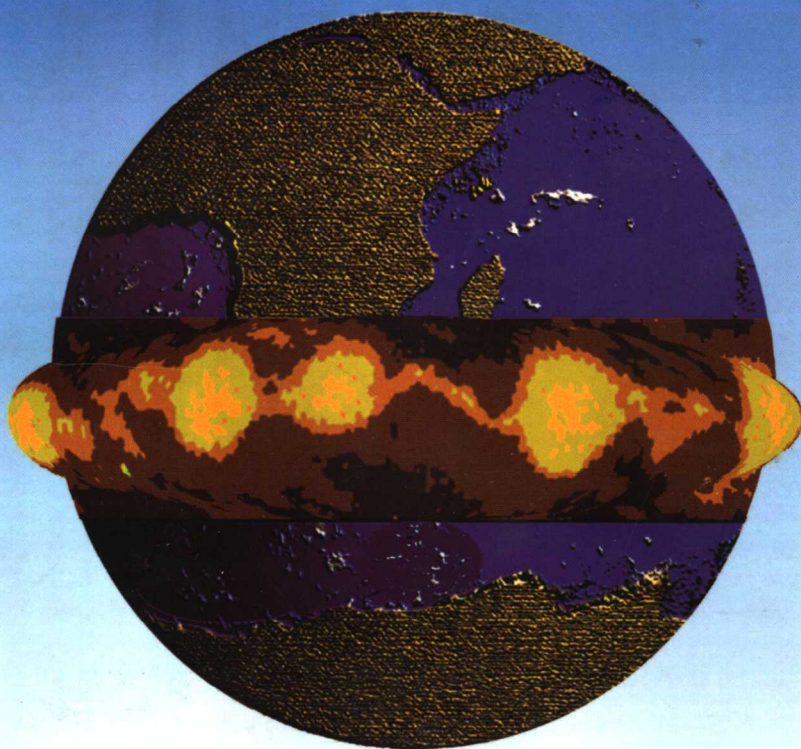


煤成油理论 与实践

胡社荣 编著



地震出版社

煤成油理论与实践

胡社荣 编著

内 容 提 要

本书全面、系统阐述石油起源的假说,煤成油理论和实践,煤田和油气地质学,煤造石油,植物生油,煤成油研究历史和现状,煤、干酪根显微组分及生烃潜力,煤成油演化和形成机理,盆地热模拟,油源对比和生源对比,有机岩模拟实验,煤相、有机相,层序地层学和含油气系统理论的历史发展,世界典型发育煤成油田含煤盆地的油气地质特征、煤成油研究现状、进展及存在的争议问题,煤成油田勘探地质模式等。

本书可作为煤田和油气地质研究者、石油化工研究者、油气生产及决策部门、科学史研究者及相关高等院校师生的参考书。

煤成油理论与实践

胡社荣 编著

责任编辑: 蒋乃芳

*

地质出版社 出版、发行

北京民族学院南路9号

北京地大彩印厂印刷

*

787×1092 1/16 12印张 300千字

1998年12月第一版 1998年12月第一次印刷

印数 0001~1000

ISBN 7-5028-1635-6/P·995

(2085) 定价: 25.00元



限于我们对宇宙认识的局限，基于不断涌现出来的层出不穷的新资料，即使被认为是革命性的、全新的、经典的理论或假说，一旦提出，相伴而来的总是这样或那样的问题和矛盾。“物壮则老”，我们完全可以对所谓的完全正确并具指导性的理论提出怀疑。17 世纪的时候，大家认为牛顿力学是对的；当速度达到光速的时候，牛顿力学就需要改进。因此，到了本世纪初，就有了爱因斯坦的相对论。相对论提出刚 20 年，海森堡、狄拉克等人又发现当物体很小的时候，相对论也需要改进。科学就是在不断地推翻、改进先存的理论，建立全新的理论基础上循环往复地、不平衡地发展的，且这种改进的速度正变得越来越快。认识世界没有穷尽，科学家只能逼近真理而不能最终掌握真理，我们没有任何理由相信任何一种理论或假说已正确到了尽头。

——本书卷首语

我们所见的固然美好,我们明了的愈加美妙,我们尚未悟彻的更是不胜其美,美不可言。

——Neils Steensen 丹麦解剖学家和地质学家(1638~1686)

前言

1993年,在石油勘探开发研究院陈永武教授的关照下,我初踏石油地质之门,参与西北侏罗系含煤盆地石油地质研究。想当初,我很想有一本系统的含煤岩系成油研究方面的大全之书,能领我很快地入门。这本书最好像煤岩学教科书——《斯塔赫煤岩学》、石油地质学教科书——莱复生的《石油地质学》这样的书,既有论述问题的系统研究发展史、前人的研究成果等,又有系统的参考资料。要有这样的一本书,这将给我带来多大的方便!从这时,我就萌发了将来要写一本有关研究含煤岩系成油的,这是一本集科普、煤成油研究历史、基础知识、存在问题和深入研究方向之大成的既通俗、简单,又有一定深度的煤成油研究工具书性质的书。

我仅学过的一点东西是构造地质,对煤岩学略知基本常识,在1993年,对石油地质学连门都摸不到,想去写一本涉及油气地质研究发展史、煤岩学、有机地球化学、层序地层学、含油气系统、成熟度、盆地构造分析和煤成油等方面较系统的似工具式的书,真有些异想天开。好在这不知天高地厚的幻想,逼我去翻看油气和煤田地质方方面面的书。我也想学前人达到“昨夜西风凋碧树,独上西楼,望尽天涯路”的境界,想横看万千书世界,纵游历史文(章)长河,无奈当今世界实在是信息爆炸,读不尽这方面的书。原打算翻遍地质图书馆有关这方面的书,可越翻越觉得自己不自量力。

六年来,为研究西北侏罗系含煤盆地的油气地质,作者走青(海)、甘(肃)、宁(夏)、新(疆)和内蒙古,踏勘山岭,穿越盆地,上油田,下矿井,进实验室,入图书馆,凭此得以陆陆续续发表了10多篇有关煤成油研究方面的文章和完成了数份西北侏罗系含煤盆地研究的报告,在此基础上,整理出由四章构成的本书。

