



天然气地质与气藏经济 开发理论基础

赵文智 刘文汇 主编

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书是国家科技部重点基础研究发展规划项目——“高效天然气藏形成分布与凝析、低效气藏经济开发的基础研究”的第一阶段成果，是在对国内外相关领域研究现状充分调研基础上，结合项目科学家群体前期研究的积累，就项目研究领域的主要科学问题、理论技术、发展趋势与技术对策而完成的综述性论文集。书中共收录了24篇论文，较系统地对天然气成因、成藏过程与分布规律、天然气藏有效识别的地球物理技术方法，以及低效、凝析气藏的经济开发理论与技术发展现状和趋势等做了深入细致的归纳总结。同时，还对相关领域提出了一些富于创新思路的新认识和新观点。

本书可供从事天然气地质与开发研究的科研、生产人员，以及大专院校有关专业的师生阅读、参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

天然气地质与气藏经济开发理论基础/赵文智, 刘文汇等编著. —北京: 地质出版社, 2004. 3
ISBN 7-116-04044-7

I. 天… II. ①赵…②刘… III. ①石油天然气地质-文集②油气藏-资源开发-文集
IV. P618.130.2-53②F407.22-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 012542 号

TIANRANQI DIZHI YU QICANG JINGJI KAIFA LILUN JICHU

责任编辑: 郝梓国 郁秀荣

责任校对: 王素荣

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010) 82324508 (邮购部); (010) 82324557 (编辑部)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真: (010) 82310759

印 刷: 北京长宁印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm¹/₁₆

印 张: 21.5

字 数: 520 千字

印 数: 1—850 册

版 次: 2004 年 3 月北京第一版 · 第一次印刷

定 价: 60.00 元

ISBN 7-116-04044-7/P·2460

(凡购买地质出版社的图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社出版处负责调换)

天然气地质与气藏经济 开发理论基础

编 委 会

主 任 赵文智

副主任 刘文汇

委 员 钱 凯 胡永乐 王红军

罗 凯 汪泽成 张水昌

王兆云 赵长毅 王云鹏

陈孟晋 柳广弟 田昌炳

朱怡翔 熊春明 刘合年

杨贤友 王尚旭

前 言

人类对能源的利用已经从以煤炭为主的时代，进入以石油和煤炭并重的时代，预计以天然气资源开发利用为主的时代有可能在本世纪中后期就会到来。天然气在能源结构中的比例被看做是一个国家文明和发展水平的重要标志之一，目前世界上天然气在一次能源结构中所占比例平均为 24%，中国约为 3%，只有世界平均水平的 1/8。我国国民经济的快速发展造成对能源的需求迅速增长，石油需求的缺口越来越大，预计 2015 年以后我国每年原油纯进口量可能达到或超过 2 亿吨左右，将严重影响国家能源安全。勘探和开发利用丰富的天然气资源，加快我国天然气工业的发展，对缓解我国原油需求增长过快给国家能源安全造成的巨大压力与有效改善我国赖以生存的环境，实现国民经济在 21 世纪可持续发展有着重要意义。

经过近 20 年的科技攻关，我国天然气工业有了突飞猛进的发展，天然气地质理论也在不断完善和发展中，勘探发现的天然气储量规模也越来越大。天然气勘探开发实践表明，我国天然气资源既丰富（地质资源总量达到 38 万亿立方米），资源品位又差异悬殊，明显存在富矿与贫矿之分。据初步统计预测，全国已探明天然气储量中，高丰度与高单井产量的高效天然气储量仅占探明总储量的约 40%，而低丰度、低效天然气储量约占 60%。在尚未探明的剩余天然气资源中，高丰度、高效天然气资源约占总量的三分之一，而低效资源占三分之二。预测显示，未来 10~20 年我国天然气需求量将大幅度增加，到 2010 年，天然气需求量将达到 1100 亿~1200 亿立方米/年。要满足天然气需求的快速增长，必须解决目前天然气勘探开发所面临的两大难题：其一是对高效天然气资源形成与分布的客观评价和有效发现，这是使天然气探明储量快速增长的基础；其二是对低效天然气资源实现经济开发，这是确保我国天然气产量能有大幅度增长和长期保持稳定的关键。正确认识我国高效天然气藏形成机理与分布的主控因素，加快高效大气田的发现速度，大幅度提高天然气勘探效率是满足国内天然气需求快速增长的捷径。因此，加强低效天然气资源经济开发的基础理论与开采技术的研究，建立系统完善的天然气基

础理论研究方法，使我国天然气基础理论研究水平居于世界前列，对今后一段时间内大幅度提高我国天然气产量，加快天然气工业发展具有重大意义。

为此，国家科技部设立了为期5年的重点基础研究发展规划项目——《高效天然气藏形成分布与凝析、低效气藏经济开发的基础研究》，旨在推进我国天然气工业的发展进程。该项目自2002年4月正式启动，从立项至今，参加研究的科研骨干对国内外相关学科现状及发展趋势做了大量的文献调研工作，比较系统地就天然气成因、成藏过程与分布规律、天然气藏有效识别的地球物理技术方法，以及低效、凝析气藏经济开发理论与技术发展现状和趋势，做了深入细致的归纳总结。同时，参与项目研究的科学家群体结合自己在该领域的研究积累，在相关领域还提出了一些富于创新性的新认识和新观点。我们在项目研究开始不久就集零为整，形成文集，想以此作为项目深入研究的起点和基础。本论文集共收录了24篇论文，包括天然气藏形成、识别与开发三个方面的主要内容，希望能够对我国天然气地质与开发理论研究以及生产实践有所帮助，同时也希望能为从事天然气地质与开发研究的科研人员提供一份有益的参考文献。

