

石油工业干部科技学习丛书

石 油 的 成 因

张厚福 编

石油工业出版社

目 录

一、石油成因的两大学派	1
二、石油有机生成的现代科学概念	3
(一) 生成油、气的原始物质	3
(二) 生油环境	6
(三) 生油层系	9
(四) 石油有机生成学说的新发展	12
1. 近代沉积中生油过程的研究	12
2. 有机质成熟度的研究	15
三、与石油成因有关的几个问题	21
(一) 海相与陆相生油条件的对比	21
(二) 石油和天然气在成因上的关系	24
(三) 石油、油页岩、煤在成因上的关系	25
思考题	28

石油和天然气都是宝贵的能源和化工原料。尽快查明和开发我国丰富的油气资源，提前创建十来个大庆油田，促进石油工业的发展，是建设社会主义现代化强国的迫切需要。那么，到何处去寻找油、气藏？怎样去寻找油、气藏？要解决这些问题，首先必须了解石油及天然气是怎样生成的。只有当人们在实践中，不断总结油、气生成及其以后的活动规律，进而认识油、气的形成及分布规律，才能正确指出找油方向，多快好省地找到油、气藏。

一、石油成因的两大学派

人类对于石油及天然气成因的认识，是在勘探及开发油、气藏的实践中逐步加深的。由于石油及天然气的化学成分比较复杂，又能流动，现在发现的油、气藏往往不是它们出生的地方，这就为研究油、气成因问题带来了许多复杂性。因此，长期以来，关于油、气成因问题，曾有过许多激烈争论。

从十八世纪七十年代以来，对油、气成因问题的认识可归纳为两大学派，即无机生成学派和有机生成学派。

（一）石油无机生成学派

石油的无机生成学派，在十八世纪末至十九世纪中叶曾盛行一时。这一学派认为石油及天然气是由无机物变成的。其中著名的有碳化物说和宇宙说。前者根据实验室分析认为地球核部的重金属碳化物和从地表渗透下来的水作用，可以产生烃类；后者认为当地球处在熔融状态时，烃类就存在于它的气圈里，随着地球逐渐冷凝，烃类被岩浆所吸收，凝结于地壳中而成石油。

至二十世纪五十年代，苏联地质界又兴起了无机生成的思潮，以H.A.库得梁采夫为代表，提出了岩浆说，认为石油是在基性岩浆中生成的。

但是，近二十多年来，随着世界油、气勘探的发展，随着石油有机地球化学的广泛应用，油、气有机生成的证据越来越多。

（二）石油有机生成学派

二十世纪以来，石油有机学派占了优势。但因对生油原始物质的看法不同，出现动物说、植物说及动植物混合生成说；因油、气生成环境不同，出现海相生油与陆相生油的争论。现在，可以认为生成石油及天然气的原始物质既有动物、也有植物，而以低等微生物为主；生成油、气的环境既可以是海相，也可以

是陆相。

二、石油有机生成的现代科学概念

二百多年来世界石油勘探的实践，积累了丰富的实际资料，大大促进了石油成因理论的发展，使石油有机生成的现代科学概念逐渐系统和完善。

原始有机物质在还原环境下，通过细菌、热力、压力、催化剂和放射性元素等作用，逐渐转化为石油和天然气。

（一）生成油、气的原始物质

石油及天然气来源于有机物质。地壳上动、植物种类繁多，化学成分又极为复杂，近来在许多活着的有机体中发现石油烃类及其有关烃的化合物，更加深了人们对生成油、气的原始物质的认识。

目前，世界上已发现的油、气田，99.9%以上都分布在沉积岩中，而极少量储藏在岩浆岩和变质岩中的油、气，也是从附近沉积岩渗流进去的。这个事实雄辩说明，石油和天然气是在沉积岩中形成的。地壳上各时代沉积岩都含有石油及天然气，但含量很不一致，油、气在地质时代上分布的广泛和不均衡性，正好同沉积岩中有机物质的分布状况基本吻合（图1）。这表明石油与有机物质有着成因上的内在联系，即石