第一章,石油形成的假说、煤成油理论和实践的脉络、煤造石油的历程、植物生油的情况。

第二章,将涉及煤成油研究的基础知识归纳成12个方面,详尽而又概略地对其研究历史、现状和进展进行介绍。

第三章,对著名的、世人较公认的煤成油田发育盆地——吉普斯兰盆地和印度尼西亚马哈坎三角洲库太盆地和西北爪哇盆地,以及以发育气田为主的中亚卡拉库姆盆地,实际上也属含煤岩系成油田的西西伯利亚盆地进行介绍。

第四章,在讨论了煤成油研究中的一些有争议问题和指出需进一步研究的问题后,提出了我国乃至世界煤成油田的形成规律和对其勘探开发的模式。

本书的特点是:涉及领域广,讨论问题多。不仅限于煤成油研究领域,还涉及相关领域的一些问题;对煤成油研究历史、煤成油研究中存在的争议问题和今后含煤盆地油气勘探的方向和模式都有自己的见解。所以,本书兼有煤成油研究史书、工具书、教科书和科普书的

性质。人的能力毕竟是有限的，正因为涉及范围很广，难免有的地方有说“外行”话之可能。书后列出的大量参考资料就是为弥补这一不足的。

本书的主要见解有以下一些方面：

(1) 在运用显微组分评价油气生成潜力时，应考虑煤显微组分、超微类脂体、微生物量等指标，而不能仅仅考虑常规的煤显微组分组成这一指标；

(2) 系统地研究了陆相生油理论的发展脉络，依据翔实的资料提出谢家荣为我国提出陆相生油论第一人；早在 1912 年，陈焕就已将涉及陆相生油理论的内容介绍给了国人。

(3) 比较详细地讨论和坚持不可能形成以腐殖煤为主要贡献组分的有工业意义的油田、低成熟条件下不可能形成煤成油田、含煤岩系中以泥岩生油为主等观点；目前比较公认的以煤层为主要贡献组分形成的油田只有印度尼西亚的西北爪哇盆地，其煤为藻烛煤。

(4) 研究含煤盆地的油气形成规律是一项综合性的课题，我们可以汲取含油气系统和层序地层学的系统和组合分析的精髓，构造的综合分析、有机地球化学和显微组分定量分析的内涵。只有在多角度综合分析研究的基础上，我们才有可能正确地认识煤成油田的形成规律。

(5) 在研究了世界含煤盆地油田形成规律的基础上，提出了含煤岩系盆地演化的三种剖面类型的概念：剖面上由完整的湖（海）平面变化旋回层序组成的演化类型、没有发育水进体系域的演化类型和没有形成湖（海相）泥岩的一些山间盆地演化类型。在此基础上，建立了含煤盆地油田勘探的模式，即将层序地层学、有机地球化学和构造地质学有机地结合起来的盆地剖面演化类型与油田形成关系模式；提出只有在由完整的湖（海）平面变化旋回层序构成的演化类型盆地才能找到油田的观点。这一模式（或观点）是在研究和总结了世界含煤盆地成油田的基础上建立的，事实和将来的实践已经或将会证明这一模式的相对正确和合理性，以及对含煤盆地油气勘探的指导性作用。

作者撰写本书后得出的最深刻的认识是，要读原著。在科学研究上可以怀疑一切，无论是专家还是权威，对其所引证的资料或结论，还是看一看原文为好；在科学研究上可以怀疑一切，这也就是孟子所谓“尽信书不如无书”。本书的主要目的是阐述煤成油研究中的现状和发展脉络，提出西北侏罗系含煤盆地的找油气模式；通过阅读本书可简捷地了解煤成油研究的历史，更快地进入煤成油气研究的角色。能做到这一点，就是作者最大的宽慰了。

认识世界还远没有穷尽，一切美好的科学结论或真理总是横亘在我们的前方！

本书在撰写过程中得到了煤田、油气地质室高文泰、金奎励、任德贻、张鹏飞、田宝霖、梅美棠等老教授的指教和帮助，也得到了唐跃刚、方家虎、王延斌、邵龙义博士等的指教和帮助；中国石油总公司石油勘探开发研究院的黄第藩、程克明、薛淑浩、李晋超教授，赵长毅、吴因业、罗平博士，郭宏莉、杨福忠、董大忠高工也给予了热情的指教和帮助；中国科学院兰州地质所的罗斌杰教授、广州地球化学所的刘德汉教授、中国石油天然气总公司信息研究所陈明霜高工提供了资料等方面的帮助。在此，作者衷心感谢提到和没有提到过的指教和帮助过的所有老师和同行。

作者也衷心感谢北京大学地质系钱祥麟教授对撰写本书的鼓励和支持！

本书的插图全部由研究生张喜臣制作完成，他为书稿的后期整理花费了巨大的精力，在此表示衷心的感谢！

目 录

第一章 煤成油研究历史与现状	(1)
第一节 石油起源的假说	(1)
第二节 关于陆相生油理论新考	(9)
第三节 煤成油研究理论与实践	(12)
第四节 煤造石油	(18)
第五节 植物成油	(23)
第二章 煤成油研究的煤岩学和石油地质学基础	(29)
第一节 煤岩学中一些概念的由来和煤炭分类	(29)
第二节 煤成油显微组分	(34)
第三节 镜质体反射率的抵制作用	(50)
第四节 煤和石油地质研究中的荧光方法	(53)
第五节 一些煤显微组分生油模式	(56)
第六节 煤的孔隙特征和煤层气	(57)
第七节 沥青	(67)
第八节 有机岩石学及研究方法和内容	(69)
第九节 干酪根	(70)
第十节 有机地球化学参数和成熟度研究	(76)
第十一节 恢复热历史的 TTI 方法	(89)
第十二节 煤田地质与石油地质的关系	(97)
第三章 世界一些发育油田的含煤盆地	(99)
第一节 吉普斯兰盆地	(100)
第二节 印度尼西亚西北爪哇盆地和马哈坎三角洲库太盆地	(106)
第三节 西西伯利亚盆地	(115)
第四节 卡拉库姆盆地	(121)
第五节 关于煤成油田形成的若干问题	(127)
第四章 煤成油理论和实践中的若干问题	(129)
第一节 煤成油研究中的若干争议问题	(129)
第二节 含煤盆地找油(田)模式	(141)
第三节 含煤盆地油气勘探模式	(153)
参考文献	(164)

一位哲人说，历史就像一条流动的河。河里任何一处河水的流动都受到上游河水的涨落与漩涡的影响。但上游河水的涨落与漩涡又受到你观察之处的岩石与河湾的影响。

但实际上，其还同时受观察者的认识水平、认知程度及对现实认识之间存在差距的影响。事物的变化会不断改变人们的认识，人们认识的提高又会改变事物，人们还没有掌握终极真理。因此，我们对任何理论和学说，都可抱怀疑的态度。

