

油气勘探专题材料之八

次生孔隙和成岩圈闭理论 在油气勘探中的应用

《油气勘探译丛》 编辑部

石油工业部科学技术情报研究所

一九八六年四月

油气勘探专题材料之八

次生孔隙和成岩圈闭理论 在油气勘探中的应用

《油气勘探译丛》编辑部

石油工业部科学技术情报研究所

一九八六年四月

内 容 提 要

本集所收入的十篇译文，是近年来国外刊出的有关砂岩和碳酸盐岩储集性能与成岩作用研究的一些主要文章，其中关于砂岩储集层和成岩圈闭的五篇；关于碳酸盐储集层孔隙演化的二篇；其他方面的二篇。内容主要涉及到储集层的埋藏成岩作用和次生孔隙、成岩封堵层的形成与识别：次生孔隙的类型与分布：潜伏不整合面之下的储层发育条件以及成岩相等，基本上反映了国外油气勘探过程中储层次生孔隙和油气成岩圈闭等方面的研究现状，也提供了在研究中某些现代分析的应用概况，可供石油地质和沉积岩石学工作者以及有关院校师生参考。

编者的话

本世纪七十年代以来,储层次生孔隙研究有了很大的进展。特别是在砂岩次生孔隙研究方面,七十年代末已形成了较系统的理论;八十年代初已初步总结出与烃类的成熟和运移有关的砂岩次生孔隙形成模式。关于次生孔隙的重要性,已有人指出,砂岩孔隙中至少有三分之一是次生的;而对于碳酸盐岩来说,普遍认为储层孔隙基本上都是次生的。另一方面,世界上一些老的产油区,随着勘探程度的不断提高,隐蔽圈闭的勘探愈来愈受到重视。美国的一些老油气田,就是由于非构造(包括成岩)圈闭的周期性发现,才长期保持了产能。近年来成岩圈闭研究也十分活跃。

次生孔隙和成岩圈闭研究对我国的油气勘探也有现实意义,它不仅是那些致密砂岩和碳酸盐岩油气区储层研究的重要内容,而且也是老油田扩大后备储量的重要手段。虽然近年来我国石油地质学家在这方面也取得了一些水平较高的研究成果,但就全国来看,储层研究,特别是成岩作用对储集性能影响,仍未受到应有的重视,处于比较落后的状态。

次生孔隙和成岩圈闭研究难度较大。研究方法上要求石油地质学与沉积岩石学和元素地球化学紧密结合。本集的许多研究实例中,除了采用常规的地层、岩相和岩石物性研究外,还大量地应用了某些现代的分析方法,如扫描电镜、电子探针、原子吸收光谱、冷-热台、阴极发光和稳定同位素质谱等,使研究结论有了更坚实的分析数据基础。这些分析方法的应用和对分析成果的解释,都值得我们借鉴。

本集的主要目的就是通过这些实例介绍国外有关次生孔隙和成岩圈闭方面的研究现状和研究方法。在所收入的九篇译文中,关于砂岩储集层和成岩圈闭的四篇;关于碳酸盐岩储层孔隙成因和演化的二篇;其他方面的二篇。内容不仅涉及到储层次生孔隙和油气成岩圈闭,而且也涉及到沉积相与成岩相的关系,次生孔隙的类型与分布,成岩隔层与成岩储层的电测显示以及在不整合面之下的储层发育条件等。同时还有不同观点的争论。

本集是由石油部科技司委托《油气勘探译丛》编辑部组织收集翻译出版,供有关同志阅读

由于我们的水平有限,缺点和错误难免,望读者指正。

《油气勘探译丛》编辑部
一九八五年十月

目 录

怀俄明州洛斯特索尔捷油田沉积与成岩相对坦斯利普砂岩储集性能的控制作用·····	(1)
东得克萨斯上侏罗统棉谷砂岩的成岩作用——对于识别致密天然气产层的意义·····	(16)
阿尔伯塔省第普盆地的地层—成岩天然气圈闭——斯皮利特河组·····	(33)
库珀盆地图拉基组的成岩作用与储集层性质·····	(49)
表生成岩作用对英格兰及伊拉克西部沙漠地区隐蔽不整合之下岩石储集特性的影响···	(65)
阿肯色州和路易斯安那州上侏罗统斯马科沃组的埋藏成岩作用与孔隙演化·····	(82)
阿肯色州行人溪油田上斯马科沃段（侏罗系）碳酸盐颗粒岩的孔隙保存：古潜水透 镜体对埋藏作用的反应·····	(115)
伊利诺斯盆地圣彼得砂岩和西蒙山砂岩孔隙和胶结物类型的区域变化·····	(131)
用电测井探测受成岩过程影响的储集层和成岩圈闭·····	(147)

怀俄明州洛斯特索尔捷油田沉积与成岩相 对坦斯利普砂岩储集性能的控制作用

D. C. Mou
R. L. Brenner

刘怀波 译
肖文达 校

摘 要

怀俄明州甜水 (Sweetwater) 县洛斯特索尔捷 (Lost Soldier) 油田宾夕法尼亚系坦斯利普 (Tensleep) 砂岩, 由结构均匀的细粒砂岩夹白云岩组成。地质背景和沉积特征表明, 坦斯利普砂岩是潮上风成环境沉积的。洛斯特索尔捷油田一口钻井岩心样品的详细岩石学、阴极射线发光和扫描电镜分析, 揭示了坦斯利普砂岩中自生组分的一些特征, 它们由以下九种成岩事件所造成: 1) 基底式硬石膏的胶结作用; 2) 长石增生物的沉淀; 3) 结核状嵌晶方解石的胶结作用; 4) 结核状硬石膏的胶结作用; 5) 组构选择性的硬石膏胶结作用; 6) 二氧化硅增生物的沉淀和碳酸盐的硅化; 7) 长石的转化; 8) 白云石的胶结作用和9) 烃类的聚集。已鉴定出四种各自具有特征变化形式的成岩相: 1) 早期碳酸盐淀积相; 2) 早期硬石膏胶结相; 3) 原生碳酸盐颗粒相和4) 结核状胶结相。富碳酸盐成岩相与潮上萨布哈 (Sebkha) 沉积环境关系密切, 硬石膏富集的成岩相与沙丘间萨布哈沉积环境有关, 而结核状胶结相则发现于风成沙丘环境沉积的岩石中。

