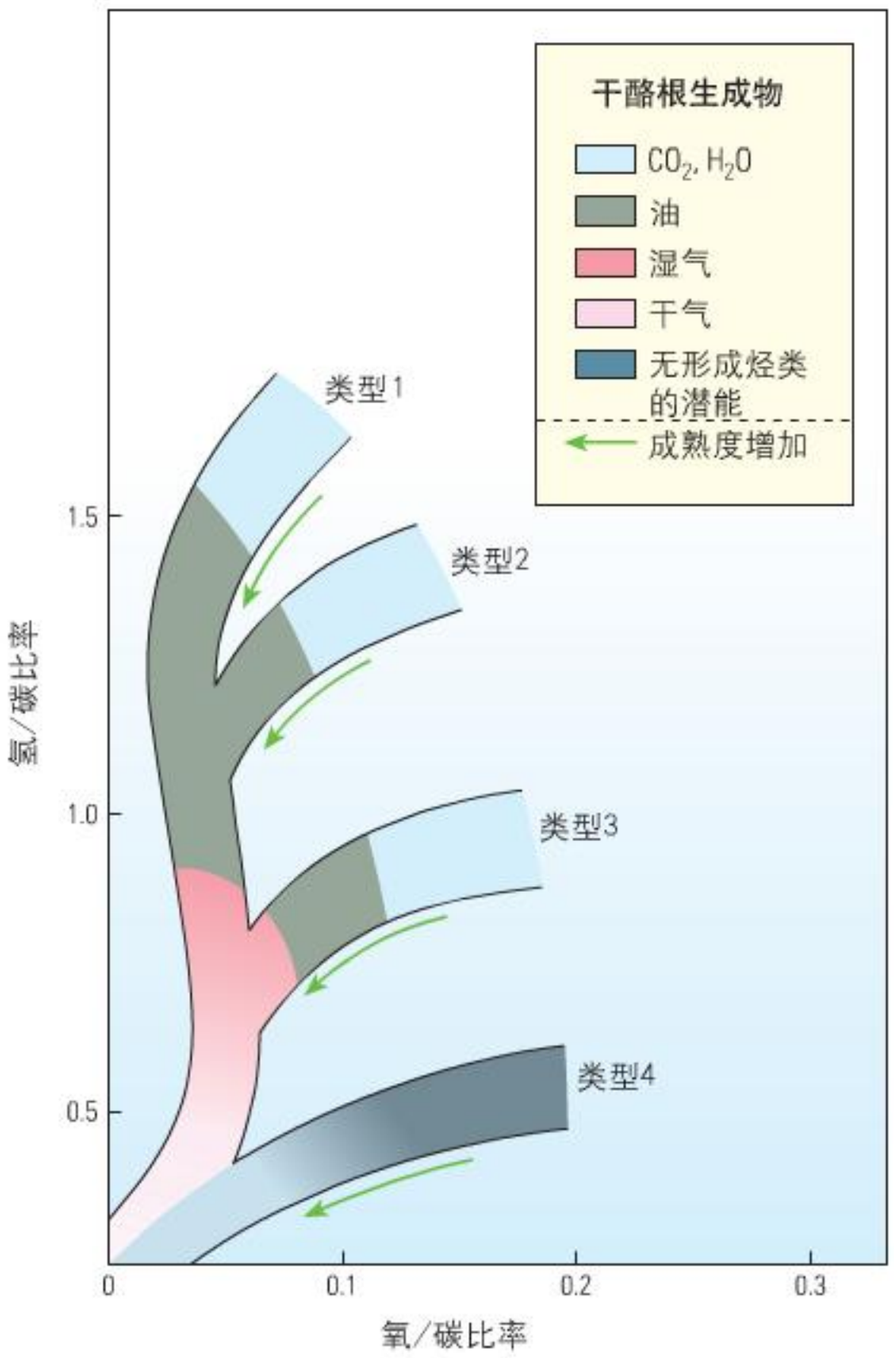


烃源岩

页岩是由被固结至超低渗透率岩层的粘土和粉砂级颗粒组成。显然，据此描述几乎无法将页岩作为勘探开发目标。然而我们知道某些页岩确实含有足够的有机物，从而能够产生烃类。这些页岩是否确实能够产生烃类，产生的是油还是气，则主要取决于页岩所包含的有机物的总量和类型、是否存在促成化学分解的微量元素，以及其所受到的热力程度和受热时间的长短等。

有机物，即动物和植物的遗骸，经热力转化后可以形成油或气。动植物遗骸需经过一定程度的保存才能发生这一转化过程。保存程度将对最终形成的碳氢化合物类型产生影响。

大多数动植物遗骸不是被其它动物消耗，就是被细菌侵蚀或腐烂，因而保存动植物遗骸通常需要在能抑制多数生物或化学净化作用的缺氧环境下快速埋藏。水循环受到限制、生物需氧量超出供应量（出现在每公升水中含氧量低于0.5毫升的水域）的湖泊或海洋环境符合快速埋藏的条件[4]。但即使在这些环境下，厌氧性的微生物也能以埋藏后的有机物为食物，在此过程中产生生物甲烷。



^ 干酪根的演化。修正后的Van Krevelen图显示埋藏过程中热量增加后干酪根发生的变化。干酪根受热转化成烃类的一般趋势可以表示为先产生非烃类气体，然后演化成油、湿气和干气。在此演化过程中，干酪根先在释放二氧化碳和水的过程析出氧，接着开始在演化成烃类时析出更多的氢。

随着时间的推移，进一步的沉积增加了埋藏深度。随着压力、温度以及埋藏深度的不断增加，有机物（主要来源于动物组织和植物组织中的脂质，或植物细胞中的木质素）逐渐受热后转化成干酪根[5]。根据所形成的干酪根的种类，在时间、温度和压力进一步增加的条件下可能会产生油、湿气或干气（左图）。

干酪根是有机物降解后形成的一种不能溶解的物质，也是形成碳氢化合物的主要来源。人们将干酪根分为四大类型，每种类型都直接关系到其所要产出的碳氢化合物的类型[6]。

•第一类干酪根：主要产生在湖泊环境，有时也可以在海洋环境下形成。该类干酪根来源于藻类、浮游物或其它被沉积岩中的细菌或微生物完全分解的物质。该类干酪根含氢量高，含氧量低，易于产油，但也可以产气，主要取决于热演化阶段。这类干酪根不常见，其形成的油气储量仅占世界油气储量的2.7%[7]。

•第二类干酪根：通常形成于中等深度的海洋还原环境下。主要源自细菌分解后的浮游生物的遗骸，含氢量高，含碳量低，在温度和成熟度逐渐增加的情况下可以形成油或气。该类干酪根与硫有关，硫要么以黄铁矿和游离硫的形式存在，要么存在于干酪根的组织结构中[8]。

•第三类干酪根：主要来源于沉积在浅海到深海环境或非海洋环境下的陆地植物遗骸。与前两种干酪根相比，其含氢量低，含氧量高，因此主要产生干气。

•第四类干酪根：来源于经腐蚀后再次沉积的古沉积环境。在沉积前，该沉积物可能已经在湿地或泥土中受到风蚀、燃烧、或生物氧化。该类干酪根由含碳量高，不含氢的残余有机物组成，被认为是一种不具备形成碳氢化合物潜能的“废碳”[9]。

4. Demaison GJ和Moore GT:“Anoxic Environments and Oil Source Bed Genesis”，*AAPG Bulletin*，64卷，第8期（1980年8月）:1179-1209。
5. 干酪根的字面意思是“蜡产出物”。干酪根一词最早是指苏格兰油页岩中发现的不可溶解的有机物。该词的使用自问世以来一直都不是很严谨，后来引申指沉积岩中不能溶解的有机物，大多数石油都来自沉积岩。有关干酪根定义更多的信息，请参见:Hutton A，Bharati S和Robl T:“Chemical and Petrographic Classifications of Kerogen Macerals”，*Energy & Fuels*，8卷，第6期（1994年11月）:1478-1488。
6. Tissot BP:“Recent Advances in Petroleum Geochemistry Applied to Hydrocarbon Exploration”，*AAPG Bulletin*，68卷，第5期（1984年5月）:545-563。

   Bordenave M-L:*Applied Petroleum Geochemistry*。巴黎：Editions Techip，1993年。

   Demaison和Moore，参考文献4。
7. Klemme HD和Ulmishek GF:“Effective Petroleum Source Rocks of the World:Stratigraphic Distribution and Controlling Depositional Factors”，*AAPG Bulletin*，75卷，第12期（1991年12月）:1809-1851。
8. Vandenbroucke M:“Kerogen: From Types to Models of Chemical Structure”，*Oil & Gas Science and Technology – Revue de l'Institut Francais du Pétrole*，58卷，第2期（2003年）：243-269。
9. Tissot，参考文献6。
10. Baskin DK:“Atomic H/C Ratio of Kerogen as an Estimate of Thermal Maturity and Organic Matter Conversion”，*AAPG Bulletin*，81卷，第9期（1997年9月）：1437-1450。
11. 沥青是能溶于有机溶液的一种有机物，是干酪根受热分解后形成的一种衍生物。干酪根、沥青以及由有机物受热后演化而成的烃类之间的实际关系还处于研究阶段。
12. Peters KE，Walters CC和Moldowan JM:*The Biomarker Guide:Biomarkers and Isotopes in the Environment and Human History，第2版*，英国剑桥：剑桥大学出版社，2004年。
13. Aizenshtat Z，Stoler A，Cohen Y和Nielsen H:“The Geochemical Sulphur Enrichment of Recent Organic Matter by Polysulfides in the Solar-Lake”，Bjoroy M等人（编辑）：*Advances in Organic Geochemistry*。英国Chichester:Wiley（1981年）:279-288。
14. Peters等人，参考文献12。
15. 裂化是较大、较重的碳氢化合物分子在高温高压下分裂成较小、较轻分子的一种过程。在这些条件下，石油可以转化成天然气。
16. Peters等人，参考文献12。
17. Hood A，Gutjahr CCM和Heacock RL:“Organic Metamorphism and the Generation of Petroleum”，*AAPG Bulletin*，59卷，第6期（1975年6月）:986-996。
18. 新取出的岩心为最佳，露头岩样次之，原因很简单，露头岩样经过风化后往往品质降低。

通过上述讨论可以得出以下结论：海洋或湖泊环境下的干酪根（第1和第2类）易于产生油，而陆地环境下的干酪根（第3类）则倾向于产生气，中间混合型干酪根（尤其是第2和第3类）在海相页岩中最为普遍。

当前，一种与氢含量有关的干酪根分类法比较流行。该方法认为含氢量高的干酪根主要产油，相反氢含量低的干酪根则产气。干酪根中的氢耗尽之后，即使还有一定数量的碳成分，碳氢化合物的形成过程也将自然终止[10]。

