

美国石油地质学家协会进修丛书

(八)

〔美〕R. W. 琼斯等著

控制石油运移的 物理及化学因素

石油工业出版社

P618.13

14715

美国石油地质学家协会进修丛书(八)

52403/19
控制石油运移的
物理及化学因素

[美] R. W. 琼斯等 著

卢松年 译



00315180



200314427

石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了石油运移作用的物理和化学实况,各种各样能使油、气逃逸的机理。控制石油运移的因素与控制石油和天然气生成因素的关系,从烃在水中的溶解度的角度评述石油初次和二次运移的机理,初次运移与母岩中水、矿物、有机物的相互作用。还介绍了墨西哥第三系页岩中烃的排出是由于烃分子通过页岩孔隙的扩散作用所造成的。

本书可供石油地质人员、石油地球化学人员和院校有关师生学习。

[美] R. W. Jones 等
Physical and Chemical
Constraints on Petroleum Migration
AAPG Continuing Education Course
Note Series #8

This is an author-prepared publication distributed
by the AAPG Department of Educational Activities
(First Printing, 1978)

美国石油地质学家协会进修丛书(八)
控制石油运移的物理及化学因素

[美] R. W. 琼斯等著
卢松年译

石油工业出版社出版
(北京安定门外外馆东后街甲36号)

北京印刷一厂排版

京辉印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 7¹/₄印张 178千字 印1—3,750

1984年4月北京第1版 1984年4月北京第1次印刷

书号: 15037·2465 定价: 0.79元

序 言

在石油勘探工作中，很难想出什么能与既获得了众多概念和意见上之荣誉，又受到了那样缺乏事实之损害的运移作用相比拟。事实上，我们已有一些非常可靠的有关年青的或古老的细粒岩石能提供有机成分的知识，而且，我们也论证过在粗粒或破碎岩石中，石油和天然气能在许多地方并以许多方式产生之模式。因而，我们觉得对运移作用的开始和终了之实况更有把握。那末，我们为什么未能确实地观察到正在从一个地方运移到另一个地方的石油呢？当然，我们有过尝试，我们可以放弃目睹石油活动的想法，除了直接观察以外，为什么我们不能明确地解释石油活动的“标记”呢？

有兴趣于解释这些过程的任何人，大概都与我们有同感即，如果我们更肯定地了解油气怎样活动，那末，我们就会更有把握地追踪它们直到其所在的位置。但运移之谜曾使许多公正而又辛勤工作的专家们受到挫折。这些文章的作者，由于他们在该领域中的工作而有发言权。我们希望听众和读者愿意应用崭新的逻辑思维考虑问题，我们要求他们能告诉我们任何有关运移作用之物理、化学实况。我们并不期望着他们在所有观点上一致，但我们高度评价他们提供给我们确切资料，以客观地考虑或重新考虑运移问题。我们设想，当我们把越来越多的确切旁证纳入我们的思维，我们的推论和解释就会更有根据，而且可靠性更高。有效地突破对运移作用的理解（对石油生成和聚集的理解都是有益的），肯定会因我们给予它们的注意而加深。

当我们在对在这里提出论文的作者们表示感谢时，我们也希望所有听众和读者都能分享因加深对运移问题的理解而带来的裨益。

W. H. 罗伯茨, III R. J. 科德尔

目 录

序 言

运移机理上的某些质量平衡和地质条件·····	R. W. 琼斯 (1)
根据地质和地球化学研究提出的石油运移的控制因素·····	詹姆斯 A. 莫姆珀 (23)
控制石油运移的化学和物理因素——着重烃在水中的溶解度·····	克莱顿 D. 麦考利夫 (59)
初次运移——母岩中水——矿物——有机物相互作用的重要性·····	科林 巴克 (82)
墨西哥湾第三系页岩的性质及排烃动力学·····	亨利 H. 欣奇 (95)

运移机理上的某些质量平衡和地质条件

R. W. 琼斯

摘 要

地球沉积盖层中的石油和天然气并非是静止的。它们总是要摆脱细分散状态,或者,摆脱使其圈闭于储集岩中的浓缩状态。有各种各样能使油、气逃逸的机理。其中包括扩散、连续的独立相流、油溶于气或气溶于油,以及溶于压缩作用水、粘土的成岩作用水或大气水。问题在于对可能之机理的定量评价,以及在给定的物理、化学和地质条件下,依次评定它们的相对重要性,评定因物理、化学和地质条件的不同而出现之数量级的变化。

在过去的十年,油源对比已经变得可靠了,而且,油、气生成的高峰期及与之相伴的油、气运移,已完全能够定量确定,这使地质学家-地球化学家能对石油在什么时候、以多大数量从一个地方移向另一个地方进行估算。结合对运移时期的物理、化学和地质条件的认识,地下石油运移的上述定量描述,可就各种运移机理之适用性,提出以实验为基础的试验。将这一技术应用于所选择的面积上,说明(1)大气水从母岩提取了阿尔伯达下白垩统砂岩中的重油,(2)连续相流是洛杉矶盆地石油离开母岩的先决条件,和(3)世界上大多数重要油藏中的石油,并非以溶于压缩作用水或粘土的成岩作用水而离开母岩。

引 言

很多机理都是作为探讨从母岩运移进入储集岩的原因而提出的(表1)。可概括地将其分为两种基本类型。一个是依赖于水,使石油或石油先体移出母岩;另一个是在与水的活动无任何关系的独立相中,使石油移出母岩。事实上,摆脱大量的水可能是独立相活动的先决条件。今天,多数报告人是某些独立相运移的倡导者,但运移座谈会上的一些报告人,却与水的控制运移的倡导者之意见非常一致。列于表1中的8到10个特殊的运移机理,将在这次会议提出的论文中给以明确的说明,如果我们相信只有一个报告人是正确的,而且所提出的机理只有一个是“正确的”,那就会使我们的问题简化。可是,情况未必如此。所有这些运移机理都以某种规模存在于自然界。提出的各种机理,在给定的空间和时间中,其数量上的相对重要性是许多参数的函数。表2、3和4证明,某些岩石、流体和干酪根的原始性质,预计都会对母岩的“运移特性”有相当大的影响。