油来源于有机物质。

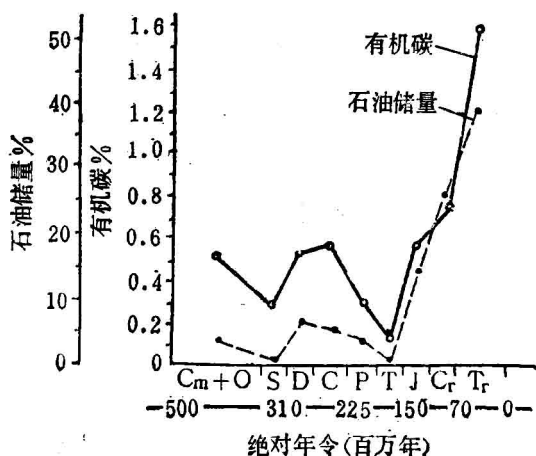


图 1 沉积岩中石油工业储量
与有机碳含量关系图

在实验室分析沉积岩中的有机物质和石油，发现它们的化学成分既相似又有差异（表 1）。从表中元素组成的重量百分比看出，二者都是以碳和氢为主，其次是氧、氮、硫。其不同之处在于石油所含碳、氢比有机物所含的多，而氧的含量则相反。这种化学成分上的相似性，说明了石油同有机物质在成因上的密切关系，而差异性恰恰反映了有机物质向石油转化是一个碳、氢不断增加，氧不断减少的过程，或者说是一个去氧加氢富集碳的过程。

表 1 沉积岩中有机物质和石油的
元素含量对比表

元 素	沉积岩中的有机物质	石 油
碳	52~71%	83~87%
氢	7~10%	11~15%
氧	15~35%	痕迹~4%
氮	4~6%	痕迹~4%
硫	—	痕迹~4%

有机化学研究表明，包含在动、植物中的主要有机物质，如旦白质、碳水化合物、脂肪等，在实验室里都可以变成类似石油的液态烃。在很多活着的生物中发现的石油烃类，被认为是有机体中的类脂化合物。这些有机物质都是生成油、气的原始物质。

此外，在石油中还发现了有些特殊的有机化合物，例如卟啉族化合物，是由动物的血红素和植物的叶绿素形成的；大部分石油具有旋光性，是由动物性胆甾醇和植物性甾醇引起的。这些都证明了石油和有机物的密切关系。

总之，石油和天然气的地质分布及它们与有机物在化学成分上的相似性，都表明油、气同有机物质有着密切的亲缘关系。这种亲缘关系充分说明油、气是

有机物质变成的。所以，丰富的有机物质是生成石油及天然气的物质基础。

（二）生油环境

由上可知，有机物质转化为石油是一个去氧加氢富集碳的过程，这说明油、气生成必须是在还原环境里进行的。没有适当的环境，有机物质不可能保存下来，例如，把有机物质（各种生物尸体）暴露在空气中，时间长了就会慢慢被氧化，即通常称为腐烂。氧化后生成气体跑到空气中，剩下一些残渣。所以，有机物质必须在比较广阔的长期被水淹没（海水或湖水）的低洼地区沉积下来，水体起了隔绝空气的作用。即使水中有一定量氧气，但这些氧气氧化一部分有机物质而消耗以后，其他大量有机物质就能够被保存下来。因此，在地质历史中，曾经是浅海、海湾、泻湖、三角洲和深水内陆湖泊等古地理区域，都是生油的有利地区。确定这些低洼地区的存在，是根据分布在这些地区的沉积岩特征得来的。

在浅海、三角洲、湖泊等低洼地区的周围和水体中，要使大量生物繁殖，特别是微生物的繁殖，就必须要求有良好的古气候条件。生物学研究证明：年平均温度高、日照时间长、空气湿度大，都显著增加了生物的繁殖能力。所以温暖潮湿的气候有利于生物的

繁殖和发育，是生油的外界条件之一。古气候条件可以根据岩石性质及化石特征来综合判断。

最后，还需要从陆地经常输入大量泥砂或其他矿物质，到浅海、三角洲或湖泊中去，迅速把从陆地输送来的和水体中死亡的生物遗体埋藏起来，形成与空气隔绝的还原环境，从而不让它们腐烂成气体向空气中散失。这就要求这些低洼地区，随着地壳的运动，边沉降边沉积，即陆生和水生的生物死亡以后同大量泥砂及其他物质一起沉积下来。沉积盆底不断沉降，一层层沉积物逐渐加厚，新沉积物覆盖了老沉积物，沉降多少，沉积物厚度就增加多少。长期保持一定水深，也就能长期成为还原环境。这样，才可能有极其丰富的有机物质被保存下来，并在还原环境中向油、气转化。我国华北地区在震旦亚界上万米海相沉积和古生界两、三千米海相及海陆交互相沉积后，又发育数千米中、新生代湖相沉积，拥有丰富的油、气资源。这样厚的沉积岩系显然是在边沉降边沉积过程中形成的（图2）。