洛斯特索尔捷油田坦斯利普砂岩储集性能 (即孔隙度和渗透率) 的纵向和横向变化都十分显著。孔隙和渗透性主要受压实和胶结作用的控制。结核状胶结相和原生碳酸盐颗粒相样品的胶结物体积与储集性能之间存在明显的互为消长关系。在孔隙度对胶结物体积的直角座标图上, 其他成岩相的样品同样可以聚集于一些特定的范围, 因此这种座标图可以区别不同的成岩相, 至少对蒸发—风成岩系是如此。

引 言

怀俄明州甜水县洛斯特索尔捷油田位于大分水岭盆地 (Great Divide Basin) 的北缘。油田内坦斯利普砂岩的平均厚度为570英尺 (174米), 自1930年以来一直是重要的石油产层。其储集性能从孔隙度百分之几、渗透率0.01毫达西到孔隙度21%、渗透率数百毫达西, 变化很大。

由于在数个怀俄明盆地坦斯利普储层中都发现了石油, 该组已被广泛地进行了研究。但是, 只有少数作者 (如Morgan et al, 1978; Mankiewicz and Steidtmann, 1979) 曾致力于

解释某些坦斯利普岩层的高孔隙度和高渗透率，而另一些有希望的储集岩孔、渗值却特别低

的原因。砂岩储集岩的孔隙和渗透性要受到成岩变化的深刻影响 (Taylor, 1977; Hayes, 1979)。这些成岩变化通常又受到如下七种可变因素中某些因素的共同控制: 1) 矿物成分, 2) 温度, 3) 压力, 4) 地质年龄, 5) 沉积组构 (即结构与构造), 6) 沉积体几何形态和 7) 流体化学 (Brenner, 1979)。本文研究的目的是评价控制成岩作用强度和分布的地质因素, 并评价这些作用对怀俄明州洛斯特索尔捷油田地区坦斯利普砂岩储集性能 (即孔隙度与渗透率) 的影响。我们对洛斯特索尔捷油田 72 号井连续取心提供的样品进行了岩石学、阴极射线发光和扫描电镜分析。相邻隆起区的露头资料 (图 1)、洛斯特索尔捷油田许多钻井的测井曲线与岩心材料用来协助进行古环境解释。

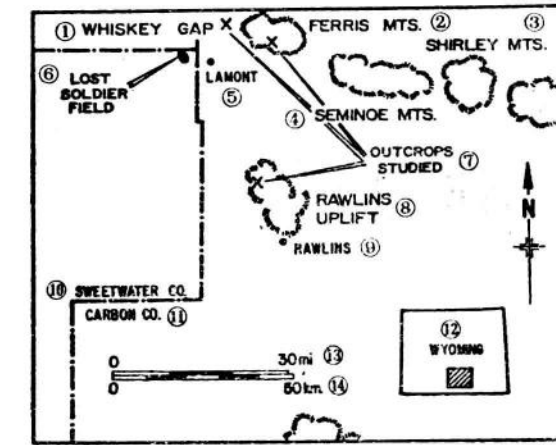


图 1 洛斯特索尔捷油田和附近露头 (×) 的位置

- ①威士忌山口; ②费里斯山; ③希尔利山; ④塞米诺山; ⑤拉蒙特; ⑥洛斯特索尔捷油田; ⑦研究的露头; ⑧罗林斯隆起; ⑨罗林斯; ⑩甜水县; ⑪卡邦县; ⑫怀俄明州; ⑬英里; ⑭公里

我们希望这一研究成果有助于了解在相似的沉积和构造条件下形成的沉积物的成岩作用, 进而用于协助在勘探程度低的地区估测潜在的储层性能。另外, 可在石油生产的早期推测出相似条件下所形成的储集岩物性, 以便更有效地确定回采程序。

地 质 概 况

由于缺乏有年代地层学意义的化石, 故不能直接获得洛斯特索尔捷田地区坦斯利普砂岩的时代。不过, 从拉腊米德 (Laramide) 和温德河 (Wind River) 地区一些与之相关的组中所采集到的化石来看, 坦斯利普的时代在狄莫统 (中宾夕法尼亚世) 至密苏里统, 或可能是弗吉尼亚统 (晚宾夕法尼亚世) 之间 (Thomas 1951; Malory, 1967, 1972)。

坦斯利普砂岩的成因, 已成为洛基山区勘探和开发地质学家感兴趣的研究课题。实际上, 对于坦斯利普的沉积环境, 许多研究者已得出了不同的看法。这些不同的解释是: a) 海洋环境 (Todd, 1964; Emmett 等, 1972), b) 海洋和海岸沙丘环境 (Fox 等, 1975), c) 主要是海洋、部分为风成环境 (Morgan 等, 1978), 以及 d) 风成沙丘和丘间环境 (Mankiewicz 和 Steidtmann, 1979)。与坦斯利普侧向上连续各组, 如拉腊米 (Laramie) 盆地的卡斯珀 (Casper) 组和科罗拉多州的韦伯 (Weber) 砂岩, 已被解释为沉积于风成环境 (Steidtmann, 1974; Fryberger, 1979)。可能, 大面积分布的韦伯-卡斯珀-坦斯利普毯状砂岩层系包含了几种不同的亚沉积层系。看来, 在宾夕法尼亚纪, 包括洛斯特索尔捷油田在内的区域, 其北部为无沉积陆地而向南、向东为沉积碳酸盐的浅海 (Mallory, 1972)。怀俄明及邻州宾夕法尼亚系不同沉积相的区域研究表明, 这一毯状砂层有往南向海进积的趋势。

直到被拉腊米造山运动中断以前, 怀俄明西部和中部稳定地台上的沉积一直是连续的。白

至纪末与第三纪初那些山块隆起时，在西费里斯（West Ferris）山区大约沉积了 3500 米厚的沉积物（Heisey, 1949; Lawson, 1949）。此时沿甜水与罗林斯（Rawlins）隆起的翼部形成了洛斯特索尔捷油田的穹窿构造。小规模断层和大规模的破碎与裂隙带是与穹窿构造相伴随的常见现象，它们对坦斯利普砂岩的石油生产起了重要作用（Devore, 1951）。

72号井岩心样品的点计法分析表明，坦斯利普砂岩为极细至细砂级，平均粒径从 0.07mm (3.8 ϕ) 到 0.22mm (2.2 ϕ)，分选极好到中等，图解标准差从 0.3 ϕ 到 0.7 ϕ (Folk, 1968)。图2表示了全部56个岩心薄片的点计法分析结果。在大多数情况下，较粗砂岩的分选性比较细砂岩差些。这一现象是由双众数交替纹层造成的，这些纹层的粒度不同，每一纹层的分选都很好，但仅有几个颗粒那么厚。在硬石膏胶结的较粗颗粒纹层中，碎屑颗粒一般是滚圆的；但白云石胶结的较细颗粒纹层中，碎屑颗粒一般是棱角状的。

