

油田地质开发情报

大庆油田科学研究设计院

1980.5

3658

油田地质开发情报

一九八〇年第一期



57/45/22



大庆油田科学研究设计院

目 录

一、沉积盆地内流体的运移·····	(1)
二、石油的运移与聚集·····	(22)
三、初次运移的物理化学特性·····	(43)
四、受构造约束的水及其在初次运移中的意义·····	(61)
五、烃类二次运移与圈闭的机理·····	(66)
六、油气的运移—化学与物理抑制作用·····	(100)
七、评价生油层的简单方法·····	(122)

沉积盆地内流体的运移

S. Neglia

摘 要

在沉积盆地中控制水和烃类运移的基本机理终究是要与盆地的构造史、岩石特性、压实作用、温度因素相关的，后四个因素本身又相互影响。

沉积岩的压实作用促使水在沉积物理藏过程中逐渐排出。岩石的物理—化学特性导致排出水向地表运移，并在诸如水力位能、矿化度、热流、温度和胶结作用等参数不同的盆地中分布。

在本文中，初次运移指烃类生成后迅速发生的运移，二次运移指烃类后来的运移。

原油在页岩中运移困难。油从生油岩运移的可能路径除在水中呈胶质状态或真正溶解于水以及在三维油润湿的干酪根网络中流动外，还可通过其在盆地较深部生成的高压气中的溶解作用下，经诸如断层和裂缝等优先路径而上升运移。因为其液相的汽压高于气相的汽压，因而出现了油的分子蒸馏现象。

在岩柱的上部产生逆向凝析，在轻微压实的塑性盖层以下气和凝析油开始形成聚集。由于气层的驱替压力高，气可通过盖层，并扩散到地表，而凝析油仍留在原地。轻微压实的页岩质盖层的孔隙大小分布导致上升气体发生化学和同位素分馏。这样在地层柱的上部小层中发现的几乎是纯净的和同位素的轻甲烷。高挥发性的原油由于循环水，特别是硫酸盐离子、硫化氢和细菌的存在容易降解，并逐渐变为重质油。

勘探工作者勘探新油气田时所能运用的地球化学工具包括：同位素分析、水力位能、矿化度、温度、胶结作用、成熟度和油气显示图。

地 球 化 学 概 念

页岩压实作用

随着埋藏深度增加，沉积物逐渐压实，也就是沉积物中的隙间水被排出。这些水顺着纵向和横向上阻力最小的路线流向地表〔史密斯 (Smith) 1971；马格拉 (Magara)，1967〕。在我们室内以及由盖达 (Gaida, 1963) 和恩格尔哈德 (Engelhard, 1963) 作

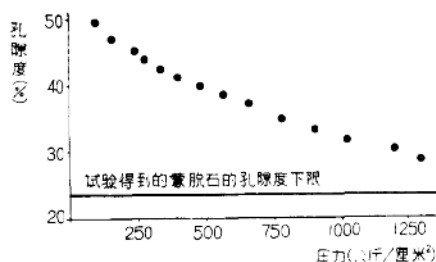


图1 钠-蒙脱石饼的孔隙度与实压力关系图

试验是在AGI试验室进行的，当蒙脱石两邻近单元间只留有一个厚 $3\text{ \AA}$ 的水层时，可以得到孔隙度的下限。当干蒙脱石单元的厚度等于 $9.6\text{ \AA}$ 时，从方程 $3:126=X:100$ 中很容易计算出最终孔隙度，即是23.8%。

流出的几乎都是淡水（含盐量接近0）。从散布在1.0克分子NaCl溶液内的钠-蒙脱石悬浮物中排出的水的含盐度下降情况示于图3。

德·西特(De Sitter, 1947)提出并经麦凯尔维(Mckelvey)和米尔恩(Milne, 1962)室内试验证实，天然页岩起半渗透薄膜作用。也就是它们对水起渗透作用，而将溶在水中的盐或确切地说是离子，部分或全部地分馏出来〔哈拉卡和贝里(Kharaka, Berry) 1973〕。薄膜特性的形成主要是晶格结构中较低价阳离子，例如 Mg^{++} 或 Al^{++} 分

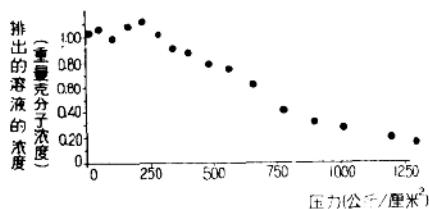


图3 压实过程中从散布在1.0克分子NaCl溶液内钠-蒙脱石悬浮物中排出的水矿化度

过报导的关于蒙脱石悬浮物的室内压实试验中观察到了钠蒙脱石悬浮物的孔隙度随压力增加而降低的现象(图1)。图2示出随埋藏深度沉积物密度增加和孔隙度降低〔迪基(Dickey), 1975〕。

从页岩排出的水矿化度随地质时间即压实作用增大而降低，第一次出现的水是从大孔隙排出的，并且由于溶解了盐的缘故可能是咸的。以后的水是从矿物表面解吸的水，由于被极化过，这种水可能基本不含盐。到压实过程完结之时，