总之，还原环境是有机物质堆积、保存并向油、气转化的必要外界条件，还原环境的形成和保持则需要有良好的地理条件、气候条件和地质条件。

概括起来，生成油、气的原始材料是有机物质，

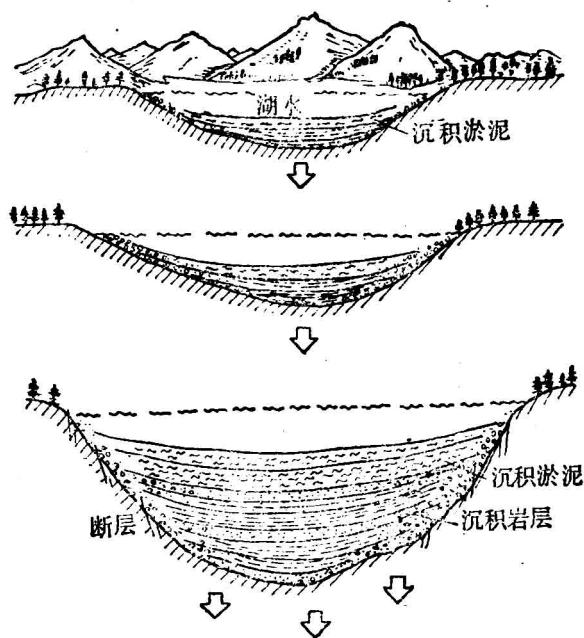


图 2 沉积盆地边沉降边沉积的剖面图

既有陆生的，也有水生的；既包括动物，也包括植物，而以繁殖量最大的低等生物为主。有机物质从陆地搬运而来，或从水体中沉积下来，同泥砂和其他矿物质一起，在低洼的浅海、三角洲或湖泊中沉积下来，形成淤泥，称为有机淤泥。这种有机淤泥被新的沉积物覆盖，造成了氧气不能自由进入的还原环境。随着沉积盆地不断沉降，沉积物不断加厚，有机淤泥所承受的压力和温度不断增高。同时，在细菌、压

力、热力、催化剂、放射性元素等作用下，处于还原环境中的有机物质逐渐变成石油和天然气。这是一个漫长的复杂转化过程，一直持续到有机淤泥经过压实和固结作用而变成沉积岩石，形成生油岩层。这个过程在时间上往往经历了数百万年。从委内瑞拉东部夸仑夸尔油田上新-更新统岩层中发现了值得开采的石油矿藏、苏联巴库更新统“巴库组”及“阿普歇伦组”发现工业性油流、美国加利福尼亚夏陆油田从上新-更新统产油等事实说明，从有机质变成石油并聚集成油藏所需的时间，最快大约不到一百万年。

（三）生油层系

能够生成石油和天然气的岩层称为生油层或生油母岩。在一个沉积盆地的发展过程中，石油往往是在稳定沉降时期的产物。在一定地质时期内，若干个生油层和其间的非生油层组合而成生油层系。如大庆地区白垩系的伏龙泉组和青山口组就是两套主要的生油层系。

生油层主要是由暗色泥岩、页岩、泥灰岩及各种石灰岩组成。它们的岩性特征详见表2。

这些生油层多形成于长期稳定沉降、气候温暖湿润、生物繁盛、水体安静的还原环境。这种环境可分布在内陆深水湖泊、三角洲、泻湖、海湾及浅海陆棚

表 2 生油层的主要岩性特征

生油层 类型	岩石类型	颜 色	结 构	层理	自生 矿物	化石	油气 显示
泥 质 岩 类	泥岩、页岩 为主，次为砂 质泥岩、泥质 粉砂岩	灰黑色 深灰色 灰绿色	泥级 粉砂级	页状 厚层 块状	富 含黄 铁矿	丰 富	或有 原生油 苗
碳 酸 盐 岩 类	生物灰岩 礁灰岩 泥灰岩 石灰岩	灰黑色 深灰色 褐灰色 灰 色	隐晶 粉晶	厚层 块状 中层状 次之	含 黄铁 矿	丰 富	或有 原生油 苗