参加本文集编写的主要人员有赵文智、刘文汇、胡永乐、钱凯、王红军、张水昌、赵长毅、王云鹏、王兆云、侯读杰、黄光辉、陈孟晋、李剑、王万春、金强、刘全有、夏燕青、张殿伟、王晓锋、伍天宏、邹艳荣、帅燕华、孔枫、罗健、汪泽成、柳广弟、赵靖舟、罗继红、时保宏、王尚旭、姚逢昌、郑晓东、曹宏、熊春明、吴晓东、蒲春生、刘易非、郑维师、张汝生、卢拥军、丁云宏、舒玉华、宋考平、周志军、单文文、朱维耀、李相方、童敏、刘合年、罗凯、田昌炳、朱怡翔、杨满平、李治平等。这是一项在项目首席科学家统一运筹和组织之下，由项目科学家群体共同完成的、集综述和阶段研究认识于一体的成果。论文集完成后，赵文智、钱凯、王红军统一审改了全文。973天然气项目的专家组成员戴金星、胡见义、郭尚平、贝丰、胡朝元、高瑞祺、赵化坤、孟穆尧、裘亦楠、刘文霖等帮助审改了部分论文，编者愿借该书出版之机，对为该书的成功出版做出贡献的专家深致谢意。

目 录

前 言

- 天然气地质学进程与发展趋势 赵文智 王红军 钱 凯 (1)
- 气田开发技术的进步与主要发展方向 胡永乐 赵文智 罗 凯 (31)
- 天然气成因及成藏研究进展
..... 赵文智 张水昌 罗 健 钟宁宁 王飞宇 (57)
- 中国大中型气田形成条件与分布规律研究现状综述
..... 汪泽成 赵文智 郑红菊 王兆云 王红军 钱 凯 (79)
- 天然气生成过程实验研究现状及发展方向
..... 邹艳荣 帅燕华 孔 枫 彭平安 (90)
- 海相气源岩成气研究现状及天然气生成的瞬时效应和气藏形成的累积效应
..... 王兆云 赵文智 王云鹏 (100)
- 原油裂解气的形成、鉴别与成藏研究进展
..... 王云鹏 王兆云 邹艳荣 (111)
- 天然气气源对比地球化学研究现状
..... 刘文汇 陈孟晋 关 平 郑建京 金 强
..... 王万春 李 剑 夏燕青 刘全有 (127)
- 天然气气源对比实验研究现状与改进意见 夏燕青 (139)
- 稀有气体同位素在天然气研究中的应用与发展趋势
..... 郑建京 刘文汇 温德顺 孙国强 孙明亮 (146)
- 中国煤与含煤有机质成气研究现状与进展 赵长毅 (155)

天然气运聚成藏过程模拟研究现状与展望	李景明 王明明 刘吉余 (166)
流体动力作用下的天然气运移成藏特征	王震亮 高胜利 施立志 张立宽 孙明亮 (174)
天然气藏地震识别理论与方法研究进展	郑晓东 (182)
我国低效天然气藏开发的战略思考	田昌炳 朱怡翔 (214)
储层中微粒运移损害研究现状与发展方向	蒲春生 刘易非 郑维师 (224)
清洁压裂液机理研究现状与主要发展方向	卢拥军 丁云宏 张汝生 房鼎业 (247)
多相流动体系中的水合物生成动力学研究现状与前景展望	孙长宇 陈光进 (253)
气藏水相束缚堵塞机理及影响因素研究进展	吴晓东 潘新伟 王金勋 (261)
低渗透气藏非达西流的研究及应用进展	宋考平 周志军 (272)
凝析气复杂相态研究	胡永乐 罗凯 刘合年 (303)
近井地带凝析油聚集机理研究综述	童敏 李相方 程时清 (311)
凝析气藏多孔介质中相变研究进展	李相方 童敏 程时清 (322)
变形介质气藏渗流理论研究的发展及意义	杨满平 李治平 李允 彭彩珍 (330)

天然气地质学进程与发展趋势

赵文智 王红军 钱 凯

(中国石油勘探开发研究院, 北京, 100083)

摘 要 中国天然气地质学的形成和发展大致经历了两大阶段, 即早期依附石油地质学理论的起步和跟踪发展阶段和就天然气特殊性进行理论认识总结的独立发展阶段。从 20 世纪 80 年代以来, 经过近 20 余年的科技攻关, 中国天然气地质学在天然气成因、天然气成藏特征、大中型气田分布规律, 以及相关配套技术发展与应用等 4 个方面取得了重大进展。天然气勘探实践, 在克拉通盆地古隆起、前陆盆地冲断带与海相盆地找气等方面也取得了一批重大成果。天然气地质学理论和勘探开发技术的进步, 对加快我国天然气工业发展起着重要指导作用。今后中国天然气地质学的发展将围绕着生气过程的有效性、成藏过程有效性及聚集保持过程的有效性, 以高丰度和大中型天然气藏的形成分布规律和有效预测方法技术的深化和系统总结为核心, 将中国天然气地质理论的发展推向深入, 推动我国天然气工业进一步蓬勃发展。