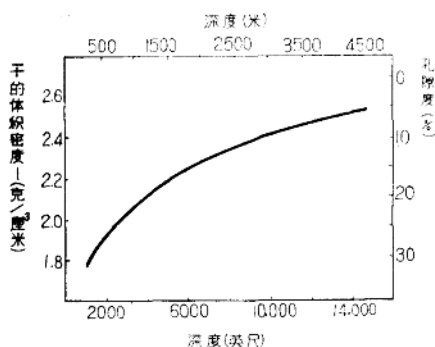


图2 沉积物密度和孔隙度与埋藏深度关系曲线。综合曲线基于发表的不同资料

别置换高价阳离子，例如 Al^{+++} 或 Si^{++++} 的缘故。这样，粘土矿物外面带负电，并在片晶间的空间产生一个电场。负电荷通过交换阳离子而平衡〔格里姆(Grim), 1968〕，阳离子可能存在，这取决于地静压力和/或层间水的矿化度，它们可以靠近表面作为一个固定的双层也可以作为一扩散的双层处在片晶间的空间内〔科鲁特(Kruij), 1952〕。在页岩孔隙体积中存在负电场将强烈地排斥进

来的阴离子, 这样将妨碍溶解盐的进入。

某一既定薄膜的斥盐作用通常是作为理想度测定的, 其变化在1.0~0 之间。一个理想的薄膜将排斥所有的盐, 而零度的理想薄膜将使任何溶于水的溶质通过, 在后一种情况下, 页岩起一个筛子作用, 在那里没有带电的表面存在。

压实的页岩所起的是理想的薄膜作用。理论上, 如果强迫一电解质通过页岩, 那么在薄膜两面的溶液间立刻形成高矿化度梯度。结果, 需要很高的水压克服渗压。天然页岩显然不能支撑住这一额外高压(达到每平方厘米几百公斤), 因此, 它们将破裂成为很多小块, 以在上、下溶液间建立矿化度平衡。笔者相信, 在压实页岩中的微裂缝宽度可能是非常小的~小至3~10毫微米(30~100 Å)。

部分压实的页岩起非理想薄膜的作用。由于具有塑性, 这些页岩不受断裂影响。因此对上升的深层水的渗滤能力将取决于它们的孔隙大小。大孔隙将有助于横越页岩部分(注1), 而小孔隙将减缓垂向流动。在两种情况下, 流出水的矿化度将小于流入水的矿化度, 因此, 在地质时期内位于部分压实页岩下部的含水层的盐浓度将逐渐增加。这样, 在岩层上部盐水的存在表明大量的水已优先运移到沉积盆地的特定地区。然而, 在深处低矿化度水的存在证明压实页岩正释放最后吸附在粘土表面的水(注2)。

页岩和粘土样品岩石物理性质

表 1

页岩样品		国家	时代	t [*]	φ (%)	k (达西)	ΔQ/Δt ^{**} (米 ³ /年)
Cortemaggiore 3	1367米	意大利	下上新世	0.69	23.0	5.0·10 ⁻⁵	16000
Orzinuovi 3	1957米	"	中新世	0.81	16.6	2.7·10 ⁻⁶	860
Alba 1	3054米	"	下上新世	0.92	13.3	2.3·10 ⁻⁷	74
Alba 1	3532米	"	"	0.94	12.0	1.5·10 ⁻⁷	48
Comacchio Mare 1	3919米	"	"	0.94	11.8	4.6·10 ⁻⁷	150
Anita 1	4295米	"	"	0.95	10.3	4.0·10 ⁻⁶	1300
Anita 1	4925米	"	"	0.96	5.9	1.0·10 ⁻⁶	3
Malossa 3	6168米	"	上三迭纪	1.00	12.5	1.7·10 ⁻⁷	54

在下列情况下 压实的蒙脱石泥饼

100大气压	52.1	$6.6 \cdot 10^{-11}$	0.021
200大气压	47.8	$5.5 \cdot 10^{-11}$	0.018
400大气压	43.3	$2.7 \cdot 10^{-11}$	0.0086
800大气压	36.0	$1.0 \cdot 10^{-11}$	0.0032
1200大气压	30.8	$5.5 \cdot 10^{-12}$	0.0018

(孔隙度和渗透率分别由 ϕ 和k代表)

* 薄膜的理想度被测定为 t^* (阳离子转换数), 对钠-蒙脱石薄膜, $t^* = 1.0$, 与理想薄膜相符, $t^* = 0.4$, 与零理想度薄膜相符。

** 根据方程 $\Delta Q/\Delta t = K/\eta \cdot A \cdot \Delta P/\Delta X$ 计算出流量 $\Delta Q/\Delta t$, 式中K = 渗透率, η = 粘度(假设为1厘泊) A = 面积(假设为1公里²), $\Delta P/\Delta X$ = 压力梯度(假设为1大气压/10米)

正如期望的那样,页岩的渗透率总的看随着埋藏深度增加而降低,有些在国际石油地质学家协会 (AGIP) 实验室测得的,试验值示于表 1。

压实的页岩都是微裂缝化了,并在压实的最后阶段让从沉积岩中排出的矿化度没有变化的水通过。

除矿化度随深度增加而降低外,由于低矿化度水和二氧化碳作用于硅酸盐矿物而出现水解过程 (注 3),使深部水 pH 值逐渐增加。任何长石的分解都将释放钾离子 (恩格尔哈德, 1967), 并进一步有助于首先进入混合层矿物中,然后进入伊利石矿物中的膨胀粘土矿物的成岩变质作用 [朗和尼格拉 (Long, Neglia), 1968]。

在深部,地层温度增加,因而,随之氧化硅溶解作用也增加促进深度热沉积物向地面运移。由于水上升通过较凉地层,胶结物沉淀下来。

水的水解强度在低矿化度时是逐渐增加的。当 pH 值高于 8.5 时,溶液中的 CO_3^{--} 离子含量增加,并且原先为硅胶结的砂质和页岩质岩层中碳酸盐胶结物开始沉淀下来 (注 4)。

烃类的生成和成熟度

关于烃类生成和运移的研究状况已由哈兹尔顿克斯 (Haseldonckx, 1978) 进行了全面的评论并可概述如下:

