

第一部分

油气地质地球化学综合研究

陆相生油及其衍生热点

徐 永 昌

(中国科学院兰州地质研究所 兰州 730000)

【摘要】对陆相生油而言,关键性的问题是何种地质背景是形成优质油源层和向成油转化的环境。认识之一是古气候和古构造有利因素的叠加,如“陆相、潮湿、拗陷”的学说。20世纪70年代以来陆相生油地球化学研究在陆相油源岩的质、量,成烃转化特征,油气源对比等方面确证了陆相沉积中存在优质源岩和向成油转化的条件,并足以保证陆相大、中型油气田形成的油源供给。陆相有机质的特性衍生出近年油气地学的3个热点,即煤成气、煤成油、未熟-低熟油气,并取得了理论和实践的双丰收。笔者在文中提出了陆相生油的地质构架——环境控源、源控藏。

【关键词】陆相生油 有机质 煤成油 未熟油

1 概 述

理论源于实践又反馈于生产实践,使生产实践进入自觉的阶段。几百年来,关于石油的成因,一直有生物成因和非生物成因两种认识的分歧。由于生物成因理论更科学、更系统、更完整,特别是它对油气勘探实践有效的指导作用,可以说本世纪以来科学界的石油成因概念基本是在有机成因的基础上展开,至少可以说,目前勘探证实的大、中型油气田是与有机成因相关联的。本文的讨论当然以此理论为基础。

从20世纪初到40年代末,世界油气勘探所发现的油气田主要与海相地层相关。从有机成因的角度,海相沉积中具有丰富的有机质,而且其组成有利于转化成为石油,在这种地质实践的基础上所总结、升华形成的石油成因理论认为,石油形成于海相沉积,海相成油理论占有统治地位应当说与石油勘探史的实践相一致,是历史的必然。由于20世纪50年代以前在陆相沉积中没有发现中型以上的油气田,加之对于陆相沉积中有机质(除煤以外)的丰富程度、有机物质的特性缺乏深入的认识,认为陆相沉积贫油,客观地说也是完全可以理解的。正因为如此,在当时陆相地层中尚未展开大规模勘探,一批陆相大、中型油气田尚未发现的情况下,从陆相沉积中存在规模不大的油气田和存在较广泛的油气显示,以石油有机成因的基本论点为依据,一批先觉的地质学家如潘钟祥、黄汲清、谢家荣等先后提出陆相可以生油,陆相沉积可以找到丰富的油气是极为难能可贵的。有关史实在黄第藩^[1]。

收稿日期:1999-10-25 修改日期:1999-11-09 刊于《第四纪研究》,2000年1月第20卷第1期,56~67

第一作者简介 徐永昌 男,1932年生 研究员 博士生导师,石油地质专业,从事气体及同位素地球化学研究。该作者在本论文集中共有10篇论文

石宝珩^[2]等的有关论文中作了极为精辟详尽的总结, 本文不少部分转引自他们的文章。

从狭意的石油成因角度讲(即不包括成藏), 其核心是成油母质的丰度、质量及其向石油的转化, 其精髓即在 20 世纪 70 年代得以完善提出的干酪根热降解成油理论。按此理论, 只要在陆相地层中有足够丰富的有机质, 又具有在热力作用下降解为油气的地质条件, 则陆相生油和海相生油在本质上是相同的, 是无原则差异的。因此, 讨论陆相生油, 或者更确切地说陆相能否形成大、中型油气田是陆相沉积能否蕴含足够丰富的有机质, 这些有机质能否具有可以转化为油气的特性, 即在陆相条件上能否形成量丰质优的油气源岩, 如果可以是什么样的条件, 也就是说与海相生油相比, 对陆相生油问题更为尖锐、更为明确地提出了陆相生油所必需的环境条件问题。对此我国学者提出了许多重要的学术观点。以侯德封为代表强调在陆相条件下, 古气候带的分布是控制陆相生油的重要条件, 他提出“有无石油的关键不在于是陆相还是海相地层, 而首先要确定的是古气候带和构造区”, “潮湿和干燥气候的时代转变有利于生油层的形成”^[3]。他的这种认识是把古气候和构造因素叠加起来, 这无疑对中国科学院兰州地质研究所基于西北地区油气勘探成果, 提出陆相生油的控制因素为“内陆、潮湿、拗陷”的学术观点具有根本的启迪和指导作用。

有的学者较强调构造的因素如田在艺等强调“长期的深拗陷有利于生油层的形成”。以朱夏为代表非常强调构造因素, 认为“唯一的条件可能只是在当时运动体制下的有利于还原作用的环境”。尽管不同学者强调的方面各有侧重, 也存在有分歧的认识, 但笔者认为, 古气候和构造因素的复合叠加, 构成一种有利生物繁衍, 形成丰富的有机体的堆积, 适宜的沉积条件下有利于生物有机体的埋藏、保存和向油气转化无疑是陆相油气形成的基本环境要素。可以认为干酪根降解成油强调的是油气形成的热力学和化学机制, 而“陆相、潮湿、拗陷”一类理论强调了环境对陆相油源层的控制意义, 也许可以将陆相大、中型油气形成的地学构架之一表述为“环境控源 源控藏”。

20 世纪 70 年代以来, 陆相生油的地球化学研究在我国得到了快速的发展, 以傅家谟、黄第藩为代表的一批学者, 在陆相有机质特征及其分类, 生物标记化合物指相, 定年及成油前身生物追踪和油气-源岩对比, 陆相生油的门限, 陆相有机质形成的原油所具有的理化标记, 陆相源岩的实验地球化学研究以及陆相盆地油气的资源量计算等做出了卓有成效的贡献, 从而使我国陆相生油研究将宏观的地学背景和微观物质探索有机地结合起来, 全面地论证了陆相沉积可以形成大、中型油田。我国油气资源量经严格科学的核算, 石油为 800 余亿吨 天然气约 $40\text{万} \times 10^8\text{m}^3$ 。我国石油探明储量和产量已分别列世界的第 7 位和第 5 位。近两年我国油气储产量如表 1 所示, 这些储产量也基本来自陆相沉积中有机质的转化即陆相形成的油气。

表 1 近两年中国油气产量和储量(未计台湾省)*

Table 1 The yields and reserves of petroleum in China in recent years

1997 年	1998 年
原油产量:1.6044 亿吨(海洋:0.16287 亿吨) 天然气产量: $223.1 \times 10^8\text{m}^3$ (海洋: $40.5 \times 10^8\text{m}^3$) 石油探明储量:190.66 亿吨(可采储量 55 亿吨)	原油产量:1.6052 亿吨(海洋:0.16319 亿吨) 天然气产量: $222.8 \times 10^8\text{m}^3$ (海洋: $38.63 \times 10^8\text{m}^3$) 石油探明储量:204.2 亿吨(海洋:17.6 亿吨) (可采储量 59 亿吨)
天然气探明储量: $1.69 \text{万} \times 10^8\text{m}^3$ (可采储量 $1.05 \text{万} \times 10^8\text{m}^3$)	天然气探明储量:2.048 万亿吨(海洋: $0.395 \text{万} \times 10^8\text{m}^3$) (可采储量 $1.27 \text{万} \times 10^8\text{m}^3$)