关键词 发展进程 发展趋势 天然气工业 中国

1 中国天然气地质学发展进程

中国天然气地质学的发展大体上已经走过了依附石油地质学理论的起步和跟踪发展与总结自身特殊性, 逐步形成独立学科的发展阶段。目前正进入理论深化、完善和系统发展阶段。伴随着天然气地质理论的进步和发展, 对天然气工业发展的促进和推动作用会越来越大。

石油地质学理论的孕育、产生和发展已有近百年的历史。如果说 1921 年 Emmons 出版的《石油地质学》一书是对那个时期以前所进行的油气勘探实践和取得的成果作了阶段性的初步总结的话, 那么 1954 年 Levorsen 出版的《石油地质学》一书可以说把石油地质学作为地质学的一个分支, 在理论上科学地提升到了一个新高度, 应该说, 对现代石油地质学的基本原理和精髓已经作了系统的阐述, 使石油地质理论逐步走向了系统和完善。20 世纪 60 年代中期, 在松辽盆地发现了大庆特大型油田以后, 发展并逐步完善起来的陆相石油地质学理论, 是在与海相石油地质学的比较中, 突出了对陆相石油地质特殊性的归纳升华而发展起来的, 是对石油地质理论知识宝库的丰富和发展。天然气地质学的产生首先应得益于对石油勘探的认识和自 20 世纪 60 年代以来石油有机地球化学研究的进步。在勘探已经发现的大多数油藏中, 都往往伴生有气顶或溶解气。根据有机质热降解生烃理论, 有机质在大量生成液态石油烃的同时, 会有相当数量的伴生天然气产生。而在过成熟阶段, 原油会进一步热裂解, 产生天然气, 成为有机质热降解演化的主体过程。因此, 由

于认识深度和勘探局限性的限制，对天然气地质理论的总结，人们自然地借用了石油地质学的主体理论和思想。这个阶段，对天然气藏的发现，有相当一部分是在寻找油藏的过程中意外获得的，而真正按照找气思想所选择的勘探目标，相当多的钻探并未获得成功。这说明对天然气成藏的特殊性还没有做到深刻认识和准确把握。

天然气地质学的起步依附于石油地质学有3方面的原因：一是天然气与石油在成因上关系密切，加之天然气地质学起步晚，人们对很多生、排、聚气机理与特征的认识自然而然地依据了石油地质理论；二是依据石油、天然气与水在地层中的赋存特征，油与气都是轻于水的流体，都可以以水为载体运移，运聚成藏有很多共同之处；三是天然气认识水平发展较慢。在国家能源结构中所占比例不高，开发利用远不及石油，因此，天然气地质学从石油地质学中分立出来，作为一个独立的分支学科发展，首先应该归功于石油地质家对天然气成藏地质要素与诸如运移、聚集和保持等作用过程的一系列特殊性的感悟和认识。这些特殊性包括：①生气母质的多样性。认识到生油母质可以生成天然气，而不生油的有机母质（如大量煤系）也可以生成天然气，生气母质从类型到分布都要比生油母质更广泛。因而勘探找气的范围要比找油更广阔。此外，石油无机成因说虽然尚未销声匿迹，但要形成商业性聚集并为钻探所发现者不多。而无机成因的天然气藏则是被大量勘探证实和发现了的。不论从生气母质类型，到成因多样性，都可看出天然气与石油有着明显的不同；②成气阶段与分布的多样性。随着研究与勘探实践的深入发展，越来越多的证据显示天然气不仅在有机质主生烃期，即液态窗范围内可以大量生成，而且在低成熟—未成熟阶段的浅—极浅层靠生化作用，和在深层高成熟—过成熟阶段靠有机物的热裂解作用都可以有商业性数量的天然气生成。因此，从勘探深度看，找气的领域比石油要广；③储气层范围更宽。由于天然气分子小，与岩石颗粒表面的张力比石油要小得多，所以天然气聚集对储层质量的要求比石油要低，在很多情况下对石油来说已经是非储层，如孔隙度 $<10\%$ ，渗透率 $<5\text{md}$ 的砂岩^①，对天然气来说仍然可以成为比较好的储层，往往有比较好的经济性储量和产量；④运移方式有别。天然气从烃源岩中一次排出的机理目前还是一个正在探讨、尚未很好回答的科学问题。但是有一点是可以肯定的，即天然气排出烃源岩母体的动力恐怕并不像石油那样，靠烃源岩的压实而排出。因为在沉积盆地的深层，当有机质热演化达到高成熟—过成熟阶段时，烃源岩的压实程度已经很高，烃源岩内部可供天然气一次运移的载体已经很缺乏。在这种情况下，要让天然气排出母岩，应该有其他动力和机制。现在看来，气源岩受热使天然气发生热蒸发排烃、扩散排烃与间歇式爆裂排烃的可能性很大。当天然气进入输导层以后，由于气体分子小，气水密度差大，产生的浮力高于石油，因而发生垂向运移的机会和规模要比侧向水平运移的机会和规模大。