干酪根成熟度

有机物转化成碳氢化合物需要时间和热度两个要素。随着时间的推移，有机化合物在不断加大的沉积物负荷下越埋越深，从而使温度增加。时间以百万年为计量单位。埋藏过程中不断加大的压力和温度致使有机物释放出油和气，而且有机物中存在的可以促进化学作用的矿物也可能加快该过程的发生。该转化过程十分复杂，人们对此还未完全了解，但其概念模型却非常简单。微生物的生化作用将一部分有机物转化成甲烷，而剩余的有机物则在埋藏和加热条件转化成干酪根。进一步的埋藏和加热使干酪根转化成沥青，然后又转化成液态碳氢化合物，最后成为热成因气－开始是湿气，最后是干气[11]。

有机物的埋藏、转化及碳氢化合物的形成过程可以划分为三大步骤（右上图）。

首先是成岩作用，以有机物在低温下的变化为特征，通常发生在温度低于50°C（122°F）的条件下[12]。在此阶段，有机物被氧化或受到其它化学作用后开始分解。在被保存之前，生物过程也将改变有机物的含量及成分。如果此时受到细菌的侵蚀，就可能产出甲烷。随着温度的不断增加及pH值的变化，有机物逐渐转变成干酪根以及少量沥青。

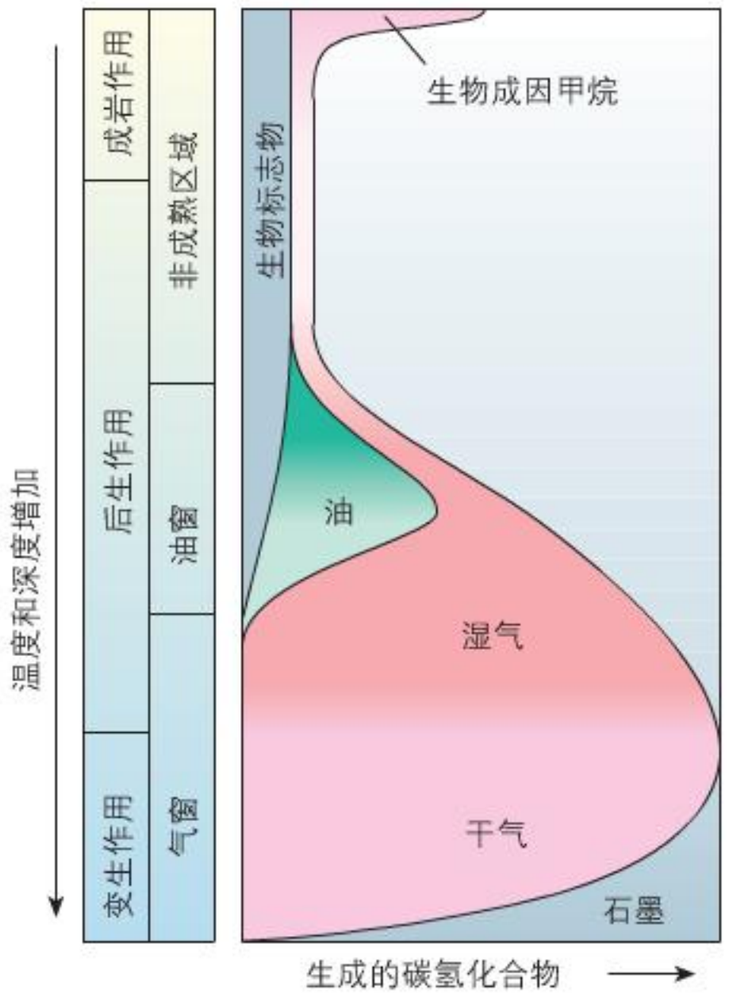
在成岩作用早期，硫可能被掺入有机物中。海水中的硫酸盐通过减少细菌繁殖为有机物生化降解作用的发生提供了氧化剂来源。这些细菌释放出多硫化合物、硫化氢（H_2S）及自然硫，它们后来可能会与粘土中的铁重新结合，形成黄铁矿（FeS_2），或者与有机物结合，形成其它类型的有机硫混合物[13]。

后生作用通常在埋藏深度进一步增加导致压力增大的条件下发生，此时，温度增加到50° – 150°C（122° – 302°F），引起页岩和干酪根中化学键的分解[14]。该阶段是碳氢化合物的形成阶段，第1类干酪根产生原油，第2类产生蜡质油，第3类产出气。温度和压力的进一步增加导致原油分子进一步裂化，产出更多的气分子[15]。

最后是变生作用，更多热量和化学变化几乎将全部干酪根转化成碳。甲烷或干气与非烃类气如CO_2、N_2和H_2S形成于该阶段。发生以上变化的盆地温度通常在150° – 200°C（302° – 392°F）之间[16]。

总之，干酪根变化过程（通常称为成熟过程）中产出一系列挥发性不断增强、氢含量不断增加、分子量逐渐变小的碳氢化合物，最后形成甲烷气。随着温度的增加，干酪根不断发生变化，其化学成分也随之改变，逐渐转变成低氢量的碳质残余物，最后变成石墨[17]。

有机物的保存与成熟过程不仅仅出现在页岩气中。对常规或非常规油气资源而言，石油和天然气的形成模型实际上是相同的。不同之处在于具体位置不同。在常规油气藏中，石油和天然气从气源岩运移到砂岩或碳酸盐岩圈闭内，而在非常规页岩气藏中，碳氢化合物必须直接产自气源岩。



^ 干酪根的热转化。在干酪根含量从活性碳转化为死碳的过程中，源岩中碳氢化合物的形成主要受到温度的制约。在成岩作用早期，天然气主要通过生物活动析出。随着埋藏深度的增加，后生作用取代成岩作用从而产出油和气。而温度和深度的进一步增加导致剩余的油发生裂化，释放出天然气。

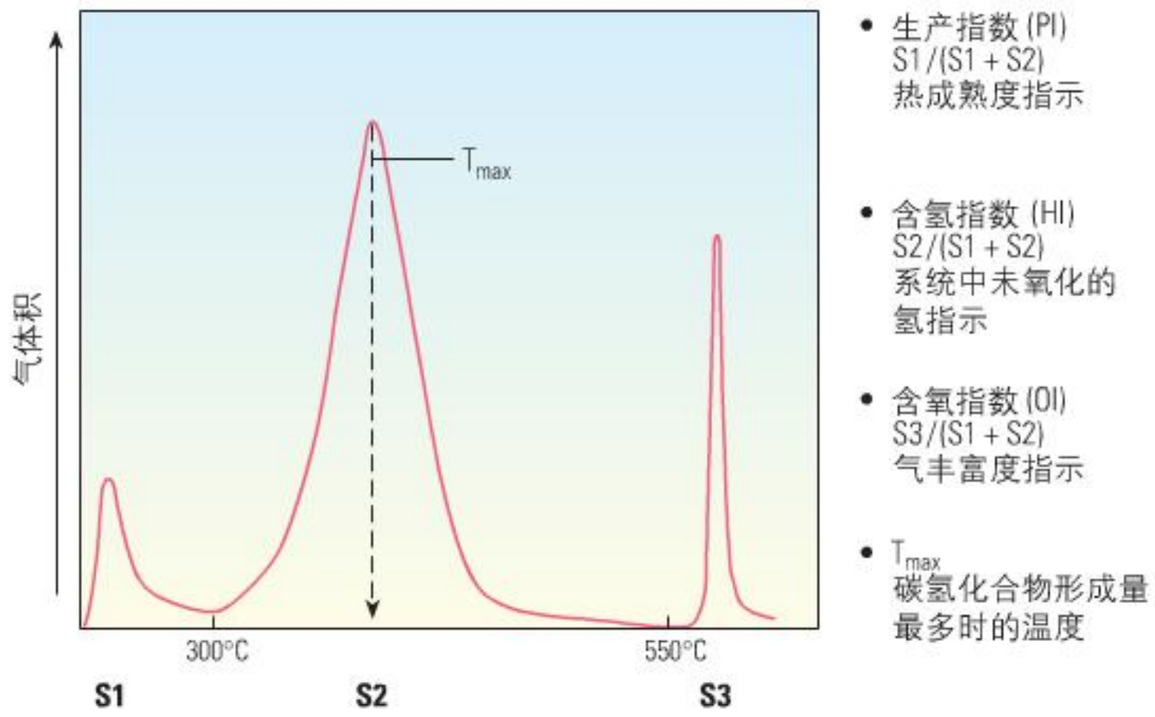
总有机质含量，重量百分比	干酪根质量
< 0.5	很差
0.5 到 1	差
1 到 2	一般
2 到 4	好
4 到 12	很好
> 12	极好

^ 源岩的有机质含量。通常认为页岩的总有机质含量（TOC）的最小截止值为0.5%。一些地学家认为另一种极端情况是有机物含量可能过多，多余的干酪根将可能会填充碳氢化合物将要占据的孔隙空间。

源岩潜力评估

源岩评估主要通过对页岩岩样的地球化学分析结合对先前所钻井测井资料的详细评价结果来完成。对全直径岩心、井壁取心、岩屑及露头岩样进行地球化学测试[18]。其主要目的是为了确定岩样是否含有丰富的有机物，以及是否可以形成碳氢化合物。一般情况下，岩石中有机物含量越高，其源岩潜力越大（右下表）。已经开发了多种复杂的地球化学技术来评估岩样中总有机质含量（TOC）及岩样的成熟度。

TOC值可以从经过去杂质处理并被置于1200°C（2192°F）温度下燃烧的重量为1克（0.0022磅）的粉碎岩样中取得。干酪根中的碳被转换成一氧化碳和二氧化碳。碳的具体转化数量可以在红外线室中得到测定，然后转换成总有机质含量，以岩石质量百分比的形式进行记录。如果最初的筛选测试证明岩样含有足够丰富的有机物，则将对这些岩样实施更多测试。



^ **气峰值-温度图。分两个阶段对岩样加热。S1峰值表明第一阶段加热至300°C时每毫克岩石受热后释放出来的游离碳氢化合物数量。S2峰值表明第二阶段加热至500°C时干酪根受热裂化后产生的碳氢化合物数量。从该曲线中我们可以了解岩石中的残余油潜能，或者埋藏深度和热度继续增加后岩石仍然能够产出的碳氢化合物量。S3峰值表明干酪根受热后释放出来的二氧化碳的体积。T_{max}值可以大致指示源岩成熟度。**

为了进一步描述有机物的丰富程度，许多地球化学实验室都采用法国石油研究院开发的程序化热解技术[19]。该技术已经成为源岩地球化学测试的工业标准，测试过程中只需使用50 – 100毫克（0.00011 – 0.00022磅）的粉碎岩石，整个测试过程也只需大约20分钟。在热解测试中，每个岩样都需要在各个不同的温度控制范围内受热。在受热的第一阶段[加热至300°C (572°F)]，游离烃从岩石基质中释放出来[20]。当第二阶段温度增加到550°C（1022°F）时，释放出热裂化作用下形成的挥发性碳氢化合物。除碳氢化合物外，干酪根在温度从300°C增加到390°C (572°F – 734°F)的过程中释放出二氧化碳。热力作用下的有机化合物释放可以通过火焰电离检测器测得[21]。