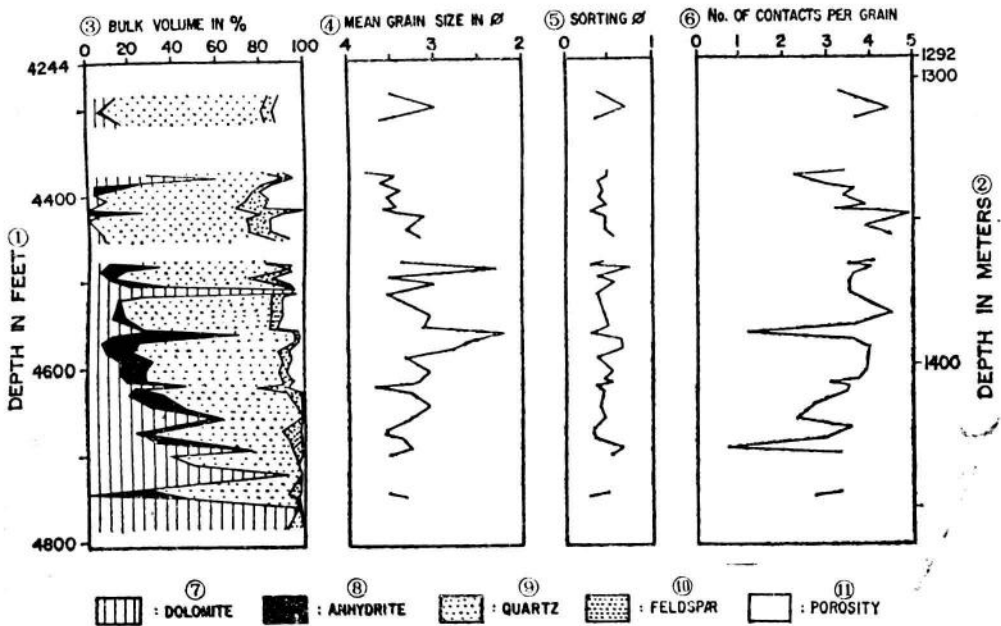


图 2 洛斯特索尔捷油田72号井坦斯利普砂岩的岩石特征。数据来自岩心样品的点计法分析

①深度(英尺); ②深度(米); ③体积%; ④平均粒径 ϕ ; ⑤分选系数 ϕ ; ⑥每一颗粒的接触点数;
⑦白云石; ⑧硬石膏; ⑨石英; ⑩长石; ⑪孔隙

砂岩层的孔隙度从百分之几到21%。点计法分析结果(图2)表明，该层序的孔隙度有自下而上升高的总趋势。

坦斯利普砂岩层的硅质碎屑几乎全部由石英和长石组成。其含量从砂质白云岩的百分之几到多孔砂岩的80% (图2)。大多数砂岩为石英砂岩，仅含百分之几的长石，但某些是次长石砂岩，长石含量多达12%。钾长石和斜长石都有，但未分别计数。除石英和长石以外，显微镜下还可见到极少量岩屑和重矿物。

沉 积 环 境

坦斯利普下部，白云岩层和小型交错层理白云质砂岩和硬石膏质砂岩是最主要的岩石类型(图3)。呈斑块或基底式胶结物的原生硫酸钙的存在指示一种蒸发的干旱环境。窗格状孔

隙和被碳酸盐泥充填的砂层表面干裂指示了碳酸盐沉积物的早期固结 (图4)。这些现象进一步说明, 沉积作用是在蒸发、干旱和超盐度环境下进行的。

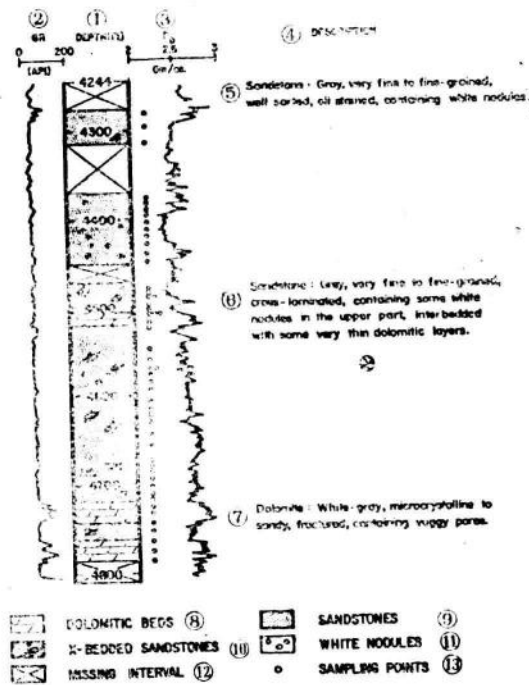


图 3 根据72号井岩心描述建立的洛斯特索尔捷油田坦斯利普岩性柱状剖面

①深度(英尺); ②伽马射线; ③体积密度; ④描述; ⑤砂岩: 灰色, 极细-细粒, 分选好, 有油渍, 含白色结核;
⑥砂岩: 灰色, 极细-细粒, 具交错纹层, 上部含白色结核与很薄的白云岩层互层; ⑦白云岩: 白-灰色, 微晶至砂状, 有裂隙, 含晶洞; ⑧白云岩层; ⑨砂岩; ⑩交错层理砂岩; ⑪白色结核; ⑫无岩心井段; ⑬采样点

这些观察结果, 连同现在洛斯特索尔捷油田所在地区晚宾夕法尼亚世时的地质背景 (Mallory, 1972) 清楚地表明, 下坦斯利普是在潜水面与地表接近的潮上萨布哈环境沉积的。风成砂偶尔从北部侵入, 形成具小型交错层理的砂岩。

与些同时, 早期固结的球粒状或内碎屑状碳酸盐颗粒, 在萨布哈碳酸盐沉积物表面上形成, 并且被风搬运, 形成部分沙丘沉积物。这类碳酸盐颗粒比单个粒间孔隙的尺寸大得多, 而且在白云质砂岩层中十分常见 (图5)。

