

石油地球化学

(美) W. L. 怀特黑德 I. A. 布雷格

一八五九年以后新兴的石油工业纷纷崛起,它促使地质工作者和化学工作者渴望于了解,这一资源以及其中流动的石油和天然气的性质与起源。通过最早的一些观察确认:这一种大部分是由烃类所组成的流体,在其所居留的多孔的和渗透性的岩石中具有进行运移的特性。

地质工作者在寻找有机残余物数量丰富的沉积层位的过程中,发现这种层位并不在通常是储油层的多孔的和具有渗透性的砂岩中,而是在邻近的泥岩和页岩中。因此他们推断石油和天然气起源于某一古地质时期在海中沉积的有机层,当时所见到的古老有机残余物是海相的,嗣后的运移使石油进入了储油层。这种对于来源和聚集过程的见解,首先是累斯奎里奥在一八六六年提出的,不久以后纽贝里,奥汤和怀特也发表了类似的看法。

根据恩格勒和冯赫费尔(1913~1925)和克拉克(1924)所综合的前人的资料,化学家们曾经试图在实验室以内动植物的油和脂肪来制备石油烃。后来,通过对油田的温度和压力的研究,了解到这些通常是在高温下进行的人工合成并不符合于地质条件,所以到今天仅具历史意义了(科克斯 1946; 莱复生 1954)。

有组织地探索石油的来源发始于美国石油学会的研究计划。第一次的研究工作系由希耳德(1943)所领导,结果,距离预定目标很远而失败了。在这同时作为美国石油学会关于现代沉积物的第四项研究计划的一部分,特腊斯克(1932)发表了许多不同海相沉积环境的分析数据。按照同一计划,他第二步又针对古代沉积物进行了研究,并直到一九四〇年方才结束。接着,在美国石油学会的主持下,从一九四二

到一九五八年之间又进行了海相沉积物中有机物质转化为石油烃的研究。最后在同一个学会的主持之下,开展了路易西安纳州和得克萨斯州,湾岸地带现代沉积作用的研究工作。

邦哈姆(1956)在“原油的地球化学研究”一文中把地球化学局限于对原油中的微量金属元素的研究,这种定义的不全面,如同野外油库中的原油终究只是地下储油层中石油的一个部分一样。但是本书所讨论的主题“石油地球化学”,却包涵着较广泛的含义,它既研究有机母质,又研究在生油层中、在运移路途中、在储油层中、影响母质变化的物理过程和化学过程,还研究储油层中石油的有机组份和金属组份的化学特性。在上述的含义之下,石油地球化学在很大程度上系有机地球化学。

与石油地球化学息息相关的还有地球化学的某些其他的分支学科。生油沉积物及其环境,未证实为生油层的有机沉积层,以及威克斯(1958)称之为“石油的产地”的各种特征,对石油来说,都具有头等重要的意义。

原油的有机成份

由于现代技术的不断发展,至今已经能够分离和确切地鉴定出原油中的许多成份。早期的工作感觉到还缺乏一种高效率的分馏设备,于是后来采用色谱分离法来分离芳香族化合物。近年来又出现了气液色谱技术,在分离、鉴定和定量分析原油成份等各个方面都比较简便、迅速和正确。

原油可以定义为天然界烃类的复杂混合物,它带有少量或痕量的含氧、含硫或含氮的化合物以及有机金属化合物。其中某些烃类的沸点很低,例如甲烷,在这种情况下,它一

部分溶解在原油中，另一部分则作为伴生气体而存在着。这种气态组份的多少取决于它所存在的总数量及其在石油中的溶解度。尽管与石油伴生的天然气通常是由甲烷、乙烷，丙烷和丁烷所组成，但也有一些天然气含少量高分子量的烃类以及二氧化碳，有时甚至含有氮气。

石油工业已经进行了许多年的原油分析，这促使一九二七年美国石油学会的第六项研究计划规定要研究商业石油馏分中化学成份的分离、鉴定和测量这一些课题。设立在华盛顿的国家标准局负责进行了该项研究，他们用俄克拉荷马州庞卡城油田布雷特六号井的原油作为代表性样品(罗西尼，梅尔，和斯特雷夫1953)。后来上述研究计划的对象又扩大到以人工合成纯烃来同石油中分离出来的烃类作对比研究。