我们认为干酪根的性质在运移中起主要作用,岩石性质居第二位,而且,无理由对大多数流体(水)性质给予过分的注意。但是这是历史的进步。即使我们能测量母岩之全部的岩石、流体和干酪根性质(这是我们做不到的),那末,可能的交换和结合显然足以向一千个物理学家和化学家挑战一千年。同时,应探索以实验为基础的解决办法。而控制解决办法的是石油地下运移时具有什么性质。虽然我们没有能力定量估算许多控制运移之物理、化学参数

表 1 某些运移机理和载体

水控制的	
1. 石油在水溶液中	
2. 天然气在水溶液中	
3. 其它有机物在水溶液中	
4. 胶态离子溶液	
5. 乳胶	
6. 扩散	
7. 大气水	
8. 大气水	
9. 压缩水	
10. 粘土脱水 (<350°F)	
11. 粘土脱水 (>350°F)	
独立相运移	
1. 石油	} 在孔隙系统中
2. 天然气	
3. 天然气溶于石油	
4. 石油溶于天然气	
5. 扩散	} 在干酪根网中
6. 压力梯度	

表 2 影响运移的某些岩石性质

孔隙度	吸附作用
渗透率	吸附作用
孔隙大小的分布	含水矿物
弯曲	微粒大小的分布
溶解压力	断裂传递
可湿性	

表 3 影响运移的某些流体性质

压力和压力梯度	粘度
温度和温度梯度	饱和度
水的含盐度	压缩性
界面张力	密度
束缚于粘土表面的水	浮力

表 4 影响运移的某些干酪根性质

1. 数量
2. 类型 (产物)
3. 类型 (吸附性)
4. 成熟度
5. 母岩范围内的分布

可能的结合,但现在和过去在自然界都是存在的。地球上的石油和天然气,无论在位置上还是在成分上都不平衡。从哲学意义上讲,石油和天然气,甚至还有干酪根,无论何时都可看作是任何一个使石油从地球沉积盖层逃逸之可能机理的积极开拓者。我们可以在自然优选中设想一个变化范围,从(1)由于压缩作用而发育了近似地层压力的结果,使未成熟的石油通过机械挤压而离开富含有机物之潜在石油母岩,到(2)由于它们本身发育了异常压强(SNP),而产生易于散发的低密度、低粘度产物,到(3)在过渡带,石油漂浮在活动水之上,而且,石油分子高度扩散,到(4)最后的场所,是大量石油和干酪根都被调和为富碳残余物而停留在母岩之中,这是因为原始有机物(OM)可以裂化出足够多的天然气向上移去。预计,比较圈闭中与母岩中的油、气数量和分布,可以找出它们适用的运移机理,而且,实际上这就是本文的论点。

应用质量平衡评价可能的运移机理时必须研究盆地。我们必须对其中有关表5所列参数具有深刻了解。对所列参数的认识用于本文以下三部分,以论证(1)连续相流是世界上重要油藏石油借以离开其母岩的机理,(2)世界上商业性石油很少是以溶于压缩作用水或粘土成岩作用水而离开其母岩,并讨论(3)墨西哥湾第三系和阿尔伯达下白垩统的油砂,这是两个对任何初次运移理论都成问题的区域。

表5 对其中有许多有关运移机理信息的盆地经过详探应获得的资料

石油	} 数量、分布和特性
沥青	
干酪根	
水——过去和现在的数量、分布、特性和活动情况	
盆地——结构和地层发育历史	

连续相运移

序言

研究典型盆地中各类有机物的分布,使我们确信,多数重要油藏中的石油是以连续相离开母岩的。在开始阶段效率最高,此后,在富含有机物的潜在石油母岩中,自然优选的运移机理,在油、气产生作用的高峰期,使沥青从干酪根被挤压进入孔隙系统。接着,因岩石的不断下沉和压缩,和(或)因岩石中总有机物之体积由于低密度有机物的产生而不断增大,就出现局部的异常压强,结果孔隙系统就发生挤出作用。产生作用不仅是运移的绝对必要条件,而且也是运移的起因。这一信念的必然结果是说明,引起石油比重随深度而升高的原因,正像因深度加大而孔隙收缩增强和可用有机物量降低一样,是为了满足对低比重、低粘度之可运移产物的自然需要。

哲学上的研究足够了。现在看一些资料。表6所列的一些理由使我们相信,在一个盆地中各类有机物的分布,必须以连续相初次运移出母岩。虽然表6各项均独立地列出,但其理由互相缠绕在一起。以下按一般分类对其进行讨论。

与石油聚集和水的活动有关的母岩有机成分

世界上大多数重要油藏都产自总有机碳(TOC's)≥2.5重量%的母岩,而且,其范围经

表 6 连续相初次运移的一些证据

- I. 世界上大多数重要油藏都产生于总有机碳含量 (TOC's) ≥ 2.5 重量%的母岩。
 - A. 没有足够的压缩作用水和粘土脱水作用水, 以使石油以含水溶液从母岩运移到储油岩。
 - B. 总有机碳高的母岩比总有机碳低的母岩具有更高的排水效率。
- II. 在产生作用高峰期和初次运移时, 大多数沥青是在孔隙系统中, 而不是在溶液中, 也不附着于粘土上, 也不在干酪根中。
 - A. 质量平衡计算
 - B. 显微镜观察
 - C. 沥青测量
 - D. 测井
- III. 初次运移伴随着高峰产生作用。
 - A. 沥青脉
 - B. 破碎页岩的产生作用
 - C. 在产生作用高峰期, 储油岩中之石油和母岩中之沥青的最大相似性
 - D. 很多有效母岩其产生作用曲线从未达到反向
 - E. 大多数运移自富含有机物岩石中的石油未被天然气饱和