——作者

第一章 煤成油研究历史与现状

第一节 石油起源的假说

近代关于石油起源的假说分为两种：有机成因说和无机成因说。无机成因说包括：宇宙说、费—托理论、岩浆说、反射性说、变质说和地幔脱气说等。有机成因说包括植物说（海生和陆生植物说）和动物说。说起人类认识、使用石油的历史，则要比这些假说的提出早得多。

据希腊史学家 Herodotus 的记载，在距今约 2430 年前（公元前 450 年），巴比伦人就已用石油沥青与粘土的混合物来胶结巴比伦塔的壁砖了。又据凯撒时代的罗马史学家 Diodorus 的记录，居住于黑海周围的人民，已将当地所产石油输出至埃及贩卖。埃及人最初将其应用于调制木乃伊的防腐剂，后又用作车轴的润滑剂。稍后，石油输往欧洲。欧洲人则把石油用作治疗外伤的药物。罗马作家 Pliny 认为，在太古之时已有人用西西里岛所产石油以供灯用（鲍璞，1917；柯清水，1980）。

我国有关油气的文字记载，据今所知，最早者为《易经·下经夬传》中的“泽中有火”。易经成书于西周（公元前 1122 年至公元前 770 年之间）（西北大学地质系，1979）。

东汉班固的《汉书·地理志》载：“（上郡）高奴有洧水，可难（古‘燃’字）。”按汉书，高奴县，即今之陕西肤施县境。可知在汉朝时候，陕西肤施地方，已发现石油。陈正祥的《中国的石油》一书和台湾“中国石油志编辑小组”编撰的《中国石油志》中都引用了我国北宋李昉等编撰的《太平广记》中的记载：“孤井在延长县北 90 里，井出石油。”宋沈括的《梦溪笔谈》亦载：“富鄜境内有石油，旧说高奴县出脂水，即此也。”富鄜地方皆在陕西，脂水即唐朝时候所指之石油。又甘肃玉门一带，在汉时也发现石油，《酒泉志》载：“汉武帝时，突厥犯酒泉，当地郡民，已油苗洒于敌军攻城的武器上，纵火焚之，浇水则益明，因击退敌军。”又据《元和郡》载：“石脂水在玉门县东南 280 里，泉中有苔，如肥肉，燃之极明。”（柯清水，1980）据章鸿钊（1917）的考证：“石油古称石漆。唐称石脂水。五代及宋称孟火油。或称石脑油。而石油之名亦始于宋。其后或称火井油。或称雄黄油。亦或称脑油。今后通称为石油。”

钻井早就被用作深掘地下矿藏的方法。据有的资料称，最早的油井是古波斯首都苏萨附近的阿尔伐利卡地区的油井，开始采油的时间是 2500 多年前（周珊等，1994）。如众所知，

公元前 200 多年, 在中国的四川省, 为了取盐水, 利用竹钻杆钻井。其中有一些井深达几百米, 有时可燃性气体与盐水一起冒出来。在云南、四川和陕西省, 从古时候起就利用天然气。天然气沿着木制的管子从它冒出的地方传送到村镇, 主要是送到庙宇, 用于取暖和照明 (梁布兴等, 1959)。据王凤琴等 (1993) 的资料, 公元前 3 世纪~公元前 1 世纪的战国时期, 李冰在四川兴修水利, 钻凿盐井。在临邛 (今邛崃) 的盐井中发现了天然气, 当时称之为“火井”。《元一统志》记载: “在延长县南迎河有凿开石油一井, 其油可燃, 兼治六畜疥癣, 岁纳壹佰壹拾斤, 又延川县西北八十里永平村有一井, 岁办四佰斤入路之延丰库。” (李兰兮等, 1303)

由上可知, 人类很早就认知和勘探了油气并加以利用。但是, 对油气成因的研究则是 18 世纪的事。

自俄罗斯天才学者罗蒙诺索夫 (Ломоносов, 1711~1765) 最早提出油气的有机成因学说以来, 先后提出了多种关于油气生成的假说。

一、无机成因说

1. 乙炔说 (Acetylene theory)

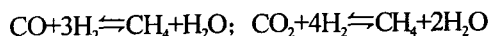
1868 年, 法国化学家 Bethelot^①曾在实验室中利用二氧化碳、碱金属与水合成石油的成分。他认为, 在高温下, 地壳下的二氧化碳与碱金属作用, 可生成碳化物 (carbides), 其碳化物碰到水后即变成乙炔 (acetylene), 乙炔可因地层之高压而聚合成高级之碳氢化合物。这可能是关于石油无机起源的最早假说 (柯清水, 1980)。

2. 碳化物说 (Carbides theory)

1877 年, 俄国化学家门捷列夫利用沸水或稀酸处理碳化铁或碳化锰之混合物, 产生类似于石油的成分。这一结果使他认为, 由于地壳内部的碳化铁与地下水作用而产生碳氢化合物, 最终形成石油。Moissan 曾由实验测得, 铀、镧、铈及铝等金属碳化物若与水相作用, 可以生成气态、液态及固态石油成分; Sabatier 及 Senderens 认为, 由乙炔之触媒加氢反应, 可以生成类似石油的化合物。故三人都赞成碳化物说 (柯清水, 1980)。1840 年, 著名地质学家 Humboldt 根据上述假说, 较系统地提出了碳化物成因说 (谢家荣, 1930)。

3. 宇宙说 (Cosmic origin)

前苏联学者 В. Д. 索柯洛夫 (Соколов) 于 1889 年 10 月 3 日在莫斯科自然研究者协会的年会上第一次提出了这个假说。1892 年, 这个学说曾发表在 В. Д. 索柯洛夫所写的一篇短文中。按照 В. Д. 索柯洛夫的观点, 随着地球的冷却, 碳氢化合物为冷却了的基岩所吸收。其一般过程可表述如下:



在温度低于 1000℃ 时, 反应向产生甲烷及水蒸气的方向进行 (梁布兴等, 1959)^②。В. Д. 索柯洛夫确信, 自然界中 C 及 H 的储量是很大的, 并且由碳和氢生成的碳氢化合物, 在天