上述测量结果和温度数据被记录在图表中后显示出三个明显的峰值（上图）。这三个峰值为地球化学家提供了干酪根中氢、碳和氧相对含量的信息[22]。为确定干酪根的类型及油气潜能提供了依据。

碳氢化合物释放量最大时的温度与S2高点对应，称作T_{max}，样品的热成熟度与T_{max}值有关。

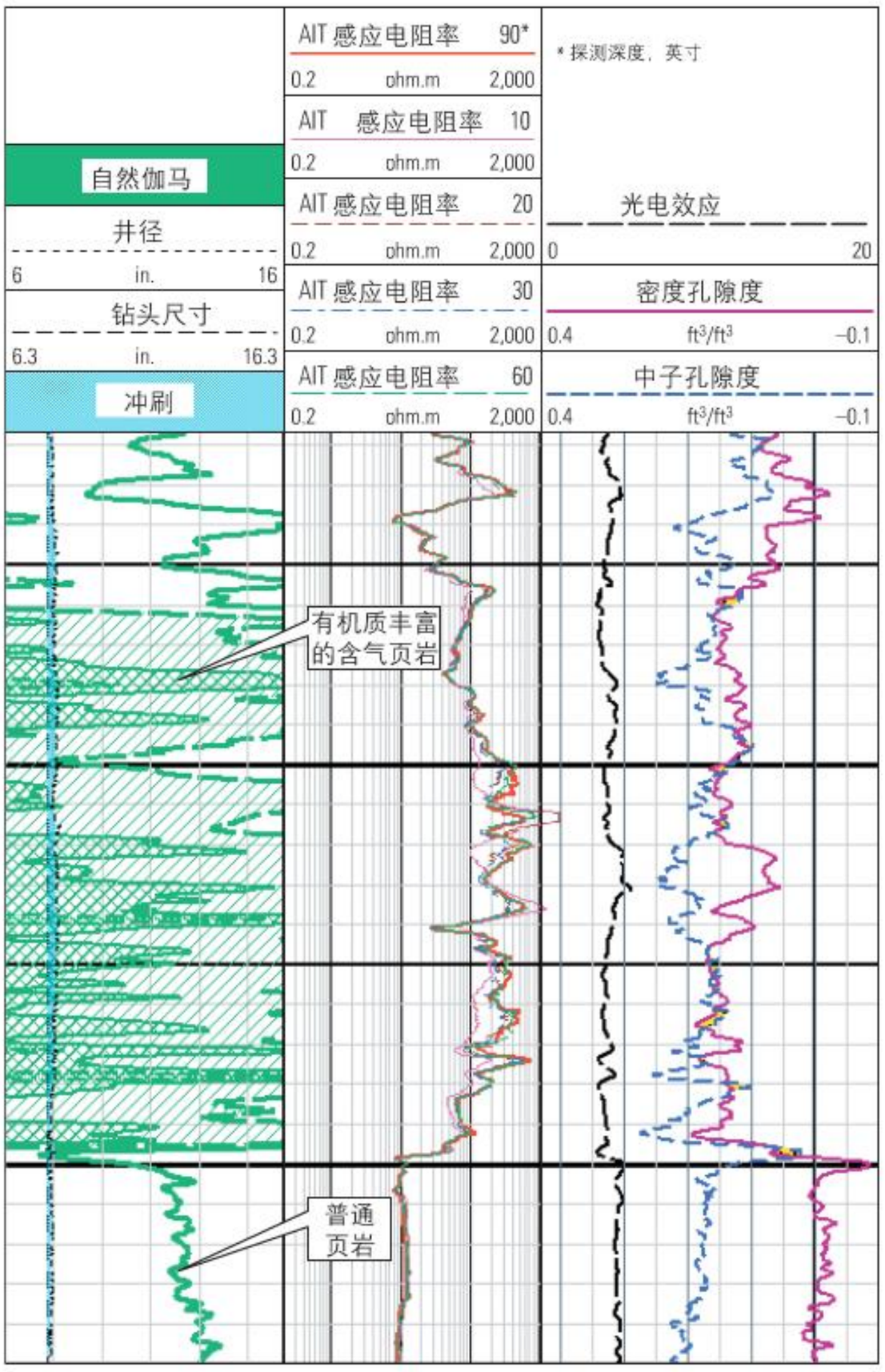
鉴定岩样成熟度的另外一个指标是镜质体反射率。作为干酪根的一个关键部分，镜质体是植物细胞壁中木质素和纤维素受热转变后形成的一种发光物质。随着温度的增加，镜质体经历复杂的、不可逆转的芳构化反应，导致反射率增大[23]。镜质体反射率最早用来确定煤炭的等级或成熟度，该技术后来被用于对干酪根热成熟度的评估。由于反射率随温度的增加而增大，因而可以通过使用该指标来评估碳氢化合物形成的各个温度范围。这些范围又可以被进一步划分成油窗或气窗。

通过一个配有油浸物镜及光度计的显微镜可以测量反射率（R)[24]。根据玻璃或矿物反射率标准仔细对镜质体反射率进行刻度，反射率测量反映反射到原油中的光度百分比（Ro)。如果通过多个岩样测试后确定了镜质体反射率均值，则该均值被称为Rm。

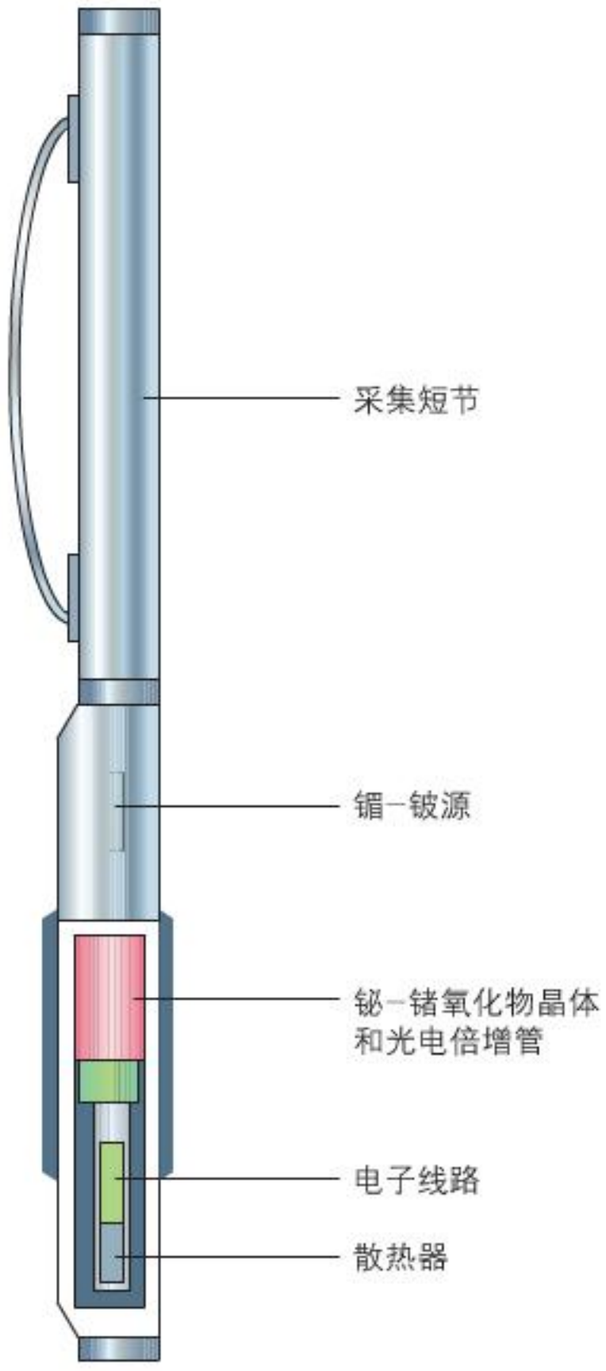
作为热成熟度的一个指标，各类有机物中的Ro值都不尽相同。这就说明第一类有机物的碳氢化合物生成的起点与第二类有机物碳氢化合物生成的起点不同。而且由于形成气窗所需的温度范围大于油窗的温度范围，因而气的Ro值也相应地大于油的Ro值。通过上述描述可以得出以下结论：成熟度值高(Ro>1.5)通常表示干气占主导优势，成熟度值中等（1.1%< Ro<1.5%）表示在该范围内的低端，气有不断向油转化的趋势。在0.8%< Ro<1.1%范围的低端能够发现湿气。Ro值低（0.6%< Ro<0.8%）时油占主导地位，而Ro<0.6%则表明干酪根发育不成熟。

Ro值本身容易使人产生误解，应与其它测量结果权衡后才能应用。其它常见的成熟度指标包括基于显微镜测量的孢子颜色的热变指数（TAI)、热解温度评估以及建立在小化石齿测量基础上的牙形石色变指数（CAI)[25]。由于镜质体反射率的普遍性，这些指数通常与Ro值有关。

19. Espitalie J,Madec M,Tissot B,Mennig JJ 和 Leplat P: “Source Rock Characterization Method for Petroleum Exploration”，OTC 2935，发表在第9届海上技术年会上，休斯敦，1977年5月2-5日。
20. 该方法允许使用与该范围稍微有所差异的温度范围。
21. Alixant J-L，Frewin N，Nederlof P 和 Al Ruwehy N:“Characterization of the Athel Silicilyte Source Rock/Reservoir:Petrophysics Meet Geochemistry”，*SPWLA第39届测井年会论文集*，科罗拉多州Keystone，1998年5月26-29日。LL篇。
22. Peters KE:“Guidelines for Evaluating Petroleum Source Rock Using Programmed Pyrolysis ”，*AAPG Bulletin*，70卷，第3期（1986年3月):318-329。
23. Peters KE 和 Cassa MR:“Applied Source Rock Geochemistry”，Magoon LB 和 Dow WG（编辑)：*The Petroleum System — From Source to Trap: AAPG专题报告60*。Tulsa: AAPG（1994年):93-120。
24. 反射率与反射系数可以相互通用，反射率更为常见。反射系数是反射率的一个度量。反射率是从一物体表面反射出来的光与射入该物体表面的光之间的比率－是返折辐射与入射辐射之间的比率。该数值能在一定范围内变化，主要取决于表面的厚度与暗度。如果表面厚度足以防止光射透表面，反射率最高，这就是所谓的反射系数。
25. 一个多世纪以来，被称之为牙形石的锥形小化石对古生物学家来说一直是个谜。长期以来晚寒武纪和三叠纪的牙形石一直被怀疑是由牙齿演化而来的。在二十世纪九十年代早期，电子显微镜相片的应用使该怀疑得到了证实。有关牙形石研究的更多信息，请参阅：Zimmer C:“In the Beginning Was the Tooth”，*Discover*，14卷，第1期（1993年1月)：67-68。
26. 有关SpectroLith技术更多的信息，请参见：Barson D，Christensen R，Decoster E，Grau J，Herron M，Herron S，Guru UK，Jodan M，Maher TM，Rylander E 和 White J:“能谱分析：快速岩石物理解释方法的关键”，《油田新技术》，17卷，第2期（2005年夏季刊)：14-33。