对天然气特殊性的观察和认识，开始了天然气地质学独立发展的历程。

天然气成因二元论的确立是天然气地质学独立于石油地质学的重要标志，随着油气地质基础理论研究的不断深入，天然气在运聚成藏方面区别于石油的特殊性也逐渐被认识，大中型气田的不断发展使得天然气产储量大幅度增长，这促进了天然气地质学的发展。

虽然 И. В. 维索斯基的《天然气地质学原理》和 E. Ntiratsoo 的《天然气》在 1954 年、1967 年相继问世，但从认识的深度广度和系统性出发，人们通常还是以前苏联学者

① 中华人民共和国国家标准——石油天然气储量规范。

И. В 维索斯基 1979 年出版的《天然气地质学》作为天然气地质学独立产生的标志。中国天然气地质学产生则从“六五”开始的天然气国家科技攻关起始，并得益于四川、鄂尔多斯、柴达木、塔里木等盆地的天然气勘探实践。1979 年戴金星教授将煤层气理论引入国内，是促进中国天然气地质学独立发展的重要里程碑。陈荣书 1986 年出版的《天然气地质学》，包茨 1988 年主编的《天然气地质学》，戴金星等 1990 年出版的《天然气地质学概论》则是中国天然气地质学渐趋成熟的重要标志。

20 世纪 40 年代德国学者提出了煤成气理论，并从 50 年代开始在西欧、中亚和西西伯利亚盆地天然气地质评价和勘探工作中取得重大发现，开辟了煤成气勘探的新领域。此时，仅仅依靠石油地质理论的指导已不能有效地开展天然气勘探。天然气成因二元论的提出为天然气地质学的独立发展奠定了基础。从 20 世纪 50 年代初至 70 年代末，天然气工业发展比石油工业更为迅速，天然气与石油的产、储量按能量比来统计，分别由各 1/3 上升到约 3/5 和 4/5，天然气地质学因勘探的快速发展而催生出来（王涛等，1997）。

中国天然气地质学的独立发展以煤成气理论引入为标志。随后天然气勘探不断有大的发现，储量与产量大幅度增加。天然气地质学一经产生，就在天然气成因、成藏、保存以及分布规律方面快速发展。尤其是天然气地球化学研究的进展更为迅猛，由此带来的气源对比与天然气成因理论的进步和完善是天然气地质学发展中独树一帜的方面，对促进天然气勘探事业的发展功不可没。

中国天然气地质学的独立发展阶段大体已经历了两个时期，目前正处于第三个发展阶段。

1.1 基础理论的引进、完善与自主创立时期

主要是从“六五”攻关起到“七五”攻关末这一阶段，我国天然气地质工作者引进、完善、发展了一系列天然气地质学的基础理论，如煤成气理论、生物气理论、天然气成因分类、天然气鉴别体系、天然气运聚动平衡理论与深盆气理论等。其中煤层气理论的引进、发展和创新在中国天然气地质学的产生和迅速发展上所起的作用具有首要意义，其从引进发展到创新的过程也很有代表性。1998 年国际煤成烃会议文件中对此有很中肯的评价（煤成气国际学术会议论文集，2000）。文件指出，现代煤成烃理论的发展分为 3 个阶段：第一阶段德国学者首先提出煤系形成的气能运移出来，在储层中聚集为常规气田，从而创立了煤成气理论，但没有注意到煤系成油的问题；第二阶段，20 世纪 60 年代澳大利亚学者确立煤系也可成油，是为煤成油理论的先声，但对煤系成油与成气的关系缺乏研究；第三阶段，20 世纪 70 年代中国学者研究指出煤系成烃总体上以成气为主成油为辅，明确了成油成气的辩证关系，这充分显示了中国学者在发展煤成气理论上的重要贡献。而这个创新性贡献是从国际理论引入开始的，然后通过调查实验和综合研究，经历了从对成气作用的定性认识发展到产烃量的定量评价，从煤系成烃理论的引入到煤系以成气为主的创新，从气源的对比到有利探区的成功预测的全过程，这也是引进、发展创新的全过程。其他领域的发展各有其典型意义：生物气理论是在了解国外动态的同时，主要基于国内的勘探实践与地质生物学特点，在地质分析和跨学科实验的基础上取得了一系列理论上的创新和发展形成的；动平衡理论，天然气成因分类与鉴别体系主要是由中国学者通过大量调查研究分析实验和归纳总结建立起来的；而深盆气理论和运聚动力学研究虽以引进为主但