* 黄第藩私人通信。

2 陆相生油的地质构架——环境控源、源控藏

就有机成油，干酪根热降解成油的石油成因理论而言，陆相生油的关键和核心问题是陆相沉积条件下，能否形成和保存丰富的有机质而且这种有机质具有成油的潜力，并在其埋藏保存后向石油转化，从而尖锐明确地提出了在陆相条件下什么样的地质背景是形成量丰质优的生油源岩的控制因素。

黄第藩在“陆相生油研究史略”^[1]一文中对此作了总结性概述，本文这一部分基本源于该文的资料。

20 世纪 50~60 年代，我国不少学者就陆相生成油气的地质背景著文予以论述。例如：

1954 年，李四光从地质力学和西北大地构造型式的观点提出中国石油勘探的远景，他把大地槽的边缘地带和较深的大陆盆地看作找油的有利地区。对于东部，在 50 年代他也多次强调过在新华夏沉降带中找油的重要意义。

1955 年，黄汲清从构造的观点指出过鄂尔多斯西缘的找油方向。

1957 年，潘钟祥在“中国西北部陆相生油问题”^[4]一文中指出：“现代陆、海沉积物中含同样的碳氢化合物等资料证明陆相生油是完全可能的”，“当中生代及第三纪时，在我国西北有许多大小不等的内陆盆地，其中沉积了湖相、沼泽相及河流相的沉积物，产生了丰富的石油和煤的资源”。

1957 年，谢家荣指出：“大陆沉积中的有机物可能主要是由陆生植物分异出来，而三角洲、潟湖和大的内陆湖皆为沉积大规模生油层的处所。我国西北许多第三纪和中生代油田……陆相地层才是最可能的生油层”。

在此笔者不能不满怀深情地提及侯德封教授，我们一代人乃至我们师辈尊称的侯老对陆相生油的贡献及其对陆相生油地质控制要素的论述。

1995 年笔者为《石油知识文萃》^[5]撰写了缅怀侯德封教授的文章“我国石油地质事业的开拓者”，愿将该文有关叙述摘引于此。

“远在 50 年代，新中国成立不久，国民经济建设面临重重困难，能源问题迫切需要解决。侯老急国家之所急，积极组织领导了 50 年代中国科学院在西北地区的油气地质综合科研考察工作。他组织领导的酒泉西部地区的石油地质综合研究取得重大成果，荣获国家自然科学奖。侯老非常重视基础性的地学研究工作，并将地质历史中的理化作用及古气候环境等因素综合起来认识油气地质问题。1957 年他在柴达木盆地工作时，应用气候地层学对盆地第三纪地层作了划分和对比，成为当时统一盆地东西部地层和认识这些地层所代表古气候、古环境、沉积地球化学的重要依据。他强调古气候对石油形成，特别是对陆相生油的重要意义，指出有无石油的关键不在于是陆相还是海相地层，而首先要确定的是古气候带和构造区。他的这些学术观点在我国石油资源的勘探开发中，起了重要的作用”。

侯老是陆相生油理论的主要奠基人之一。他在 20 世纪 50 年代末领导中国科学院兰州地质研究所的一批青年科技工作者，在总结我国石油生产实践的基础上，完成了《中国西北区陆相油气田的形成及其分布规律》^[6]一书。这是我国第一部陆相生油专著，提出了“内陆、潮湿、拗陷”为代表的陆相生油的新论点，从而在理论上和实践上突破了石油主要形成于海相地层的传统观念，迎来了一个有理论指导的在我国陆相中、新生代沉积勘探开发油气的时

期。

黄第藩还归纳了侯德封 1959 年在关于“陆相沉积盆地石油地质的一些问题”^[3]一文所提出的一些重要学术论点：我国西北区油田及其储层的分布说明“来自陆相沉积本身的油源是占有一定的重要地位而且远景很大”；^②中国西北地区“古生代与中、新生代地壳运动使台块区与地槽区向着相反的方向发展，这样，在中、新生代的台块区就发展为沉积巨厚的盆地，并在这些盆地中形成了油田”；^③“潮湿与干燥气候的时代转变，有利于生油层的形成”。

黄第藩在该文中还将我国的陆相生油研究归纳成为 3 个学派，现部分摘引于下：

其一是：1961 年 4 月，中国科学院兰州地质研究所黄汝昌等在《中国西北区陆相油气田的形成及其分布规律》^[6]一书中，对我国西北区地质发展历史、地质构造、沉积建造以及陆相油田形成、分布的许多基本问题进行了广泛的论述，并强调古气候因素，提出了“内陆、潮湿、拗陷”的理论作为陆相油气田形成的基础地质条件，他们认为，“在地质历史发展过程中形成的内陆盆地，在其长期稳定的下陷中，堆积有巨厚的陆相地层。具有潮湿或半潮湿气候下的沉积，利于油气生成和油气田的形成”。他们指出，“陆相生油和海相生油一样决定于有机质的数量、有机质堆积的地质条件和沉积环境及有机质转化为石油的条件”。“潮湿气候造成大量有机物的堆积，地壳长期拗陷有利于石油的生成，淡水湖泊还原环境下的沉积是石油生成的源地”^[6]，深水湖泊的中部是石油生成的有利地带。

笔者认为，这一学派在探讨陆相生油问题时强调了陆相成油形成量丰质优陆相油源岩的地质要素，说这一学派是在侯老的启迪、倡导下成长和发展起来的，我想我们这一代人是公认的。最近电视报道我国陆相生油理论相关问题时提及了李四光、侯德封、黄汲清 3 位地质学界功绩卓著的前辈学者。这再次表明，对祖国作出奉献的人，共和国是不会忘记他们的。

其二是：石油工业部石油科学研究院于 1961～1964 年在翁文波的主持和推动下，石油科学研究院对石油成因进行了卓有成效的研究工作。余伯良、曾鼎乾和阎敦实代表了当时石油科学研究院对陆相生油的基本观点。

其三是：地质部石油地质局以朱夏为代表。他认为：“中、新生代沉积中油气的形成看来并不需要更多的条件，唯一的条件可能只是在当时运动体制下的有利于还原作用的环境。”

笔者认为，如果仅强调石油的形成和成藏，则海相生油与陆相生油主要方面是相似的；如果强调陆相生油则成油作用前的地质背景，或古地质环境状态将是决定能否形成量丰质优陆相油源层的关键因素。3 个学派无论强调气候，强调构造，强调长期的深拗陷，强调还原性的环境，无疑都是有一定的依据的，不同学者，基于不同的客观实践强调不同的方面是可以理解的。但是，总观三派学说，对陆相生油的古地质环境都给予了极大的关注。陆相生油的重要学术观点之一是“源控论”，它不仅是一项重要的理论认识，对陆相油气勘探也起了积极的指导作用。综上所述，对于陆相生油的地学构架也许可以归纳为“环境控源、源控藏”。