到一九五三年为止，已经从庞卡城原油中分离和断定出一百三十种烃，一九五三年以后，又鉴定出若干新的化合物。同时其他国家的实验室也积累了许多有关从不同类型的原油中分离出来的烃类的定性和定量分析的数据。其中对苏联、中国、伊朗、和近东的石油都作了相当详细的分析。

迄今为止，从原油中分离出来的化合物还只是相当简单的，其中包括基本的烷族、环烷族和芳香族的化合物。也曾经鉴定过一小部分结构更复杂的多环化合物，例如金刚烷和一些二环辛烷等等，但是对润滑油馏分的复杂结构，知道得还十分笼统。在石油中，一部分化合物是由芳香基、环烷基和烷基结构混合构成的，那么其种类上可能有的数目几乎变为无限大，因此很少有希望能够断定出其中的任何一个。所以原油的高沸点馏分是以其物理特性来衡量的，它是指示芳香基、环烷基、烷基结构之间的比率关系的一条线索。这样，就有可能来估算每一个分子中所含有的芳香环、环烷环、和烷链的平均数目。对于这类化合物来说，具有相类似的物理特性的异构体其数目可以是如此之多，看来不大可能将其中任何一个分离出来并加以断定。

近年来由于开发了出产酸性天然气和含硫量高的原油的油气田，促使人们对这类石油中含硫化合物的性质发生更浓厚的兴趣。早期的工作也是在美国石油学会的支持之下，由得克萨斯大学负责进行的；最近美国矿务局和英国也展开了研究，而英国所研究的是伊朗石油。

从原油中已鉴定出来九十种含硫化合物。这些化合物包括噻吩、二环和多环等杂环化合物，以及硫醇和硫醚。

含氮化合物也曾经深入地研究过。这些化合物，除了吡唑(又名9-氮杂芴)以外，都是吡啶和喹啉的衍生物。特别值得注意的是原油中从未发现过脂族胺，尽管这些化合物在生物降解产物中是常见的。所以应当认为这些原先与石油伴生的化合物大概是被“环化”掉了。

化学家早就知道原油中有含氧化合物的存在，也曾经很详细地研究过它们的结构，从简单的含1~20个碳原子的脂肪酸到环状的环烷酸和芳香酸，例如苯酚和 β -萘酚。这些酸从类型上来看，异构物的种类极其庞大，尤其是环烷结构令人特别注意。这些化合物多年以来，一直引起人们很大的注意，但还只是近来才重新明白到，当天然界的烃类发生分异和再分配的时候，它们具有在化学势能上起媒介作用的重要意义。

此外，还在各种石油中鉴定出种类相当多或很多的噻啉单体；以及噻啉与钒和镍的络合物。近年来从犹他原油中又分离出酞酸二辛酯(菲利普斯和布雷格1958)；后来又在科罗拉多原油中也发现了这种化合物(皮尔斯等1958)。此外，在意大利原油中利用红外分光光度法也鉴定了这种物质(科郎博个人通讯)。据调查，这是在原油中业经鉴定的唯一的酯。至于与酞酸二辛酯有关系的酞酸，也曾经根据它与酚起作用，生成酚酞的反应而被鉴定出来(路伊斯个人通讯)。

有趣的是这些化合物，或者单独含氧，或者单独含氮，或者单独含硫，而未曾看到报导从石油中分离出同时含其中二种杂元素的化

合物。若把噻啉归纳到这些化合物中去,那么它们是例外,因为它们确实既含氧又含氮。

原油中的微量金属元素

在最近五十年中,化学家研究了从原油衍生而来的沥青物质和固体残渣中的微量金属元素。骚思威克(1951)在回顾这一方面早期的工作时,提到希韦特(1909)曾经在一八九四年分析过有机沉积物中的钒,希韦特是第一个在石油衍生物中发现钒这一金属元素的人。另一方面费斯特(1940)提供了赖芒迪一八八三年在秘鲁拉索科恰沥青矿床中发现钒的经过事实。这方面的工作从希韦特报告以后即开始活跃起来,并在本世纪初,导致对生物体中的钒展开了许多研究。最出色的贡献是由特雷布斯(1934, 1935, 1936)作出的,他发表了对原油中噻啉的研究成果,后来他的文章成为广泛引证的材料。近年来登宁和穆尔(1957)所进行的大规模研究,再一次强调了特雷布斯的工作和钒在含噻啉的原油中的意义,并认为它和石油的起源有关。