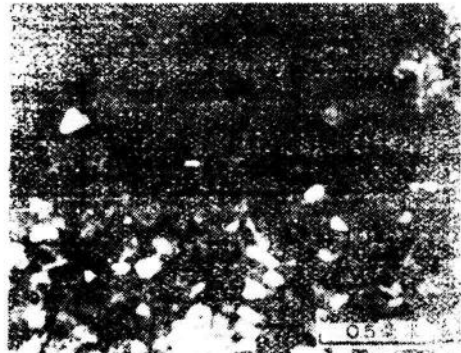


图 4 显微照片示窗格状孔隙和被碳酸盐泥充填的砂层表面干裂 (箭头所示)。正交偏光

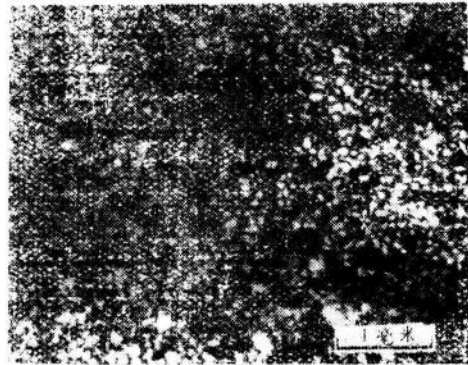


图 5 白云质砂岩中的球粒状或内碎屑状碳酸盐颗粒。显微照相, 72号井, 4711英尺(1434米)

在这层白云质砂岩之上，就是以具高角度、大型板状交错层理砂岩层系和少数白云质及硬石膏质薄层为特征的上坦斯利普（图3）。

露头上这套大型交错层理的方位指示了南-南西的沉积物搬运方向。这与 Collinson 与 Runcorn(1960) 根据古地磁研究和 Heckel(1977) 根据对气候敏感的沉积岩分布所作的古纬度测定完全可以对比，他们的研究说明，在晚古生代怀俄明州处于北东信风带。在这些交错层理砂岩层中不含前面所描述的泥质和球粒状碳酸盐颗粒。

所有这些材料都明显地指示，此时，原来在下坦斯利普时的大面积潮上萨布哈已被向南-南西方向迁徙的沙丘所覆盖。仅仅少数残存的丘间池塘可能继续堆积了某些透镜状蒸发沉积物（图6）。由于附近萨布哈碳酸盐颗粒供应量的减少，交错层理风成砂中几乎不含原生碳酸盐颗粒；并由于地下水而相对降低，而几乎不见硫酸钙。



图 6 覆在碳酸盐透镜体 (C) 之上的交错层砂岩。费里斯山地区白杨溪剖面

在坦斯利普的最上部，侧向连续的白云岩再次出现。推测，由于末期砂的供应耗尽，该区再次转变为潮上萨布哈环境。图7概括了洛斯特索尔捷油田一带坦斯利普砂岩的沉积历史。

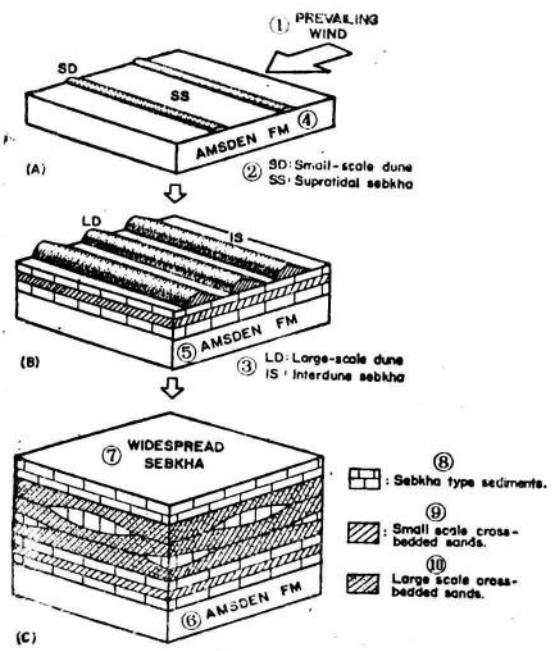


图 7 洛斯特索尔捷油田坦斯利普砂岩沉积历史示意图。A) 沉积早期为带有少数小规模沙丘的潮上萨布哈环境。B) 大规模沙丘迁移覆盖全区。C) 宽广的萨布哈环境再次控制该区
①盛行风；②SD：小规模沙丘，SS：潮上萨布哈；③LD：大规模沙丘，IS：沙丘间萨布哈；④⑤⑥阿姆斯特丹组，⑦宽广的萨布哈；⑧萨布哈型沉积物；⑨小型交错层状砂；⑩大型交错层状砂

成 岩 作 用

成 岩 变 化

根据洛斯特索尔捷油田72号井坦斯利普砂岩井段岩心样品的岩石学分析,识别出九个成岩事件:1)基底式硬石膏胶结作用;2)长石次生加大物的沉淀;3)结核状嵌晶方解石的胶结作用;4)结核状硬石膏的胶结作用;5)组构选择性的硬石膏胶结作用;6)二氧化硅增生生物的沉淀和碳酸盐的硅化;7)长石的转化;8)白云石胶结作用和9)烃类的聚集。

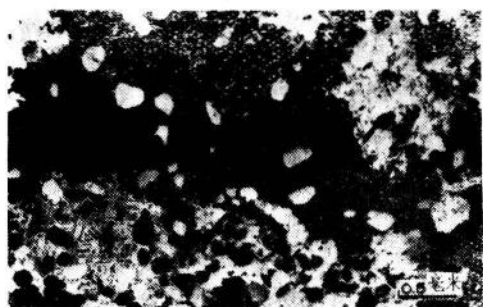


图 8 显微照片示基底式硬石膏胶结物,72号井,4562英尺(1389米)。注意,未受浸蚀的滚圆石英颗粒及其“漂浮状”的结构特征。正交偏光

基底式硬石膏胶结作用——如图8所示,这类硬石膏胶结物的含量通常很高(大于或等于25%),致使碎屑颗粒没有任何自支撑格架而呈“漂浮状”。硬石膏胶结的地方,砂粒一般是滚圆的,未受浸蚀,而且实际上没有观察到其他成岩变化。因此我们确信,这种胶结物是在沉积位置上从萨布哈环境的超盐度溶液中沉淀出来的。松散砂的原生孔隙度推测为40%(Beard and Weyl, 1973),几乎全部被石膏胶结物所充填。埋藏以后,石膏脱水为硬石膏。由于重结晶时体积减少38%,原来40%的胶结物变为大约25%(或更多)。

长石增生生物的沉淀——坦斯利普许多砂岩层里,碎屑长石都是主要组分之一。某些长石颗粒已自生加大形成自形晶体(图9)。在阴极射线显微镜下,碎屑核心与加大部分各自发出不同的兰光,证实了这些增生生物的存在。自生加大部分形成的准确时间不能确定,不过它们形成于埋藏后的相对早期是可以肯定的,因为常被晚期的硬石膏和方解石胶结物所交代。