3 陆相生油的地球化学

先进技术的支撑是学科理论取得开拓性、突破性进展的关键性前提。20 世纪 70 年代以来，一批先进仪器和相应的分析技术引用于陆相生油的研究，从而对陆相沉积有机质的丰

度、类型、生油岩的评价、有机质成烃演化特征及其模式、陆相沉积的成油门限、古沉积介质的环境、成油的生物先质、陆相生油的排驱、运移，油气成熟度及油气-源岩对比及陆相盆地的资源量计算等等，均取得了突破性的进展。这些研究极大地丰富了陆相生油理论。宏观地质背景和微观物质精细结构研究的结合，使陆相生油理论形成更科学、更完整的体系，也更有效地指导了油气勘探。同时，建成了一批国际先进水准的油气地球化学实验室，在陆相油气形成领域成长起一批以傅家谟、戴金星、黄第藩等为代表的国内外著名的优秀学者。陆相油气形成研究成果极为丰硕，本文仅能简述几个方面的概况。

3.1 陆相有机质的丰度及质量

石油成因理论的主体仍是干酪根热降解成油，从这个角度出发就应当定量地确定陆相有机质质量上是否为有效的成分，数量上不仅可以从烃源中排出并可提供形成大、中型油田的量。B. Tissot 根据干酪根的 H, C, O 元素的组成和原子比例将其分为 I、II、III 型，I、II 型为有利于生油的母质，其组分相对富含氢，我国黄第藩等基于中国情况，为更有利于陆相烃源岩评价将干酪根分为 3 类 5 种，即标准腐泥型 (I₁)、含腐殖的腐泥型 (I₂) 中间型或混合型 (II)、含腐泥腐殖型 (III₁)、标准腐殖型 (III₂)，并提出了干酪根岩石热解分析类型指数标准。研究表明，陆相沉积中同样可以存在成油潜力很大的 I、II 型干酪根。与国外研究相似，在评价生油岩的优劣时最主要的几项指标，通常以有机碳对全岩所占百分数为标准，同时讨论岩石中可溶有机质氯仿沥青“ A ”和其中总烃的数量。

中国一些大型油气区的研究表明，在区域内都存在较好、好、乃至最好的生油岩，而且油源岩体积巨大，成为这些大、中型油田形成的油源。现以我国最大的陆相油田大庆所在松辽盆地的一些数据为例（如表 2^[7]、表 3^[7]），从表列数据可以看出，嫩江组和青山口组主体为好乃至最好的生油岩，除嫩江组三段为差的生油岩不计外，较好和最好生油岩的体积达 3292km³ 其残留氯仿沥青“ A ”的含量达 140 亿吨以上，充分说明陆相沉积确实蕴含着形成巨型油田的物质基础，类似实例就不一一列举了。

表 2 松辽盆地南部主要凹陷生油层地球化学数据 *^[7]
Table 2 Geological data of the source rocks in the main depressions
in the southern part of the Songliao Basin^[7]

数据指标	层位	古龙-大安凹陷				乾安-长岭凹陷			
		有机碳 %	氯仿沥青“A” %	总烃 %	级别	有机碳 %	氯仿沥青“A” %	总烃 %	级别
嫩江组	三	1.101	0.028	0.018	差	0.966	0.035	0.014	差
	二	2.054	0.065	0.036	较好	1.294	0.057	0.032	较好
	一	2.978	0.300	0.176	最好	1.743	0.261	0.213	最好
青山口组	三	1.300	0.151	0.116	好	0.487	0.013	0.009	差
	二	1.558	0.149	0.092	好	1.265	0.193	0.136	好
	一	2.442	0.310	0.184	最好	1.967	0.355	0.241	最好

*各项指标均取算术平均值。

表 3 松辽盆地南部生油层有机质含量 * [7]

Table 3 The organic concentration of the source rocks in the southern part of the Songliao Basin^[7]

数据 层位	项 目	生油岩	有机碳	氯仿沥青	烃含量	单位体积	单位体积氯仿	单位体积
		总体积 km ³	含量 10 ⁸ t	“A”含量 10 ⁸ t	10 ⁸ t	有机碳含量 10 ⁸ t·km ⁻³	沥青“A”含量 10 ⁸ t·km ⁻³	烃含量 10 ⁸ t·km ⁻³
嫩江组	三	337.84	75.1	2.55	1.18	0.222	0.008	0.004
	二	926.16	352.46	12.96	7.23	0.379	0.014	0.008
	一	662.85	351.29	42.50	29.91	0.530	0.064	0.045
青山口组	三	240.56	63.72	6.97	5.35	0.265	0.029	0.022
	二	892.92	291.17	34.59	22.94	0.326	0.039	0.026
	一	568.95	304.95	43.99	27.41	0.536	0.077	0.048
合 计		3632.28	1438.69	143.56	94.02			

* 各项有机质含量均用算术平均值。

3.2 陆相生油的生标及同位素研究

生物标记物作为指纹化合物，同位素作为核素级示踪物质，对于陆相油气的物质来源、成油环境、油气源对比等均发挥了重要的作用。

20 世纪 70 年代末至今，在中国陆相生油的研究中，生物标记化合物得到了广泛的应用，人才、成果倍出，在国际上占有重要地位，实验设备也完全不逊于国际先进实验室，通过生物标记物对比，确定了中国陆相地层中的原油生标可与陆相生物对比，可以判明与陆相的沉积环境相关，可以判断与原油有生成联系的陆相源岩层……等。如傅家谟等通过油页岩中生物标志化合物的研究建立了生物标志物与有机物输入模式；通过廊固凹陷的研究发现了 C₃₀αβ 藿烷占烷烃组分的 8% 以上，这种情况可能是陆相淡水湖相生油岩的重要特征；对某些煤成油母质的研究发现了一系列反映陆源输入和沉积成岩环境的生物标志化合物，如陆源二萜类、三萜等。又如，黄第藩等讨论了色素类、多环萜类和无环类异戊间二烯烷烃在油源对比中的作用；通过对柴达木盆地早 2 井的研究建立了有机质连续的生物化学和热化学的演化过程，讨论了正构烷烃的生源构成，并认为 C₂₁ 以下化合物起源于脂肪酸的成分，C₂₂ 以上化合物起源于生物蜡的成分，特别是在生物标志化合物的应用研究方面，比较系统地总结了陆相原油和生油岩中生物标志化合物的分布及组成与海相的区别，主要反映了陆源成油母质的特征。他指出正烷烃的高碳数峰群、三环二萜烷（松香烷）藿烷、C₂₉ 甾烷、4-甲基烷、γ-蜡烷、奥利烷、镍卟啉、烷基菲、芘等，可以看作是陆相生油岩特有的生物标志化合物，并列表标出了反映母质类型和油源对比、演化（成熟度）运移、原油生物降解 4 种类型的生物标志化合物参数。生物标志化物的成果对陆相生研究的贡献足可完成一部巨型专著，在此就不一一列举了。