^ 含气页岩测井结果。与普通页岩相比，含气页岩具有自然伽马强度高、电阻率大、地层体积密度和光电效应低等特征。



^ ECS 元素俘获能谱仪器。ECS 探头记录和分析中子与地层作用后感生的自然伽马能谱。通过这些测量可以获得准确的地层成分评价结果，包括粘土、碳酸盐、硬石膏、石英、长石和云母等。

可以通过测井资料对页岩的其它性质进行评价，在某些情况下，这些测井曲线具有明显的特征（上图）。高自然伽马强度被认为是页岩中干酪根的函数。通常情况下干酪根能形成一个使铀沉淀下来的还原环境，从而影响自然伽马曲线。高含气饱和度导致高电阻率，但电阻率也会随着流体含量和粘土类型而变化。粘土含量及干酪根的存在能降低地层体积密度，干酪根的比重较低，介于 0.95 − 1.05 克/厘米^{3}之间。

还可以根据测井资料确定页岩中复杂的矿物组分以及源岩孔隙空间内的游离气体积。通过综合应用常规三组合和地球化学测井资料，斯伦贝谢的岩石物理学家可以确定页岩中的有机碳含量并计算吸附气的含量。地球化学测井资料也能帮助岩石物理学家分辨粘土类型以及各自体积。这些信息对计算生产能力、确定随后的水力压裂作业中应使用流体的类型起着关键作用。

ECS（元素俘获能谱）探头及 Platform Express综合电缆测井仪器与先进的解释技术结合后用以评估 Barnett 页岩及其它盆地中的含气饱和度和天然气地质储量，确定岩性特征。ECS 探头应用中子感生的俘获自然伽马能谱测定硅、钙、硫、铁、钛、钆、氯、钡和氢的含量（上图）。

上述数据与诸如对利用中子感生自然伽马能谱仪器获得的能谱进行处理的 SpectroLith 岩性处理解释技术一起应用。通过 SpectroLith 技术的应用，可以确定地层中粘土、石英-长石-云母、碳酸盐、黄铁矿或硬石膏的含量[26]。

应用在SpectroLith处理中的元素在干酪根中并不存在。因而虽然可以准确表示岩性，但是却无法对有机物进行表述。与此相比，用Platform Express仪器得到的测井资料则受干酪根的影响。比如还原环境下铀元素的存在使干酪根的自然伽马强度很高，前文对此已作过描述。仅仅依靠自然伽马资料来确定粘土含量容易高估粘土含量。而由于ECS和Platform Express之间存在差异，可以将两者结合起来使用以减少可能出现的岩性方面的错误，从而定量确定干酪根含量及孔隙度（下图）。

Barnett页岩综合结果图显示测井资料、岩性和矿物解释及流体评估综合数据，是综合应用ECS和Platform Express得到的结果，可以帮助作业者确定天然气地质储量以及根据矿物组成和渗透率确定射孔位置。同样，解释得到的矿物组成和孔隙度资料有助于确定在何处钻分支井。在某些地区，作业者利用矿物曲线图来识别页岩中的石英、方解石或白云石。这些矿物的存在增加了地层的脆性，从而有助于改善水平井中的造缝。

以上分析是绘制地层、干酪根成熟度及温度-深度图的基础。结合泥浆录井评价和岩石物理分析，地学家可以了解干酪根的成熟程度，寻找可能存在具有经济价值的天然气藏。钻井工作开始后，可对新获得的岩屑或岩心进行测试以评价页岩中的矿物及有机质含量。

天然气地质储量评估

页岩气产量是否可以长期保持经济产量开采主要取决于原始天然气地质储量、完井质量及基岩渗透率这三个因素。其中天然气地质储量通常是远景区经济评价的关键参数，其重要性高于基岩渗透率和完井质量。

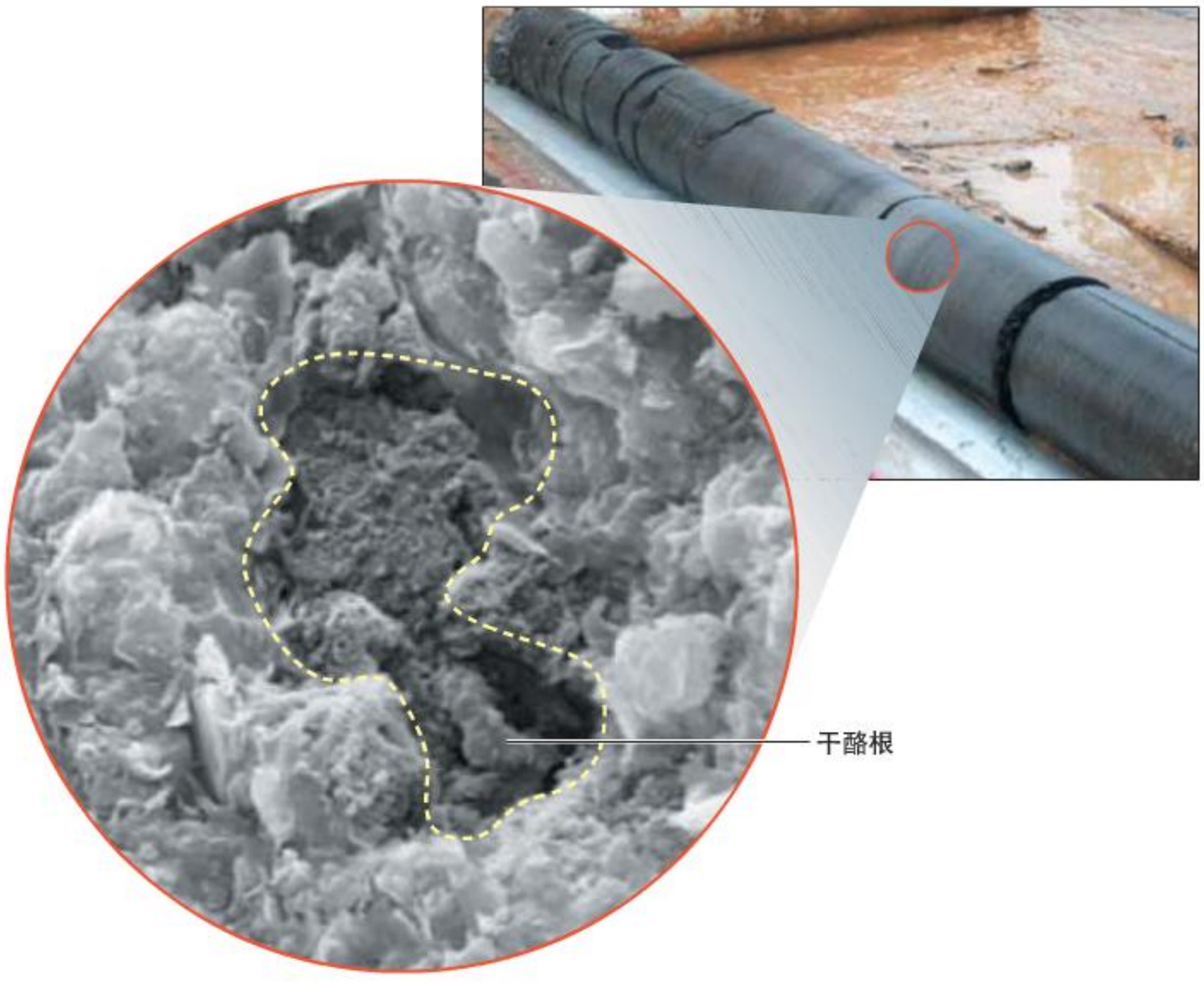
对于已充分开发的盆地，页岩气开采代表其已处于最后的开采阶段，通常具有很多油田研究和已钻油气井资料。因而在钻新井之前，诸如露头剖面、富含有机质页岩的油田地质图以及早期钻井数据等资料对地下页岩气开发的初步评估具有一定的意义。除岩性以外，早期油气井中具有天然气显示的泥浆录井资料、色谱分析记录和天然气火焰电离检测气读数尤其重要。岩屑通常经过过滤、清洗和风干处理，然后封存在岩样箱内。在适当的时候，这些岩屑将被送往实验室用于有机质含量和成熟度的分析。

在开发页岩气钻井活动早期，取心在地层评价方案中具有重要的意义。页岩取心为地学家确定天然气地质储量提供了直接数据。

天然气蕴藏在孔隙空间及裂缝内，或吸附在页岩内有机物的活性表面（下一页图）。上述两种间隙气与吸附气一起构成全部页岩天然气。确定在油气藏条件下间隙气与吸附气的比例后，地学家可以运用多种手段评估天然气地质储量。