金属元素的定量分析工作,在原油炼制后的残余物中比之在天然沥青中,开展要晚得多。赫尔曼(1936)在原油经过热裂以后所形成的焦炭中发现含有0.2~0.7%的钴、镍、锡和钒。又在一个内燃汽缸中的白色灰烬中发现含0.15%铜、0.5%镍和2.5%钒。至于托马斯(1938)的资料,其性质与赫尔曼的资料是一样的。此后,韦耳兹(1946)还分析了24个不同来源的石油的焦炭灰份,发现主要的金属成份有硅、铁、铝、钙、镁、和钠、有时也有钒。但是这些物质说不定是来自炼制厂或来自锅炉和烟道的污染。

骚思威克(1951)和邦哈姆(1956)运用直接灰化原油的方法或在碳弧中使原油挥发的方法来分析金属成份。后者还提到施雷(1931)曾经发现高含量的钒和镍是与沥青基原油伴生在一起的。这一发现促使邦哈姆去研究俄克拉荷马州五个宾夕法尼亚纪原油中沥青质和这些金属元

素之间的关系。这些沥青质含量十分高的原油含有极其多的钒和镍。他研究的目的是:探索原油中微量元素的含量如何在地质上用以区别来自不同的盆地或油区的原油,和用以对比来自不同的油池的原油,以及用以重建这些石油生成和运移的环境条件。他一共研究了来自六个州的原油;在六十六个样品中,五十七个系来自俄克拉荷马州。邦哈姆又在塞米诺耳地区的地图上标出了各个油池所产的原油中钒和镍的含量。他认为这一成果表明金属元素的分布与古地理的走向密切相关,金属元素含量最高的地方是沿着古海岸分布的,而越到盆地中心则越为减少。

骚思威克(1951)提到海德(1938)和卡钦科夫(1948, 1949)曾经对原油灰分作过光谱分析。发现镍、铜、铬、铈最为普遍,其次是锡、铅、钼、钴。没有见到金、银、铀、镉、铟、铊。斯金纳曾经发现加利福尼亚州圣玛利亚出产的原油含有0.022%以噻啉络合物的形式出现的钒。

骚思威克所作的文章认为金属元素,特别是镍和铬,在原油的灰化过程中损失很大,他试图创造一种在原油中严密地定量分析这些元素的方法,但是失败了。他还详细地论述了应用电弧直接进行分析所可能产生的误差,及其分析上的限度。

事实证明骚思威克的见解是正确的,铬确实以料想不到的数量存在于许多原油中,其数值与镍相当,然而铬是以无机形式存在着。

骚思威克还对三个沥青基原油和一个非沥青基原油经过燃烧后的残渣进行了全面的定性分析。结果,这四个样品都含有铝、钙、铬、铜、铁、镁、镍、硅、银、钠和锌,而在其中三个沥青基原油中还发现有铅、锰、铷、锶、锡和钒。

骚思威克还引用了郎戈巴迪(1947)在阿根廷廷腊法埃耳的原油灰分中测定铀的数据,以及博戈亚伦斯基(1929)在俄罗斯二个地方的原油灰分中测定镭的数据。此外,贝耳等(1940)和提腊促(1941)曾用计数器测定了原油中的镭

和氢，发现氢的数量超过了它与镭取得平衡所应有的数量，可是他们没有测定铀。

在较近的综合性报导中，内耳森(1958)列出了对三十四个加利福尼亚原油，三十七个得克萨斯和路易西安纳原油，二十七米德康提嫩特和落基山脉地区原油，以及十八个其他国家的油田的原油，所作出的有关钒、镍、铁、铜和钠的分析数据。此外，又列出了六个样品中钒的含量与原油比重之间的关系。其中从委内瑞拉，巴恰夸罗原油(13° A.P.I.)含钒350 ppm到委内瑞拉，圣华金原油(41° A.P.I.)含钒2.4 ppm。内耳森(1959)还介绍了四十一个委内瑞拉石油中钒、镍、铁、铜、钠和铬的含量，而含钒最多的是博斯坎原油(10.1 A.P.I.)，其含量达1200 ppm

貝克和霍格森(1959)适得其时地报导了在加拿大西部的原油中镁的数量。这一文献具有重要的地球化学意义，拟在本文的下面几节里再行讨论；他们还研究过镁同钒和镍之间的关系(霍格森1954，霍格森和貝克1957,1959)。