最近，据程克明私人通信，他们在研究吐哈盆地煤成油时与美国斯坦福大学的 J. Michael Moldowan 合作取得了令人瞩目的新突破。他们发现在吐哈盆地中、下侏罗统所产原油中富含降异海松烷，与此相对应中下侏罗统煤岩也富含降异海松烷，而泥岩中降异海松烷的丰度很低，从而不仅证明了吐哈盆地探明的原油主要源于陆相的煤系沉积，而且主要源于中、下侏罗统的煤，这对于长期争论的煤系中的煤是否是煤成油的源岩的问题是一个极为

同位素在陆相生油的研究方面与生物标记化合物相比则相对薄弱，但在天然气的研究中却发挥了较好的作用。在陆相油气生成相关研究中同位素也存在一定优势。如在同一种原油中存在湖相和泽沼相的生标时就不易说明何种来源为主，而深湖相原油的同位素组成常较轻，沼泽相煤成油的同位素常较重。以吐哈盆地为例，侏罗系煤成油 $\delta^{13}\text{C}$ 值主体分布于 $-27\text{‰} \sim -26\text{‰}$ 的范围，而二叠系湖相原油则分布于 $-32\text{‰} \sim -31\text{‰}$ 。在两种原油二元复合的状况，我们可以大致计算二者在复合油中所占份额。又如对煤成油而言，用轻油重同位素的指标，即可以概括地表示煤成油的特征，对于盐湖相所形成原油只需在重同位素的基础上加一个姥、植比的指标即可将二者较好区别，即盐湖相石油通常 Pr/Ph 值 < 1 而煤成油则常是 Pr/Ph 值 > 3 。这几个数据所需经费极少，很易获得，可以较方便而准确地获得陆相原油类别的进一步区分，这对陆相油气勘探是很有益的。

笔者在 1986 年“石油地球化学中的同位素研究”^[8]一文报道了用同位素类型曲线对克拉玛依原油进行原油-源岩对比和酒西盆地原油运移的研究。

从克拉玛依原油及油源岩碳同位素资料中可以看出：石炭系与二叠系原油碳同位素类型曲线非常相似，在方法误差范围二者基本相同。②三叠系原油（陆相原油）碳同位素类型曲线明显地区别于石炭、二叠系原油的类型曲线。石炭系、二叠系原油类型曲线外延的干酪根碳同位素值与实测值非常相近。即通过同位素类型曲线进行油-源对比的结果是成功的。可以认为它们即是这两个储层原油的油源岩。④三叠系原油与三叠系生油岩干酪根也存在可比性，但较石炭、二叠系要差。

根据类型曲线对比，我们认为，三叠系和二叠系的原油具有不同的来源。特别应该指出，三叠系原油碳同位素与陆相沉积的三叠系中、上部可能生油岩的对比性较好，可以认为三叠系中、上部的油气主要为陆相沉积自生自储。石炭、二叠系的原油为另一类型，我们倾向于石炭、二叠系的原油是同源的，油源岩为二叠系。

对酒西盆地老君庙背斜带从西到东的一个剖面不同井位全油碳同位素值，根据地质和其它地球化学指标的研究，较好地确定了该区油气是从西向东运移。^[9]镍卟啉的变化是这种运移方向的指示之一，从西向东 $\delta^{13}\text{C}$ 有变小的趋势。在剖面控制的约 30km 范围内， $\delta^{13}\text{C}$ 从西面的 -30.5‰ 渐次变为 -31.5‰ 即原油的碳同位素变轻了 1‰。可以认为是运移所造成的同位素分馏。

3.3 其他

陆相生油的地球化学内容实在太丰富了，笔者挂一漏万地简述了几点，实际很多问题无论从理论上或勘探实践上都是很有意义的。如产于我国各油区的原油，几乎都是以高蜡、低硫为特征，且发现有镍卟啉化合物存在，并具低 V/Ni 值。而原油的这些特性，正是陆相与海相成油有机质的物质特性的差别所决定的。通过实验地质学研究证明了许多油区的陆相沉积中的生油岩；经热模拟实验获得了油、气产物与我国陆相地层产出的油气具有相似的理化特性；从实验地质学的角度提供了陆相生油的论据并为陆相盆地油气资源量计算提供了必要的参数；我国两次大型的油气资源评价为我国陆相油气勘探提供了战略决策的依据；陆相有机质包括煤系有机质的研究从理论上建立了煤系可以形成大量天然气，在特定条件下可以形成煤成油；陆相有机质中存在只需较低活化能即可降解成油，成气的有机物质，从而在陆相生油的范围内衍生出一些新类型的陆相油气资源，如煤成气、煤成油、未熟-低熟油、生物-热催化过渡带气，这些领域的研究实际已成为近 20 年油气地学研究前缘和热点。

总之,陆相生油的地球化学研究既确证了在中国陆相地层中发现的油气来源于陆相沉积中的有机质,并基于油源对比判明了形成原油的陆相源岩。生标及同位素等指纹及示踪物明确了与原油形成有关的陆相生物先质和与陆相沉积相应的环境,陆相盆地资源量计算既证实了正是陆相有机质形成了我国的大、中型油气田,也为我国油气勘探提供了战略决策的依据。

4 陆相油气生成的衍生热点

陆相沉积中的有机质由于有足够丰度和具有成油成气的组分,从而在中新生代陆相地层广布的我国发现了一批大、中型陆相油气田,而陆相有机质的物质特性使得陆相油气生成在近 20 余年间衍生出油气地质学的 3 个热点领域,即煤成气、煤成油和未熟-低熟油气,下文对此作简要介绍。