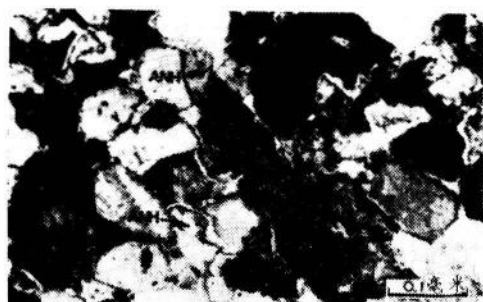
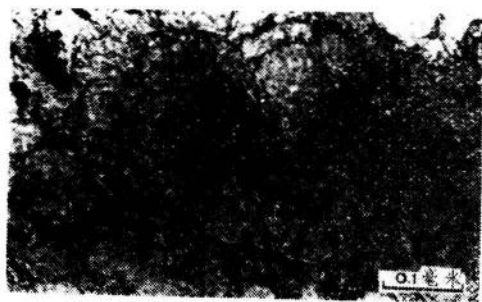


图 9 显微照片示在硬石膏胶结 (ANH) 的砂岩中,长石增生生物 (FO) 形成自形晶;72号井,4421英尺(1346米)上)单偏光,下)正交偏光。

结核状嵌晶方解石胶结作用——虽然坦斯利普砂岩中方解石胶结物在数量上是很不重要的,但在72号井大约4580英尺(1395米)以上的某些多孔状砂岩层中,确见呈嵌晶胶结物出现,局部形成致密的白色结核。嵌晶方解石大约占全部坦斯利普多孔性层段岩石体积的0.05%。岩石学上,这些方解石胶结的结核的特征为: i) 直径约1厘米,散布于岩石中; ii) 无组构件选择性(图10); iii) 由在嵌晶胶结物基底中经轻度浸蚀及压实的碎屑颗粒组成; iv) 保存的孔隙度很低,除某些白云石交代作用外(图11),缺乏晚期成岩变化; v) 出

现在碳酸盐胶结物总含量低的层段中。

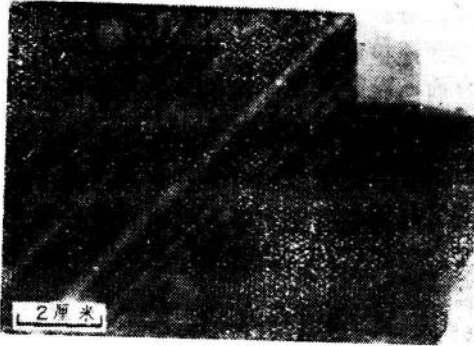


图 10 无结构选择性的方解石胶结结核 (箭头所示), 72号井, 4570英尺(1392米), 微白色纹层是结构选择性硬石膏胶结的较粗颗粒纹层。

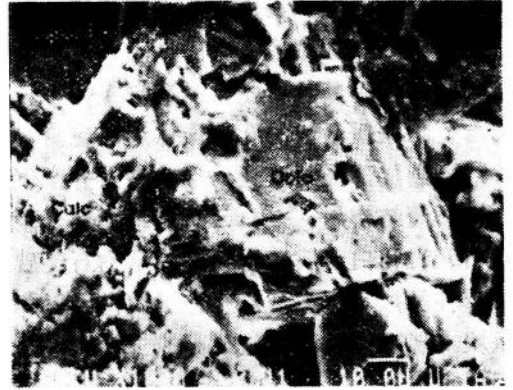


图 11 扫描电镜照片示方解石胶结的结核 (Calc) 局部被白云石菱形晶(Dolo)交代, 72号井, 4404英尺(1341米)。标尺=10微米。

上述特征说明, 这些方解石胶结的结核应是在碳酸钙仅微过饱和的稳定化学环境中很缓慢地形成的。根据初步的热力学计算 (Mon, 1980), 估计应有0.005%的坦斯利普砂岩能被这种在埋藏过程中由于温度升高而从逐渐过饱和的原生水中沉淀的方解石所胶结。因为蒸发环境中的地下水对碳酸钙来说应该是高度超饱和的, 所以推测大多数方解石胶结物是在埋藏时期由于溶解性降低, 从这种原生水系统中形成的。

结核状硬石膏胶结作用——硬石膏胶结的结核块与嵌晶状方解石胶结的结核共生, 除直径一般较小 (3 毫米) 以外, 具有与后者相同的岩石学特征。因为硬石膏的溶解度随着埋藏深度的增加而降低, 显然, 它们大多数也是在方解石胶结的结核形成的同时, 从停滞的原生水中缓慢形成的。

结构选择性的硬石膏胶结作用——洛斯特索尔捷油田72号井岩心中, 具交错层理的坦斯利普砂岩层一般为细纹层状。较粗颗粒的纹层总是被硬石膏紧密胶结 (图10), 而较细颗粒的纹层则没有硬石膏胶结物。在较粗颗粒纹层中, 每个颗粒的颗粒接触点数目为3到4, 这种接触点数目可以作为压实作用的指标 (Taylor, 1950)。3—4个接触点数目说明, 在胶结前曾发生过显著的机械压实。进而, 还要有大量的孔隙流体侧向流过粗颗粒纹层, 才能沉淀出这么多的硬石膏胶结物。

二氧化硅增生生物的沉淀和碳酸盐的硅化——自生石英次生加大 (图12) 和碳酸盐的硅化在洛斯特索尔捷油田的坦斯利普砂岩中并不罕见, 但在碳酸盐颗粒和斑块丰富的下坦斯利普却没有见到。这可解释为, 二氧化硅增生是从压溶颗粒接触面附近的硅过饱和溶液中结晶出来的。这种溶液大概也提供了二氧化硅去交代邻近的碳酸盐。在下坦斯利普, 相邻石英颗粒之间的压溶可能受到了原生碳酸盐的阻隔, 所以没有这类成岩变化

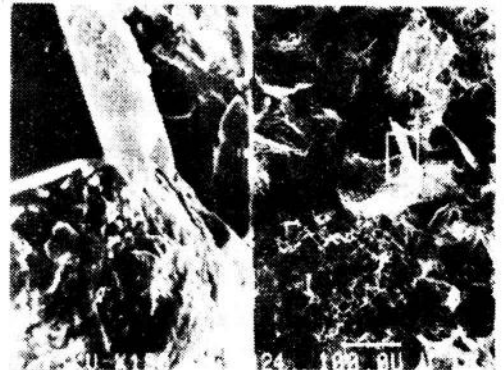


图 12 扫描电镜照片示在部分溶蚀的碎屑石英颗粒上的石英增生生物, 72号井, 4554英尺(1387米), 标尺=100微米。左边照片是右边照片中矩形区域的放大。