常超过 10%, 按重量计^①。可想出很多实例: 北海北部基梅里迪安, 阿尔及利亚志留系, 加利福尼亚上中新统, 普拉德霍湾区的白垩系“黑页岩”, 中央大陆的巴肯和伍德福德, 西西伯利亚中生界。

在研究为什么高有机碳含量要求连续相运移以前, 让我们先研究一下一种岩石变成有效母岩即, 商业油藏的源泉, 所需之最小有机物含量问题。回答这一问题对了解运移作用是很重要的, 但在多数文献中, 却都以一个颇为时髦的问题来对待。莫姆珀 (1978) 对这一课题的评论是论点鲜明的例外, 而且, 我也请你们对以下问题好好讨论一下即, 为什么盛行的数字 0.5 重量%的有机物, 未经证明或未经深入讨论就放入文献之中。就我看来, 除非人们是与厚的第三纪三角洲系统打交道, 否则 ≈ 0.5 重量%的有机物就给他们带来极严重的困难, 而且, 以下的回忆也是有益的, 即多数圈闭位置中的储集岩是无油的。总有机碳含量低所造之困难是简单而明确的, 即没有足够的液态烃进行连续相运移, 而且, 自然界常常是迫使驱动任何液态烃离开母岩的运移机理之有效性变得更小。

使一个潜在母岩变为有效母岩所必须之有机碳最低含量, 并非单单是一个不可捉摸的常数。它取决于许多其它变数而变化很大。不仅取决于有机物类型及其在岩石中的分布, 而且也取决于潜在母岩与潜在载岩的相互位置、有机物的成熟度、在产生作用高峰期母岩中无机物的物理和化学性质, 自然, 还有油田之经济意义的大小。因此, 大多数有机物 $> 90\%$ 的煤却不是潜在的石油母岩。它们产生的是比大多数石油母岩所产之单位重量更重的烃类; 可是, 像镜煤体和惰性体这些煤中的主要微分组分, 并不是过饱和的, 同时, 直到烃类裂化成气并在有机物内聚合以前, 也不析出烃类。另外, 运移作用的自由化和构成一个有效母岩所需之有机物量, 是部分地被潜在母岩中均匀分布之有机物所控制, 还是部分地被以纹泥式分布之不同丰度的有机物所控制, 也是不难看出的。一个被贫页岩所包围的有机物丰富带向有效载岩排挤其液态烃, 在实验上无疑是非常困难的。因此, 构成一个有效生油岩所必须之最小有机物量, 取决于许多控制初次运移自由化的变数。

① 以上的归纳最值得注意的例外是, 作为基本实例的尼日尔和密西西比第三纪三角洲系统。其中, 母岩伏于储集岩之下, 而且由含有 TOC's 0.3 到 1.0 重量%的 10,000 英尺以上的地层组成, 其中有机物是成熟—过成熟的。其主要的运移过程基本上是与这些系统一致。见以下的讨论。

根据现代化的油-源对比,起因于上述富含有机物母岩的储集岩石油,其量以数量级超过能借助于压缩作用水溶液或粘土脱水溶液而离开母岩的石油量。让我们看看两个证据更充分的例子,华盛顿盆地中的巴肯页岩和洛杉矶盆地的托塔利泰。在这两个区域中,假设都极为保守,即所需的溶解度几乎肯定未能充分报道。如果来自巴肯页岩的石油,在产生作用高峰期,是借助于压缩而被载运出巴肯页岩,那么在表7中①,使用了W. G. 道(W.G.Dow, 1974)就华盛顿盆地巴肯页岩所提供的数据,计算了所需之最小溶解度。这些最小数字至少对石油来说高出两个数量级,以致不能呈水溶液运移。

表 7 质量平衡的先决条件——华盛顿盆地密西西比系——泥盆系巴肯页岩
(数据据 W.G. Dow, 1974)

聚集相当 3×10^9 桶石油。
成熟的巴肯页岩体积 ≈ 100 英里 $\times 200$ 英里 $\times (40/5280)$ 英里 ≈ 150 立方英里。
每立方英里巴肯页岩排出的最小石油量 $= 3 \times 10^9$ 桶/150 英里 $\approx 20 \times 10^6$ 桶/立方英里 ≈ 770 ppm。
如果石油排出发生于巴肯页岩孔隙度从10%降到5%,所需之水溶解度 $\approx 15,000$ ppm。
如果从巴肯页岩排出相当于聚集起来的石油的3.3倍(Dow, 1974),所需之水溶解度将是 $\approx 50,000$ ppm。

研究洛杉矶盆地中的质量平衡,人们就更不相信石油的水溶液运移。图1有两个通过洛杉矶盆地的北东—南西向横剖面(据 Gardett, 1971),表示了盆地轮廓、主要油田位置,以及由菲利皮(Philippi, 1965)确定在盆地西侧,而由扩大为横穿盆地的近似之高峰产生作用顶界。有关质量平衡的数据表示在表8中。全部数据都给人以深刻印象。我请你们特别注意说明母岩体积的 $\approx 2.5\%$ 转变为石油之第8项,说明运移效率高的第10项,和说明水溶液运移与从母岩运移无关的第15项。