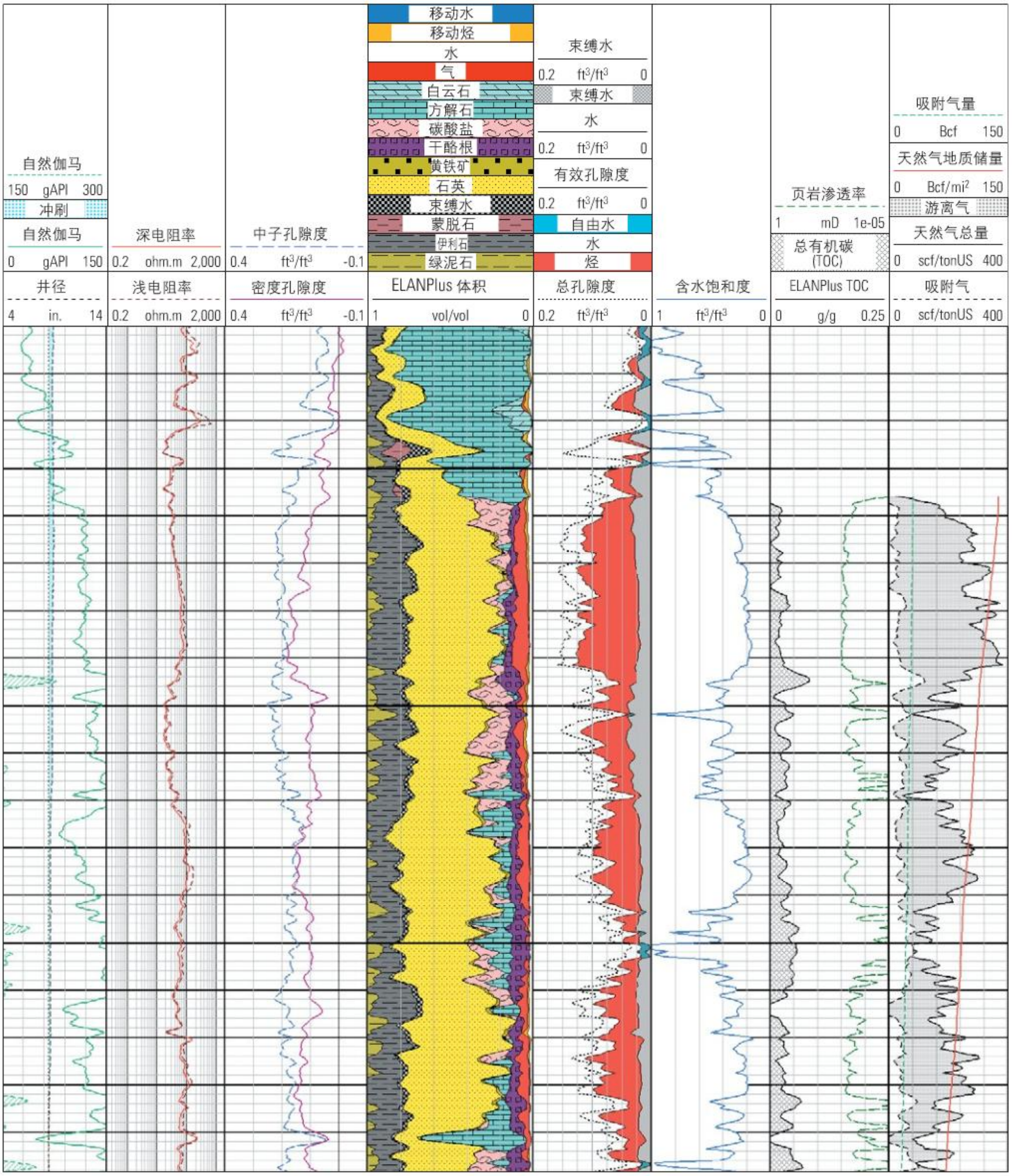
在井场，对新取出的岩心进行整理以运往实验室进行分析。该岩心的部分可能被封存在罐内并送往配有特殊装备的实验室实施罐吸附测试。测试过程中将对岩心中释放出来的天然气体积和组分随时间的变化进行测量。罐吸附测试测量释放出来的天然气总量，而不测量吸附气及间隙气的具体比例，也不对其与压力之间的依赖关系进行评价。因而还必须进行其它测量。

实验室工作人员将压碎后的页岩放入岩样室，然后对其增压。通过对恒定油藏温度条件下岩样室的分析，分析人员可以建立起页岩气实际PVT关系的吸附等温线（请参见“兰格缪尔等温线”，第44页）。



^ 页岩中干酪根的扫描电子显微镜照片。有机质的存在导致碳氢化合物以吸附气的形式存在于孔隙性有机物的表面活性区域。同时，干酪根也为页岩基质创造了混合润湿性环境，使干酪根附近的页岩呈现油湿特征，而远离干酪根的区域则呈现水湿特征。（图片由TerraTek公司的Barbara Marin提供。）

27. 位于犹他州盐湖城的TerraTek公司是斯伦贝谢地质力学实验中心。



^ 利用Platform Express和ECS测井得到的Barnett页岩综合测井结果。前3道曲线是Platform Express仪器的测量结果。第4道是根据以Platform Express和ECS数据为基础的含气页岩岩石物理模型得到的结果，这些数据通过ELANPlus高级多矿物测井分析软件进行了处理。该程序有助于对矿物成分、干酪根、含气孔隙度和含水孔隙度进行定量分析。其它道用来量化总孔隙度和有效孔隙度、含水饱和度、总有机物含量、基岩渗透率、天然气地质储量和累计产气量。对游离气和吸附气，都计算出其天然气地质储量和累计产气量。第4道所描述的几个因素是页岩气远景区成功开采的关键。除了干酪根和含气孔隙外，Barnett页岩还含有数量较多的石英和碳酸盐，这两种矿物使地层更脆弱，从而更容易进行压裂。粘土矿物成分主要是伊利石，一般情况下，伊利石不容易与压裂液起化学反应。

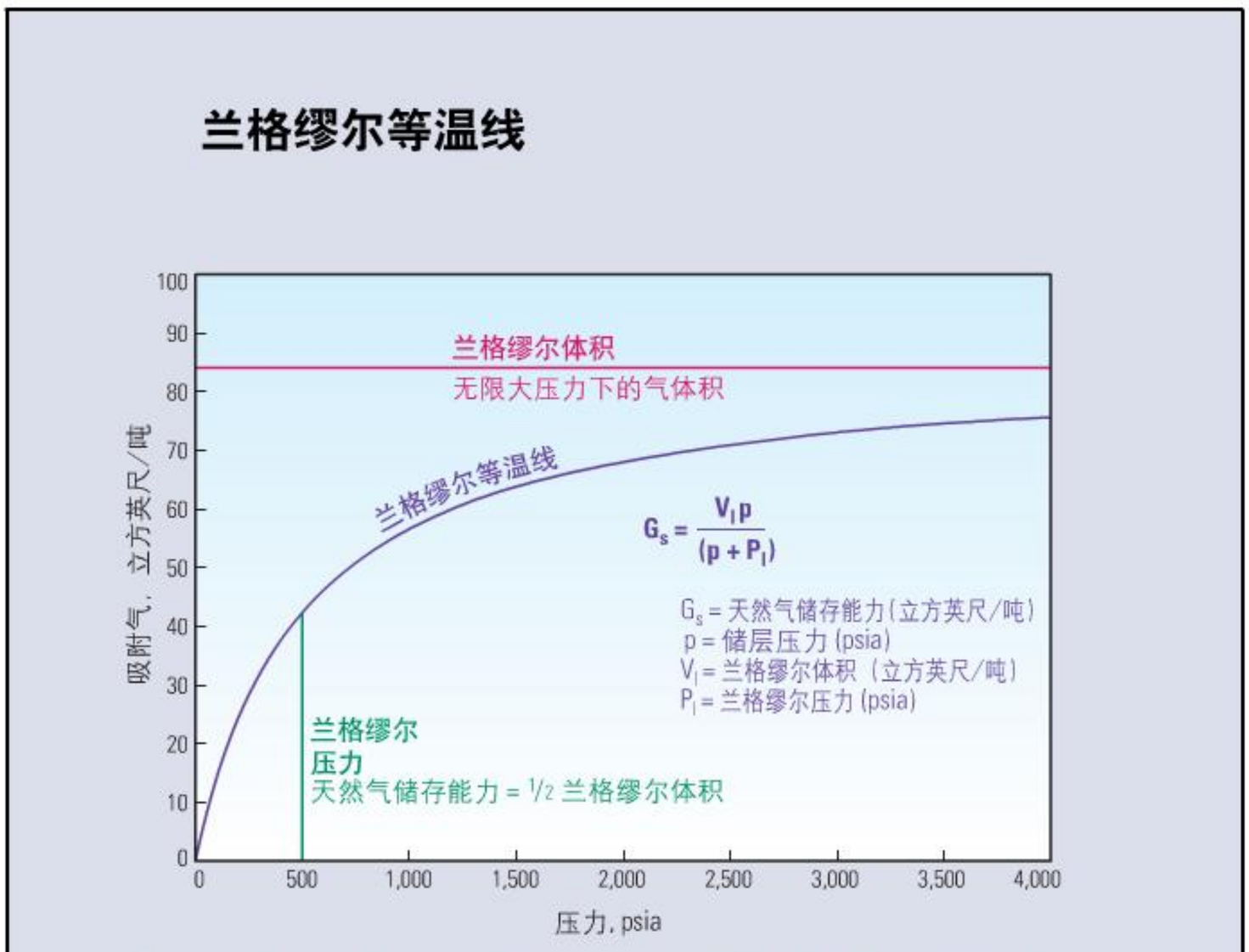
另外一项用于专门分析低渗透率、低孔隙度地层岩样的技术是由斯伦贝谢旗下的TerraTek公司开发的[27]。这种被称为致密岩石分析（TRA）的专有热解技术可以对含气页岩岩样提供综合评价（下一页，上表）。

吸附等温线数据作为油藏压力的函数，可以用来直接评估有机物吸附天然气的最大能力[28]。TRA含气孔隙度数据也是油藏压力的函数，可直接提供间隙气测量结果。吸附等温线和含气孔隙度与罐解吸附测量数据结合，能提供完整的天然气地质储量描述结果。该信息为油气藏模拟提供了关键数据，并能指示间隙气和吸附气对诱发裂缝系统的相对贡献。

岩心分析经验表明，成熟、热成因的页岩主要被间隙气所饱和，吸附气所占比例在50%到10%。相反，未发育成熟、生物成因的页岩主要被吸附气所饱和，间隙气所占比例很小。同时页岩孔隙空间中还被不同比例的水、气及可动油所饱和。

储层性质最佳的页岩通常含油和含水饱和度低、间隙气饱和度高，因而气相相对渗透率也较高。该类页岩中有机物含量在中等以上，有机物发育程度较高，其组织结构反映出孔隙度和渗透率在埋藏过程中保存较好。因此，为了对天然气地质储量进行评估，实验室测量必须能够对天然气和液体饱和度、孔隙度、基质渗透率、有机物含量和成熟度、有机物在恒定油藏温度下吸附天然气的能力（是油藏压力的函数）等进行直接评价。

最后，测井分析数据，特别是根据岩心分析所得的实际油藏性质标定后的测井分析数据，是利用孔隙度和气饱和计算进行天然气地质储量可靠预测的基础。以测井资料为基础的模型也可以用于预测横向范围有限区域内邻井中的特性，从而有助于对盆地的非均质性进行评价。



▲ **吸附气储存。兰格缪尔等温线（蓝色）显示一饱和岩样在特定压力下所能吸附的天然气量。压力下降会导致甲烷按照蓝线描述的动态轨迹脱离吸附状态。随着压力的下降，天然气解吸附能力以非线性的形式加强，因而本例中岩样在压力为3500 psi（24.2 MPa）时所吸附的甲烷量约为74立方英尺/吨。当压力从该点开始下降时，脱离吸附状态的天然气相对较少，而一旦压力下降到500 psi（3.4 MPa），该页岩所能吸附的天然气中有一半将脱离吸附状态，剩余的天然气将在压力小于500 psi的条件下全部脱离吸附状态。**

吸附在干酪根表面上的甲烷与页岩中游离甲烷处于平衡状态。兰格缪尔等温线就是用来描述某一恒定温度下的这种平衡关系的。该关系涉及两个参数：兰格缪尔体积和兰格缪尔压力。前者描述的是无限大压力下的气体积，而后者描述气含量等于二分之一兰格缪尔体积时的压力。