发生。

长石的转化——长石增生物形成于坦斯利普砂岩成岩历史的较早期，说明长石在干旱环境中，于沉积期和埋藏后不久的地表和近地表条件下是稳定的。实际上，包裹在硬石膏和方解石胶结物中的大多数长石颗粒及其自生加大产物，均保持不变，因为早期基底式胶结物阻止了它们与化学性质活泼的孔隙流体起反应。另一方面，没有受到早期胶结物保护的长石颗粒和加大产物则局部受到改造，形成粘土并产生后来被烃类充填的某些次生孔隙。

白云石胶结作用——白云石是坦斯利普砂岩最常见的胶结物。这里存在着由纯白云岩经过砂质白云岩和白云质砂岩到无胶结物石英砂岩的过渡关系。我们共鉴别出了两种白云石类型。第一种类型是作为基质存在于纯白云岩和砂质白云岩层中，或者呈球粒状或内碎屑状颗粒及斑块出现在白云石含量很高的白云质砂岩中。虽然有某些现代潮上环境原生白云石的报导，但很难说上述第一类白云石是否属于原生沉淀的。第二类白云石呈自生胶结物充填在粒间孔隙中。这种白云石显然形成于成岩作用晚期，因为上述所有其他刚才提的胶结物均受到这种白云石的交代（图13A、B）。图13A中白云石胶结物的菱形晶外形进一步表明，至少某些白云石胶结物一开始就是呈白云石出现的。



图 13 (A)晚期白云石胶结物 (D) 交代较早形成的硬石膏胶结物

(A) 两者均交代碎屑石英颗粒(Q)。显微照片，72号井，4480英尺(1364米)。B) 晚期白云石胶结物(D) 交代较早形成的石英增生物(QO)。扫描电镜照片，72号井，4749英尺(1446米)，标尺=10微米

白云石胶结物有多少期，可通过白云石的阴极射线发光观察来确定。其原子构造中杂质的种类和含量不同，造成了白云石的不同发光颜色和发光强度，反过来，发光颜色和发光强度又反映了成岩作用不同时期的流体化学特征(Marfuntin, 1979)。

坦斯利普的白云石可以观察到三种不同的阴极发光颜色：i) 橙色，发自砂岩中的某些白云石胶结物和某些原生碳酸盐层的基质；ii) 红色，发自被白云石紧密胶结的砂岩中的白云石胶结物和原生碳酸盐颗粒、斑块及基质；iii) 暗红色，发自白云岩层中的裂隙充填白云石(图14)。白云石菱形晶体(图15)的条带状发光色说明，坦斯利普砂岩中白云石的形成有许多期。但是，已观察到白云石发光颜色具两个总的变化趋势。第一，晚形成的碳酸盐通常比早形成的碳酸盐发光色要深些。因而白云石菱面体由橙色的核心与微红色的环边组成，而白云岩的基质为淡红色、裂隙充填胶结物为暗红色(图14)。第二，不论白云岩层的基质，还是自生白云石胶结物，其发光色都有从坦斯利普上部的橙色变为坦斯利普下部的淡红色的趋势。推测，碳酸盐沉积环境中流体各种微量元素相对含量的差异，是造成这两种变化趋势

的根本原因。在沉积坦斯利普下部的潮上萨布哈环境中，流体中可能含有造成白云石具淡红发光色的微量元素（主要是 Mn^{++} ）。在沉积坦斯利普上部原生碳酸盐层的沙丘间萨布哈环境中，流体可能含有赋与白云石橙色发光色的微量元素（某些Fe、Co、Ni离子）（Marfunin, 1979）。那些被解释为是从压溶的原生碳酸盐附近过饱和孔隙流体中沉淀的白云石胶结物，应该含有与附近原生碳酸盐中十分相近的微量元素成分。因此，白云石胶结物的发光色，应该与胶结物附近的白云石层和球粒状白云石颗粒的发光色相似。然而，却在上坦斯利普具橙色发光的白云石层中见到少数有红色发光的白云石胶结物。推测，流体化学可能不时受到来自下坦斯利普较厚的红色发光白云岩层组分的影响。

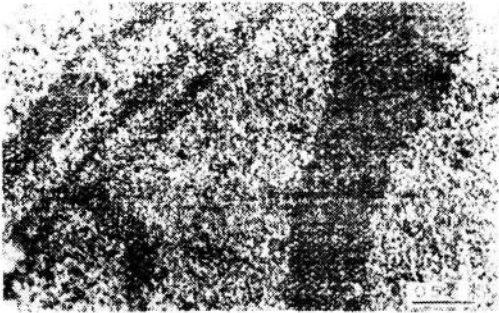


图 14 阴极射线发光照片示二期白云石：1) 基质 (MTX)，2) 裂隙充填 (FF)。72 号井，4726英尺 (1439米)。

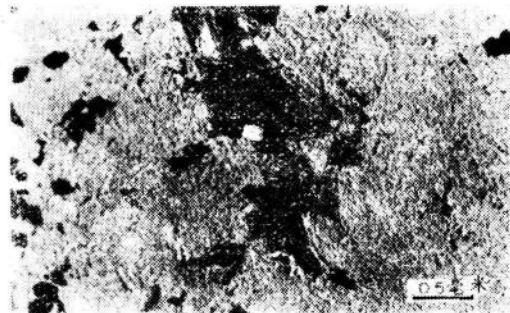


图 15 阴极射线发光照片示白云石晶体的多期生长。72号井，4775英尺 (1454米)。

烃类的聚集——与坦斯利普共生地层中的有机质随着埋藏而成熟，大量烃类生成的深度接近3500米。洛斯特索尔捷油田的穹隆构造形成于白垩纪末期，上述所有成岩变化在这以前都已完成，因为在被胶结的地段没有见到油渍。在烃类流体聚集于全部可以到达的孔隙空间以后，化学成岩变化就被阻止了。此后，储集岩中被石油包围的每一种组分，在这种无极性的、化学上稳定的环境中，实际上均保持不变。