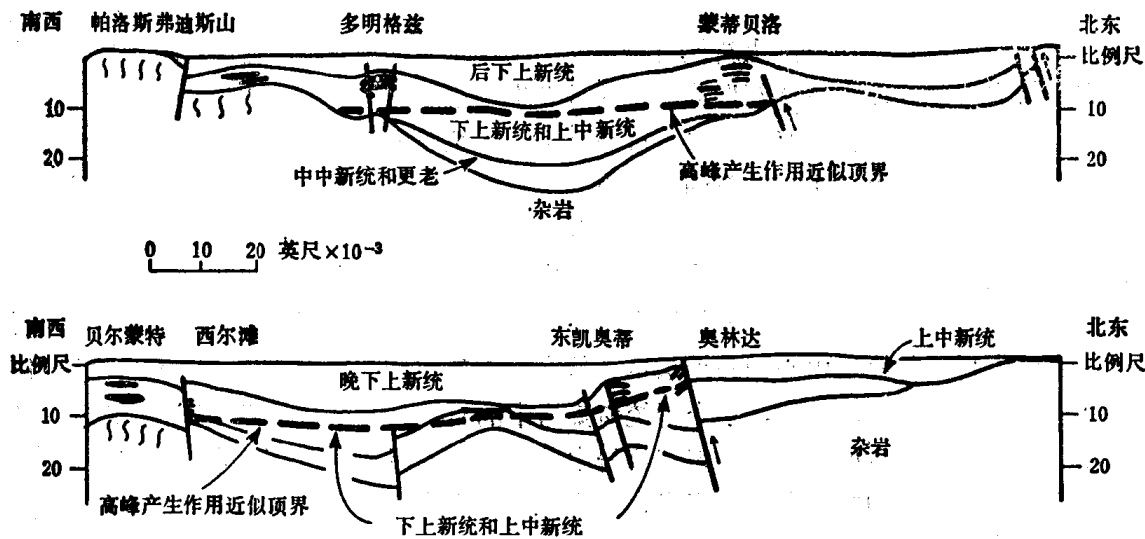


图 1 洛杉矶盆地北东—南西向横剖面图,表示油田和生油高峰的近似顶界
(据 Gardett, 1971)

对两个给定的例子和更一般的情况都必须说明的是,若不是大量的水能够从下面通过母岩并在此过程中析出烃类,那末我们不完全依赖于从母岩放出的原生水则是不可能的。当下

① 在该表和后续的表中,试图使用最可用的数字,但它们可能错了1到3倍。

表 8 洛杉矶盆地中的一些质量平衡的研究

1. 相当石油 $\approx 25 \times 10^6$ 桶 ≈ 1.0 立方英里
2. 与油田有关的岩石体积 ≈ 1600 立方英里 (Barbat, 1958)
3. 盆地体积的 $1/1600$ 或 0.06% 或 600 ppm 是圈闭中的石油
4. 成熟的和过成熟的母岩 ≈ 200 立方英里
5. 母岩体积的 $1/200$ 或 0.5% 或 5000 ppm, 或母岩重量的 ≈ 2000 ppm 是圈闭中的石油
6. 假设原始干酪根的 $\approx 25\%$ 变为石油
7. 原始有机物为 ≈ 4.0 重量%
8. 产生之石油总量 ≈ 1.0 母岩重量 $\% = 2.5$ 母岩体积 $\%$
9. 产生之石油总量 ≈ 200 立方英里 $\times 0.025 \approx 5$ 立方英里
10. 储集岩中的石油/产生之石油 $\approx 1/5 \approx 20\%$
11. 假设运移发生在母岩孔隙度从 10% 降到 5%
12. 运移时流体丧失 ≈ 10 立方英里
13. 假设全部运移的石油都在圈闭中
14. 那么从母岩运移出石油时油/水 $\approx 1/9$
15. 所需之溶解度 $\geq 100,000$ ppm

沉井压缩时, 即使一个正常的、带有渗透性夹层的非母源页岩, 也会在其内部产生剩余压力, 而且, 向上和向下都排出流体 (Smith, et al., 1971; Evans, et al., 1975)。当由于烃的大量产生而来的附加剩余压力被加到由于压缩而来的正常剩余压力的时候, 大量水经过母岩向上流动的可能性变得微乎其微。世界上许多良好的母岩都在其范围内兼而起着石油母岩与石油盖岩的作用, 这一事实就可以使人确信上述的解释。生油岩和储油岩的互层是一个理想的结合, 使母岩不是通过向上流动的水, 而是通过连续相流而暂时排放其剩余压力。自然, 这完全是洛杉矶盆地中的情况, 那里的混合储油岩是与深海页岩的互层。

顺便说一下, 根据图 1 和几个有关石油及其母岩分布的数据, 可以就洛杉矶盆地中的运移做出一些补充的推论。上上新统由丰富的储集岩和按常规标准 (总有机碳 ≥ 1.0 重量%) 的潜在生油岩组成, 而且在全新世造山运动时发生构造变形, 这一造山运动使下上新统-上中新统地层形成富含石油的背斜构造。可是, 上上新统只含有少于盆地 0.1% 的石油, 而且, 仅仅是与深部地层所含之丰富的石油构造中的主要断层有关。我以为这些事实意味着: (1) 从晚上新世沉积中心移出的任何压缩作用水和粘土的成岩作用水, 都载运了微量的液态石油, 尽管在热成岩作用的早期产油阶段存在着丰富的“良好”潜在石油母岩; (2) 在早上新世以后的地层占优势的条件下也不可能发生连续相运移; (3) 接近下上新统剖面之顶界储集岩石油的突然中断, 与盆地中心同一地层单元的高峰产生作用之顶界有密切关系。这说明断层主要是遮挡而不是通道, 而且, 下上新统储集岩中的石油起源于盆地深处下上新统母岩夹层, 而不是像菲利普所说, 下上新统储集岩中的石油是沿断层从下伏之中上新统母岩进入的。

成熟的富含有机物之潜在石油母岩, 比有机物不大丰富的岩石具有更大的排出效能。例如, 洛杉矶盆地可能 5% 成熟母岩的原始有机物现在在圈闭之中。墨西哥湾第三系可能是 $< 1.0\%$ 。如果水的活动比独立相运移更重要, 那末, 我们可以期待, 有机物不大丰富的潜在石油母岩要比富含有机物者具有更高的排出效能, 但情况并不如此。

在富含有机物的潜在石油母岩中烃产生作用的高峰位置何在?