将一压碎的页岩岩样加热以排除其所吸附的天然气，然后对其进行岩心分析，可获取兰格缪尔参数值。随后将岩样置于一密封容器内，在温度恒定的甲烷环境下不断对其加大压力，测得其所吸附的天然气量，将结果与兰格缪尔方程式拟合后就形成等温线（上图）。

对于符合类似曲线的页岩，吸附作用是在低压（低于100 psi）条件下储存天然气非常有效的机理。相反，高压条件下，当吸附气接近高于2000 psi（13.8 MPa）的渐近线时则吸附效率不佳。

评价页岩气藏潜力

评价页岩气藏的潜力涉及到对多种因素正反面影响的权衡，包括页岩矿物成分和结构、粘土成熟度、干酪根类型及成熟度、流体饱和度、吸附和间隙气储存机理、埋藏深度、温度和孔隙压力等。

28. 可以对单一气体（通常是甲烷）以及混合气体（通过分析产出气体混合物得到混合气样品）进行测量。

29. Schenk，参考文献2。

岩样号	体积密度	颗粒密度	干颗粒密度	孔隙度	含水饱和度	含气饱和度	可动油饱和度	含气孔隙度	束缚烃饱和度	束缚粘土水	渗透率	总有机质含量
	g/cm³	g/cm³	g/cm³	体积百分比	孔隙体积百分比	孔隙体积百分比	孔隙体积百分比	体积百分比	体积百分比	体积百分比	毫微达西	重量百分比
1	2.48	2.622	2.645	6.65	15.16	81.4	3.43	5.42	0.5	6.21	270	3.77
2	2.436	2.559	2.584	6.26	18.5	76.44	5.05	4.79	1.29	7.03	230	6.75
3	2.48	2.633	2.652	6.87	15.43	83.9	0.66	5.77	0.5	6.8	270	3.36
4	2.327	2.487	2.509	7.74	13.09	83.02	3.87	6.43	0.73	6.67	347	7.41
5	2.373	2.539	2.558	7.58	11.17	85.92	2.9	6.52	0.34	2.63	359	5.95
6	2.461	2.605	2.63	6.87	16.26	80.42	3.32	5.53	0.99	7.19	298	5.04

^ TerraTek致密岩石分析技术。特殊岩心测量对颗粒密度、孔隙度、流体饱和度、渗透率和含气页岩总有机质含量等进行分析和描述。在该数据集中，含气饱和度、孔隙度和渗透率测量值等均表明该气藏为高潜能气藏。

其中，孔隙度、流体饱和度、渗透率和有机质含量等对于确定页岩储层是否具有进一步开发价值非常重要(右表)。

页岩气产自非均质性严重的地层这一现实加大了储层评价的复杂性。页岩在水平和垂直方向上的性质都会发生突变，高潜能储层段与质量较差的层交互并存。储层岩层可能在相对较短的距离内横向延伸或尖灭，而页岩总厚度则保持不变。描述储层特性以及了解造成局部非均质性的沉积和环境因素，是页岩气藏勘探和开发过程中面临的主要挑战。

通过分析岩心和测井资料，地质学家可以评价井筒范围的非均质性。通过对岩屑进行岩石学分析可以确定页岩类型，再结合多井TOC测量数据和测井分析，能够对盆地中储层潜力进行初步评估。通过上述数据的分析，地学家可以确定天然气地质储量、储层潜力及其随深度的变化。这些数据是评估储层是否可以经济开采的基础，也是确定完井目标储层单元，以及评价横向和垂向完井成本－效益的基础。

从页岩中开采天然气所受到的最大限制可能来自岩石内的孔喉。TerraTek公司的研究人员曾将各个不同类型的页岩和不同盆地中的井产能与基质渗透率数值做过比较。这些分析得到的经验表明，渗透率低于100毫达西是经济开采页岩气远景区的下限。这一限制似乎与完井质量及气含量无关。

最后，发现页岩气藏的关键在于各有利地质参数的综合，如热史、天然气含量、储层厚度、基质岩石特性和裂缝等[29]。

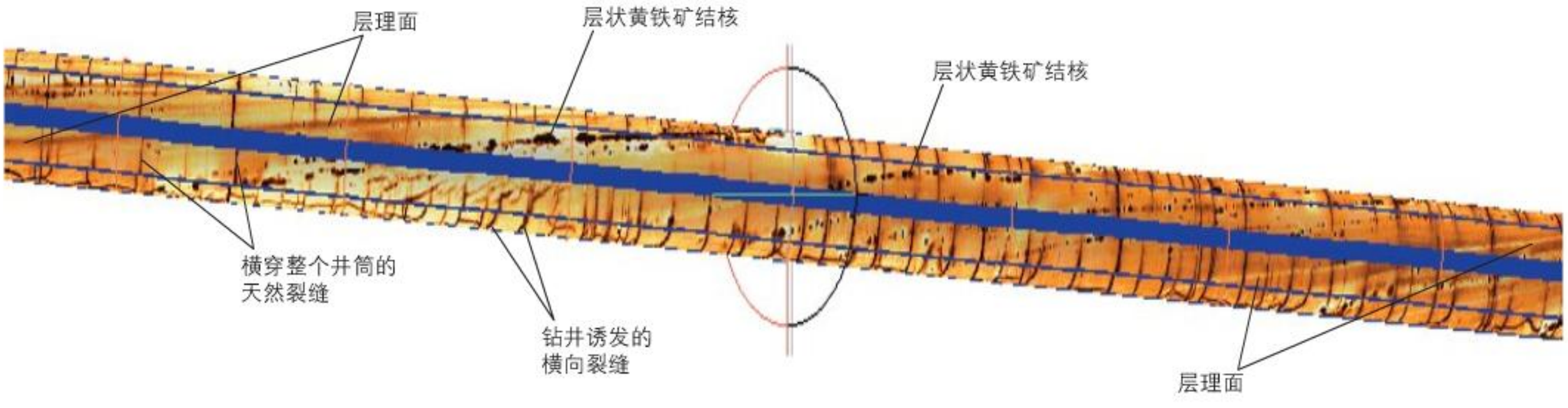
参 数	最低值
孔隙度	>4%
含水饱和度	<45%
含油饱和度	<5%
渗透率	>100 毫微达西
总有机质含量	>2%

^ 关键储层参数。美国多个页岩气盆地的经验表明，要想实现经济开采，页岩气藏必须符合或超过以上参数值。

气藏开发

岩石内必须具备足够的通道以使天然气流入井筒，产至地面。在页岩中，气源岩中裂缝引起的渗透性在一定程度上可以补偿基质的低渗透率。因此将页岩作为开采目标的作业者应事先考虑系统渗透率，即由页岩基质和天然裂缝的综合渗透率。

为了更好地利用储层中的天然裂缝，并且使井筒穿越更多储层，越来越多的作业者都在应用水平钻井技术(下图)。虽然该技术在石油工业中并不是一项新技术，但它对扩大页岩气成功开发的战果却有着重大的意义。



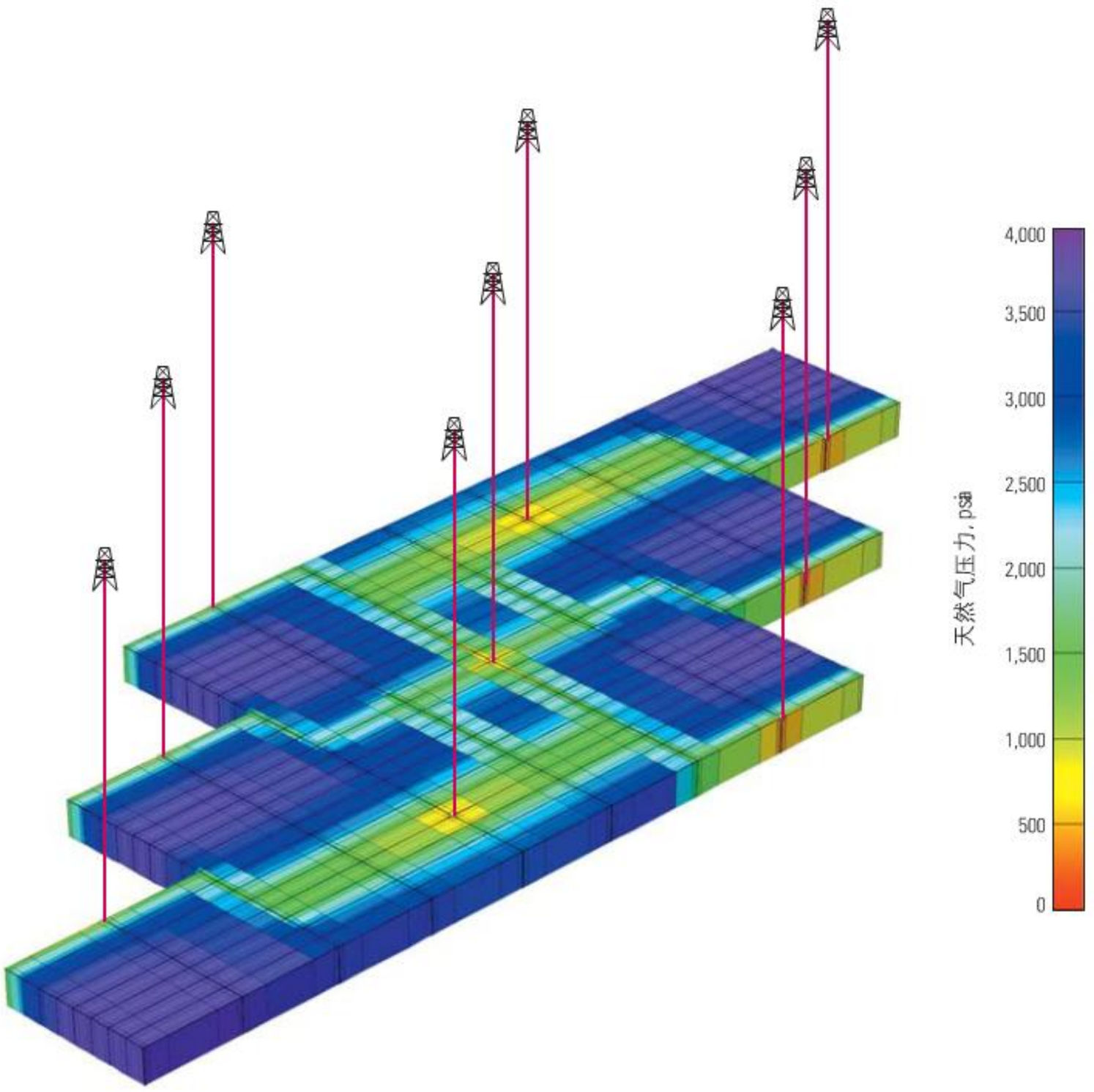
^ 钻井穿过裂缝。FMI全井眼微电阻率扫描成像测井显示出水平井钻遇的裂缝和层理特征。钻井诱发的裂缝沿着钻井轨迹顶部和底部出现，但沿着该井筒侧面终止，井筒侧面的应力最高。井筒钻穿的原有天然裂缝以垂直线的形态穿过井筒的顶部、底部和侧面。图中颜色较深的黄铁矿结核非常明显，与层理面平行出现。