4.1 煤成气

煤成气作为一个学术名词笔者仍主张称为煤型气。煤主要形成于陆相和海陆交互相。煤和油气有一定相关性是早已共识的事实,但作为陆相天然气资源重要来源的认识在我国则始于 20 世纪 70 年代末 80 年代初。以戴金星为代表,提出了煤系有机质可以形成大、中型气田。特别是 1983 年政府将‘中国煤成气开发研究’列为‘六五’期间国家重点科技攻关项目并在其后的‘七五’、‘八五’和‘九五’将天然气地学研究持续地列为国家科技攻关重点,从而极大地促进了作为陆相沉积之一的煤系天然气形成储聚及成藏的研究,取得了理论和实践的双丰收。在研究方面,建立了煤成气的综合判识标志,确定了一批气田确与煤系成气及其运移、聚集成藏有关,计算了煤成气的资源量,其值在 10 万亿~20 万亿立方米之间(不包括煤层甲烷,笔者认为按 15 万亿立方米计应是合理的);指出了有利于煤成气形成储聚的区域,如鄂尔多斯,新疆三大盆地和中国的东南海域。煤系地层可以成气、可以形成大、中型气田的理论认识,开拓了陆相聚煤盆地找气的新领域,对我国天然气增产,增储做出了巨大的贡献^[9]。最近戴金星的总结性论文^[10]对 20 年来我国在此一领域的成就作了系统、综合的论述。到 1997 年底,在我国探明的天然气储量中,煤成气田所占份额已由 1978 年的 9% 上升到 50.9%。目前我国将探明储量大于 100 亿立方米的气田划为大、中型气田,至 1997 年底已探明的大、中型气田属煤型气田者达 23 个,占全部探明的大、中型气田总储量的 63.1%。作为陆相沉积油气生成理论的衍生热点之一,煤成气的理论对生产实践的指导功不可没。

4.2 煤成油理论及勘探的突破

经近 20 年的研究,煤系有机质可以成气并形成大、中型气田在科学界基本得到认同。煤系中常伴生有油,即煤可以形成石油,但能否形成并经排驱储聚达大、中型油田规模,则存在不同认识。主要疑点在于成煤环境和成油环境是有差异的。油源岩形成于还原性较强的条件,煤系多形成于氧化性较强的环境,而还原性环境对于有利于成油母质的堆积、保存和其后向石油的转化都是具有关键意义的。一个更大的疑点是煤系有机质特别是煤系中的煤,由于煤的强吸附性,在煤形成烃类后是否可以有效地排出并达到足以形成工业储聚的量。

煤系成气及其工业储聚,可以认为具有普遍意义。而煤系成油并达工业规模的储聚则

需要特定条件。从成煤环境来说,有的煤系确实就形成于相对还原环境如深覆水沼泽,在类似条件下可以沉积储聚较多的有利于向成油转化的有机质。秦匡宗用 ^{13}C NMR 的方法将有利于向成油转化的这类有机质称为油潜力碳,在煤系有机质中的角质体、藻质体、木栓质体和基质镜质体的有机碳中,这种油潜力碳就占有相当的份额。加之煤系有机质的百分含量很高,所以它们的成烃潜力也是很大的。其实将煤系有机质就认定为腐殖型有机质,认定为Ⅲ型干酪根的观点已被摒弃。研究表明从干酪根分类的角度,煤系有机质是Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ型干酪根的复合体,只是不同煤系有机质中干酪根的复合比例不同而已。煤系泥岩和煤有的就属较好的生油岩。根据若干地球化学指标^[11]将吐哈盆地煤系泥岩从生油岩的角度划分成若干等级的探索。

关于煤也作了类似的讨论,即从研究的角度无论煤系泥岩和煤均可按其地化特性确定出有一部分为好和较好的生油岩,而它们的丰度很大,可以提供形成大、中型煤成油田所需的油源,在特定条件下,陆相煤系能否形成油源岩的疑点可以获释。

关于煤成油的排烃问题,黄第藩^[12]比较了湖相烃源岩和烃源煤抽提物族组成的差异,论证了煤形成油后可以从煤中排出,正是煤对各族份的差异吸附形成了两种烃源岩抽提物族组成特征和目前煤成油不同于湖相原油的组分。具体表现为:大分子沥青质很难从煤中排出,因此其相对含量随演化程度加深呈线性增加。这至少表明,沥青质基本被滞留在煤层中。随演化程度加深,芳烃含量的下降较为缓慢。这与芳烃几乎只有部分低环芳烃能够排出,而大部分芳烃特别是多环芳烃仍滞积在煤层中有关。在演化过程中饱和烃含量几乎始终低于芳烃,并且饱和烃的峰形平缓,含量也低,变化在5%~15%之间,而芳烃含量变化在15%~30%。在烃源岩抽提物中,芳烃含量高于饱和烃既不是一种原始成烃产物的正常现象,也不是以源于腐殖型母质可以解释的。因为几乎任何类型的成烃母质中的有效成烃组分都是类脂组(或壳质组),产物自然是以饱和烃为主的。因此,烃源煤中芳烃含量高于饱和烃现象,只能是一种运移效应的反映。由于饱和烃的极性弱,大部分已由煤中排出了。

正是由于烃源煤初次运移和排驱的上述特点,从而导致聚集成藏的煤成油总是以轻质油为主,饱和烃含量达80%以上,其次为三环以下的轻芳烃。而非烃、沥青质和四环以上重芳烃则很少作出实际的贡献。

上述研究表明,对煤成油形成及其工业储聚在理论上是可以成立的。在陆相煤系的勘探实践中,先后在澳大利亚吉普斯兰盆地,印度尼西亚的马哈坎三角洲区域,新西兰的塔拉拉基盆地都探明了具有较大规模的煤成油的工业储聚,特别是1989年我国新疆吐哈盆地亿吨级大型煤成油田的发现,更把陆相生油的衍生热点之一煤成油的研究和实践推进到一个更高的境界。

4.3 陆相烃源特征与未熟-低熟油气

未熟-低熟油气的形成及其成藏是油气地学前缘领域之一,也是陆相成油母质特性所决定的陆相生油理论的衍生热点之一。

干酪根热降解成油理论的成油的主峰大致在 $R_0 \approx 0.7\% \sim 1.1\%$ 之间,这个区间即所谓液态窗,在生油门限所形成的是正常的成熟原油。此区间值主要是根据海相生油和陆相正常的湖泊型源岩所形成油的地质实际资料所获得。它实际与这些成油母质的主体为水生生物,为藻类等物质有关,研究表明,该类物质在热力作用下降解为烃类其所需的活化能,以

热演化标尺 R_O 表示时,主生油阶段大致相当于 $R_O \approx 0.7\% \sim 1.1\%$ 的范围。实际上不同有机质热降解成烃所需的活化能是不同的,在陆相沉积条件下,陆源在机质是成油母质的重要来源,有时甚至是主要来源,而陆源有机质的成分是较复杂的,其成烃特性也差异很大,表 4 是按有机岩石学划分的陆源有机质的显微组分及其成烃 R_O 值。

表 4 显微组分生油演化模式 (依显微组分荧光性质)^[11]
Table 4 The evolutionary models of the oil generation of macerals
(based on the features of the flourescence of macerals)^[11]

显微组分	生油范围 $R_O/\%$	主生油期 $R_O/\%$
基质镜质体	0.40~0.75	0.5~0.6
藻类体	0.55~1.3	0.9~1.1
		0.55~0.65
角质体	0.45~1.3	0.95~1.1
孢子体	0.5~1.3	0.9~1.1
木栓质体	0.3~0.6	0.4~0.5
树脂体	0.4~0.7	0.5~0.6
沥青质体	0.35~0.70	0.5~0.6