1. 原油是从分散在沉积岩中的有机质转化得来的;

2. 干酪根可被近似地分为两大组主要物质: a) 包括由海相浮游生物或藻类转化来的富含氢的非晶物质组成的腐殖泥; b) 主要从陆源植物转化来的含氧很多但含氢很少的木质物质;

3. 从干酪根中生成的烃受下列因素控制: 干酪根的化学和物理成分、热史、围岩的催化特性和时间 (图 4), 据多布里安斯基 (Dobriansky, 1963) 的材料, 原油的化学成分随温度的增高变化如下: 富含极性化合物的重质油、富含树脂的重质油、环烷基油、环烷石蜡基油。在温度超过 150°C 时, 液相损失, 油首先转化成湿气, 然后变成纯甲烷, 这些转化概述于图 5 中;

4. 杂原子出现在干酪根结构的芳香族环中, 在温度大大超过 150°C 时被分解构成 H_2S 和 N_2 ;

5. 干酪根的成熟度通过镜煤反射率 (R_o)、热演变指标 (TAI) 和孢子染色指标 (SCI) 方法确定;

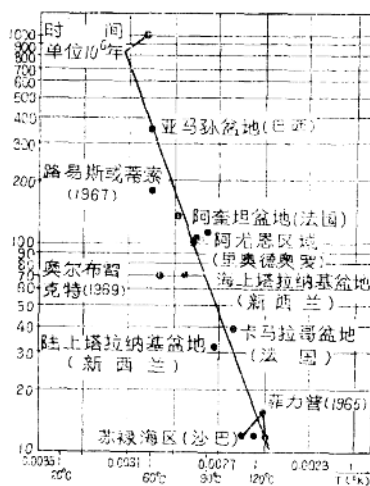


图 4 给定的地层年代 (t) 和温度 (T) 在得到大量石油成因上的关系

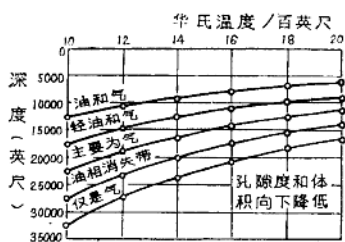


图5 地温和油、气产状

可以。地球化学理论如果不能适当地与其它勘探理论相结合，就会使工作误入歧途。一些实例将阐明这个观点。

1. 地球化学家一般以存在于生油岩中的有机质的质和量为基础评价沉积盆地（差： $<0.5\%$ ；一般： $0.5\sim1.0\%$ ；好： $1.0\sim2.0\%$ ；很好： $2.0\sim4.0\%$ ；极好： $>0.4\%$ ）。很容易提出这样的问题：具有 0.2% 的平均有机碳含量的成熟页岩层能产工业油流吗？或者换句话说，10立方米的这种页岩等于有机碳含量为 2% 的1.0立方米的相似页岩吗？如果回答是肯定的，地球化学家评价盆地含油潜力时，应当不仅考虑好的和很好生油岩中的有机质，还要考虑差或一般的生油岩中的有机质。

2. 探井一般钻在已确定的构造上，即钻在背斜上。如果构造在页岩沉积时是一古高点的话，那么，在该构造顶部有机质的沉积和保存的机会就少了，也就是得到有利的页岩生油岩的机会少。如果取样的页岩不是好的生油岩，地球化学家们会同意对盆地作进一步地勘探吗？确实好的页岩可能存在于构造的两翼，也就是存在于一般没有钻勘的地区。

3. 如果广泛的地球化学研究证实在盆地中有非常好的生油岩（例如，巴黎盆地），人们可期望这样的盆地石油资源非常丰富。然而，根据蒂索介绍（口头交谈），在巴黎盆地附近的储集岩中仅发现极少量的石油，比例为 $1:10000$ （1在储层中，10000在生油岩中）。显然，除生油岩以外，其它条件对形成可供开采的油气聚集也是必要的。

4. 通常的看法是在岩层中未成熟阶段发现的同位素轻质甲烷一定为细菌成因。如果这种类型气的起源是由于细菌成因的话，常常很难解释为什么气聚集位于一些特定的区域，即一般位于延伸到盆地深部位的大断层之上部，而不是广泛存在于聚集层能够捕集细菌气的盆地中。

上述例子表明，如果地球化学研究仅以生成和成熟研究为基础的话，就需要特别慎重。这个简单方法将不能解决很多勘探问题，只作为是研究烃类聚集的始点。在这之后，对地球化学家来说，了解烃类运移的机理是必不可少的，首先是从生油岩运移到附近的渗透储层，而后是运移到构造或地层圈闭中。

6. 烃类的成熟度和生成的间接时间可通过测定甲烷同位素和它的同系物来评价。存在于干酪根结构中的 ^{12}C 对 ^{13}C 的键和 ^{13}C 对 ^{13}C 的键比 ^{12}C 对 ^{12}C 的键强。所以，它们的断裂温度比 ^{12}C 对 ^{12}C 的键高或断裂时间比后者长。结果，富含重同位素的烃可以看作是成熟干酪根生成的最终产物。

基于在烃类生成和成熟方面的科学进展，地球化学在油气勘探方面作出了很大贡献，但这只有当谨慎应用数据和概念时才可以。

初次运移

通常把烃类从生油岩向附近的渗透岩层的运移定义为初次运移〔伊林(Illing, 1933)西尔弗曼(Silverman, 1965)霍布森和蒂雷特树(Hobsou, Tiratsoo), 1975〕。对组成生油岩的非常细粒矿物之间孔隙中石油和天然气运移的机理的了解还很有限。虽然易溶于水的气态烃在连续的水介质中可以扩散, 但在沉积岩的正常温度下液态烃溶解度小得多。而且, 由于单个分子的高表面张力值, 这些烃类有形成一些微米大小的液滴的趋势, 这些液滴比页岩中的孔隙大得多〔威尔特(Welte), 1972〕。所以对原油来说, 运移通过细粒沉积岩非常困难(迪基, 1975)(注5)。