儲油层的研究

在儲油层中，石油位于岩石的孔隙内，通常是位于海相砂岩砂粒间的孔隙内。如果是石灰岩则石油位于灰质碎屑之间的孔隙内，位于鲕粒或貝壳之间的孔隙内，以及位于有时是很大的空穴内。某些陆相碎屑沉积层中的石油，例如在俄罗斯巴库地区的阿契拉加耳上部砂岩和委内瑞拉，魁里的碎屑岩中的石油，都被认为是从下面的海相儲油层沿着裂缝作为通道而运移到陆相砂层中去的。在许多儲油层中，主要的孔隙是石灰岩或砂岩中的裂缝，在罕见的情况下甚至是变质岩，片岩和火成岩的裂缝。

孔隙内的流体并非全部是石油，而是包括了一部分通常被称为间隙水的卤水。这里石油和卤水都借助于它们同儲油岩石的固相质点之间的界面张力而分布着。通常卤水占据着较小的孔穴和管道，为相当大的毛细管力所擒住；因而大部分儲油岩，尤其是砂岩，是水润性的

(派克斯1949，第十七章)。

原油，作为儲油层的流体之一，含有被溶解了的天然气，其数量视压力，温度和烃类流体的数量和组成而定。如果天然气的数量不足以使它在原油中的溶解度达到饱和，则儲油层中只有液态流体。当天然气过剩时，则未溶解掉的天然气上升到儲油层的顶部，在不能渗透的盖层下面，形成一个气顶。此外通常在含油层的下面，有卤水充满着各个孔隙，这就叫做底水。油田边缘的卤水，则叫做边水。

在儲油层被钻穿而导致压力发生变化之前，流体系统的起始状态相对于开采时的条件来说，基本上处于平衡之中的。在压力和温度较低的浅层油田中，比之在较深的油田中，其儲油层的流体在性质上有所区别；当深度超过六千英尺左右时，按照烃类组成的不同，儲油层中的流体有时会出现临界状态；在那种场合下，凝析油气田的气态产品里就含有少量溶解在气体中的液体。天然气田有出产不含液体组份的干气的，也有出产含有少量天然汽油的湿气的。由此可见，在油田的儲油层中，石油在物理和化学性质上的巨大变化(珀森1958)需要用地球化学来作出解释。

这一问题曾被看作为：是由于生成石油的母质有所差异，是由于石油从儲油层外界的母岩运移到儲油层的过程中所发生的变化，以及在较罕见的情况下，也会是由于在儲油层中石油发生了再分布而造成的。油田的地质特点表明，流体聚集到儲油层的过程是在不太长的地质时期以内完成的。所以儲油层中流体组成的变化和趋向成熟，被推断为是在古老的油田中经过长时期而达到的。不过这一过程很难与早一些时期的影响区分开来，尤其是因为某些儲油层中由于外来的流体会使其组份发生缓慢的变化(赫伯特1953，亨特1953)。但是尽管如此，不少的研究人员还是研究了这个问题。巴尔顿(1934,1937)在早期的一系列工作中，计算了在原油分析中，沸点处于例常范围内的各个馏分的百分含量，按照这一数值

和 A.P.I. 比重指数, 来对比湾岸地区深度为 3000~5000 英尺和深度为 5000~7000 英尺的原油, 所对比的原油具有同一的性质和相应的年代, 都是属于中新世, 渐新世和古新世的。结果证实原油的变化很明显地与储油层的深度和年代有关系。随着储油层的深度和年代的增加, 原油发生了渐进的变化, 环烷基原油开始逐步过渡, 到了深部古新统地层中已经变为几乎是烷烃基原油了。同时原油中低沸点馏分的含量也是随着深度和年代的增加而增加的。

巴尔顿指出决不能用深部的轻质石油向上运移或其他表层的因素来解释上述的变化。他认为上述的变化说明了重质原油是在时间和某些因素的影响下, 或在表层下面与深度有关的一些因素的影响下, 蚀变为轻得多的原油。他所提倡的理论是: 湾岸地区储油层中所有的原油的前身, 是重质环烷基石油, 而它们性质的变化与深度和时间成正比的关系。

上面所观察到的这些原油的演化, 是向着氢和碳的比值逐步升高的方向进行的, 这一资料为驳斥认为热裂反应是演化过程中的主要反应的说法提供了证据。巴尔顿赞成用甲基化反应来解释这一演化过程最为讲得通。他并且提出普腊特的同时代的文献作为参考。

普腊特(1934)观察到石油在其原产地的演化过程中, 其氢—碳比值是逐步增加的。这一作用至少就最终效应来说, 颇类似于工业上的氢化过程。他认为氢的来源是通常与液态石油相伴生的甲烷。