^①关于 Bethelot 的人名和提出此说的年代, 很多书和文章上写的是 Bethelot, 1866 年, 如戴金星等 (1995)、柯清水 (1980), 等等, 本书作者所使用的人名和年代依据 Moore (1947) 和谢家荣 (1930, 1934) 之书。

^②本书在 И. О. 布罗德和 Н. А. 耶列明科的《石油及天然气地质学原理》一书中描述道: Н. А. 索柯洛夫 (Соколов) 1892 年提出该学说, 另一学者 В. А. 索柯洛夫在理论上论证了在温度为 1000℃ 或低于它时在天体外圈中能形成甲烷 (CH₄), 其人名和说法与梁氏等的略有不同。

体发展的极早期就出现了。继而他断言，在地球上碳氢化合物的产生和其他天体上一样，当形成了一定数量的碳氢化合物后，其相当大一部分为岩浆所吸收，若当甲烷存在于大气时，地球为灼热的液体状态，那么就不难理解为什么当岩浆冷却时甲烷为岩浆所吸收，而不被分离出来。

然而，根据地球是由陨星尘埃形成的宇宙假说的创始人O. IO.施密特的宇宙理论，在较小行星的（如地球是与巨大行星不同的）原始大气中，没有甲烷和其他的轻质气体。这些较小的行星在形成时温度很低，并具有很大的质量。

B. II.索柯洛夫确信：“随岩浆的继续冷却及固结，含于其中的碳氢化合物就沿着岩石圈中由错动所产生的裂隙逸出，这种作用一直持续至今。”他曾以火山气中含有可燃气体和在岩浆岩及变质岩中有石油显示来证实以上的论点（梁布兴等，1959）。

宇宙说遭到了许多石油地质工作者的反对，并提出了许多反对的理由（梁布兴等，1959）。

不过，宇宙说也有它合理的一面。从地球深处逸出的火山气体中，已确认有火山气体的存在。这种烃类是通过无机过程而发生的。在太阳系诸大行星——木星、土星、天王星和海王星的大气中，已确定烃的浓度很高；在很多小星球和慧星上，也确定有烃类存在。在所有这些场合，烃类的无机生成都是不容怀疑的（索柯洛夫，1954）。

近代宇航技术和宇宙化学证明，宇宙说前提是有依据的，这从行星大气成分和宇宙飞船“旅行者一号”探测确定的土卫六大气中氮约占98%，甲烷不到1%，同时还含少量 C_2H_6 、 C_2H_2 、 C_2H_4 等得到证明（戴金星等，1995）。球粒陨石中还发现有卟啉化合物。陨石中的碳、氢化合物早在1806年已在Alais碳质球粒中发现，至今先后发现了60余种烃类物质，如脂肪烃、芳香烃、氨基酸、卟啉、类异戊二烯、烷烃、嘌呤、嘧啶等。研究表明，这些类物质是无机成因的，是原始前生命物质，而不是地球外生命的遗迹（王涛，1997）。于志均等1976年在我国的吉林球粒陨石中发现含有烷烃、芳香烃、异戊间二烯烷烃、氨基酸、卟啉、色素等有机化合物。有机物质有可能是在地球开元几亿年后就已经形成了，至少在34亿年前就形成了。从1963年美国天文学家Weinreb首次在星际介质中发现羟基分子（OH）以来，经三十几年的努力，天文学家已观测和证实了92种分子，其中大部分为有机分子。在星际分子中发现了酰胺分子，如甲亚胺（ NH_2CN ）、甲酰胺（ NH_2HCO ）和甲胺（ NH_2CN_3 ）。在人马座B₂星云发现了环形分子，如 C_3H_2 和 C_4H 等（郑兴武等，1993）。阿波罗11号、12号宇航器带回的月球样品中，检测到氨基酸、脱氧核糖核酸之类的有机物；在月球表面也存在有机物。有人据此认为，采用宇宙观点的清晰的石油成因学说，将有可能建立起来（安藤直行，1976）。

4. 地幔脱气说

1882年，Moissan发现，在火山喷出气体中，总含有微量的碳氢化合物。他由此而联想到这类碳氢化合物可能来自地壳的内部。据此，他便认为在地壳的深处，所含之碳与氢能于火山爆发或地球内部发生变化时结合成碳化物，此等石油成分，复于接近地面的地层下，与低温的岩石接触并冷凝为石油。至于地壳中之碳与氢的来源为何，他则没有清楚的交代（柯清水，1980）。

Кроиоткин 1954年在《地壳内碳氢化合物的生成》一文中，既不赞成岩浆说，也不同意有机成因说，提出了地幔脱气假说。Gold于1980年、1982年（1984）赞成两种不同的烃类脱气方式：一种是地壳中的深部气与岩浆一起向上运移，若经过侵入体附近高温带时，高

温与不大的静地压力双重影响下导致烃的分散并形成 CO_2 与 H_2O , O_2 的易逸度提高, 特别是经过花岗质岩浆时, 也引起烃的分解。因此, 岩浆活动或火山作用并不有利于气体的聚集; 当深部的烃向上运移时, 既没有遇到岩浆源, 也没有在地壳浅部遇到高过热层, 这样, 烃类未受分解, 在合适的条件下在沉积层或基岩裂隙中可聚集成藏。Кроиоткци 于 1976 年称这一过程为“冷脱气过程”。

徐永昌等先后于 1976、1979、1990 和 1991 年, 王先彬于 1987、1989 年进行氦的系列研究并发现幔源氦工业储集(徐永昌等, 1994)。戴金星和唐忠取自 1986 年起对我国无机成因的二氧化碳及其气藏进行了研究(戴金星等, 1995, 1997)。他们的研究表明, 有工业意义的气藏可由无机成因。

我国黑龙江省五大连池、广东省鹧鸪窿和云南省腾冲县火山区高温温泉气中的二氧化碳、氦和甲烷, 东太平洋北纬 21° 处中脊喷出的甲烷和氦以及大西洋中脊的 Popping 岩中的甲烷是这类成因的气(戴金星等, 1995; 张恺, 1997)。