油气初次运移问题已辩论好长时间了〔科德尔(Cordell, 1974), 菲利普(Philippi) 1974〕。根据定义, 初次运移概念意味着油从生油岩形成后不久就运移进储油岩, 下述的有利条件可以解释油的运移: a) 富含极性化合物的油的生成由于起表面活性剂作用, 极性组分能够形成胶质溶液〔贝克(Baker, 1959), 科德尔, 1973〕, 并且油可与排出水一起从生油岩中流出; b) 在富含干酪根(其重量含量大于2~3%)的生油岩中, 楔于粘土薄层间的有机质使孔隙保持开启, 因此允许油滴通过; c) 油在三维油湿干酪根网络中流过〔麦考利夫(McAuliffe) 1978〕。为了形成连续的干酪根网络, 生油岩也必须是富含有机质的, 且含量大于1%。

这些有利条件在自然界中不能经常产生。因此, 假定在生油岩中生成的多数原油, 正如用溶剂萃取试验或热解试验确定的那样(贝克, 1974), 仍然停留在原地直至新的地质条件使原油流出生油岩或直到油被热裂化成为气。

普赖斯(Price, 1976)指出, 油从生油岩中排出是温度即埋藏深度的函数。在高于150℃时, 在水中的油的溶解度大大增加, 所以油可以真溶液的形式同挤出水一起溢出。普赖斯的假说不能无保留地接受。首先, 需考虑的是, 原油溶解需要很高的温度, 而这一高温并不总是存在于沉积岩中; 第二个要考虑的是溶解原油所需的水量。在高温下, 沉积物已被压实, 能从生油岩中排出的水是

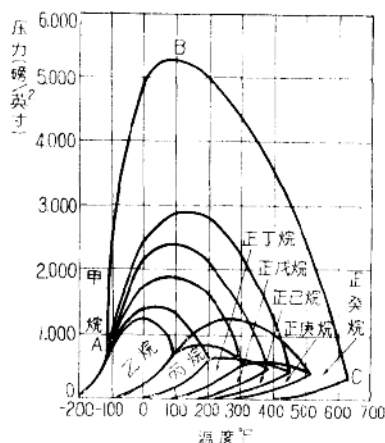


图6 二元正烷烃系统临界轨迹
(布朗等人1948, 见
McCain, 1973, 67页)

曲线与不同的二元混合物的连续线的临界点一起绘出的(临界点是液相和气相的所有特性相等的点。图中没有示出混合物的成份。详见, McCain, 1973, 64~67页, 或相似的教科书)。解释实例: 甲烷—正癸烷混合物。正癸烷临界点C相应的温度为625°F, 压力为350磅/英寸²。如果正癸烷与量不断增加的甲烷混合: 临界点沿着曲线C~B移动, 也就是甲烷在混合物中增加的百分数, 可使液态正癸烷在逐渐较低温度下挥发。如果气的压力也增加的话, 己烷、丙烷等量地增加, 使液态烃类在汽相中容易溶解。

极少的。

解释油从生油岩流出的另一个机理认为是原油在气相中的溶解。众所周知，压缩气

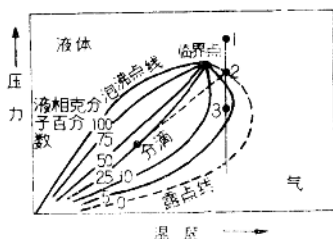


图7 反向凝析气的相图

(根据Mcmain, 1973)

垂直线表明油藏压力在正常油藏温度下降低。当压力与露点线(点2)交切时,凝析气开始分离。通过进一步降低压力,分离的液相的量首先增加达到最大,然后减少。当第二次与露点线交切后,所有液态烃重新变成气相。虚线表明当产出流体时,从注藏条件到分离器条件的变化。温度下降,分离器中气必然膨胀,可回收的凝析油的量增加。

在压力和温度升高时可溶解多得多的液态分馏物(注6),如象二元的正-烷属烃系统的相态图那样(图6)。相反,当气相失去压力和温度时,以前溶解在气相中的液态烃便逐渐析出(图7)。这个现象被称为“逆凝析作用”。在页岩压实一节描述的微裂缝为岩层较深部的高成熟层段中生成的气在生油岩中渗流提供了适宜的通道。这样,存在于附近孔隙中的油能够渗出,并溶解在气中。油的分子蒸馏现象起因于其在液相的蒸气压力高于气相的蒸气压力(注7)。从微裂缝化了的生油岩中逸出的气可通过断层运移到上部层。在温度低于149℃的沉积岩中发现凝析油田确实证明能够生成气或将油转化成气态烃的热成熟作用层必然在较深处,而且运移是以气相形式发生的。

盖 层

当油和气从生油岩运移到邻近渗透层时,初次运移结束。潜在储集层内烃类的进一步运移可导致油和/或气的聚集,若具备有利条件的话,例如构造或地层圈闭和封闭盖层存在的话。

地质学家中通常的看法是盖层对油、气以及水应是不渗透的。这个看法,特别对水来说不完全正确。在沉积盆地中真正不透水岩层是永冻层和蒸发岩层。

发育在更新世冰河气候的永冻层的厚度在苏联北极区的一些地方可达1500米〔萨特(Sater),1969〕。西西伯利亚地台北部地区发现的大气田内,在阻止聚集在浅层的气向地表扩散中,永冻层是理想的封闭层。世界最大的气田乌林柯依气田可采气量为210万亿(英尺)³〔霍尔波蒂(Halbouty,1970)〕,有些产层深为1035~1200米。由于永冻盖层不透水,天然气在产层内聚集过程中被气驱替的水大量地从没有永冻层的南部地区或是从由于深部温水流使地层温度保持在0℃以上的局部隆起区释放出。