在产生作用的高峰期和略晚些, 初次运移时的烃类大多都是在孔隙系统中。它们不是含水溶液、不被粘土吸附、也不在干酪根中。大多数烃类不溶于孔隙水。表 9 的数据清楚地说明了这点, 表中表明, 甚至一种总有机碳很低的岩石, 也总是含有较饱和孔隙所需许多倍

表 9 烃的有效性比孔隙水的容量

潜在石油母岩 总有机碳 (重量%)	页岩孔隙度 (%)	岩石中C ₁₀ 烃 (ppm, 体积)	烃可溶性 (ppm)	烃的水溶量 (ppm)	岩石中剩余烃量
0.5	40	30	10	4	7.5 x
0.5	30	70	15	4.5	16 x
0.5	20	200	25	5	40 x
0.5(5)	10	1000	100	10	100 x (1000 x)
0.5	5	200	500	25	8 x

的烃类。

在产生作用高峰期, 总有机碳 ≈ 3.0 重量% 的母岩, 含有较饱和和所需高几百倍的烃。粘土对烃的吸附问题更难以使用有价值的数字予以定量回答, 而且这显然也是一个需要研究的领域。可是, 水和氧、氮、硫化合物的极性远大于烃, 而且, 在产生作用高峰期的温度下, 吸附性的降低有力的说明多数烃不是吸附于粘土之上而是在别处。根据未抽提的潜在石油母岩的煤微观结构所表现出之煤化作用痕迹 (图 2) 有力地证明, 在产生作用高峰期岩石—有机物—孔隙系统中的多数烃并不在有机物之中。未抽提的潜在石油母岩之 H/C 比随成熟度的增强而降低, 只能意味着更富含氢的产物, 即烃类, 是从干酪根或被干酪根排出。在这个意义上, 煤岩学的“煤级跳跃”——基本上是来自潜在石油母岩的煤微观结构中之挥发物快速排出时间——乃是有价值的研究, 因为在石油运移中这是值得重视的 (例如: Stach, 1953; Teichmüller, 1975)。更常见于文献中的石油 H/C 比 O/C 图解 (图 2), 对了解初次运移比了解干酪根 (抽提过有机物) 更为重要。例如, 从镜煤反射率 0.7 到 1.1 的镜煤曲线之分带性清楚地表明, 直到聚合湿气的产生阶段到达以前, 镜煤不会排出烃类。在成熟度相同的间隔内由近乎垂直的演化路线表明, 潜在石油母岩的有机物正在排出石油。事实上, 根据近似的测量和一些有关产物的元素组成方面的假设, 我们能计算烃的生成量、干酪根中的残余量、孔隙空间的残余量和已运移量。

根据质量平衡所做的假设认为, 借助显微镜观察、电测曲线和地球化学测量所得之证据, 在产生作用高峰期大多数沥青是在孔隙空间里。

在洛杉矶盆地中, 一种母岩中之连续相运移的情况, 可用地球化学资料和高效显微镜观察做进一步证实, 后者由从事于研究德尔雷伊滩油田石油成因的胡茨等人 (Hoots, et al., 1935) 在 43 年前一篇文章中提出。图 3 表示胡茨等人对德尔雷伊滩油田描述的情况。未测量“结核状页岩”的总有机碳, 但相当 6% 的蒸馏作用产量, 说明总有机碳 ≥ 10 重量%。

平均 1.8 重量%或 ≥ 4.0 体积%的氯仿抽提物至少具有同等重要意义。根据表 10 所列, 石油相对其母岩的 API 比重、烃、饱和烃和烷烃含量的显著升高, 证明石油是从页岩进入片岩而不是相反。大概这一研究的最流行方法是 W. H. 布雷德利 (W. H. Bradley) 的有机物显微镜观察。他认出四种显微有机物类型, 我引述了他的描述。

“第一类是……孢子外膜。第二类……最丰富……深红棕色……、基本上无结构……、呈细脉状和不规则的薄片或片状, 以及不规则的小的絮结质……、大小变化很大……, 与多数有机物比较其变化小……, 无疑曾从其原始成分经受了变化。第三类有机物是浅黄色、均匀地分散于岩石中, 完全是半透明的……在其历史中有时是液态, 有时是流胶……, 在沉积

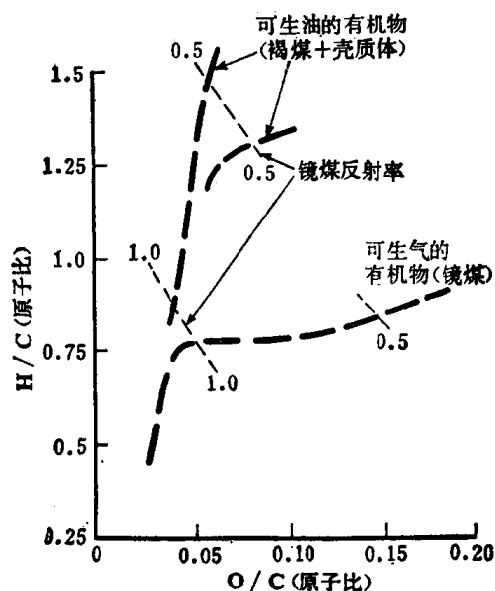


图 2 生油和生气有机物的成熟路线图

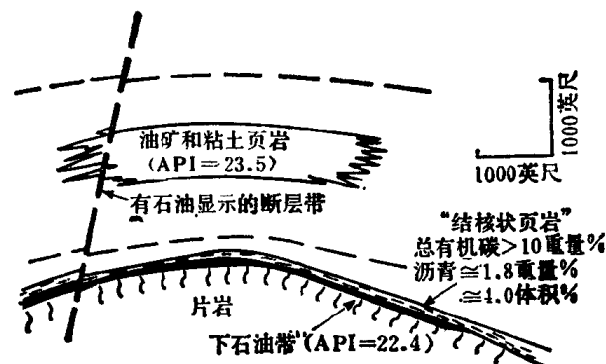


图 3 加利福尼亚德尔雷伊滩油田构造剖面略图(Hoots, et al., 1935)