但是, 目前人们并没有找到太古代时形成的油气藏。

5. F-T (Fischer-Tropsch) 合成说

1923 年, Fischer 和 Tropsch 在前人研究的基础上, 由煤合成了石油, 因之称之为 F-T 法。Friedel 等早在 1963 年就发现, 在所有石油中均存在甲基戊烷和甲基己烷。实验分析表明, 2-甲基戊烷比 3-甲基戊烷多, 而 3-甲基己烷却比 2-甲基己烷多。这种相反情形在许多原油中也被发现。Friedel 等进一步认为, F-T 合成的两个参数——链增长概率和链支化概率, 它可精确地预测沙特阿拉伯石油异构体的含量, 并指出其机理类似 F-T 合成, 而不是由化石有机物热解形成。Elanskiy 指出, 在有 CO_2 存在的条件下, 含铁橄榄石的蛇纹石化作用可形成赤铁矿和烃类, 诸如乙烷。Studier 等人证明了 Orgueil 和 Murray 含碳球粒陨石的烃类组成(在低碳数中苯和甲苯占优势, 在高碳数中脂烃族烃占优势), 可以在实验室通过 F-T 模拟合成, 然后再加热使部分烷烃转化成芳香烃。Lancet 等也指出, 在含碳球粒状陨石中观察到的烃(芳香族聚合物和溶剂可抽提沥青)和碳酸盐(白云石和铁菱镁矿)之间的碳同位素分布有大的差异, 它可通过 F-T 合成来模拟再现。他们提出, 这些陨石在 $27^\circ\text{C} \sim 227^\circ\text{C}$ 温度范围内产生 F-T 温度反应, 在合成中, 磁铁矿和含水硅酸岩为催化剂, 在蛇纹石化作用期间, 含水硅酸岩与氢镁和铁碳酸盐一起形成。Robinson 于 1963 和随后根据 Friedel 等的资料(Robinson, 1966)提出, 可能在数十亿年前, 在催化剂的参与和升高温度的条件下, 类似 F-T 合成正常烃方式而合成了原油。后来, 原油中可能有生物质的加入。Szatmari(1989)根据前述的研究结果进一步总结出石油形成的 F-T 合成理论: 当一氧化碳(大规模变质作用或俯冲沉积碳酸盐岩的火成脱碳作用形成的)与浅部地幔岩石圈和蛇绿岩推覆体的蛇纹石化作用(在缺少空气的情况下)形成的氢发生反应时, 以磁铁矿和赤铁矿为催化剂, 由 F-T 合成方式生成液态石油。他进一步认为, 斜向板块运动产生深部断层, 在这一作用过程中, 有利于蛇纹石化作用和液态烃的形成。世界上石油最丰富的产地, 包括中东的石油, 都可推测性地解释为由这一机理所形成。

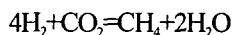
在这里我们需要指出的是, 对于中东等石油最丰富的地带和石油聚集带, Gold 等于 1982 年提出了不同的成因解释: 爪哇和苏门答腊含油气区实际上与火山带及深部地震带平行。火山带或地震带可以从新几内亚西端经过一系列小群岛, 然后穿过爪哇、苏门答腊、安达曼群岛、再到缅甸的褶皱山脉。在所有这些不同的地质区带中, 分布着丰富的工业油气藏和油气

苗。伊拉克、伊朗、波斯湾各国和沙特阿拉伯的很多大油田可分别用母岩特征、地质历史和地层差别解释，但是，有一个最重要的特点是，在极不相同的沉降深度和广阔的区带内存在特大油气田。所以，以合理的推测，深部原因可能是对如此巨型区带起作用的因素（Gold，1984）。

6. 放射性说

H.П.泽林斯基首次提出放射性作用在成油过程中是具有意义的。稍后，B.A.索柯洛夫于1925年提出了石油的放射性成因假说。

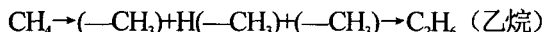
B.A.索柯洛夫用实验证实， α 射线作用于有机物（泥炭、含碳物质）时，这些有机物质就发生分解。他曾利用动植物形成的各种有机物来进行实验，并获得了氢、二氧化碳及甲烷。此外，他还作了如下的实验：将 α 射线作用于水获得游离氢，游离氢再与二氧化碳化合则生成甲烷：



在 α 射线的继续作用下，获得更高的高分子化合物。

该学说是以沉积岩中所含放射性元素的作用为出发点的。在砂岩中，放射性元素含量为 $4 \times 10^{-4}\%$ ，灰岩中为 $2.6 \times 10^{-4}\%$ ，在酸性及基性结晶岩中，铀的含量稍高一些（ $9 \times 10^{-4}\%$ 和 $3 \times 10^{-4}\%$ ）。沥青页岩和炭质页岩被认为具有较高的放射性（梁布兴等，1959）。Russel曾于1945年检验过510种沉积岩试样所含的放射性元素，发现海相页岩的放射性要比其它沉积物高得多，古生代页岩的放射性平均又要比新生代页岩为高，而且在较老的地层中，其放射性的差别比在较新地层中为大。

实验证明，在放射性作用下可以进行甲烷的叠合作用，这正是一般方法所不能做到的。



以上反应还可继续向下进行（梁布兴等，1959）。

Sheppard等于1946年提出，分子式为 RCOOH 的饱和脂肪酸（如软脂酸 $\text{C}_{15}\text{H}_{31}\text{COOH}$ ）受 α 粒子的轰击后可产生烷烃；Breger等于1950、1951年先后得出环烷酸（环己酸）受 α 粒子轰击后可产生环烃；Knebel于1946、1953~1954年间在实验室中用 α 粒子轰击甲烷及其它气态烃，结果发现，可以产生很大部分的氢和不饱和烃；如用 α 粒子轰击液态烃，也可以产生同样多的氢，而且不饱和烃可能还要多些。但是在原油里就没有这些东西，即使有的话数量也极少（莱复生，1975）。

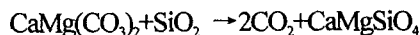
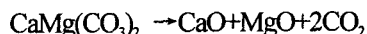
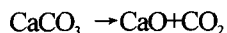
放射性转化说有许多缺点。反对 α 射线辐射作用能使烟雾变成石油说法的主要论点早在1931年就由Lind提出：至少在实验室试验中，氢原子在反应中会被分裂。这样，在地质历史时期内，就会形成碳比氢高的各种重油，而一般说来，从烟雾变成石油时会使氢对碳的比率逐渐增高。但是，这里形成的游离氢可能被用于其它需要更多氢的转化过程中。Beers等基于一种放射性高的黑色有机页岩的发现，于1944年提出了另一个反对放射性转化说的论点：如果美国的安特林—卡坦诺加—乌德福页岩（下密西西比统及上泥盆统），从泥盆纪时期起一直在进行着放射性转化过程的话，那么，在这页岩的裂隙和小孔中就应该有游离的石油，而有机物很少或者没有。但是，事实不是这样，这里的烟雾含量很高，而且除去少数储集天然气的地区，这种烟雾全是含焦沥青质的；含石油却很少或者没有。诚然，天然气可能是由放射性作用形成的，但是在许多地区，天然气的分布毫无规律，而页岩的放射性及烟雾含量普遍增高，这说明天然气是由其它原因生成的（莱复生，1975）。