蒸发岩对捕集气也是非常好的封闭层。格罗宁根大气田(荷兰和西德交界处)和胡果顿-潘汉得气田(堪萨斯、俄克拉何马和得克萨斯州交界处)就分别以盐层和硬石膏为盖层(霍尔波蒂,1970)。然而,虽然盐层大面积连续沉积,但不能作为下伏生油岩中生成的烃类的永久封闭层。盐层的物理特性(低比重、在高温高压下的可塑性)同盐层的厚度在盆地中是变化的,因而促使盐丘(halokinesis)构造的形成。地静压力的不同可

引起盐丘的形成。盐段的较厚部分通过消耗其周围的盐而继续生长〔特拉什姆 (Trushim), 1960〕, 直到盐层出现不连续现象为止。在这些条件下, 无论在盐丘的两翼, 还是在位于构造顶部的盐层之上都会产生断层和裂缝, 这有利于流体向地表扩散。如果年青的页岩盖层能阻止烃类向上运动, 就可形成新的油气藏。流体通过不连续的盐层的实例有刚果的朗果 (Loango) 和碧玉 (Emeraude) 浅海油田。

富含蒙脱石的部分压实的页岩厚层起非常低渗透层的作用, 并形成了超压带 (高于水压的带)。当压力达到地静压力时, 粘土丘开始形成, 同样, 页岩段的较厚部分通过消耗周围的页岩连续生长。横向上, 那个变薄了的页岩层可很容易失去隙间水, 被压实, 易受断裂影响, 并释放出受压水。粘土丘演变的力学原理与盐丘相似。烃类圈闭在厚页岩盖层下的超压气田的例子有法国的拉克 (Lacq) 气田 (霍尔波蒂, 1970) 和波谷 (Po Valley) 的马勒萨 (Malossa) 气田。在这两气田中, 气呈单相状态。

正常压实的页岩层, 特别是与粗粒沉积岩层交互时, 对水的渗透性特别好 (表 1)。根据仍在进行中的 AGIP 实验, 页岩的渗透性首先随压实作用增强而降低, 然后, 当沉积物变得足够硬时, 因为微裂缝的发育, 渗透率开始增大 (图 8)。构造应力也是造成由高度压实的沉积岩组成的深部构造两翼上断层发育的主要原因。

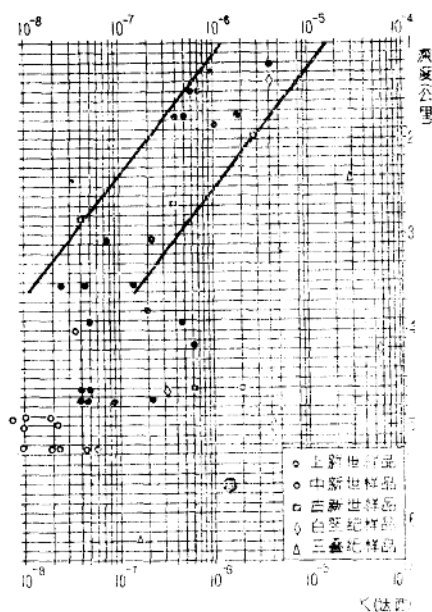


图 8 页岩渗透率值与深度的半对数关系图

表明年青、较浅岩石渗透率的线性降低。渗透率在深度大于3500米不规则增加, 特别是在页岩层老于上新世情况下。结果是在AGIP试验室得出的。

在低理想薄膜中, 矿化度的增高是通过消耗大量的流经渗透性更好的薄膜的水得到

页岩层, 甚至是中等压实的页岩层, 一般对油和气是不渗透的 (注 8)。为了使油滴或气泡通过页岩孔隙需要达到很强的饱和压力 (“饱和压力” 同时也叫 “驱替压力”)。让气通过多孔介质所需的饱和压力和最大孔隙半径之间的关系见图 9。例如, 孔隙直径小于 1 微米的页岩可经得住 22 磅/英寸² (高达 1.5 公斤/厘米²) 的毛管压力。一般地说, 盖层 “控制” 油的能力比气好, 因为对既定的含烃层段来说油的浮力作用 (由于油和水的比重不同) 比气的浮力低。

靠近生油岩的储集层内烃类的初次聚集情况, 是背斜构造见图 10, 是地层圈闭见图 11。在此两种情况下, 盖层下面流体的成分随地质时间漫长过程连续变化如下:

1. 由于页岩盖层的某种薄膜作用, 含水层的矿化度逐渐地增加。

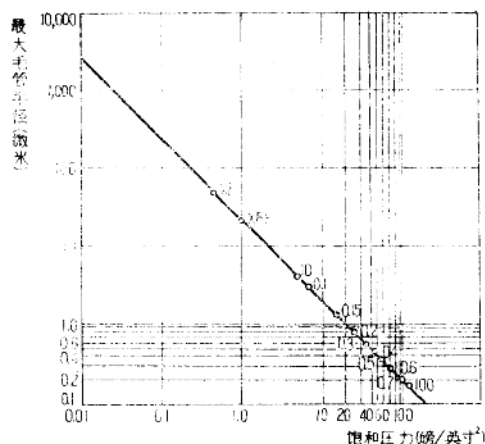


图9 饱和压力图, 符号XF、XFF、10、01
等代表微孔隙瓷器的不同等级

的。薄膜两面的矿化度的差别始终保持很小, 以避免形成明显的渗透压力梯度, 否则后者将大大降低或阻止透过该薄膜的水的流动(注9)。

2. 在一定深度内, 页岩层内的孔隙压力与含水层中的孔隙压力之差是造成水从页岩盖层中排出的原因。页岩中的孔隙压力较高, 是由于它的渗透率低, 水支撑了部分地静压力。