貝耳, 古德曼和怀特黑德(1940)对石油进行了放射性成份的测量。他们发现得克萨斯和俄克拉荷馬州原油中的氢的含量为 0.47×10^{-12} 到 0.05×10^{-12} 计数/克, 等于与其中的镭取得平衡所需要的数值的十倍左右。这样的放射性强度足以使石油在地质时期内由于小粒子的辐射而引起石油中的烃类发生一定的化学变化。同时这种反应还会产生相当数量的氢(怀特黑德 1954), 尤其是从重的沥青物质中产生氢更为容易。这些氢可以满足巴尔顿和普腊特

所推断的石油在演化过程中对氢的需要量。

α 粒子辐射是石油形成过程中化学反应的源泉的说法, 遭到布鲁克斯(1931, 1948)的反对, 主要的理由是: 与石油相伴生的天然气中很少看到有氮气的存在。既然最终成为氮原子的每个 α 质点可以促使生成 100,000 个烃分子, 那么氮的数量之少是可以推想而知的。

貝耳等人所测定的不多的几个原油的放射性强度尚待进一步验证, 尤其需要对未经采样的油田进行验证; 他们没有测定过天然气中所含的氮, 但是这一部分的氮也应当同原油中的氮合并在一起来计算储油层中流体的氮的含量。

进一步探索放射化学对储油层中原油演化的作用, 仍然具有地球化学的意义, 因为原油在储油层中居留的时间远远地长于它原先在生成和运移至储油层的过程中所需要的时间。在储油层居留的这一段时期里, 其流体中所含有的氮肯定会促使某些烃类的生成。

普腊特提出金属触媒剂, 特别是镍和钒的氧化物, 在石油演化过程中的烃类反应中所起的作用, 然而骚思威克主张要注意铬的触媒能力, 他认为以铬作为触媒剂比钒或镍更为合适。

布鲁克斯(1948)曾经研究过表面活性触媒剂, 他测定了俄克拉荷馬和其他地方的沉积岩和某些矿物使松节油发生聚合的作用能力, 其成果如下:

矿物和岩石	聚合物%
漂白土, 乔治亚	75
司耳凡页岩	76
红层粘土	65
第三纪粘土	68
绿砂, 新泽西州	72
绿砂, 得克萨斯	70
灰色波斯砂岩	56
斯坦利页岩	57
雷阿干砂岩	50
卡耳文砂岩	46
辛普生砂岩	34

二迭纪砂岩	30
膨土岩	34
铝土矿, 乔治亚	58
高岭土	12

布鲁克斯认为上述的成果, 和某些未包括在内的成果, 以及利用漂白土、人造物质, 和铺在二氧化硅上面的铝所进行的一些实验(盖耶 1933) 都说明烷烃是烯烃所形成的, 并且烃分子的异构化和裂解是在远低于热裂温度的温度下就开始迅速地进行。据报导从所谓“烃类分散体”来看, 上述实验的产品与典型的石油是相同的。

布鲁克斯所得出的结论是: 漂白土和其他表面活性触媒剂的作用都证明, 从石油的复杂性反映出来的其所经历过的许多变化, 可以是在存在着这一些触媒剂的情况之下发生的。如果就温度条件来说, 没有这些触媒剂, 烃类原先是比较稳定的。现在再谈一谈有关巴尔顿的工作情况。他曾经提出: 在湾岸地区的砂质储油层中, 表面活性矿物, 例如粘土矿物, 可能是使石油随着年代和深度而发生变化的一个因素。更进一步的推论是: 在石灰岩储油层中, 石油应当很少发生变化或者不发生变化, 因为在那里表面活性触媒剂很少或者甚至没有。

地质学家们曾经认真地考虑过布鲁克斯的见解, 并且在有关研究储油层中石油所发生的变化许多场合下, 引用了布鲁克斯的论点。但是总的来说, 他们的结论并不赞同布鲁克斯的见解, 可是他们的论述通常没有能够以实验工作作为基础。然而, 粘土矿物学中现代化方法的出现, 以及有关表面现象的知识的增长, 都使得进一步针对布鲁克斯的观点作检验论证已成为一个令人瞩目的研究领域。必须指出的是: 在油田的储油层中所存在着的体系, 比之类似粘土的固态物质和液态烃类远为复杂, 因为其中的粘土浸渍着盐水。