也在引进后得到丰富与发展。

1.2 基本天然气地质规律总结与有效指导天然气勘探时期

天然气分布基本规律的总结起始于“七五”或更早，而全面系统的总结与广泛用于天然气勘探实践则是在“八五”与“九五”攻关期间。这些规律应用于天然气勘探实践使探明储量与产量在“九五”以来大幅度增加。这个阶段关于天然气分布规律主要认识有：盆地控气规律、生气中心控气规律、构造带（包括克拉盆地、陆缘与陆内坳陷盆地、前陆盆地及裂谷盆地中各类二级构造带）控气规律、封盖层控气规律、天然气晚期成藏规律等。这些规律性的认识在指导天然气勘探上起到了重要的推动作用，使中国天然气储量在短短十年间翻了近两番，总量接近3万亿立方米。天然气年产量达到300亿立方米，开始为西气东输工程的启动提供了有力的资源保障。天然气在国民经济中所处的地位越来越重要。随着天然气勘探的快速发展，对天然气地质理论的探索也在加速。勘探家们已经注意到，用已有的天然气地质理论总结指导天然气勘探，有时并不能奏效。例如，根据已有的理论总结，天然气藏，尤其大中型天然气藏往往在生气强度大于 $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 的生气中心范围内。应该说这一理论要点在引导天然气勘探选区和发现中发挥了重要作用，但现在有越来越多的勘探实践说明在高生气强度中心范围内，并不是所有的圈闭都能有大中型天然气藏的形成。造成这样的结果，因素是多方面的，可能有天然气生成热动力学问题，可能有天然气优势与分散运移问题，也有成藏期早晚与聚散平衡关系问题，当然也有圈闭自身的封闭性问题。就天然气生成来说，同样质量的烃源岩，大规模生气发生的早晚与过程持续的长短对天然气藏的形成规模与聚集丰度都有影响，很显然对气源岩的评价仅仅以丰度和类型等静态指标判断其优劣和有效性显然已经不够了，其他规律性认识往往也都有根据新事实进一步丰富完善的必要。

1.3 目前正处于成藏理论的深化、完善与创新时期

经过“六五”、“七五”、“八五”和“九五”近20年的天然气科技攻关，中国天然气地质学走过了孕育、产生、完善和独立成体系的阶段，这期间一系列理论和成藏规律的总结，有效地指导了天然气勘探。应该说我国各种成因类型的天然气藏已经全部被揭示，并已认识到形成天然气藏的主要气源类型与空间分布。今后要对高效天然气藏的分布与潜力做到有效预测和评价，就需要对这一类优质天然气资源的形成条件与特征进行研究，尤其是涉及生气动力学、运移成藏过程与优质成藏要素在什么具体的地质背景下才最容易出现，并在三度空间中形成有机组合。科学地回答这些问题，并能对高效天然气藏形成与资源潜力和分布进行客观预测，将代表天然气地质学发展新阶段的开始。

天然气地质学研究的新阶段应以天然气藏成藏过程重建为核心。成藏过程中的动力学研究也越来越受到重视，已有的研究成果和进展已在勘探实践中获得验证。目前还没有形成完整的理论体系。在前人研究成果的基础上，目前天然气地质学研究以客观认识高效天然气藏的形成与分布为核心，围绕生烃灶生烃的有效性、成藏过程的有效性、成藏要素组合的有效性，深入探讨气藏成藏机制，从机理上总结提出天然气藏成藏理论和高效大中型气田分布规律，这个阶段的探索还刚刚开始，通过对生气热动力学过程研究，天然气优势、定向、最佳输送方式以及优质要素发育环境及机理的研究，天然气成藏理论会向前大大前

进一步。相信中国天然气地质学定会在新一轮注重基础研究的探索中获得进步和发展。

2 重要理论进展与重大应用成果

经过 20 多年的科技攻关，中国天然气地质学在天然气成因理论、成藏作用、分布规律以及实用配套技术开发等 4 个方面取得了重要进展，理论的不完善、发展与相应配套技术的不断进步都极大地推动了中国天然气工业的前进。

2.1 天然气成因理论研究取得的重要进展

天然气成因理论研究进展主要体现在煤成气理论的引进、发展和创新、天然气成因分类和鉴别体系的建立、生物气理论的形成等方面。其中煤成气理论的引进发展和创新对中国天然气地质学的发展具有首要意义，因为它有力地影响、带动了相关学科的发展，有效地指导了勘探实践，在整体上提高了天然气地质学的理论水平和学术地位。

2.1.1 煤成气理论的介绍引进、发展创新和广泛应用

煤成气理论的引进、发展、创新和应用对中国天然气地质学的产生、发展和创新起到了无可替代的首要作用。

煤成气系指以腐殖型为主的有机质（包括煤层和分散的Ⅱ₁及Ⅲ型有机质），在热演化过程中所生成的气态物质（主要为烃类气体）。20 世纪 40 年代德国学者就提出煤系地层能生成天然气。1959 年在荷兰北部发现格罗宁根大气田，查明了二叠系赤底统风成砂岩中巨大天然气聚集来自中石炭统煤系，煤成气开始被人们所重视。

到 20 世纪 70 年代末期，在世界已探明天然气储量中，煤成气已占 70% 以上。也就是在 70 年代，煤成气的研究也引起了我国学者的关注，煤成气理论被引入中国并得到了发展应用。这一过程大体可以分为 3 个阶段。

2.1.1.1 介绍、引进阶段（1975~1982 年）

该阶段主要由一些对国内外油气勘探情况比较了解（包括国内煤系地层油气显示情况）的专家学者和技术人员介绍，宣传、探讨、煤成气理论用于中国的可能与前景。特别是戴金星 1979 年的论文，具有开创中国煤成气理论的里程碑意义。以下是该阶段发表的一些重要文献及重要的学术活动：