从表中数据可以看出,显微组分中基质镜质体、木栓质体、树脂体和沥青质体在 R_O 为 $0.3\% \sim 0.4\%$ 已开始生油 而在 R_O 为 $0.5\% \sim 0.6\%$ 时主生油期已完成。即在陆相有机质中有些组分,在正常油刚进入成熟门限时,它们已到主生油结束阶段。当这部分有机质数量较丰时,则可形成油藏。其所形成的石油与传统的正常石油相比,它们尚未进入成熟门限。从这个意义讲,它们就是未成熟油,而这种油主要与上述陆相有机组分相关,所以未熟油可说是陆相生油衍生出的一个领域,一个石油地学的新热点。与未熟油相对应,笔者在研究辽河,苏北,吐哈等陆相盆地时发现了一些陆源腐殖质组分所形成的天然气,它们具有特定的埋深,特定的地球化学特性,其成熟度大致在 R_O 为 $0.3\% \sim 0.7\%$ 的范围,我们称之为生物-热催化过渡带气^[13]。研究表明在有机质类型主要为 I、II 型时 其它条件具备 将形成未熟油而有机质主体为 III 型时,将形成过渡带气。对未熟油伴生气的分析表明,它们具有与过渡带气相似的特征。笔者曾提出天然气成因的“多阶连续、主阶定名”^[14]的天然气成因模式,从上述未熟、低熟油的形成可以看出,不仅是天然气,包括陆相石油的形成也体现多个阶段成油,并在一定程度上体现了多阶段相互衔接,连续过渡的特征。也许“多阶连续,主阶定名”的模式可以作为陆相油气形成的特征之一。

黄第藩对未熟-低熟油进行了系统全面的研究^[15] 在成烃物质上 他是从可溶有机质和干酪根两大部分予以讨论,指出在未熟-低熟阶段成烃的主要先质为可溶有机质,这与前文所述体系不存在矛盾是从不同学科术语上讨论问题。

20 世纪 90 年代以来 未熟-低熟油气有关问题成为油气地质学的一个热点,不仅在理论上有很大进展,生产上也取得了丰硕的收获,据目前的统计●我国未熟-低熟油的资源量为 47 亿~54 亿吨,主要分布在东部。生储岩系以第三系为主,白垩系也占有相当份额。未熟-低熟油气相关问题,作为陆相生油的衍生领域之一其成果是巨大的。

● 黄第藩私人通信

今年 4 月是侯老诞辰 100 周年。回忆 1956 年我们一批年青人从北京地质学院石油地质专业毕业分配来中国科学院,是侯老(还有叶连俊先生)给予了我们多方指导,1957 年侯老亲赴柴达木指导中国科学院的石油地质综合科考工作。笔者有幸追随左右,工作中他敏锐的野外观察能力、渊博的学识、开阔的思路对科考队的工作帮助极大,也使笔者受益终身。1959 年,当兰州地质研究所一批年青人基于西北石油勘探实践撰写我国第一部陆相生油专著时,侯老又亲临兰州悉心指导。应当说“内陆、潮湿、拗陷”陆相生油学说的提出是与侯老启迪和指导密不可分的。侯老不仅知识渊博,而且品德崇高,是我们一代人崇敬的师长、学习的楷模,在侯老百年诞辰之际,仅以此文敬献侯老。

参 考 文 献

- [1] 黄第藩,陆相生油研究史略,见:中国石油学会石油地质委员会编.有机地球化学和陆相生油.北京:石油工业出版社,1986,1~21
- [2] 石宝珩.我国陆相生油理论历史,现状和问题,见:《中国含油气盆地烃源岩评价》编委会编,中国含油气盆地烃源岩评价北京:石油工业出版社,1989,21~43
- [3] 侯德封.陆相沉积盆地石油地质的一些问题.地质科学,1959,(8):225~227
- [4] 潘钟祥.中国西北部陆相生油问题,石油勘探,1957,(4):4~8,(5):14~17
- [5] 徐永昌,我国石油地质事业的开拓者,见石宝珩 郭泰生主编,石油知识文萃.北京:石油工业出版社,1995,290~291
- [6] 中国科学院兰州地质研究所,中国西北区陆相油气田的形成及其分布规律,北京:科学出版社,1961,146,210
- [7] 张惠.松辽盆地南部生油层特征及定量评价.见:《中国含油气盆地烃源岩评价》编委会编,中国含油气盆地烃源岩评价.北京:石油工业出版社,1989,134~150
- [8] 徐永昌,沈平等,石油地球化学中的同位素研究,见:中国石油学会石油地质委员会编.有机地球化学和陆相生油,北京:石油工业出版社,1986,22~28
- [9] 徐永昌.煤成气研究与天然气开发.科学通报,1993,38(16):1441~1444
- [10] 戴金星.中国煤成气研究二十年的重大进展.石油勘探与开发,1999,26(3):1~3
- [11] 程克明主编,吐哈盆地油气生成,北京石油出版社,1994,26~29,36~56
- [12] 黄第藩.成烃理论的发展 II)煤成油及其初次运移模式,地球科学进展,1996,11(5):432~438
- [13] 徐永昌,沈平,刘文汇等,一种新的天然气成因类型——生物-热催化过渡带气.中国科学(B 辑),1990,(9):975~980
- [14] 徐永昌 沈平,天然气成因新模式 II 多阶连续主阶定名.中国科学(B 辑),1993,23(7):751~755
- [15] 黄第藩.成烃理论的发展 I)未熟油及有机质成烃演化模式地球科学进展,1996,11(4):327~335

成烃理论的发展及国外未熟-低熟油气的分布与研究现状

刘文汇¹ 黄第藩² 熊传武² 徐永昌¹

(1. 中国科学院兰州地质研究所 兰州 730000)

(2. 中国石油天然气集团公司石油勘探开发科学研究院 北京 100083)

【摘要】未熟-低熟油气是油气资源的重要组成部分。本文在系统分析文献资料的基础上,阐述了国外未熟油气的分布特征,探讨了其地质产状和地球化学特征,进而总结了未熟油气的形成机制,讨论了未熟油气的有机地球化学判识标志和地质标志,对我国未熟油气的研究具有重要的借鉴作用。

【关键词】未熟油气 成烃机制 油气分布 地球化学特征

石油的工业开采始于 19 世纪中叶,但作为手工业开采和利用则要久远得多。因此,人们早就开始考虑石油的形成问题。苏联化学家罗蒙索夫是世界上最早研究石油并力图解释石油生成的学者。1763 年他根据对石油化学的研究,认为石油是有机生成物,石油和煤炭一样是由泥炭在高温作用下所生成,同时向裂缝和孔隙岩内运移,并在孔隙岩内大量聚集起来,这是最早的石油有机成因论。大约一个世纪后,在美国第一个主张有机说的是 Lesquereaux 他在 1866 年指出美国东部泥盆系的石油可能是海相有机质产生的。1876 年俄国化学家门捷列夫提出了石油起源的碳化物假说,首次系统地完成了石油的无机成因说。