表 10 洛杉矶盆地德尔雷伊滩油田石油和母岩沥青之组成差异

样 品	蒸 馏 范 围	比 重 °API	芳 香 烃 %	环 烷 烃 %	烷 烃 %
结核状页岩	200~600° F	28.7	30.8	39.6	10.5
下石油带	200~600° F	41.9	19.2	52.0	23.3

物压缩时被压入所有可利用的孔隙。

上述的第二类物质几乎逐渐变为淡黄色物质。当浅红棕色絮结质变小，则在颜色上和透明度上完全近似于第三类黄色物质。第四类有机物是比较少见的暗红棕色不透明的均质棒……、充满液体或近似流胶的孔隙，与上述浅黄色有机物有密切关系，而且，浅黄色物质可能来自暗红棕色有机体碎片的分解。”

我把布雷德利描述的前两类有机物理理解为带有一种乃是极次要成分的外膜之干酪根，把第三类理解为沥青中更像“石油”的部分，把第四类理解为因其不易流动而能从母岩中机械地分离出来的、沥青中之更像柏油的部分。这一领域中的现代化研究会是很有意义的。

在值得研究的母源运移领域里，显微镜的重要性从未受到重视。不幸的是，有其尖端技术的“客观”地球化学的发展，使具有 50 年前技术的“主观”显微镜退居幕后。只是最近随着荧光显微镜的发展（例如：Teichmüller, 1975, 1977），和扫描电子显微镜的发展，显微镜才开始发挥其研究运移的潜力，40 年前，在布雷德利对“结核状页岩”的精敏观察中并未明显地研究运移。在以后的几年里，由于科学家们更直接地研究沥青和干酪根在母岩中的分布，我们将看到荧光显微镜和扫描电子显微镜研究，在运移领域中会起很大作用。

显微镜观察对运移所做之结论，为富含有机物的、有生油潜力之页岩的沥青分析所证明，沥青分析证明，沥青的再分布在热史中开始得十分早。例如，在犹他州绿河层的 WOSCO EX-1 岩芯中，罗宾逊和库克 (Robinson and Cook, 1975) 发现，根据 1.50~1.55 的 H/C 比证明之成熟度和有机物类型都相同的样品，其抽提物的比率可相差十倍之多。在成熟

度较差的剖面中，四个充满以凝灰岩的沥青，其活动情况被抽提物的比率广泛变化而掩盖。在有机物不大丰富的岩石中，母岩沥青的再分布发生于更大的热转化阶段。德罗等人 (Derroo, et al., 1977) 研究阿尔伯达盆地时指出了许多潜在母岩的“浸染”，并见到其成分介于来自同一母岩的正常沥青和石油之间。

关于“标准原生类沥青”完全参考苏联文献，他们将其理解为母岩沥青再分布的证据。他们常常借助于母岩沥青的组成和数量变化来确定运移数量 (Trofimuk, et al., 1974)。

当富含有机物的潜在石油母岩到达产生作用高峰期，电阻率急剧上升。华盛顿的巴肯页岩和北海的金梅里得间都是良好的例子。按我的意见，对这些现象最好的解释是，在孔隙空间中水被沥青置换。

以连续相流大量运移的证据

凡是见过尤英塔盆地绿河层和尤英塔层之沥青脉的人，对沥青的连续相流所具有的性质，有深刻的印象。表 11 综合了可能见于绿河层中的使沥青脉定位的各种条件，条件是罕见的，但既不是唯一的也不是全部的。

表 11 绿河“页岩”沥青脉的连续相流所需之必要条件

1. 岩石中非晶质有机物富含>10 重量%氢
2. 非晶质有机物富含>25 体积%氢
3. 细粒的易碎碳酸盐岩基质
4. >6000 英尺的负荷——由于有机物置于岩石静压力之下而提供流体移动的驱动，有机物的粘度降低不足以产生正常的热成熟度
5. 构造张力裂隙
6. 由于有机物冲入裂隙使压力释放于有机物

图 4 是亨特 (Hunt, 1963) 绘制的绿河盆地剖面示意图，表示沥青脉和常规储集岩之间的关系。可以相信，形成沥青脉之有机物的进一步成熟就使粘度较小的沥青从细粒母岩以连续相移入储油砂岩。

在洛基山区和加利福尼亚富含有机物的裂隙页岩中，有很多商业性油藏。其大多数产水量很低，而且依靠重力排驱。大量的水或移动很慢或牢牢地被束缚，而通向裂隙入口的主要是石油。

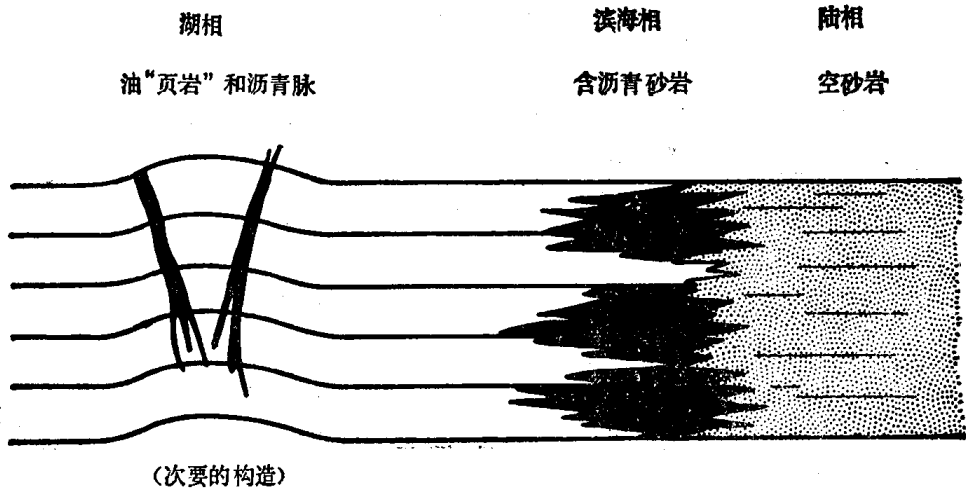


图 4 犹他州尤英塔盆地中与沉积相有关的沥青的产状类型 (据 Hunt, 1963)