亨特(1953)曾经进行了广泛而谨慎的研究, 他分析了怀俄明州一百八十个油池的原油, 并与地层的因素联系起来。他在详细描述地层

的基础上所作出的结论是: 这些资料既不符合于布鲁克斯的见解, 也不符合于巴尔顿的结论。许多事实表明怀俄明原油的化学组成和它们接近地表有关, 很可能因为其中的轻质组份已经以油苗的形式损失掉了。这种关系在湾岸地区并不存在。

在怀俄明州有许多油苗, 其储油层的盖保岩的性质正是这许多油苗之所以出现的一个重要因素。

亨特的结论: 认为怀俄明的原油和地层之间存在着多种关系; (1) 环烷族和芳香族含量较多的原油与化学沉积物、碳酸盐、硫酸盐等盐度较大的沉积环境有关, (这些原油反映了氢的数量不足); (2) 芳香族和环烷族含量较多的原油产于盆地内靠近海岸的地带由碎屑沉积物所形成的储油层中, 并与砂一页岩比值较高的沉积物伴生在一起; (3) 在宾夕法尼纪的太因斯累普储油层中, 原油的化学组成与埋藏深度有关。根据上述的结论, 亨特认为在原油之间比较重要的差异, 主要是由于母质和沉积环境的不同所造成的, 而埋藏深度仅为次要的因素。

贝克和霍格森(1959)在讨论加拿大西部原油中镁、钒和镍的变化的意义时, 不仅列出了十三个白垩纪原油, 五个侏罗纪原油, 三个下石炭纪原油和十三个泥盆纪原油的金属元素含量, 而且还列出了镁同钒和镁同镍的比值。所有这些微量金属元素都随着储油层的年代的增长和石油的成熟而逐渐减少; 但是可以在图表上清楚地看到, 储油层中镁的损失速度低于钒或镍。这一资料显然说明, 尽管在储油层的流体中, 镁的含量不及钒和镍, 但是, 在漫长的地质时期内, 在大面积的储油层中进行着的石油的成熟过程, 对于镁的影响相对来说要比较小一些。贝克和霍格森在这一方面的研究, 为全面地了解微量金属元素在储油层石油的演化过程中所起的作用树立了新的里程碑。

石油的运移

在孔隙性的介质中, 流体运移的物理过程,

已为大家所熟知。沉积物中的流体主要是水，在海相沉积物中常常是盐水，其次是数量较少的石油和天然气。韦勒(1959)考察了碎屑沉积物随着埋藏深度而逐渐致密的过程，他提到黑德伯格(1926, 1936)曾经研究过米德康提嫩特和委内瑞拉的油井中粘土和页岩的重力致密作用。在泥浆、粘土和页岩中，位于间隙内的流体不断地被挤出去，直到沉积的颗粒和胶体质点相互接触为止。在砂层和砂岩中致密的可能性要小得多，因为其中几乎不发生胶体效应，并且颗粒间的孔隙度比较低。在砂质岩石中，包括砂质的和钙质的砂粒碎屑岩在内，颗粒间的相互支撑作用保持了它的孔隙度与渗透性。

韦勒指出对于石灰岩的致密过程还了解得很不够。大部分的钙质沉积物的原始孔隙度大于砂层，但是绝大部分石灰岩都很少呈现出有密度增加的迹象。它们的固结作用，似乎通过胶结物在颗粒之间的沉淀，而于成岩作用的早期阶段业已完成。

具有渗透性的层位或在地质上出现得比较少的断层带，在发生致密作用的阶段和致密了以后的时期以内，为流体的运动提供了通道。赫伯特(1953)指出：石油和天然气是在水达到正常饱和度的环境下发生运移的。如果其中的水是处于静止状态，那么周围的流体平衡条件就完全符合流体静力学的原理，石油和天然气可以地区性的沿着水平的层面运移和聚集到顶部位置，而密度越小的流体就越浮在最上面。这就是经典构造理论中的一个常见的条件(豪威耳1934)。如果其中的水是处于非垂直方向的运动之中，那么它对于石油和天然气的推力就不再是平行的了，以致这二种流体的运移方向就有所不同。在体系处于流体动力学的条件下，随着石油和天然气的积聚，必然出现油同水或气同水的倾斜界面。