成 岩 历 史

根据不同成岩变化产物之间的岩石学关系以及已发生的每种变化所需要的物理化学环境，洛斯特索尔捷油田坦斯利普砂岩的成岩历史可解释如下（图16）。

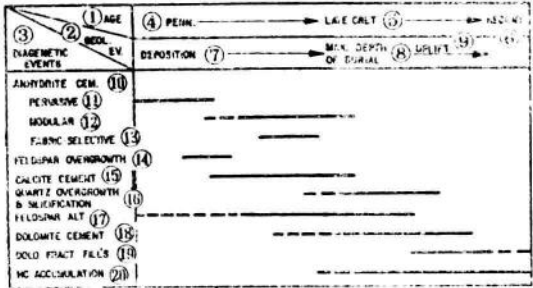


图 16 洛斯特索尔捷油田72号井中所观察到的沉积期后事件的共生史

①时代；②地质环境；③成岩事件；④宾夕法尼亚纪；⑤晚白垩世；⑥现代；⑦沉积；⑧最大埋藏深度；⑨隆起；⑩硬石膏胶结作用；⑪基质式；⑫结核状；⑬组构选择的；⑭长石增生；⑮方解石胶结；⑯石英的增生和硅化；⑰长石的转化；⑱白云石胶结；⑲白云石裂隙充填；⑳烃类聚集

在晚宾夕法尼亚世坦斯利普沉积时期，硫酸钙和原生碳酸盐沉积于地下水面高于或接近地表的萨布哈环境，直到成岩作用最晚期的白云石化发生以前，全部成岩变化均未波及到这些萨布哈沉积物。

埋藏以后，由于溶解度随温度升高而降低，方解石和硬石膏胶结的结核便从风成沉积物内停滞的超饱和原生水中缓慢地形成。大量硫酸钙过饱和溶液也侧向穿过交错层状砂岩中极易渗透的粗颗粒纹层，沉淀出组构选择性的硬石膏胶结物。在此期间，碎屑石英颗粒由于温度升高而部分溶解于原生水中，形成浸蚀平滑的颗粒表面。在拉腊米造山运动影响到本区以前，结核状方解石和硬石膏的沉淀以及石英的溶蚀持续进行，直到接近白垩纪末研究区内坦斯利普到达它埋藏的最大深度时为止。在坦斯利普接近它的最大埋藏深度时发生了压溶，并在压溶颗粒的接触点附近产生过饱和溶液。从这些二氧化硅过饱和水溶液中沉淀出石英，形成自生加大物或交代原生碳酸盐。白云石也同样从碳酸盐过饱和溶液中沉淀出来，在含有原生碳酸盐颗粒或接近原生碳酸盐层的砂岩中，形成晚期白云石胶结物。其他矿物的白云石化也在这个时期发生。与此同时，大分水岭盆地的更深处，邻近地层中的有机质已经成熟，并向上运移到坦斯利普储集层。在接近白垩纪末期或第三纪早期，洛斯特索尔捷穹窿构造形成以后，烃类聚集于可达到的孔隙空间，从此储集层的组分就基本上保持不变了。非储层白云岩层裂隙中的白云石充填是此后发生的唯一成岩事件。

成 岩 相

根据在坦斯利普砂岩中所观察到的共生的特征组分，可区分出四种具有特殊成岩变化形式的成岩相：

早期碳酸盐淀积相

该相标本的特征是白云石含量高（一般大于30%）、早期硬石膏含量变化大、孔隙度低。大多数白云石的形成可能归因于早期碳酸盐沉淀。白云石与风成碎屑砂的共生导致了纯白云岩、砂质白云岩和富白云质砂岩的沉积。属于早期碳酸盐淀积相的那些岩层，由于含有蒸发盐矿物（硬石膏）和伴有粘附波痕（adhesion ripples）与窗格状孔隙（图4），所以被认为是在蒸发的潮上萨布哈环境中沉积的。属于该相的薄层砂岩是在风成砂堆积超过原生碳酸盐淀积的短暂时期内沉积的。粘土（现在为伊利石）在该相中常见。这些薄层砂岩的孔隙度很低，因为早期的细粒碳酸盐和硫酸钙淀积物差不多充填了全部粒间孔隙，而来源于邻近碳酸盐层的白云石胶结物又进一步充填了剩余的孔隙。该相标本中根本见不到什么油渍。晚期白云石胶结作用和白云岩化可算是该相成岩历史中最重要的变化了。其他成岩变化则不甚显著。

在岩心样品中，由于碳酸盐含量高，该相岩层具有一种白的色调。白色的硬石膏斑点通常见于这类岩石中。具近平行至波状纹理的粘附波痕是常见的沉积构造。

早期硬石膏胶结相

该相标本的特征是，硬石膏含量高、白云石含量低、孔隙度低。看来，该成岩相的岩层是沉积于沙丘间萨布哈蒸发环境，也就是从直接沉淀碳酸盐的地方转移到了更近岸位置。风

成砂的充分供应,致使这种环境沉积的相主要由白云质砂岩组成。硬石膏有时呈基底式胶结物(图8)出现在白云质砂岩中。由于原生碳酸盐含量较低,所以平均孔隙度稍高。这种较高的孔隙度使较晚期的反应流体得以通过,而引起成岩变化,例如长石、石英的自生加大以及白云石化作用等,也对烃类的运移和聚集起了一定作用。

原生碳酸盐颗粒相

这个相的识别是根据其交错纹层的性质和原生球粒状或内碎屑状碳酸盐颗粒的存在。小规模交错层和丰富的碳酸盐颗粒与斑块表明,沉积作用是发生在接近潮上萨布哈的风成沙丘环境。硬石膏胶结物集中于粗颗粒纹层中。这种组构选择性的硬石膏胶结作用之前的成岩变化,例如长石自生加大和微晶方解石胶结结核,在该相内随处可见。然而,由于粗粒纹层几乎完全被硬石膏所胶结,所以晚期石膏胶结阶段之后发生的多种变化,例如石英自生加大和油浸等,仅见于细粒层中。白云石化主要发生在靠近球粒状碳酸盐颗粒和斑块的地方。白云石总含量受这些碳酸盐颗粒和斑块丰度的控制。该相的孔隙度虽然仍很低,但一般比那些沉积在萨布哈的相要高。孔隙大多保存在缺乏碳酸盐斑块的较细颗粒纹层中,这些纹层仅局部被硬石膏和更晚的白云石所胶结。

在岩心样品中,该相表现为一种亮暗纹层相间的厚层交错层理砂岩(图10)。暗色是由油渍造成的,浅色则由白色硬石膏斑块引起。

结核状胶结相

该相沉积在风成沙丘环境,相内所观察到的成岩变化强度都很低,因此研究区坦斯利普的最高孔隙度保存在该相内。在风成砂丘环境中,既没有原生碳酸盐沉淀,也缺乏丰富的球粒状颗粒来提供充足的碳酸盐物质以产生较多的白云石胶结物。因为陆内沙丘砂的大部分位于地下水水面之上,所以也缺失早期的硫酸钙。虽然交错层的某些粗颗粒纹理已被硬石膏胶结,但观察到的最突出的成岩变化特征还是白色方解石或硬石膏胶结的结核。