产生作用高峰期的石油运移

菲利皮和法国石油研究所的各种出版物都已清楚地证明,在产生作用高峰期,母岩沥青与有成因联系的储集岩石油之间,在组成上有最大的相似性。自然,组成并不完全一致。可是,在石油未经变化的地方,石油通常由较沥青为轻的、低粘度、低极性的物质组成,其差别则与连续相学说极相适应。

在一些盆地中,母岩从未达到高峰产生作用的反向点。例如,包括巴黎盆地在内,一些加利福尼亚盆地的某些部分,落基山中的白垩系部分,以及伊利诺斯和密执安盆地的上古生界部分。在完全达到产生作用高峰期以前,这些地区中的石油是从生油潜力较大之岩石排出,而不是从总有机碳含量低的岩石排出。

最早从富含有机物的潜在石油母岩排出的石油,并且是大部分的石油,通常低饱和着天然气,尽管热成熟度较高,有机物对天然气容量也很大。这清楚地证明,运移即不与水有关也不与气有关。也证明,只有当孔隙空间的沥青饱和度达到一定数值时,运移才开始启动。

各类化合物从母岩运移的时间,与母岩的物理排出学说相符合。绿河盆地第三系的烃类和其它沥青脉,不仅是以独立相从母岩运移的证据,而且也证明,如果存在某些其它条件,独立相运移可以在成熟史的早期发生。附加的热成熟度创造了未成熟的、高凝固点的“常规”原油,它们具有代表绿河页岩石油特征的碳优势指数(CPI)。在尤英塔盆地,较成熟的石油来自更深的绿河页岩之含有机物不多的部分,因为有机物最丰富的部分未曾达到充分的成熟。可是,独立相运移仍然为卢卡斯和德雷克斯勒(Lucas and Drexler, 1975)的一篇优秀论文所详细讨论的地层学和产层历史所证实。

绿河的资料阐明了一些重要论点,这些论点在世界许多富含有机物并已产生重要油藏的石油母岩地区都得以重复。多数石油是在产生作用加强的时候排出,石油常常具有成熟较差的一些组成上的信息,能够容易地用化学上的近似性与其母岩联系起来,而且石油常低饱和着天然气,除非证明在运移以后母岩和(或)储集岩有剧烈下沉。具有这些特征的石油和岩层,一般包括加利福尼亚的大多数第三系石油,库克茵莱特的侏罗系石油,怀俄明含磷建造石油,北海北部和中东的大多数石油。由于这些石油在产生作用高峰期移出母岩,所以对任何已提出的、在生成和运移之间缺少有力的成因联系之原始运移机理都是一个严峻的考验。

与石油在水溶液中运移有关的一些问题

据我看来,与压缩水和粘土成岩作用水呈水溶液进行商业性石油运移有关的问题很多,而且难以解决。虽然有某些重叠,仍列出并讨论了以下四类问题:一般的——极限的深度;浅的——未成熟的;高峰产生作用;过成熟的——超热的和超深的。

一般的——极限的深度

与水溶液有关的某些一般性问题列于表12中,并在以下逐项讨论时予以解答。

1. 在一个下降和压缩盆地中,从热成熟的生油岩向上方的较冷的储集岩移动之水量常常比想像的要少。图5表示在下降和压缩盆地中,水与其向盆地外部和向上流动不如向内和向下流动。水在层位上向上移动而向下则进入较高的温度。寓意于图5中的假设并不像人们所想的那么有约束力,例如,不管由于什么原因引起了异常压强和向下压缩,水就会上升,即使在层位上比图5所示的要小。一部分沿断层流动的异常压强水只会使水的分布返回到图5所示。移入图5剖面中的侧向水流必然还伴有由某处移出的侧向水流。像墨西哥湾第三系

表 12 与石油在水溶液中运移有关的一些问题——一般的——极限的深度

1. 从(热的)生油岩流入(较冷的)储集岩的水体积不够
2. 富含煤和镜煤的岩石不是生油岩
3. 石油的组分与已知的分子溶解度无关
4. 没有必需的胶态离子浓度
5. 总有机碳低的岩石不能形成大油田(不包括厚的第三系)
6. 重大的运移发生在孔隙系统含有 100 倍于饱和孔隙水所需之石油以后
7. 向下移动的水不足以使海浸页岩生成并圈闭大油田
8. 圈闭中无沉淀作用, 否则储集岩中石油的分布不会受毛细作用控制