通过得克萨斯州中北部Fort Worth盆地Barnett页岩的开发进程可以清楚地看到水平钻井的作用。1981年，Mitchell能源公司开始在该地区钻了第一口直井，15年以后井的数量才超过300口。2002年，在收购Mitchell公司后，丹文能源公司开始在该地区钻水平井。截至2005年，水平井数量已超过2000口。此外，Barnett页岩实际钻井经验表明，从水平井中获得的估计最终采收率大约是直井的三倍，而费用只相当于直井的两倍[30]。

除水平井技术之外，其它技术也发挥了重要作用。如作业者通过采用三维地震解释技术能够更好地设计水平井轨迹。由于采用了该技术，作业者将Barnett页岩钻井活动扩展了那些原来被一直误认为没有产能、含水且位于页岩下方的喀斯特白云岩区域。

一般情况下，作业者通过沿垂直于最大水平应力方向钻井的方法来增加井筒与裂缝相交的可能性，从而打开更多的页岩表面进行开采。但是，常规的定向钻井技术可能受到扭矩和阻力的影响，扭矩和阻力通常是司钻在井筒造斜过程中由滑动和旋转所造成的。在更复杂的井眼轨迹中，扭矩和阻力可能限制横向位移，加大测井难度。为了避免上述问题的发生，在开采较直的、曲折度不大的井时，可采用旋转导向系统[31]。某些情况下，从水平段底部到顶部的倾角变化低于0.5°[32]。

诸如geoVISION随钻成像之类的随钻测井系统已应用于某些油气井，以解决水平井测井存在的一些问题。应用该系统后可以在整个井筒长度范围内产生电阻率成像和井筒地层倾角分析。成像测井提供构造信息、地层信息和力学特性信息，用于优化随后的完井作业。例如，成像能够将地层天然裂缝和钻井诱发裂缝进行比较，帮助作业者确定射孔和油井增产的最佳目标。在Barnett页岩远景区，利用这些测井得到的成像资料来识别地震资料无法识别的断层以及与之相关的从下伏喀斯特白云岩中产水的天然裂缝群[33]。



^ ECLIPSE油气藏模拟。标色后的页岩层模型显示九口垂直气井开采15年后的压力衰竭趋势。水力压裂裂缝以及天然裂缝相互交错组成网络通道，天然气通过这些通道从地层流入井内。

在进行加密钻井时，井眼成像有助于识别邻井中的水力裂缝，从而帮助作业者将注意力集中在储层中原先未被压裂部分的增产措施上。井中有无钻井诱发裂缝的存在及钻井诱发裂缝的方向对确定整个水平井的应力变化及力学特性非常有用。这一信息在减轻Barnett页岩完井难度及降低相关费用方面也起到了很大的作用[34]。

页岩气藏模拟

大多数气藏模拟器都是对常规气藏进行模拟分析，常规气藏中天然气储存在单一孔隙系统中。但是页岩气藏模拟则需要采取不同的方法。有限差分模拟器（如ECLIPSE油气藏模拟软件中的页岩气藏模块）认为天然气储存在致密页岩基质的孔隙空间内，并吸附在页岩有机物上，游离气则蕴藏在页岩地层的天然裂缝内。

30. Waters G,Heinze J,Jackson R,Ketter A,Daniels J和Bentley D: “Use of Horizontal Well Image Tools to Optimize Shale Reservoir Exploitation”,SPE 103202，发表在SPE技术年会暨展览会上，美国得克萨斯州San Antonio，2006年9月24-27日。
31. 有关旋转导向系统更多的信息，请参见：Williams M：“旋转导向钻井新技术的应用”，《油田新技术》，16卷，第1期（2004年春季刊）：4-9。
32. 在定向井中，跟部位于井的垂向段与水平段之间，而端部位于水平段的另一端。
33. Waters等人，参考文献30。
34. Waters等人，参考文献30。
35. 减阻水处理使用低粘度水基液将支撑剂输送到水力压裂形成的裂缝中。
36. Waters等人，参考文献30。

在建立气藏单井和整个气田模型时，这些气藏模拟器可以使作业者将所掌握的有关岩石的全部信息都包括进去。气藏的特性，如产层有效厚度、气藏压力、温度、气含量、含水饱和度、天然裂缝几何形状、岩石基质孔隙度、总有机质含量以及甲烷吸附等温线函数等都可以容易地包括在模型中。以上信息为作业者评估天然气地质储量奠定了基础。

还可以将来源于增产后模拟和微地震解释的基质渗透率测量数据及水力压裂裂缝几何形状数据结合到模型中。根据实际天然气和水产量对模型进行调整，可以评估系统渗透率。通过建立完全符合实际油气井生产动态的模型，作业者能够预测一个地区的估算最终采收率（前一页图）。

通过油气藏模拟可以实施多种类型的敏感性分析，这一点尤其重要。分析包括优化井设计，权衡水平井与直井之间的利弊，优化增产设计的次数与规模，根据不同的布井方案确定最佳钻井井位。上述分析为今后建立在科学、技术和经济基础上的开发决策创造了条件。

页岩气藏增产处理

含气页岩中的天然裂缝虽然具有一定的作用，但是通常无法提供经济开采所需的渗透通道。多数含气页岩都需要实施水力压裂。

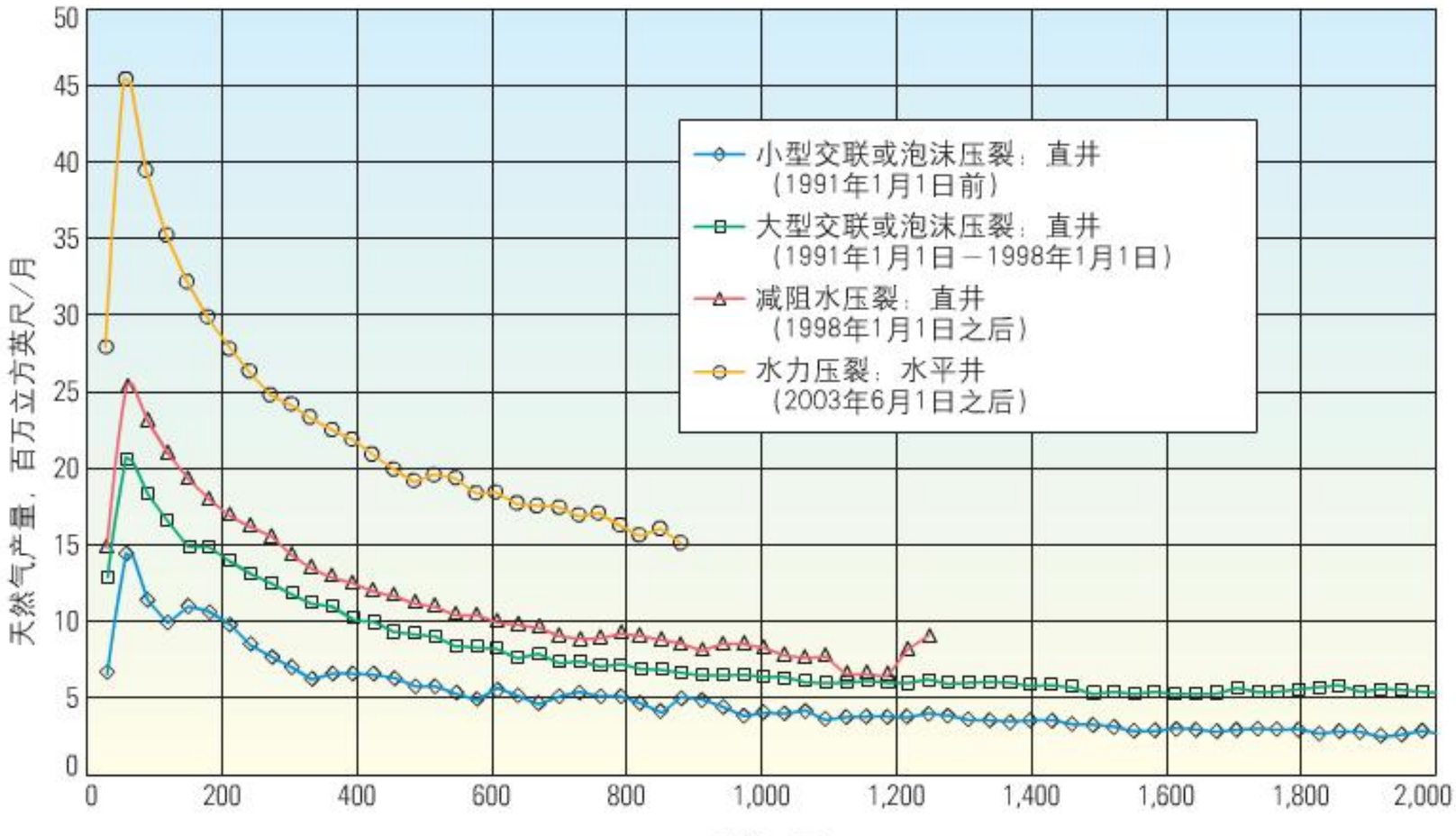
压裂使更多的页岩范围暴露于井筒的压降条件下。页岩中水平井周围紧密排列的水力压裂裂缝能够加快天然气的开采速度。

作业者通常在中等深度（一般在5000 – 10000英尺（1524 – 3048米）之间）的高压页岩中泵入低粘度水基减阻流体和支撑剂进行增产处理[35]。而在深度较浅或油气藏压力较低的页岩中，则泵入氮泡沫压裂液。高压条件下泵入的液体在页岩中产生裂缝。这些裂缝可以从井筒向外在页岩中延伸上千英尺。从理论上将，支撑剂颗粒嵌入裂缝，停泵之后可使裂缝保持开启状态。

Barnett页岩开采过程中曾采用过多种增产措施。在20世纪80年代中期之前，对Barnett页岩下部采用二氧化碳和氮气泡沫增产处理[36]。随后又实施了大型水力压裂措施（下图）。该措施平均每次需要耗费60万加仑（2270米^3）的交联凝胶和140万磅（63.5万公斤）的支撑砂。增产作业虽然提高了估算最终采收率，但是昂贵的完井费用和低天然气价格使该远景区的经济效益不佳。直到1997年，才停止进行大型水力压裂作业，此时Mitchell能源公司开始对使用减阻水增产措施进行评估。



^ Barnett页岩大型水力压裂作业现场。在该单级增产措施中，将100多个装满水的压裂罐运往井场并放置在井场周围。泵送装置、管汇和监测设备等则被放置在井场中心附近的井口周围。由于采用了新的完井方法，现在所需的材料和设备少了很多。现在，作业者将井筒分成一些小层段，并对其实施多级增产处理。这一新方法改善了油气井动态，降低了完井成本。