赫伯特证实几乎在每一个产油地区都能找到符合于流体动力学的条件，因此，在涉及石油的运移或再分布的场合下，他所提出的物理学原理已成为地球化学家进行研究的一个可靠

基础。

鲁夫和勒瑟福德(1958)在论述石油运移的机理和速度的各种见解时，总的来说是同意赫伯特的观点的；即必定有一种机理能够将石油的具体的运移概括进去：无论是呈单相运移，还是在气态天然气的存在下呈多相运移；无论是通过静止的水进行运移，还是与运动中的水一起运移。他们认为在发生致密作用的早期阶段，石油运移的速度是相当高的，因为这一作用及其伴随而来的水的运动，一般是随着时间而不断地减弱的。地质学家们，根据野外资料及晚第三纪储油岩的年龄，估计储油层中的流体要充满这一储油层所需要的时间是一百万年到一千万年。这一推断应该进行验证，尤其是应该用流行的地球化学方法去验证它。

曾经在某些油田内研究了石油运移的方向及其再分布的情况。对于储油层位在顶部尖灭而封闭的地层型储油层来说，例如在俄克拉荷马州和格冷潭以及得克萨斯东部的油田内，石油和其中溶解的天然气肯定是沿着这些下倾的地层从盆地内部进来的。上述的二个油田都是从西面进来的。然而在绝大多数对称的储油构造和背斜油捕之中，以及在沙坝或礁堤之中，则无法作出这种地质上的判断。

近年来，在这一类储油层的科学研究方面，地球化学已经取得了成就，俄克拉荷马州的塞米诺耳地区可以作为一个著名的例子，那里的油池位于沿着洪通穹起脊部而分布的对称的砂岩岩穹中。对于这一些油田，邦哈姆(1956)通过图表说明了那里的原油中的钒和镍的高含量等值线基本上平行于该地区产油的走向线和下宾夕法尼纪沉积盆地的海岸线。这些原油沿着西部边缘在古地理上紧接于宾夕法尼纪靠近海滨的浅水地带，并且距离它们原先的母岩不远。向东，原油中钒和镍的含量有所下降，并且就在大约二十英里以外的地方，如果仍用原来的方法就已经不再能够测量出原油中的这二种金属元素了。是否是由于这些东部的原油曾经由西向东进行了运移，并且被粘土或岩石中的其

他成分所选择吸附而损失了较多的原先所含有的钒和镍；抑或是由于其来源与西部的原油不同，原先就只含有现在那样多的金属元素；其答案并不清楚。邦哈姆认为，即使不考虑从微量元素分布而作出的这种解释，它们与古地理的走向也确实有关系，并且这一关系具有一定的意义。

霍格森和貝克(1959)应用某些方面类似于邦哈姆的方法进行了研究，他们很详尽地探索了有关阿尔伯达西部四个油田的地球化学问题，并且将每个油田的许多原油样品，按照密度(A.P.I.比重指数)，硫、沥青质、胶质的含量百分比、钒和镍的含量以及钒和镍的比值，列出了一张很长的分析单。除了这些分析成果以外，还在论述中特别强调了分析数据的性质与原油样品采样地点之间的关系。

根据他们的陈述，位于阿尔伯达东部和萨斯喀彻温西部的洛伊德明斯特油田是一个由黑色重质原油聚集而成的大油田。那里有十一个深度不大的小油池，位于清洁而又未固结的小区域砂层之中。这些砂层系下白垩纪砂层，而四周的页岩则区域性地向西南方向平缓地倾斜。尽管油的埋藏量很多，但是最终可以一次回收的原油数量却很一般，因为原油的A.P.I.比重指数低而粘度大。

洛伊德明斯特油田的十二个原油样品的分析成果并非是无可争论的，不过总的情况是各个油井之间的变化明显，但是还不算太大。这一方面它与麦克缪腊里油田(斯科特等1954)有所相似。洛伊德明斯特油田的分析成果，也象麦克缪腊里油田那样的不规则，这一点表明上述的二个油田仅仅是在这二个地区就地形成的，而不是大规模的全面性的运移所造成的。

雷德沃特油田与洛伊德明斯特油田就大不相同。其轻质原油是从泥盆纪的石灰岩礁中开采出来的。原油聚集在倾斜的岩礁的上缘，位于含水层的上面。这一岩礁坐落在埃德蒙顿的东北面，它倾向西南，是向西南方向延伸着的一连串岩礁中的一个。

雷德沃特油田的分析数据在各个油井之间也同样有明显的但是不大的变化。其中镍的含量和有关的数值，从西北到东南，相当强烈地显示出均匀地升高的趋向。雷德沃特的成果可以解释为原油系从南面运移而来，但是这一资料不够十分清楚，因为硫的资料与金属元素的资料总的来说并不一致。