区域。

近年来，随着石油有机地球化学的发展，在实验室内可以用近代化的仪器，分析生油层各项指标。包括反映生油层内有机物质含量、氧化-还原环境及向石油转化程度等方面的地球化学指标。例如，剩余有机碳、可溶性沥青、烃类含量及其族组成、异戊二烯系烷烃、正烷烃奇偶优势比、芳香烃结构分布指数等等*，国内外都已开始广泛采用。但其中尚有不少问题，有待进一步研究。

* 国内外开始广泛采用不少新的地球化学指标来研究生油层，现择其主要者简介如下：

剩余有机碳含量：系指岩石中残留的有机碳含量。因生油层内油、气生成后，岩石中残留下来的有机质中的碳含量，就是今天实验室所

能测定的数值，故称剩余有机碳含量（%）。它在粘土岩中 $\geq 1 \sim 2\%$ 、碳酸盐岩中 $\geq 0.1 \sim 0.2\%$ 时，即可列为生油层。由于岩石中剩余有机碳与剩余有机物质含量之间存在一定比例关系，故用剩余有机碳含量乘以1.22（或1.33）即为岩石中所含剩余有机物质总量。

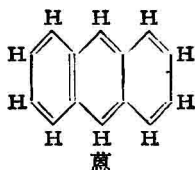
可溶性沥青含量：岩石中溶解于有机溶剂的物质，称为可溶性沥青。这些溶剂可以是氯仿、苯、丙酮等等。有机溶剂从岩样中抽提出来的沥青重量与岩样重量之比，即为可溶性沥青含量。若用氯仿当溶剂，则抽提物含量就是常说的氯仿沥青“A”。

烃类含量及其族组成：指可溶性沥青中的总烃含量及其中的正烷族、环烷族、芳香族烃的含量。总烃含量高、正烷烃含量也高，表明有机质向石油转化程度高；反之，若非烃含量高，则说明转化程度低。

另外，可溶性沥青含量/剩余有机碳含量、总烃含量/剩余有机碳含量两个比值，也是常用的转化程度指标。

正烷烃奇偶优势比：岩石抽提物中正烷烃奇、偶碳原子数之比，称为正烷烃奇偶优势比。生物体内最丰富的正烷烃一般是 C_{27} 、 C_{29} 、 C_{31} 和 C_{33} ，所以生物体中的正烷烃中奇数碳原子数必然大于偶数碳原子数，即存在明显的奇偶优势比；而原油中奇数碳原子只有微弱的多数。所以，岩石的有机抽提物中，正烷烃奇偶优势比 < 1.2 ，即奇数碳原子数略占多数，代表岩石中的有机物质向石油转化程度高，可列为生油层。这项指标在鉴定粘土岩生油层时效果较好，对碳酸盐岩效果较差。

芳香烃结构分布指数：对粘土岩和碳酸盐岩生油层都适用。在含18个碳原子（至少是10个碳原子）以上的稠环芳香烃中，苯环上两类初级氢原子数之比值，称为芳香烃结构分布指数。第一类初级氢原子，是指直接和苯环上碳原子相连接的1~2个相邻的氢原子；第二类初级氢原子，则是指直接和苯环上碳原子相连接的4~5个相邻的氢原子。例如蒽的结构式中，中间的苯环属第一类，两侧的苯环属第二类，前者有2个初级氢原子，后者有8个初级氢原子，则蒽的结构分布指数应为 $2/8 = 0.25$ 。一般岩石抽提物的芳香烃结构分布指数都小



于0.8；当这项指标达到0.8~1.4时，即可列为生油层。

异戊二烯系统烃：是由异戊二烯加氢聚合而成的一组异构烷烃化合物。六十年代以来，在原油和沉积物中陆续发现了 $C_9 \sim C_{25}$ 异戊二烯系统烃，其中的2,6,10,14-四甲基十五烷称姥鲛烷，2,6,10,14-四甲基十六烷称植烷，后两者最丰富且最稳定。它们几乎在每个原油和生油岩样品中都有，运移作用又不会改变其相对含量，所以是研究原油和生油岩之间关系，追踪石油运移途径的良好对比标志。在国外已利用姥鲛烷/植烷、姥鲛烷/正17烷、植烷/正18烷、姥鲛烷+植烷/正17烷+正18烷等等比值来对比原油和生油岩的关系，其中以姥鲛烷/正17烷效果最好。此外，将异戊二烯系统烃结合其他地质特征，还有助于判别沉积环境。