1975~1978 年，罗自立相继发表了涉及煤层气理论介绍及四川煤层气勘探前景的“试从板块构造探讨四川盆地新的石油资源”、“国外天然气成因研究及其对四川勘探的实践意义”。（罗自立，1975；1978）。

1979~1980 年，戴金星相继发表“成煤作用中的天然气和石油”、“我国煤系地层含气性的初步研究”（戴金星，1979；1980）。

1981 年，中国地质学会石油地质专业委员会、江苏省地质学会和江苏省石油学会联合在扬州市瓜州召开“全国煤成气学术讨论会”。这次会议是我国专门探讨煤成气的第一次学术盛会，其目的是为我国的能源多样化，在我国开辟能源新领域、新地区、新类型，动员有关部门发挥各自特长，密切配合，共同为发展我国的能源事业做出新贡献。

1982 年，戴金星发表“煤成气含义及其划分”（戴金星，1982）。

该阶段的最大功绩在于介绍、宣传了煤系地层能够生气并在常规储层中聚集成藏，中国具有勘探煤成气田的大好前景，同时，戴金星在“成煤作用中形成的天然气和石油”，一文中阐明煤系成烃总规律以气为主，以油为辅的认识，为我国在煤成气理论领域中的领先地位作了准备。

2.1.1.2 发展创新阶段（1983~1985年，“六五”期间）

在国际煤成气理论发展史上，中国学者开始逐渐起主导作用。该阶段的发展创新主要体现在3个方面：①建立了中国煤成气鉴别标准、验证了中国煤成气田的存在；②在大量实验研究的基础上证实了20世纪70年代提出的煤系以成气为主的理论认识，并初步应用煤成气理论指导勘探实践；③总结了我国当时已经发现和可能发现的天然气分布聚集规律。

1983年“煤成气的开发研究”列入“六五”期间38项重点科技攻关项目之一，以戴金星为项目长，任务分别由当时的石油工业部、地质矿产部、煤炭部、中国科学院所属有关单位承担，展开了我国规模较大的煤成气研究工作。

在大量实验分析的基础上，建立了煤成气与油型气鉴别指标（见图1，表1）。

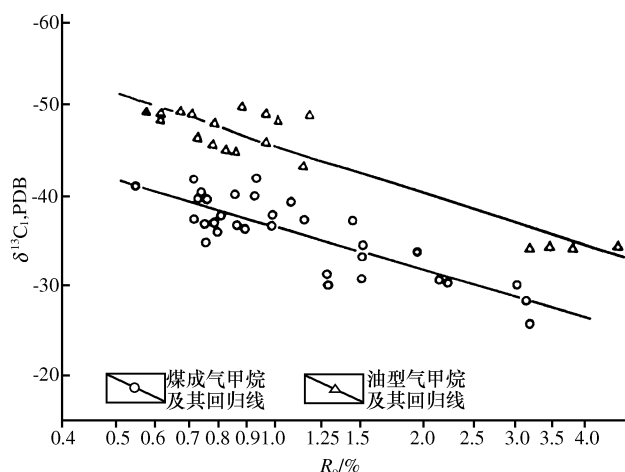


图1 我国煤成气和油型气 $\delta^{13}C_1$ 值与 R_e 关系图

通过对文留、中坝等约20多个气田的检测，证明了中国煤成气田的存在，为在我国开展煤成气勘探提供了可靠的科学依据。同样是在“六五”科技攻关期间，以实验模拟为基础证明煤系成烃以产气为主，并以煤及煤系泥岩烃产量曲线为依据，对我国40个含煤盆地中的11个作出了资源评价，结合天然分布聚集规律的总结，预测了有利勘探地区，其中一些预测结果（如鄂尔多斯中部目标）在后来的勘探中得到了很好的验证。经过这两个阶段的工作，煤成气理论在中国基本建立起来，并在煤系以成气为主的认识上领先世界水平，在指导基础实践上得到广泛应用。

2.1.1.3 持续发展与广泛应用阶段（1985年以后）

“七五”期间煤成气研究的重点在于深入研究煤成气的地球化学特征，完善综合鉴别指标，总结成气条件和分布规律方面。如某些学者（冯福，1994；王庭斌，2002）所说，这一时期研究的重点是“含煤盆地转化为含气盆地”的地质条件。在煤成气资源评价