在埃德蒙顿南面一百英里左右的焦弗雷油田，原油是从下白垩纪魏金砂层和白垩系底部的砂层以及泥盆纪尼斯科(D-2)灰岩中开采出来的。目前，主要储油层是魏金砂层。焦弗雷油田的原油有二个有趣的特点。第一个特点是在雷德沃特的分析成果里所显示出的趋向在焦弗雷也同样存在，并且明显得多。雷德沃特的数值的变化约为50%，而焦弗雷魏金原油则近乎100%。金属元素、沥青质、胶质、和硫的数值，在沿油田的东北边较高而西南边较低；比重指数则沿东北边低而沿西南边高。第二个特点是魏金和尼斯科这两个储油层中的原油分析成果并不一致，所显示出的变化的方向的不同说明二者之间的古地理条件是不同的。

钒和镍的数据在二者之间没有差别，但是沥青质、胶质、和硫的数据则在二者之间有所不同。魏金原油的含量等值线是西北——东南向的，尼斯科原油的含量等值线是南北向的。魏金砂层的开采情况说明原油是从西南向东北移动。而尼斯科原油是由西向东运移和聚集的，并在原油的性质上与魏金原油有所区别。

彭比纳是所研究的第四个大油田，同时也是北美洲最大的油田，它位于埃德蒙顿东南约七十五英里。其主要的采油层是上白垩纪卡迪翁姆砂层，这一砂层系由三层砂和一层砾岩组成，并且是在上白垩纪的海进和海退的旋迴中沉积下来的。一共分析了六十八个卡迪翁姆原油样品，从而获得的数据表明，在其余较小的油田之中所显示出来的趋向在这里发展到十分强烈的程度。在雷德沃特的变化范围是50%，在焦弗雷的变化范围是100%，而在彭比纳卡迪翁姆的变化范围却上升到十倍左右。曾将彭

比纳卡迪翁姆的原油样品，按照每一个分析项目，等分为高值、中值和低值三个类别。这个油田的各个分析项目的数据都一模一样地在东北面是高值区，在西南面是低值区，而中间是中值区。

在彭比纳油田内的卡迪翁姆储油层面积超过三十三万英亩，在加拿大阿尔伯达州，其余的卡迪翁姆原油是从分布面积在五百万英亩以上的许多小油池中开采出来的。这些小油田中的绝大部分都已经采集了石油样品和作了分析。结果表明在小油池中的原油和彭比纳原油一模一样，并且从这边的油井到那边的油井，其变化的趋向也同彭比纳是一致的。最重要的是在彭比纳油田中所显示出来的北东——南西的走向同样地扩展在整个散布在五百万英亩的面积上的卡迪翁姆含油层中。

因此，彭比纳卡迪翁姆原油从东北向西南的运移，是阿尔伯达州卡迪翁姆原油在大区域范围内按着这一个共同的方向而运移的一个部分。

普腊特(1934)，巴尔顿(1937)和布鲁克斯

(1948)还谈到石油在运移路途中所经受的反应。他们认为在石油向储油层运移的路途中，吸附效应及胶体的其他表面现象对石油具有一定的影响。这在前面已经讨论过了，这里不再重复。对于一些重质组份由于难以运移而滞留下来的事实，似乎已经很少有争论了，但是由于在浸水的粘土胶态体系方面还缺乏实验数据，现在还不能够明确地阐明表面活性触媒剂的效应。

邦哈姆(1956)在有关塞米诺耳原油的运移问题的讨论中曾经提到吸附作用，而霍格森和贝克(1959)认为彭比纳原油聚集的周围环境，总的来说，与邦哈姆所叙述的完全相同。他们声称：他们在实验室条件下所获得的试验结果，符合于有关在原油运移和再分布的过程中沥青质、胶质、钒、镍和含硫化合物为多孔的固相物质所吸附的说法，但是这仍然不够完善。地球化学界还希望能够作出更多的资料来阐明这一个问题。

(张义纲译自1963年版《有机地球化学》)

毛主席语录

一切反动派都是纸老虎。看起来，反动派的样子是可怕的，但是实际上并没有什么了不起的力量。从长远的观点看问题，真正强大的力量不是属于反动派，而是属于人民。

《和美国记者安娜·路易斯·斯特朗的谈话》