3. 当气相的毛管压力达到饱和压力时, 气将通过盖层, 并纵向扩散。一些气随水进入溶液中, 并同它一起消失。剩余气在不易溶解的化合物中变得更富集。如果盖层有很大孔隙, 所有的气都将损失掉, 圈闭仅充满了油。如果孔隙足够大, 油也会跑掉。

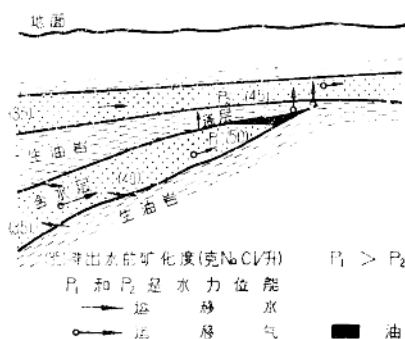


图10 流体在背斜中的初次运移

烃类生成于页岩生油岩的较深部位。烃柱(油+气)的高度受轻微压实盖层的孔隙大小的控制

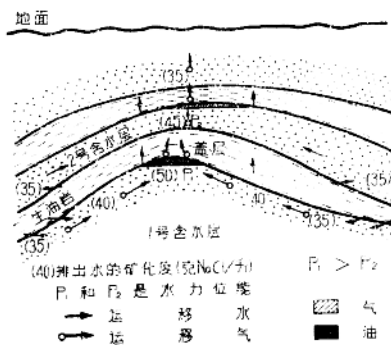


图11 流体在地层圈闭中的初次运移

烃类生成于页岩生油岩的较深部位。烃柱(油+气)的高度受轻微压实盖层的孔隙大小的控制。

4. 盖层中和上覆沉积层中的流体含量也要发生变化。

页岩盖层的水饱和度随上升气开始充填大孔隙而逐渐下降。运移来的气的存在可由泥浆录井, 或比较相同岩性地层的构造的翼部(低值)和顶部(高值)电阻率测量值来证实。

5. 在渗透性透镜体内开始捕集天然气这一点可作为地震测线上的亮点而加以检测。

二 次 运 移

根据伊林(1933)首次提出, 并被石油界普遍接受的二次运移这一概念, 被定义为靠近生油岩的渗透性岩层内的流体的运动, 这一运动实际上导致了这些岩层内油、气分离。“二次”这个名词与地下不连续渗透有关: 初次运移出现在页岩层, 二次运移出现在砂岩或其它渗透岩层。在可辨认的聚集形成后, 为了区分开烃类的连续运动, 伊林运用了“三次运移”这一术语。然而, 这种分类是基于空间和时间因素, 并可能引起某种混乱, 例如, 当生油岩中的油以气态而不是液态运动时就是如此。我们应该如何确定聚集在生油岩中的油被来自深部气源并经压实页岩的微裂缝渗滤的天然气驱替的过程呢?

(这个机理在初次运移一节提到过)我们称这个过程为初次还是三次运移呢?

为简化这个问题, 笔者提出这一术语仅依时间因素而定。术语“初次”系指油形成后不久即开始的运移, 而“二次”系指油的后来的运移。

流体从深层优先运移路线以位于构造两翼的正断层为代表。这些正断层是因盆地发育、盐丘活动或延伸构造作用而形成的。然而, 断层在刚性的沉积岩中保持开启, 而在塑性岩石中趋向于闭合(注10)。在中等压实的沉积岩中, 由于某种可塑性断层不如通道那样有效。在地质时间上, 断层有被氧化硅或碳酸盐沉淀封闭的趋势, 尔后, 流体的向上运动可继续进行, 如果断层连续地复原或在该层中形成新断层的话。

很明显如果正常的构造条件存在时, 横切一些砂质或其它渗透层的断层可能产生各种油气藏(图12)。需要有能够捕集由上升水流动而运载来的烃类的砂质层。但是油藏可能含有不同类型的烃(西尔弗曼, 1965)。如果较深层的气已经溶解了液态烃, 那么, 随着压力下降, 这些液态烃将从气中分离出, 并开始聚集于较深部油藏中。随着新的烃类的到来, 较深部构造仅充填气, 而失掉油, 后者后来进入上部构造。这个机理与格索(Gussow, 1954, 1955)的差异圈闭理论符合。因为逆凝析作用发生在压力不很高(300公斤/厘米²范围内)的情况下, 原油的捕集终止于中等压实的沉积岩中, 也就是部分压实的页岩层中。这种条件下的最浅层油藏由年青的盖层封闭。

水可渗过浅盖层, 在某种程度上说气也如此。一旦达到饱和压力界限, 这样, 盖层将允许气纵向扩散。因此, 在轻微压实的第四系和新统沉积岩中仅发现厚度有限的气藏。在地层中如果存在有利的地质条件的话, 可形成一系列气藏(图13)。在穿过页岩体的运移过程中, 由于气与水一起组成溶液, 溶液溶解过程将分馏出更多的可溶解组份, 分馏的结果是浅气藏的气是由几乎纯净的同位素的轻甲烷组成(注11)。浅层气