我们知道,地球内部进行着各种核反应。经核反应后形成的稳定的长寿的子体可形成新的元素。核衰变、核聚变、核裂变后形成的无机成因气体和稀有气体均属于此成因。如铀、钍元素经核衰变形成氦;核裂变成氦;放射性 K^{40} 衰变后形成氩、铁;钙裂变后亦能形成氩;钠、镁、氧和氟经衰变后形成氖;铷、铯经裂变成氩;氩是铀、钍和碘的裂变产物。此外,在地球深部由于核裂变水,可以变成氢和氦。根据徐永昌等(1994)和戴金星等(1995)对我国大陆主要油气田和盆地天然气中 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 等的分布特征的研究,表明了无机成因气藏的存在。

7. 变质说

不含有机沉积物的岩石在变质作用中能生成无机成因气。变质作用既可形成非烃气,也可形成烃类气。

化学沉积的碳酸盐岩石受深埋、岩浆活动和大型剪切型断裂作用下,能使碳酸盐岩变质产生大量二氧化碳气体,其反应式如下:



超铁镁质岩(橄榄岩)的蛇纹石化也可产生烃类。如橄榄石的蛇纹石化产生下列反应:



俄罗斯伏尔加—乌拉尔油区巴依冈和丘波夫油田的石油就属此种成因。Abrajano 等在 1988 年提出,菲律宾三描礼士部分蛇纹石化的超铁镁质岩裂缝中冒出气苗,是该岩石蛇纹石化过程的产物,气苗的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 值为 $-7.0 \pm 0.4\%$ (PDB),具有典型无机成因甲烷的特征(戴金星等, 1995)。

8. 岩浆(火山)说

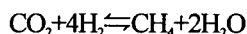
Кудрявцев 是岩浆说倡导者。他在 1951 年提出,石油的生成同基性岩浆冷却时碳氢化合物的合成有关。由于合成是在高压条件下完成的,故可促使不饱和碳氢化合物聚合成为饱和碳氢化合物(密洛诺夫, 1954)。氢气沿着液体岩浆移动时与原子碳化合,于是在垂直运移的过程中就形成了石油烃类(波尔菲利耶夫, 1961)。

库德梁采夫等著的《反对石油有机起源假说》中文版书序中指出:基性岩浆的结晶作用是在 $1000 \sim 1100^\circ\text{C}$ 发生的,此时没有任何一种碳氢化合物(包括甲烷在内)可以存在,当岩浆侵入沉积圈的情况下,对岩浆熔融条件的热动力学的分析得出这样的结论,除了甲烷以外是不可能产生或存在任何一种碳氢化合物的,而甲烷又远非石油。

然而,岩浆说的反对者并不否认处于侵入沉积圈的熔融岩浆本身存在和产生甲烷的热力学条件。

其实,也不能认为(门捷列夫的无机说)是原则上错误的。从地球深处逸出的岩浆中有气体的存在。这种烃类是通过无机过程而发生的。在太阳系诸大行星——木星、土星、天王星和海王星的大气中,已确定烃的浓度很高;在很多小星球和慧星上,也确定有烃类存在。在所有这些场合,烃类的无机生成都是不容怀疑的。因此,无论在地球上或其他天体上,在一定的条件下都可以引起烃类的无机生成。但不应当就此认为,在地球上火成岩中的石油矿床是可能因火山气体或从地内逸出别的气体而形成的(索柯洛夫, 1954)。

如果说成油的岩浆说目前还有争议,与岩浆有关(不仅基性岩浆)的天然气(不仅烃类气还包括二氧化碳、一氧化碳和氢气等)存在与生成是无疑的。从现代岩浆说观点看,岩浆除本身含无机成因气体外,在一定的地质条件下,本身的一些气体又可相互作用,形成另外的无机成因气体。例如以岩浆中镍作催化剂,在 300~350℃(当岩浆侵入沉积圈后)时,岩浆中二氧化碳和氢气反应可生成甲烷:



1979 年,Краб 曾用二氧化碳和氢气,并以辉岩(上地幔的主要岩类之一)作催化剂进行实验,获得了气态烃和液态烃。云南腾冲县火山区高温温泉气中部分甲烷可能是岩浆成因的(戴金星等, 1995, 1997)。

无论是从碳化说倡导者还是反对者的观点来分析,两方均认为并得到实验证明:碳化说可形成无机成因烃类气。

据莱复生(1975)的意见,反对石油无机说的主要理由有二:①石油,特别是中间沸点(121~149℃)的馏分具有旋光性;②在所有各类石油中找到含有大量个别组分的同系烃类。据了解,所有这一类的化合物是从有机物来的,很难由无机营力形成。

二、有机成因说

莱复生(1975)和贾格等于 1969 年分别总结了石油的有机成因,其石油有机成因的主要理由可归纳如下:

(1) 在地球的沉积物中发现有大量的有机物和烃类。

(2) 早在 1835 年,Ж.Бю 就证实了某些石油馏分显示旋光性。旋光有机化合物的合成被认为只出现于生物中。

(3) 石油的 $\text{C}^{13}/\text{C}^{12}$ 比值比大气中二氧化碳的或碳酸盐的 $\text{C}^{13}/\text{C}^{12}$ 比值更接近生物。然而,石油的 C^{13} 含量比生物要低。曾发现类脂化合物在同位素上比大部分有机质要轻,这与类脂化合物是很重要的石油母质的观念很一致。

(4) 存在于石油中的几种化合物的化学结构与存在于生物中的化合物非常相似。如红色钒卟啉络合物等,石油中大部分烃类特别是正烷烃是由生物的脂肪酸而来。

(5) 美国石油学会于 1944、1945 年间在谓之为第 43B 号方案中编辑了一本 74 篇文献的书目提要,其中记述了从苔藓、水草、高等植物、昆虫、软体动物、鱼以及包括人在内的高等动物体中分离出来的各种烃类(Smith, 1954)。