表 1 煤成气和油型气综合鉴别指标

气的类型		油 型 气	煤 成 气
项目			
同 位 素	$\delta^{13}C_1$	$-30‰ > \delta^{13}C_1 > -55‰$	$-10‰ > \delta^{13}C_1 > -43‰$
	$\delta^{13}C_2$	$< -29‰$	$> 27.5‰$
	$\delta^{13}C_3$	$< -27‰$	$> 25.5‰$
	$\delta^{13}C_1 - R_o$ 关系	$\delta^{13}C_1 = 15.801gR_o - 42.21$	$\delta^{13}C_1 = 14.131gR_o - 34.39$
	$\delta^{13}C_{1-4}$ 连线	较 轻	较 重
	C_{5-8} 轻烃单体系列	$< -26‰$	$> -26‰$
	与气同源凝析油 $\delta^{13}C$	轻 (一般 $< -29‰$)	重 (一般 $> -28‰$)
	凝析油的饱和烃和芳香烃 $\delta^{13}C$	饱和烃 $\delta^{13}C < -27‰$ 芳香烃 $\delta^{13}C < -27.5‰$	饱和烃 $\delta^{13}C > -29.5‰$ 芳香烃 $\delta^{13}C > -27.5‰$
	与气同源原油 $\delta^{13}C$	轻 ($-26‰ > \delta^{13}C > -35‰$)	重 ($-23‰ > \delta^{13}C > -30‰$)
	烃源岩氯仿沥青“ A ”对应组分 $\delta^{13}C$	较 轻	较 重
气 组 分	汞蒸气	$< 600 \text{ mg/m}^3$	$> 700 \text{ mg/m}^3$
	C_{2-4} (成熟阶段)	R_o 相同或相近时 一般油型气比煤成气多 2% 以上	
轻 烃	甲基环己烷指数	$< 50 \pm 2\%$	$> 50 \pm 2\%$
	C_{6-7} 支链烷烃含量	$> 17\%$	$< 17\%$
	甲苯 - 苯	一般 < 1	一般 > 1
	苯	$148 \mu\text{g/L} \pm$	$475 \mu\text{g/L} \pm$
	甲苯	$113 \mu\text{g/L} \pm$	$536 \mu\text{g/L} \pm$
	凝析油 C_{4-7} 烃族组成	富含链烷烃, 贫环烷烃和芳香烃, 一般芳香烃 $< 5\%$	贫链烷烃, 富环烷烃和芳香烃, 一般芳香烃 $> 10\%$
	C_7 的五环烷、六环烷和 nC_7 族组成	富 nC_7 和五环烷	贫 nC_7 , 富六环烷

方面, 预测了全国煤成气远景资源量约 15 万亿立方米, 为国家制定天然气勘探规划提供了依据。

“八五”、“九五”期间, 煤成气理论研究继续得到重视和持续发展, 并在成气地球化学和天然气聚集域研究上完成了多项具有创新性或中国特色的进展。

“八五”期间戴金星等提出中亚煤成气聚集域与亚洲东缘煤成气聚集域是我国煤成气两个主要的富集区。中亚煤成气聚集域以侏罗纪煤系为主, 在我国境内属于中亚煤成气聚集域的东缘, 是仅次于华北石炭-二叠系含煤岩系, 分布面积居第二位的主要含煤岩系。含煤沉积主要有塔里木盆地的库车坳陷和西南坳陷、准噶尔盆地南缘坳陷、吐哈盆地台北坳陷以及伊犁盆地的察布查尔坳陷。

亚洲东缘煤成气聚集域在我国近海海域有一系列古近纪、新近纪含煤盆地 (东海陆架盆地、台西盆地、南海北部诸盆地), 是世界古近系、新近系重要的聚煤区之一。由于该区地处太平洋板块、菲律宾板块, 印度板块与欧亚板块共同作用的活动带, 新生代以来持续快速沉降及高地温场特征, 为这些含煤盆地转化为含煤、含气 (油) 盆地提供了有

利的地质条件，成为寻找大中型煤成气田的有利地区。

煤成气地质理论的引入发展和应用使我国煤成气勘探工作取得重大进展，在各类成因的天然气中，煤成气勘探形势最好，发展最快。据戴金星（1999）统计；1978年底探明煤成气储量仅占我国气层气储量的9%，至1997年底已上升至50.9%，因此，我国探明气层气储量从1978年至1997年能够增长6.5倍，煤成气储量的高速增长起了十分重要作用。当前煤成大中型气田已成为我国天然气储量增长的支柱，随着对煤成气地质理论的深入研究，我国煤层气的勘探开发定会取得更大的进展。煤成气地质理论研究的里程碑意义将更加突出。

2.1.2 天然气成因分类标准的建立

天然气成因分类标准及鉴别体系的建立都是煤成气理论引进、发展带动起来的创新性工作。

正确、全面、系统的成因分类标准的建立是天然气地质学的核心基础理论，国内外学者都投入了相当的精力。“无机成因气曾是20世纪80年代科学前沿探索的热点之一”（王涛等，1997；Gold，1980；1982），而对于有机气成因分类的研究投入的工作量则更多（徐永昌等，1994）。1992年戴金星等提出了我国第一个较为全面的天然气分类方案（表2），徐永昌于1994年作了进一步发展（表3），两者的共同特点是将有机成因气分为两大亚类型，即以腐泥型有机质为主要成气母质的腐泥型气（油型气）和以腐殖型有机质为主形成的腐殖型气（煤型气）。在两大亚类的基础上，根据有机质演化的阶段或有机质转化为天然气的主要外生营力的特征，进一步确定天然气成因分类的命名。这是近年来，国内应用较多的天然气成因分类体系。

表2 天然气成因分类方案

无机成因气：宇宙气、幔源气、岩浆岩气、变质岩气、无机盐类分解气							
有机成因气	热成熟度	未熟阶段		成熟阶段		过熟阶段	
	母质类型	生物气	腐泥型生物气 (油型生物气)	热解气	油型热解气	原油伴生气	裂解气
	腐泥型天然气 (油型气)						
	腐殖型天然气 (煤成气)					凝析油气	腐泥型裂解气 (煤型裂解气)