在岩心样品中,该相根据其块状、均一的较细颗粒层,这些层在黑色油饱和砂的基底上含有分散的白色结核来加以识别。

通过上面的讨论,很明显,每个成岩相的特征成岩变化均主要受原始沉积环境控制。沉积环境决定了原生碳酸盐和硫酸钙沉积物的分布,而原生碳酸盐和硫酸钙沉积物使储集性能(孔隙度和渗透率)变差,并把坦斯利普砂岩分隔为许多层,还为附近发生的较晚期成岩变化提供了物质。这些沉积环境还决定了沉积构造(例如交错层系中的微细纹层),而沉积构造则控制着埋藏后孔隙流体的流动形式。此外,沉积环境还决定了块状砂岩层的分布,由于块状砂岩中心部分未受到晚期白云石胶结作用,才使烃类得以运移并聚集

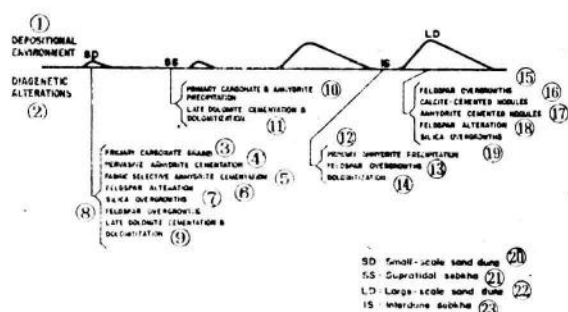


图 17 怀俄明州洛斯特索爾捷油田各沉积相中所见到的成岩变化

①沉积环境; ②成岩变化; ③原生碳酸盐颗粒; ④基底式硬石膏胶结; ⑤组构选择性硬石膏胶结; ⑥⑧长石变化; ⑦⑩二氧化硅增生加大; ⑧⑨长石次生加大; ⑪⑫晚期白云石胶结和白云岩化; ⑬原生碳酸盐和硬石膏淀积; ⑭原生硬石膏淀积; ⑮白云岩化; ⑯方解石胶结的结核; ⑰硬石膏胶结的结核; ⑱小规模沙丘; ⑲潮上萨布哈; ⑳大规模沙丘; ㉑沙丘间萨布哈

于这些层中。图17说明了坦斯利普砂岩每个成岩相的沉积环境与成岩变化之间的相互关系。

成岩作用对储集性能的影响

机械压实、压溶、胶结、溶蚀和重结晶都对决定洛斯特索尔捷油田坦斯利普砂岩的最后储层性能有影响。不过，溶蚀和矿物的重结晶在该油田似乎作用不大，只有少数次生孔隙是由长石和早期胶结物的溶蚀造成的。方解石重结晶成白云石和石膏重结晶为硬石膏可能导致许多针尖状微孔隙的形成；然而，在岩层静压力下硫酸钙的塑性流动，加上较晚期的白云石胶结作用，可能已堵塞了研究区坦斯利普储层中的这类孔隙。只有机械压实、压溶和胶结成为影响储层孔隙度和渗透性的主要成岩作用。

机械压实是成岩早期阶段，也就是大约在埋藏的最初1000到1500米时期发生的主要物理作用（Füchtbauer, 1967）。通过颗粒的机械重排，分选好的滚圆沙丘砂的原生孔隙度（大约40%，呈斜方最紧密堆积，Rittenhouse, 1971；Beard和Weyl, 1973）将会降低到约26%（呈菱形六面体最紧密堆积，Füchtbauer, 1967；Rittenhouse, 1971）。目前，洛斯特索尔捷油田坦斯利普砂岩的最高孔隙度约为21%，出现在无胶结物的砂岩层中。这种较低的孔隙度说明，除颗粒的机械重排以外，还必然有别的重要压实作用过程。发生在机械压实之后的压溶，一定是这种使孔隙度进一步降低的作用机制。虽然岩石学分析表明，坦斯利普砂岩颗粒与颗粒间大多保持其相切的性质，而且二氧化硅胶结物的体积又小于1%，但是，

只要受压溶的颗粒接触处能得到0.7%的二氧化硅胶结物，就可以造成这5%的孔隙度下降（Rittenhouse, 1971等）。在机械和化学压实（压溶）阶段，渗透率必然也从分选好的极细砂的几达西（Beard和Weyl, 1973）下降到无胶结物孔隙性砂岩层的几百毫达西。

通过孔隙内过饱和溶液中化学沉淀的胶结作用而造成的孔隙度下降，可能在沉积之后立即就开始了。通常，一旦砂体的某些部位胶结了，那里的压实就可能被阻止，仅在未胶结的部位才可能有压实作用发生。

从岩心样品的点计法分析结果可以看出，在孔隙度与白云石、硬石膏总体积之间有良好的相关关系（图18）。这一线性相关是通过方程“总白云石和硬石膏% = 40% - 1.94 × 孔隙度%”来表达的，它描述了坦斯利普砂岩的正常压实历史。对无孔隙的一端来说，压实作用被沉积以来沉淀在原生孔隙中的40%的胶结物所阻止。对于无胶结物的另一端来说，压实作用以固定的速率持续进

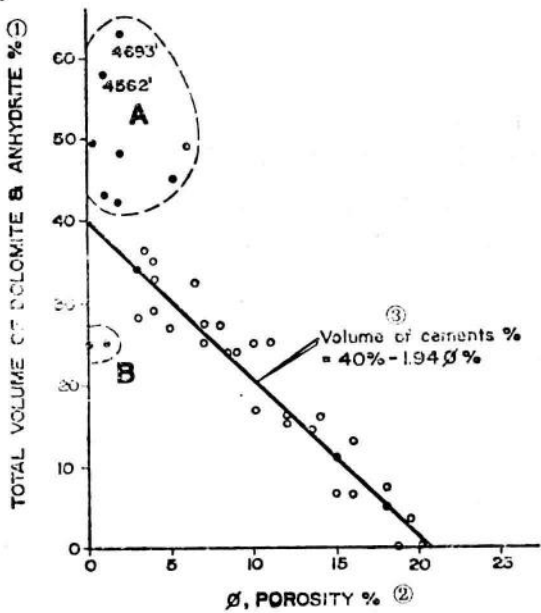


图 18 洛斯特索尔捷油田72号井样品中孔隙度与胶结物体积之间的线性相关关系
“A”组代表含有大量早期碳酸盐或硬石膏淀积的样品。“B”组代表完全被硬石膏胶结的样品。
①白云石和硬石膏总体积%；②孔隙度% (φ)；③胶结物总体积% = 40% - 1.94 φ %