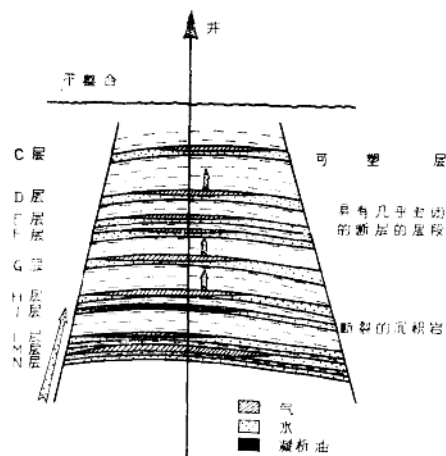


图12 通过断层的运移

烃类最后被圈闭在第一可塑盖层下面。
沿着流体垂向运移路线将产生差异圈闭。

田以上的气扩散形成的晕圈在钻井过程中通过泥浆录井方法可以较容易地检测到；在有些地区，进行海上地震勘探中也可以通过连续记录溶解于底部水中的气而很容易地检测到；在有些地区，进行海上地震勘探中也可以通过连续记录溶解于底部水中的气而很容易地检测出（注12）。气田之上的第一页岩层段的钻井，因为高压气的存在可能是很危险的。

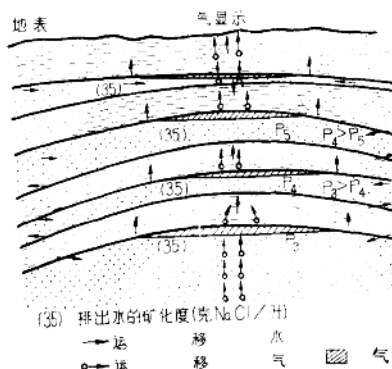


图13 在年青的未压实的海相沉积物中气的纵向扩散

在压实的第一阶段，沉积物释放出存在于大孔隙中的原始水，含水层的矿化度仍与海水相等。构造之上，分散气一般是存在的，剖面示出了上新世—第四纪时代的意大利的很多多层气田的地质位置。 $P_1 \sim P_5$ 是水力位能。

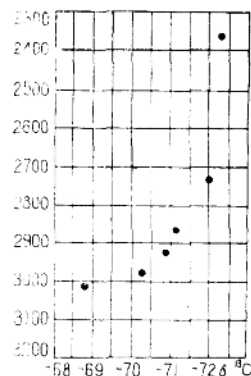


图14 意大利北部拉文纳海上科西尼(Porto Corsini)的多层气田同位素馏份。

每个点至少代表从相同层取来的四个气样品的平均 $\delta^{13}C$ 值。深度单位为米。所有层中的气田几乎是纯净的甲烷组成。较高等的烃类和重烃最后被圈闭在较深的未勘探层中。

自然条件是已知的，在那里，深部渗透层直接与地表相连通。如果地层的断裂或倾斜发生在较新的造山运动过程中，那么可能已经造成了流体从下部聚集区纵向上扩散。流体可以很容易地运移通过具有有利的构造位置的连续渗透层。突尼斯南部基尔乔（Kirchaou）地层的三迭系砂岩层就是一例（图15）。基尔乔层的矿化度随深度变化。当来自古生界地层的矿化度为320克/升（正如从突尼斯南部盆地古生界含水层盐水中测定的那样）的盐水达到三迭系砂岩层时，它们会被那里的低矿化度水稀释。而且，靠近地表，来自古生界—三迭系地层的稀释水与来自露头层的雨水混合。结果，上升水转而流向以峡谷底部代表的低位势排泄带。此盆地内油的分布状况取决于流动水的矿化度和方向。在深处，在流体从古生界岩层进入三迭系岩层的地点附近的圈闭中，也就是在高矿化度带，一旦深部圈闭充满油后，油就将同上升水一起向上流。在浅部低矿化度带，雨水的下倾运动将保存住油滴，甚至在稍微倾斜的盖层之下形成新的石油聚集。这种圈闭的闭合作用是由油滴的浮力和流水传递给该油滴的速度一起提供的（图15）。

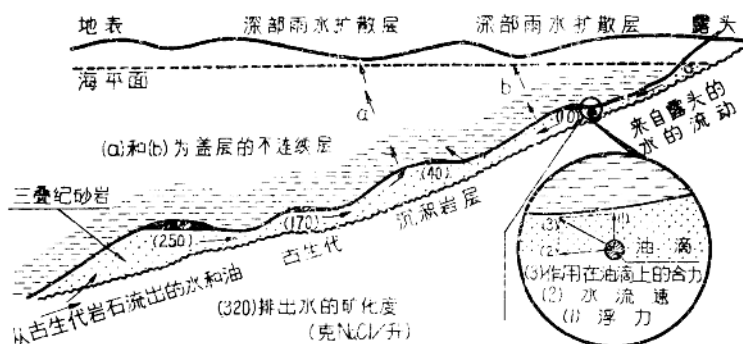


图15 通过扩展到地表的渗透岩石的流体侧向运移

理想的剖面表明突尼斯的环境。水动力可使油滴和气
泡上升，形成烃类二次聚集。水向下运动阻止油向地
表扩散，并且在适当条件下有利于圈闭。

降解作用

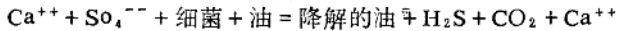
被圈闭的或运移到岩层上部的油受一般导致挥发性组分损失和氮-硫-氧化合物（树脂和沥青质）浓缩的变质作用的影响。氮-硫-氧化合物的浓缩进而引起比重和粘度增加。当有微生物活动时，这一过程常常称为“生物降解”。对油的生物降解一直有广泛的争论〔米尔纳（Milner），1977〕等人。依笔者的意见，油的降解作用扩散的范围比以前假定的要广泛地多。