关于石油主要为有机成因,现今的人们已没有什么争议了,但对此也有多种不同的认识。

1. 植物说(Phylogenetic theory)

该学说分海生植物说和陆生植物说。“海生植物为石油成因之根源久为人所公认。就种种关系之实例言之。1860 年,萨基尼亚地方海岸之湿地,有海草埋没于沙滨,厥后分解,遂生与石油类似之液体。依石油生成之状态表示,实例此说颇多赞同。嗣经柏托拉及赖诺罗之研究,依阿乌兹石炭及石油层含有藻类遂定石油为植物之成因。”(陈焕, 1912)这可能是我国最早有记载的有关石油为植物成因的介绍。

根据莱复生(1975)的书载,第一个发表石油可能为海生植物成因的是 Lesquereaux。他在 1866 年即指出,美国东部的泥盆纪石油可能是从海生的纤维状植物来的。据胡见义等

(1991)的书载:1863年,加拿大著名地质学家 Hunt T.S.说:“在北美古生代岩石中,曾产生沥青有机物质,它们是由海生植物衍生而来的,或者是由海洋动物的残余部分衍生的。”

石油是由陆生植物生成的。这个学说是基于有红树科丛林存在的事实,并认为陆生的沼泽植物及泥炭经碳化作用而形成煤,但有时它们受到沥青化作用则形成石油。如前所述,罗蒙诺索夫早在1759年就已经提出煤是油源岩,而煤为陆生植物转变而来。“谓石油与石炭。同为陆生植物所构成。或地方虽偶有石油与炭层相伴。检其炭质。多与普通之炭略同。陆生植物成因说于地质学上似有理由,然亦未能满足如石油与石炭褐炭等比较其性质究属不同。”(陈焕,1912)由陈焕译文可知,至少在1912年前,国外已有人明确地提出陆生植物能生油的观点。

英国地质学家 Craig (1921)是这个学说坚决的捍卫者。他认为石油和煤的原始产物都是一样的,其差别仅在于:如果原始物质被粘土所覆盖,则即形成石油;而这些物质封闭得不够好,则形成煤炭。

2. 动物说 (Animal theory)

“考动物根源说者。谓1803年。于威敦堡地方之页岩沥青中似含有动物之遗迹。1866年。有洛夫氏出。谓克耶奈罗炭之性质与普通炭不同。克耶奈罗炭中。含有多量鱼类之遗迹。与沥青质之分量略生差异。1868年,红海中或产珊瑚礁。且产石油。是则石油之成因实归于动物无疑。1881年,库勒宜兹及格利西亚地方之油层,有多数之鱼类、藓生类、有孔虫类埋藏于其中。该处之石油似全为动物所构成。1889年,银固来尔氏之动物考说表大为有力,谓干馏鱼油所得之液体竟与石油相同。”(陈焕,1912)依本书作者之推测,陈氏译文中之银固来尔氏可能就是 Engler 之中译名。1888年(有人写的是1880年(柯清水,1980)),Engler 在实验室条件下,用鱼肝油在温度为 400°C 和压力为 $10 \times 10^5 \text{ Pa}$ 下蒸馏,获得了比重为0.81的油质,其中并含有饱和的碳氢化合物、石蜡和润滑油(梁布兴等,1959)。1921年,一位日本地质学家小林也获得了相同的结果(波达波夫,1962)。另有说法是,1921年,日本的卡博亚西从青鱼和其它鱼类中也获得了这种油质(梁布兴等,1959)。格费尔1908年在他的《石油及其衍生物》一书中,列举了许多关于生物大量死亡的实例。石油由动物有机体生成的学说是以沙洲理论为依据的。沙洲或沙滩都是在海岸的附近形成,并隔绝了海的某些部分,在被隔绝的部分里建立了新的、促使动物群大量死亡的环境。里海的卡拉一博加兹戈尔就是这种与海洋隔绝的海湾的例子。的确,经常有许多鱼类落入其中,并在盐水中死亡。看来这种说法是正确的(梁布兴等,1959)。

3. 腐泥说 (Sapropelite theory)

石油若系源自于脂肪之变化的话,那么,其起源就非未必仅限于动物,植物也可以为石油之生源,即动植物为石油共同的生源(谢家荣,1930;柯清水,1980)。

所谓腐泥,是指动物之残骸及植物之藻类,因地壳的变动与泥土相混合,后经腐败发酵作用而形成者(柯清水,1980)。

1877年,Л.波波娃和拉兹雪夫斯基首先发现,在某种自然条件下,微生物作用所引起的细胞分解,不仅能产生水和碳酸,而且还能产生碳氢化合物(主要是甲烷)。1893年,Н.Л.泽林斯基和 E.M.布鲁西洛夫斯基确定了黑海和敖德萨溺谷里硫化氢的形成,与软泥中有去硫细菌有关,这种细菌把海水里的硫酸盐还原为硫化氢,同时又氧化了在形成的碳氢化合物。1906年,Г.М.米哈依洛夫斯基首先指出了石油的形成过程是在海相的沉积岩中发生和

发展的，它是动植物遗体厌氧分解的结果，而且这个过程不仅受高温的影响，同时也受盐的溶解作用和细菌作用的影响（波达波夫，1962）。英国地质学家司徒华特于1910年提出，石油是在海泥层面上由腐烂分解（细菌作用）而形成的（库德烈雅夫采夫，1962）。

1919年，H.Д.泽林斯基在温度达400℃而不提高压力的条件下干馏巴尔喀什湖的腐泥，除得到甲烷、一氧化碳、氢、硫化氢之外，还取得了树脂，用树脂进一步加工获得了汽油、煤油和重油。尔后，他又发现了石蜡、环烷及芳香烃石油，也就是说他取得了天然油的全部产物（波达波夫，1962）。

古勃金在1934年的《石油学》一书中阐述了这个学说，也称作腐泥学说或混成学说。他认为石油是由生物淤泥产生的（梁布兴等，1959）。

A.Ф.德波梁斯基于1948年认为，腐殖泥变化成为石油的过程是这样一个过程：腐殖泥—油页岩—沥青岩—软沥青—石油（费得洛夫，1957）。

50年代，前苏联曾有关于石油有机和无机起源的一场争论。在今天看来，争论的双方都有一定的道理，只不过有的当事者对石油成因的看法未免绝对化了一点。有机体能成油，无机物也能形成气藏，这已为今天的绝大多数油气地质工作者所接受。