石油的有机成因观点逐步得到了地质学家和地球化学家的认同,但对有机质的成烃演化过程,历来存在着各种各样的假说和认识,概括起来,就是早期成油说和晚期成油说。早在 19 世纪末,E. Orton(1888)就对当时关于石油的生成、运移和聚集观点作了全面的评述。其中包括石油的非生物(无机)来源、有机质高温蒸馏(即后来的干酪根晚期成油)和有机质低温分解(早期成油)来源等三种主要观点。他认为石油的无机成因学说只符合化学家的化学理论而难以与地质实际一致,因而基本上难以成立;而石油的有机成因毋庸置疑,但结合地质实际来看,有机质的高温分解并非主要的成烃机制,石油主要是由有机质的低温降解而成。Orton 当时就注意到,石油的成因理论对解决不同的地质实际各有所长,但他更倾向于石油的早期形成,这可能是油气早期形成的最早说法。而这些说法只是从理论上提出一些观点,当时还未得到大量的地质和实验证据证实。

19 世纪下半叶,有机化学家开始参与石油形成的实验研究,并对石油的有机成因起到

收稿日期:1999-01-11 刊于《天然气地球科学》,1999 年 4 月第 10 卷第 1~2 期,1~22

第一作者简介 刘文汇 男,1957 年生。研究员、博士生导师,主要从事天然气地质学、地球化学的研究工作。该作者在本论文集中共有 14 篇论文

了不可估量的作用。1863年, Laurent 将脂肪酸在水蒸气中蒸馏, 得到液态烷烃。两年后; Warren 和 Storrer 也从鲛鱼肝油的蒸馏中获得相似的烷烃石油的混合物, 并指出脂肪酸可能是烃类的母质。继此以后, 又曾有人在不同情况下使用脂肪酸作原料进行加热脱羧的成烃作用试验。特别是 Engler 和 Hoefler 自 1888 年起, 共同对不同动、植物的脂肪酸类进行了成烃模拟实验和野外考察, 完善了石油生物(有机)成因学说(Engler & Hoefler, 1909) 有意义的是, 其实验用波罗的海海滨潟湖水底的由单细胞藻类组成的正在分解的腐泥, 经过蒸馏得到 24.4% 的蜡质和沥青质液态烃和 14.6% 的气态烃。这一实验, 开创了利用现代沉积物模拟石油形成实验的先河。

20 世纪上叶是各种成烃理论论战最为活跃的阶段, 特别是有机成油理论得到了空前发展并得到大量实验的支持。有机质成油说得到了大多数人的认可, 但对有机质的生油组合和生油过程以及演化特征却有不同认识。20 世纪 20 年代, 俄国学者维尔纳茨基研究了有机质的地质作用在其《地球化学概论》(1933) 中, 详细讨论了关于石油的有机组成和有机成因, 提出碳循环模式。从此, 成油理论步入了地球化学研究阶段。在这一时期, 进一步研究脂肪酸是烃类母质的实验进一步深入(Eisma & Jurg, 1964; Almon, 1974) 并对其成烃机理进行了探讨, 也对有机化合物醇、酯、酮和醛的成烃转化和叶绿素、氨基酸和聚萜烯的转化作了研究。Treibs(1934)首次发现并证实卟啉化合物广泛存在于不同年代、不同成因的含油和沥青建造中, 认为卟啉化合物来自叶绿素的生物地球化学转化, 并以此作为石油有机成因的证据。当时, 对有机质成烃母质及其成油机制有两种主要观点。

1 有机体生化作用和早期成烃说

活的有机质中含有微量烃类。有观点认为石油直接起源于这些烃类, 特别是一些细菌, 在构成植物和动物的有机体、细胞膜和细胞的各种构造单元过程中能够合成烃类。在生物死亡埋藏过程中, 由于烃类的分解速度相对比其它有机化合物慢, 因此, 在良好的无氧条件下可以发生一些碳氢化合物的聚集。另外这种观点还认为细菌作用是促使这些化合物转变为更多种类石油烃的主要营力。Zobell(1945) 等人曾在实验室中用硫酸盐还原细菌作用于有机质, 包括各种有机酸, 得到少量比甲烷重的正构烷烃, 并认为芳香烃及其衍生物可由细菌对蛋白质作用形成, 而硫酸盐还原菌还可使烷烃转化为环烷烃。另外, 也有人找到了能分解脂肪形成石油产物的细菌。还有人认为细菌是氢的生产者, 而氢是沉积岩中有机质进行氢化作用而生成石油所必需的。Стадников(1937)认为有机质在细菌作用下首先会发生脱氧还原作用, 产生中间产物——原生石油。聚集在含盐盆地沉积物内的这些中间产物, 经过分解加氢后变成烃类。一般认为细菌可以通过脂肪酸的去羧基作用、不饱和烃的加氢作用和氨基酸的还原去胺作用等形成烃类。20 世纪 50 年代, Smith(1954) 等从现代沉积物中发现了类似于原油的烃类组成, 后经 ^{14}C 同位素分析进一步证明这些烃类中一部分是与它们赋存的现代沉积物同时形成的, 从而使有机体早期及生化成烃观点得到进一步发展。

在这一时期, 俄国石油地质学家古勃金进行了系统的石油起源问题研究, 认为石油是由海洋中动物和植物的混合物质作为母质形成的。开始, 石油以显微油滴分散于粘土淤泥的母岩中, 其后在压力作用下和水一同被母岩挤至邻近的多孔层内, 在当运移聚集到层内一定部位后便形成油气藏(Губкин, 1937), 这是最早的较为完整的早期成烃理论。古勃金认为

生油过程是从有机软泥或生物软泥中开始的，以后就一直不停地在有机岩夹层和围岩层成岩变化过程中完成。在整个过程中，温度并不特别高，但压力逐渐增加，而且还有厌氧细菌的参加。液态石油或半液态石油是在软泥里和没有完全变硬的岩层里开始形成，当岩层在上覆重荷下逐步压实时，石油和水被挤入疏松岩层——砂层、石灰岩层内。他同时还认为，任何岩层，只要有适当的生油物质，都会有石油形成，只是在生油层内石油始终处于分散状态(Губкин, 1937)。McCoy & Keyte(1934)、Van Tuyl & Parker(1941)、Levorsen(1954)、Weeks(1961)和 Hedberg(1964)等通过对世界各种地质资料的研究确信，油气能够在早期低温形成并聚集在早期形成的圈闭中。早期成油理论在这一时期的建立，涉及到生油物质、生油母岩、成油环境和转化条件等一系列问题。