生物降解出现在地表水通过断层、裂缝或其它通道可以自由循环的层中，这种水可以提供适合于生物降解反应的条件。直接供给氧气被认为是蚀变过程中细菌的主要要求

之一。

好氧细菌在由雨水侵入的上部层中是有效的。根据[哈伍德(Harwood), 1973]材料, 生物降解作用需要下面条件: 溶解气含量约8毫克/升的循环水; 地层温度范围为20-50℃, 而且油几乎不含硫化氢(它会伤害好氧菌)。细菌对油的攻击将产生CO₂和氧化的重质油。

在地层水缺乏游离氧的深层, 厌氧细菌被认为是最有效的(注13)。食氧的细菌需要从溶解在水中的硫离子进行新陈代谢。根据琼斯(Jones)和史密斯(1965)资料, 包括在这个过程中的化学反应可用下述方程概述:



H₂S通过溶解在循环水中的游离氧($\text{H}_2\text{S} + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{H}_2\text{O} + \text{S}$)或通过溶解在水中的硫酸盐离子($4\text{H}_2\text{S} + \text{SO}_4^{--} = 4\text{H}_2\text{O} + 5\text{S}$)可很容易氧化成硫[费利(Feely)和库尔普(Kulp), 1957]。游离硫可脱去油中的氢并形成凝聚的高分子量循环烃和新的H₂S。而后, H₂S与新的硫酸盐离子反应生成硫, 等等。墨西哥湾沿岸和西西里地区的硫矿床就是这样生成的。

死细菌的蛋白质细胞可掺入油中[贝利(Bailey)等人, 1973a], 并且通过增加含氮量而使其降解。

由于强阴离子例如SO₄⁻⁻的排除或被非常弱的阴离子例如S⁻⁻替换而使pH增加之后, CO₂将与钙阳离子结合构成次生方解石。由微生物的活动而产生的次生方解石可很容易通过同位素分析检测出来[古尔德(Gould)和史密斯, 1978]。

由于厌氧细菌优先在石蜡层底层生长, 降解的油通常缺少正烷烃(贝利等人, 1973a, 1973b)。

通常认为细菌生长的最佳温度范围在20~50℃之间, 在大约65℃的温度下, 细菌的活动显著地减弱。结果, 在地层温度超过80℃时, 硫酸根的还原一定是在没有细菌活动情况下自发的。为了引起反应[奥尔(Orr), 1974], 只需要有产生于热变质作用最后阶段的H₂S示踪剂的存在。

一般与生物降解同时发生的水洗过程是引起油降解的另外一个原因。更易溶解的轻烃, 特别是芳香烃易于从原始油聚集中除去, 导致残余油中氮-硫-氧组分增加。

由降解反应含气副产品(H₂S和CO₂)引起的气举作用大大增强了进入地下的雨水和补给水的循环, 降解反应在一些地方是自然产生的。例如西西岛的杰拉(Gela)断裂油田生产含硫高达10%的重质油, 海水沿着南部大断层向下倾方向流动(图16), 用从交切的中新统石膏沉积溶出的硫酸盐离子供给三迭系白云岩含水层。降解反应发生在油水界面, 产出的是气和降解过的油。泡沫水的上升运动沿北部大断层出现。因为两种水柱有重量差异, 大大增强了水的循环。白云岩含水层的温度是80℃, 原油比重经油柱向上逐渐降低。在杰拉油田北部区储层中倾斜水面的存在、油样中H₂S和CO₂占优势以及油层压力为静水柱压力等事实都证实了油的自然降解作用。

自然界中, 降解过的油看起来是很普遍的。根据琼斯·亨特(John Hunt)所谈(个人通讯交往): “已证实的有关降解的油的情况比重质未成熟的油要多。阿萨巴斯卡油砂是白垩系生物降解过的油的一个例子。一些油页岩是未成熟油的良好实例, 但这些油

从未真正充分地运移过而形成一未成熟的聚。



图16 杰拉 (Gela) 油田的地表水循环

油被圈闭在断裂的厚普特(Haupt)白云岩储集层。海相地表水沿着南部断层下流,又沿着北部大断层上升。杰拉油田具有倾斜的水面。海上油井产出的油比重0.9725。陆上油井产出的油较重,比重为1.0143。

地球化学勘探

涉及影响地下流体运移的物理-化学原理的广泛基础,与运移问题相关的所有地质环境的系统变化是应用地球化学概念进行勘探的必要条件。地球化学资料的不正确的解释可使所有地球化学工作变得毫无意义,并使勘探工作误入歧途。

由于钻井费的增长,特别是在海上,勘探工作越来越需要发挥地球化学的作用。负责评价主要由有机质含量低的地层组成的盆地的含油潜力的地质学家尤其需要地球化学资料。油聚集可形成的这些地方,只有当沉积岩中的低比例的有机质得到向斜区大体积岩层和分散的烃类向位置适宜的圈闭优先运移的补偿时,在这些地方才能形成石油聚集。

通常借助于各种工具来进行运移研究。用于勘探工作的工具的选择取决于有效的仪器和地球化学工作者计划和完成相应的采样活动的的能力。

地球化学工具

同位素分析

将同位素分析应用于石油勘探已由斯塔尔 (Stahl,1977, 1978) 做过评论。烃类的化学和同位素分馏正是在自然界中发生的,在解释同位素资料和化学资料时,一定要注意烃类运移通过不同地质条件地层的途径,也就是借助于断层、微裂缝、大孔隙或是水溶