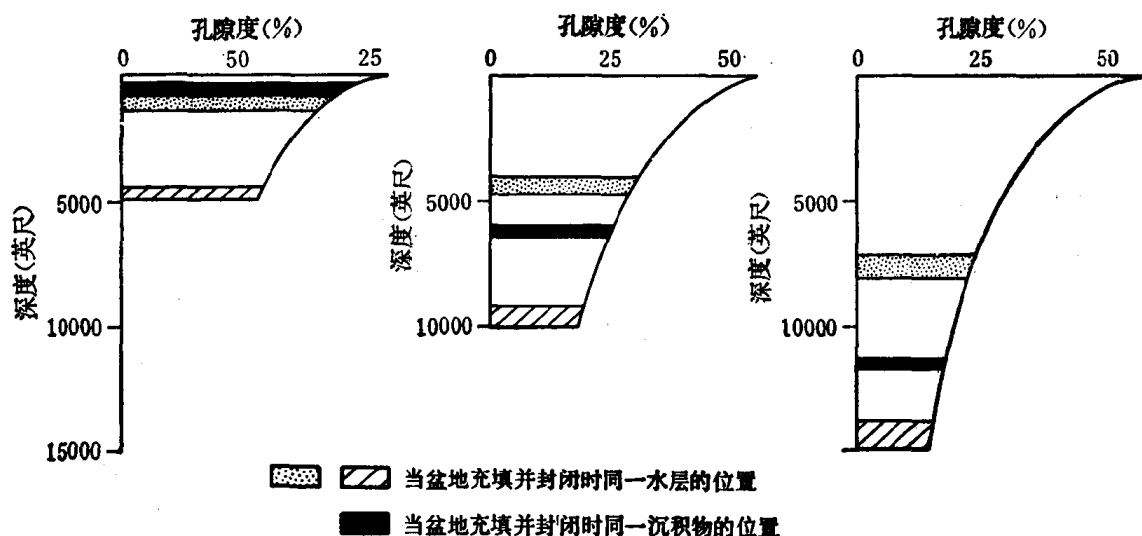


图 5 在压缩盆地中水和沉积物的纵向移动

那样的一些运移模式将由切维罗恩油田研究公司的博纳姆(L. C. Bonham)详细讨论。这一模式的修改稿似乎首先由霍布森(Hobson, 1961)发表, 他坦率地以此作为反对巴克(Baker, 1960)水溶液学说的一种意见。

2. 人们清楚地知道, 尽管有时在富含壳质体的地方见到过油膜, 但镜煤却不是商业油田的母源。虽然镜煤对液态石油的生产能远小于更富含氢的煤微观结构组分, 可是, 煤的有机物含量仍比正常母岩高很多。这意味着, 对重量一定的岩石煤常常含有比推断之母岩多许多倍的烃类。例如, 东南勘萨斯的切罗基层, 巴克(Baker, 1962)发现, 37 个推断之母岩的烃平均值是 129 ppm, 而两个与煤有关的平均值是 6900 ppm。煤和其他镜煤有机物常与砂岩含水层和储集岩有联系。如果水的溶解度在油藏形成过程中有意义, 那末很难理解为什么实际上没有一个人同意煤是丰富的母岩, 而且, 为什么多数含煤剖面, 除非有其它潜在母岩存在, 没有为数可观的石油。

3. 克莱顿·麦考利夫(Clayton McAuliffe)将在讨论这个课题时提出证据, 论证石油组成与水中的分子溶解度的变化是不符合的。如果相信油田是以水溶液运移形成, 那么, 根据组成成分, 慎重考虑, 与其相信溶于水不如相信溶于气(Zhuze and Bourova, 1977)。

4. 麦考利夫博士也要谈到胶态离子溶解度及运移问题, 而我不想在这里讨论这些问题。

5. 6. 除了像被 10,000 多英尺成熟和过成熟页岩所覆盖的、墨西哥湾第三系那样的地区之外, 总有机碳含量低的地区不会形成大油田。因为, 总有机碳 > 0.2 重量% 的岩石所含

之烃，几乎总是超过足以饱和人们所期待之孔隙水(表9)，如果烃在水溶液中运移是一个重要因素，那末，那里就没有像非生油岩一样的岩石。因此，在产生作用高峰期，在干酪根已排出了其大多数烃类的地方，总有机碳低的岩石可以完全像总有机碳高的岩石一样饱和其孔隙水，结果，也像有机碳高的岩石一样成为有效的母岩——如果水溶液是原始运移机理。显然，情况并非如此。

初次运移的第一阶段发生在产生作用已进行到超过干酪根的吸附能力，并且已使沥青排入孔隙系统的时候。这时，在有效母岩的历史中，孔隙中沥青比能溶于水中的沥青多2~3个数量级(表9)。看来合理的是，总有机碳低的岩石还不可能提供那么高的浓度，以致妨碍从其发生重大的初次运移。

7. 世界上很多最好的母岩是能做盖岩也能做生油岩的海浸式页岩。如何能使足够的水从上方穿过这些页岩直接在下部形成油藏？使水下降的机理如何？

8. 已提出的一些水溶液运移机理要求石油（或溶液中的其它有机物）在有载体水进入上覆页岩的圈闭之中沉淀下来。如果所提的这个机理有效，那末，石油和水在储集岩中的分布不会是如此全面地受毛细作用控制。而事实上，在储集岩的微细孔隙中，特别是在盖岩附近，有更大的饱和度。

浅的——未成熟的有机物

由于孔隙度和孔隙度因水在层位上的向上活动而变化，以及在浅处也有适当数量的烃类，所以，仍然有人认为浅压缩水下降可以形成油藏。表13列出一些反对浅处成油的意见。

表 13 与石油在水溶液中运移有关的一些问题——浅的——未成熟的有机物

- | |
|--|
| 1. 没有接近成熟的母岩就没有重要的油田 |
| 2. 沥青的成分与石油的成分很不相像 |
| 3. 所有石油都有热形成的化合物 |
| 4. 在镜煤反射率 ≤ 0.6 的沥青中不能达到石油的 CPI 值 |
| 5. 溶解度极低 |

储集岩不与成熟的母岩接近就没有重要油田。维利斯顿盆地的白垩系和洛杉矶盆地上上新统，是明显的例子，除靠近热成熟的母岩之外，具备形成油田所必需的全部因素。

未成熟沥青的烃组成，即使是与最不成熟的石油比较也是极不相同的。所有石油都含有占优势的由热形成之化合物，而且，石油的 CPI 值在镜煤反射率 ≤ 0.6 的沥青中通常是不能达到的。虽然已经讨论了在沥青中一旦有一定浓度的正烷烃存在，就会使溶液的高 CPI 值消除，但大多数地球化学家对此并不相信。同时，以实验为基础的证据也不能予以证明。在一种石油中，正烷烃分布的不规则，时常会在母岩中重复。另外，姥鲛烷/植烷常常是油源的一个证据。如果初次运移发生在溶液中，而且溶解作用消除了烃的原始分布，那末，姥鲛烷/植烷就不会是母源证据。

烃的溶解度很低，而且，沉淀机理在数量上与深度浅温度低不相适应。

高峰产生作用

如前所述，有很多理由相信初次运移和高峰产生作用基本上是同时发生的。有同样的理由相信，运移着的烃不能在水溶液中流出成熟的母岩。主要的问题是，在产生作用高峰期有足够的水流过母岩(表14)。