石油为有机物所形成，已为地质学家所公认，但这种有机物是植物质或为动物质，或为动植物混合物，在此时期有较大争论。各种各样的有机物质、动物、植物和混合起源的有机遗体，都曾被作为石油的原始物质。Engler(1888)和 Höfer(1912)认为海相动物是石油的原始物质，而 Крәр(1923)则认为陆地植物是石油的原始物质，但将动植物残骸组成的海相软泥中的有机物作为原始有机母质的看法得到了广泛的支持(Губкин, 1937)。这些物质是浮游生物的脂肪和一些腐殖质、蜡质、树脂和其它物质的混合物(Стадников, 1937)其化学成分包括醚、蛋白质的变化产物以及沥青物质。这种沥青物质中有分子量很高的碳氢化合物(Smith, 1954)。这些碳氢化合物的发现就成为软泥中或在沉积阶段和成岩早期形成石油学说的证据。总之，人们已认识到石油生成可来自任何有机残体，可以来自植物，也可以来自动物，可以来自高等生物，也可以来自最简单的生物。所有有机质若其残体沉积在沉积物中，都能作为形成烃类的原始物质。就形成石油的有机组分而言，无论是脂肪、蛋白质还是碳水化合物，都有证据证明可以形成烃类。

关于有机质成油转化的条件，当时已有非常多的论述。认为主要的因素有：①热力；细菌；③ α -射线；④催化剂；⑤压力(Соколов, 1948)。在石油形成的不同阶段中，不同因素的作用强度有所变化并协调发展。热分解被认为是有机质成油有效而长期的作用，而石油的旋光性和甾类化合物的存在，证明石油形成温度不超过 200℃，但有机化合物的热分解温度相对较高，常作为热分解时形成烃类的原始物质——脂肪、蜡质和角质是耐热化合物(>460℃)，甚至在高温下也如此。高级脂肪酸在有催化剂的情况下也在 300℃以上才能分解。树脂的分解温度平均在 150℃以上，但蛋白质和其它含氮化合物的分解温度较低(50~70℃)木质素和纤维素在 250~300℃下开始分解，但木质素转化成的腐殖酸在温度高于 100℃时就开始分解(Соколов, 1948)。但是，石油埋藏的地质条件研究表明，石油的生成在许多地方是在不超过 100℃温度下进行的，甚至 50~60℃，还不是可能形成石油的最低极限温度(Соколов, 1948)。Соколов认为，尽管在低温下有机质成烃的分解速度很低，但考虑到沉积岩存在的地质历史以百万年计，因此，较长的时间可以补偿有机质在不太高温度的低速分解，以致最终能形成大量的分解产物。由此看来，在 50~100℃的温度下，沉积岩中某些有机质在地质时期内可能发生完全分解或部分分解，在压力和催化剂共同作用下，石油可以在几十度至 200℃下形成。

关于压力，Соколов(1948)认为，单靠增高压力难以使高分子有机质生成液态烃和气态烃，压力只能导致沉积有机质的压缩和缩聚作用，使不饱和化合物转化为较饱和的化合物，也可以影响分解过程方向和最终产物成分。Гринберг在实验室压力增高而温度不高条件

下，从植物油中获得了碳氢化合物。另外，在高压之下，由于质粒的接触，可以发生剪切力，这对石油的形成相当有帮助。

原始有机质分解成为烃类的天然铝硅酸盐的催化作用，在这一时期引起了极大关注。Н.Д.泽林斯基 (Зелинский, 1927, 1929) 及其同事对有机质分解产物中常见的典型有机物——脂肪酸、胆甾醇、油酸、蜡质、桦皮素及松香酸等加入氧化铝进行分解研究，证明了粘土在生油过程中所起的加速作用。油酸、胆甾醇加氧化铝后，在室温下开始反应，150 时反应异常快，形成液态饱和烃、不饱和烃和环烷烃，含蜂蜡、松香酸和植物甾醇的桦皮素在更低的温度下也形成液态烃。在粘土存在和较低温度下从鱼油中可以制成主要由环烷烃组成的类石油 (Kobajachi & Jarmamoto, 1927) 粘土矿物作用于其他有机化合物 醇、醚、酮 在 150~260℃ 时亦能形成类似石油的烃类 (Гутыря, 1943)。Jurg 和 Eisma (1964) 用二十二烷酸在膨润土参与下加热至 200℃，获得了一系列烷烃衍生物，并根据实验提出了由脂肪酸转化为烃类的正碳离子成烃机理。因此，在粘土参与下，有机质可以在较低温度下形成石油，大量的石油不仅在 100~150 时生成，而且在低于 100 甚至 50 的温度时也能形成 (Соколов, 1948)，化学方面的研究支持了这一观点 (Hanson, 1959)。

石油的放射性成因说是以生油页岩层中往往富集放射性元素的地质实际为前提。20 世纪 20 年代在苏联 (Соколов) 和美国 (Lind & Bardwell) 同时发展起来的。Соколов 用实验证实 α -射线作用于有机质 (泥炭、含碳物质) 时，这些有机质就发生分解。脂肪酸可变为石蜡烃，环烷酸可变为环烷烃。 α 粒子对有机质的作用，似乎是在低温下进行的热解作用，如果仅加热分解脂肪酸，温度必须高于 300℃ 而在 α -射线作用下，这种分解在任何温度下都可以进行，即使在很低的温度下也能进行。放射性 α -粒子作用于水，使其分解而生成氢，成为有机质成烃过程中氢化作用 (加氢作用) 中氢的一个重要来源 (Зелинский, 1936) 而这一作用至今仍有重要意义。

此外，细菌对有机质的作用并形成烃类已在前文作过论述，这也是有机质早期成烃的一个重要作用。

总之在 20 世纪前半叶，有机成油说及早期成油说得到了空前发展，从地质学、地球化学以及生物学等方面对成烃母质、过程、地球化学条件及物理、化学因素等方面论述了石油的早期形成与聚集。石油的有机成因学说不特别强调某一个外部因素，而是基于温度、压力、细菌活动、催化剂和放射性等因素的协调作用，它们是彼此相联系着的。比如，温度增高使细菌活动终止，压力影响催化作用和水解作用，增压发生有机质的聚合，减压发生有机质的水解。放射性作用既不取决于温度，也不取决于压力，但可以影响细菌活动和催化作用，特别是 α -粒子分解水形成的氢气，成为有机质加氢作用成烃过程中氢的重要来源。

2 晚期成烃 (干酪根热降解成油) 说

20 世纪初，人们已注意到原油成分和比重随温度或沉积岩变质程度加深而变化的现象。50 年代中期开始，由于色谱，尤其是气相色谱技术的应用，地质体中微量可溶有机质的研究得到了快速发展，人们能够系统地研究沉积物、沉积岩和石油中的正烷烃、脂肪酸的分布特征和成因 (Smith, 1954; Stevens et al., 1956; Meinschein et al., 1959)。据 Degen (1965) 统计 60 年代中期，已从现代沉积物、土壤、沉积岩和水体中分离鉴定出五百种以上化合物，