第二节 关于陆相生油理论新考

关于陆相生油理论，有人曾作过考证（石宝珩，1981；陶世龙，1986；黄第藩，1986），概括其说法一般有三种：①我国石油工人和科技人员根据石油勘探实践总结出来的；②李四光所创立；③在这两种说法之后较为流行的说法是潘钟祥（1941）在国外首先提出，黄汲清等（Huang T.K., et al., 1947）在国内于1943年首先提出（陶世龙，1986；黄第藩，1986；田在艺，1998）。陶文中引证了谢鸣谦（1960）的论述，即前苏联的密尔钦克等在1928年就注意到了阿塞拜疆的生油层为陆相沉积。王竹泉等（1933）的文章所提的事实是陆相生油立论的基础，但不等于把陆相生油作为一种观点提出，所以，在我国，还是潘钟祥和黄汲清率先提出陆相生油理论（陶世龙，1986；黄第藩，1986）。在目前所出版的一些书（包括百卷本中国全史——《中国民国科技史》）或文章中，作者们普遍认为，陆相生油理论为潘、黄两位先生率先提出。而据现有的资料，这种说法很有值得商榷的地方，现探讨如下。

一、中国早期陆相生油理论的形成

1932年，王竹泉和助手潘钟祥一起调查了陕北的石油地质情况。在描述了陕北生油层后，他们对石油之来源进行了研究。在1933年发表的论文中对石油成因进行了讨论。文中提出：“……一在下侏罗纪煤系中，……颇似为肤施油苗之来源。”王竹泉等（1933）并未明确提出陆相地层能生油这几个字，却间接地意味着陆相地层——侏罗纪瓦窑堡煤系能生油的看法。

在此之前，王竹泉（1928）报道了在陕北地区之北的大青山地区：“于三道坝北见煤系上部夹石灰岩六七层，并含有鱼类化石，虽因标本保存不甚完全，难资鉴定，然在中国西北部最初于下侏罗纪煤系采得淡水动物化石者此也。”在陕北地区，他（1926）对陕北马栋臣等所划侏罗纪陕西系进行了重新研究，得出：“……马栋臣氏等通属于侏罗纪者，作者则于其中采得石鱼等淡水动物化石，确证时代为上侏罗纪。”在相邻的山西，经他的研究后提出：

“中侏罗纪及上侏罗纪之红色页岩、砂岩及薄层石灰岩内，虽时含有淡水动物化石。”由此看出，当时王竹泉已经确信陕北的侏罗系为陆相地层，而他认为侏罗系就是源岩层，就间接地意味着陆相地层能生油，确实，他们并没有明确提出陆相地层能生油的观点。

如果说王竹泉等（1933）的论述不足以说明已明确提出了陆相生油的想法（或理论）的话，翁文灏则明确地提出了对唯海相地层能生油观点的质疑。他在 1934 年发表的论文中写道：“据最近研究，似陕川两省之油皆原（似应为“源”之误——本书作者）出于三叠纪，其上之侏罗纪白垩纪所见者，似皆由三叠纪而上升。或言大量石油必在海成地层，四川三叠纪确为海成。陕西三叠纪则迄今未有海成证明，大致似为陆相。如此则得油之望，似又川多于陕。然陆成地层果绝对无储（似应为“生”之误——本文作者）油之望耶？若以油泉之多观之，陕北实远过于四川。”由此可知，他对当时盛行的海相生油理论有极大的疑惑，觉得事实上陆相的陕北三叠系生油比四川海相的生油层系生油多。据此可以看出，他的陆相地层能生油的思想已经表达得较为明确的了。这是否能算初步提出了陆相生油的理论了呢？

如果这还只能说翁文灏仅对海相生油提出疑问，还不足以说明陆相生油理论已经明确提出的话，谢家荣的论述应该说是非常明确、丝毫无差的了。他在 1934 年出版（第二版）的《石油》一书中，明确提出：“三角洲半属海相，半属陆相。其海相之部，即为浅海或滨海沉积，最适于石油之产生。而近陆之部，则植物繁茂，在适当环境之下，亦能造成石油。且地盘稍有升降，海岸线即随之而伸缩，故在此区域之内，海陆二相之地层，往往相间而生，於石油之积聚，最为适宜。”

他在书内的另一处写道：“在内地湖沼之内，所成之岩石，名曰湖沼沉积，其中生物丰富，尤以沼泽中之植物为最繁茂。此项沉积，被覆于水面之下，无充分之空气，故生物得以逐渐腐化，煤层之生，即基於此。至于石油是否亦在此同等环境之下，沉积而成，学者意见，尚不一致。现代油田，虽与产煤之层距离甚近，或同属一层，尤以在欧亚二洲之油田，二者之关系，最为密切。但就大体论之，世界主要产煤之时代，与主要产油之时代，并不相合。即有少量石油，沉积於湖沼之中，与煤层之成因相类似，但此系局部的或偶然的現象，重要油源，固别有积聚之所也。”在这里，虽然谢家荣认为内陆湖泊中只能偶然地形成少量的石油，但毕竟认为内陆湖泊也能生油。

谢家荣在本书中几处提到了陆相地层能生油的想法，他在书中进一步提到：“煤矿之成，系由沼泽或沿海大陆上之植物，逐渐腐变而成。石油成分，虽与煤异，然谓其自植物变化而来，亦无不可。於是学者遂倡异物同源之论，而英国之克累格氏（craig）主之尤力。至其结果所以相异之故，则因经过之地质历史，既极不一律，温度压力诸环境，亦随之悬殊，故在甲地造成煤层，而在乙地则易为石油。二者递变之迹，野地考察，尚得而见之。又据化学家之实验，倘将褐煤或烟煤置器中蒸馏之，则能得与石油相似之碳氢化合物。故又有人主张已成之煤层，在适当温度压力之下，亦能再度变化，而成石油。据实地观察，产油之层，有时兼含煤质，中国陕西油田，即为一例，而重要煤田之附近，亦常有微量之石油流出。二者关系既密，则异物同源之论，不能谓为绝无根据也。”

虽然，谢家荣在本书中和在其它的文章中认为陆相生油的聚积量很少并带有偶然性，他还认为当全部为陆相沉积时则难生成石油（谢家荣，1935），但他却是明明白白地提出了内陆湖沼和近海的陆相三角洲和沼泽沉积物能生成（少量）石油的观点。因此，我们说，我国学者至少在 1934 年已经提出了陆相生油理论（胡社荣，1998，1999）。