应该指出，上列各项指标多属开始广泛采用，其中尚有不少问题有待深入研究。

(四) 石油有机生成学说的新发展

近二、三十年来，随着自然科学的迅速发展，随着各国油、气勘探工作的蓬勃开展，石油有机生成的科学理论也在日趋完善。归纳起来，在下列两方面进展较快：

1. 近代沉积中生油过程的研究

前已谈到石油和天然气是有机物质沉积在浅海、三角洲或湖泊等低洼地区，在还原环境下成岩过程中生成的。现代地球上广泛分布着浅海、三角洲或湖

泊，在这些低洼地区的近代沉积物中是否存在着丰富的有机物质？是否存在着油、气生成的条件和过程？用“将今论古”的对比方法，研究近代沉积物中的生油条件和生油过程，将会更加充实和完善人们对地质历史上油、气生成的认识。我国石油地质工作者对青海湖及洞庭湖的近代沉积物进行了研究，美国 P.V. 斯密施对墨西哥湾、G.T. 菲利皮对加利福尼亚岸外陆棚、苏联 B.B. 维别尔对里海、黑海及谢万湖的研究，都取得了宝贵成果，归纳起来有下列几点：

1) 在这些海相和湖相的水体及近代沉积物中，确实存在着大量有机物质。如我国青海湖中，除有丰富的鱼类外，还有较多浮游生物和底栖生物，特别是微生物硅藻占75%以上。据统计，黑海有100万吨鱼、1500万吨浮游生物和4000万吨底栖生物，尤其微生物繁殖速度快，每年产量可达80亿吨。在近代沉积物中也发现了丰富的有机物质，且在愈细的沉积物中有机物质含量愈高。这是由于沉积物愈细，表明当时水体愈稳定，愈容易形成还原环境，也就愈有利于有机物质的堆积和保存。

2) 近代沉积物中抽提出来的有机物质，在化学成分及物理性质上与石油近似。图3为斯密施用红外光谱对比分析墨西哥湾近代海洋沉积物所含烃类与美

国怀俄明州中新统石油的结果，发现它们在成分上非常近似，因而谱线变化相当吻合。将淡水泥质沉积物所含有机物质的元素组成，同石油、浮游生物加以比较（见表3），发现前者介于后两者之间，表明近代沉积物中的有机物质已经历一定演化，比活的浮游生物更接近石油。

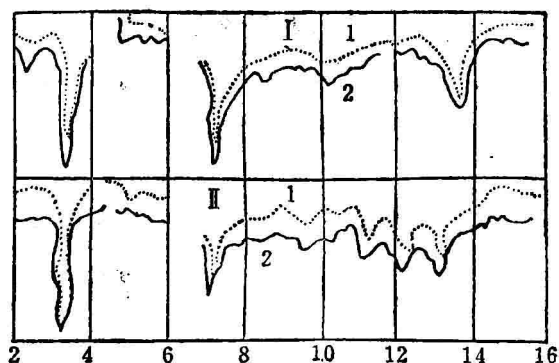


图3 石油与近代海洋沉积物中所含烃类的红外光谱图

1—石油；2—近代海洋沉积物中所含烃类；

I—庚烷抽提物；II—苯抽提物

表3 石油、近代沉积物中的有机物质和生物的元素组成对比表

物 质 名 称	C %	H %	S + N + O %
石 油	84.32	13.58	2.10
淡水泥质沉积物中的有机物	76.7	11.3	12.0
浮 游 生 物	44.2	8.6	47.2

3) 近代沉积物中有机物质的元素分析表明, 随着沉积物埋藏深度加大, 所含有机物质的烃类含量在增加, 而非烃化合物含量在减少 (表4)。所以, 越往深处, 近代沉积物中的有机物质就越接近石油。

表4 墨西哥湾近代沉积物中烃类含量随深度的变化 (据斯密施)

海底以下的样品深度 (米)	抽提物中的烃类含量 (%)	抽提物中的非烃含量 (%)
0.9~1.2	7.5	92.5
5.5~6.7	20.4	79.6
15.8~16.2	27.5	72.5
31.1~31.4	80.9	69.1

这些研究成果表明, 在近代沉积物中确实存在着油、气生成的过程, 而且这个过程至今也还在进行着。将今论古, 可以说明石油有机生成的现代科学概念, 对古代生油过程的认识, 是比较符合客观实际的。

2. 有机质成熟度的研究

近几年来, 国内外开始注意从埋藏深度、地热及埋藏时间等方面研究沉积岩中有机物质向石油转化的程度, 即有机质成熟度的研究。法国J. 康南 (1974)、