^ 采用新技术改善井动态。多年来随着钻井和压裂技术的不断发展，Barnett页岩增产作业的效果不断得到改善。

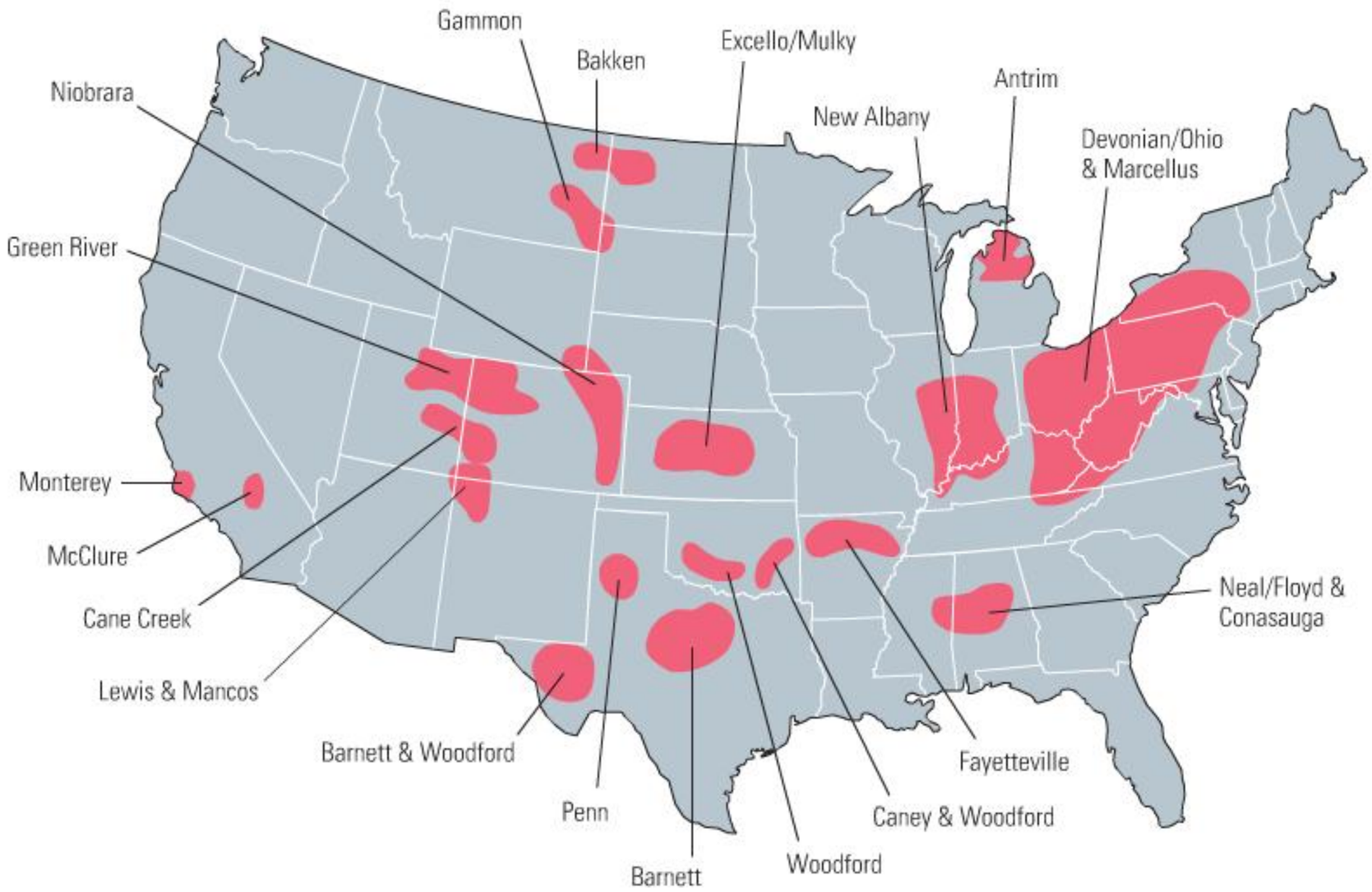
这些增产措施能产生长而宽的裂缝通道，所使用的交联液大约是大型压裂措施的两倍，而泵入的支撑剂体积还不到大型水力压裂的10%。与大型水力压裂相比，虽然在油气井动态方面改善不是很明显，但其成本却下降了65%左右。现在，减阻水增产措施已成为Barnett页岩中最为常见的增产措施（上图）。而且，增产作业费用的下降允许作业者对Barnett页岩上部层段实施完井，从而使估算最终采收率提高20%以上。

尽管在Barnett页岩压裂过程中一般使用水和砂粒，但是其它页岩远景区的作业者发现，压裂过程中存在水力压裂裂缝中支撑剂充填不充分的情况。该现象可能是由于压裂液产生的裂缝宽度不够，不足以容纳支撑剂颗粒所造成的，也可能是因为泵入裂缝的砂粒从携砂液中快速脱离悬浮状态而造成的。上述两种原因都导致形成较小裂缝，使渗透率难以达到预定的目标值。

为了克服以上难题，一些作业者采用了ClearFRAC无聚合物压裂液或FiberFRAC纤维基压裂液技术来延长支撑剂悬浮时间。使用ClearFRAC液的目的是为了将支撑剂送入裂缝深处。除了支撑剂本身以外，ClearFRAC液中不含可能降低裂缝渗透率的固相成分，并且可以与富含有机物的页岩配伍[37]。FiberFRAC液中的纤维使支撑剂砂粒处于悬浮状态，直至裂缝在砂粒闭合并将其锁定。最后流体中的纤维溶解，从而增加裂缝中流体的流动能力。以上两种流体都将支撑剂保留在裂缝中，因而在井开井生产时，裂缝还能保持开启状态。

二十世纪90年代末，Mitchell能源公司开始实施其它新的增产试验。结果表明，重复压裂措施对原先使用凝胶液完井的油气井最有效。微地震监测数据表明，这些处理能够激活与最大水平应力垂直的天然裂缝[38]。但这种裂缝激活反应通常不会发生在粘性流体中。因此，对于那些原先应用减阻水措施完井的井实施重复压裂通常效果不太明显。

37. Fredd CN，Olsen TN，Brenize G，Quintero BW，Bui T，Glenn S和Boney CL：“Polymer-Free Fracturing Fluid Exhibits Improved Cleanup for Unconventional Natural Gas Well Applications”，SPE 91433，发表在SPE东部地区会议上，美国西弗吉尼亚州Charleston，2004年9月15-17日。
38. 有关裂缝和微地震技术监测裂缝延伸更多的信息，请参见：Bennet L，Le Calvez J，Sarver DR，Tanner K，Birk WS，Waters G，Drew J，Michaud G，Primiero P，Eisner L，Jones R，Leslie D，Williams MJ，Govenlock J，Klem RC和Tezuka K：“水力压裂监测新方法”，《油田新技术》，17卷，第4期（2005/2006年冬季刊）：42-57。
39. Anderson BI，Barber TD，Lüling MG和Sen PN：“Observations of Large Dielectric Effects on Induction Logs，or，Can Source Rocks be Detected with Induction Measurements？”，*SPWLA第47届测井年会论文集*，墨西哥Veracruz，2006年6月4-7日。000篇。
40. 电容率是介质抵抗电荷流动的能力。
41. Faraj B，Williams H，Addison G，McKinstry B，Donaleshen R，Sloan G，Lee J，Anderson T，Leal R，Anderson C，Lafleur C和Ahlstrom J：“Gas Shale Potential of Selected Upper Cretaceous，Jurassic，Triassic and Devonian Shale Formations，in the WCSB of Western Canada：Implications For Shale Gas Production”，天然气研究所报告GRI-02/0233，2002年12月。
42. Curtis JB：“Fractured Shale-Gas Systems”，*AAPG Bulletin*，86卷，第11期（2002年11月）：1921-1938。



^ 富含有机物的气源岩盆地分布图。该图显示了美国主要的页岩气盆地，总潜在资源量在 500 – 1000 万亿英尺^3 (14.16 – 28.32 万亿米^3)。

含气页岩井在经济上获得成功除了天然气价格上涨和水平钻井技术提高这两个因素之外，经济、有效的增产作业实践也是关键。

在其它盆地的推广应用

毫无疑问，一个盆地中采用的新技术或是成熟技术新的应用都将推动该技术在其它盆地中的应用。目前正处于研究阶段的一项应用就是通过分析感应信号来寻找气源岩。

目前，斯伦贝谢的研究人员正在对感应测井仪器所测得的电压测量数据进行研究[39]。电导率信号中被称为正交分量的部分一般所占比例较小。然而，某些岩石层却能使该正交分量信号发生重大变化。

通过分析 AIT 阵列感应成像仪的原始数据，斯伦贝谢的研究人员发现了超出页岩层正常范围的较大的正交负信号。相反，邻层砂岩和页岩则呈现较小的正交正信号，这些信号代表该地区典型的电导率测量结果。

对造成正交信号异常若干可能因素进行的试验和模拟结果显示，异常高的电容率是造成这些页岩中出现较大负正交信号的唯一因素[40]。

得克萨斯、俄克拉何马及犹他州的一些被认为是气源岩的页岩层呈现高介电常数的特征，并且被低介电常数的非气源岩所包围。薄粘土层的大小以及黄铁矿的存在导致介电常数异常高，并为烃类的形成提供了粒间孔隙。

斯伦贝谢的研究人员正着手研究这些电性特征在气源岩和非气源岩页岩中的变化程度。随着进一步的测试和改进，对普通的感应测井资料的详细分析能够提供页岩层正交信号与其烃类形成能力之间的相互联系。

除 Fort Worth 盆地以外，在俄克拉何马州的Woodford页岩和Caney页岩以及阿肯色州的Fayetteville页岩也发现了页岩远景区。其它富含有机物的页岩分布在美国的各个地区，其中一些成熟盆地（如伊利诺伊、密歇根和阿巴拉契亚盆地）正处于开发中（上图）。随着美国页岩气产量的不断增加，其它国家的作业者也将会发现类似的盆地，从而为增加页岩气储量奠定基础。

除美国之外，其它国家也在进行盆地研究，以寻找类似的页岩气藏。在加拿大西部，地质学家正在仔细研究艾伯塔和不列颠哥伦比亚省上白垩纪 Wilrich 地层、侏罗纪 Nordegg/Fernie 地层以及三叠纪 Doig/Doig Phosphate/Montney 地层的页岩气潜力。地球化学研究结果表明这些地层具有未来开发的潜能[41]。目前，除美国以外的其它国家页岩气远景区很少的主要原因可能是页岩气产量低，回收成本时间较长造成的，而并不是因为缺少页岩气盆地[42]。然而在常规油气资源开采到达顶峰之后，美国页岩气盆地中积累的经验必将有助于世界其它地区页岩气资源的开采。

—MV