混合成因气：大气、气水合物、同岩两源混合气、异岩两源混合气

(戴金星等，1992)

两者的主要不同点在于徐永昌的分类对成熟演化阶段分得更细并作了量的界定。

1997年，在王涛的组织下，由戴金星、徐永昌、傅家谟、沈平、陈单红、刘文汇等一批学者在前两个分类的基础上提出了新的分类方案（表4）。该方案根据成气原始母质的类型，将天然气分为有机成因（生物成因）气、无机成因（非生物成因）气和混合成因气3大类型。无机成因气又可根据形成机制进一步分为幔源成因气和变质成因气亚类。有机成因气则基于源岩有机质的元素组成和显微组分特征进一步划分为以腐泥型母质为主的油型气和腐殖型母质为主的煤成气两个亚类。这个方案比前两个方案更加完善、适用性更好。可视为我国天然气成因分类理论成熟的标志。

表 3 天然气成因类型划分表

大类划分 (成气母质来源)	成因类型									
	按有机质特征定型		按主体外生营力定名							
			0.3		0.6		1.3		2.0	
		$R_o/\%$								
有机成因气 (生物成因气)	I—II _A	油型气	生物气 (细菌气)	生物-热催化过渡带气 (未-低熟油伴生)		正常原油 伴生气	正常凝析 油气	裂解气		
	II _B -III	煤型气		生物-热催化过渡带气 (低演化煤型油、凝析油)		热解气 (常伴生煤型凝析油)		裂解气		
无机成因气 (非生物成因气)	地幔原始成因气									
	岩石化学成因气									

(徐永昌等, 1994)

表 4 天然气成因类型分类表

无机成因气	幔源气、岩浆成因气、放射成因气、变质成因气、无机盐类分解气							
有机成因气	成熟度		未熟阶段	未熟—低熟阶段	成熟阶段		过熟阶段	
	母质类型	气的成因类型			油型热解气			
			I—II _A	油型气	油型生物气 (含原油生物改造型)	油型过渡带气	原油伴生气	凝析油气
		II _B -III	煤成气	煤型生物气	煤型过渡带气	煤型热解气 (常伴生凝析油)		煤型裂解气
混合成因气	异岩两源混合气, 同岩两源混合气							

2.1.3 天然气鉴别体系的建立

天然气的识源鉴别不仅是天然气地质理论研究的重要方面,对天然气勘探实践也有直接的指导意义,是具有重要经济价值的理论信息(王涛,1997)。我国学者在天然气地质及地球化学领域开展了大量的研究工作,并按天然气成因体系建立起了相应的鉴别体系。包括:①无机成因气-有机成因气的判识;②生物气及生物-热催化过渡带气的判识;③油型气-煤型气的判识等等。“六五”天然气科技攻关期间,仅为鉴别煤成气就取岩样930块,气样572个,油样149个,进行了29项分析,取得了4.5万个数据,归纳得出了煤成气鉴定图表,具有很高的理论价值,用于指导勘探取得了显著的效果。

概括起来,鉴别天然气成因的指标包括天然气稳定碳同位素、气组分、轻烃、生标化合等参数。戴金星等在1992年根据各项参数建立了系统全面的天然气成因类型综合鉴别体系(表5)。

2.1.4 生物气理论的学习引进和发展创新

我国生物气的研究可以追溯到20世纪60年代初期(沼气的利用更早),但大型生物气藏的发现还是在80年代初期,以柴达木盆地三湖地区涩北1、2号气田的发现为代表。关于生物气的成因,因为有显著的生物标记化合物为依据,在气藏发现初期即得到确认。但生物气的形成、运移、聚集、保存机理的认识则是在后来的研究中才逐渐明确的。近

表5 天然气成因类型综合鉴别表

		有机成因气		无机成因气
		油型气	煤成气	
同位素	$\delta^{13}C_1$	$-30‰ > \delta^{13}C_1 > -55‰$	$-10‰ > \delta^{13}C_1 > -55‰$	一般 $> -20‰$ 最轻达 $-30‰$
		$-10‰ > \delta^{13}C_1 > -105‰$		
	$\delta^{13}C_2$	$< -28.8‰$	$> -25.1‰$	
	$\delta^{13}C_3$	$< -25.5‰$	$> -23.2‰$	$\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3$
	碳同位素系列	$\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3 < \delta^{13}C_4$		
	$\delta^{13}C_1 - R_o$ 关系	$\delta^{13}C_1 \approx 15.80 \lg R_o - 42.21$	$\delta^{13}C_1 \approx 14.13 \lg R_o - 34.39$	$> -8‰$
	$\delta^{13}C_{\infty 2}$	$< -10‰$		
	$\delta^{13}C_{1-4}$ 连线	较轻	较重	
	与气同源凝析油 $\delta^{13}C$	轻 (一般 $< -29‰$)	重 (一般 $> -28‰$)	
	凝析油的饱和烃和芳烃 $\delta^{13}C$	饱和烃 $\delta^{13}C_1 < -27‰$ 芳烃 $\delta^{13}C_1 < -27.5‰$	饱和烃 $\delta^{13}C_1 > -29.5‰$ 芳烃 $\delta^{13}C_1 > -27.5‰$	
	与气同源原油 $\delta^{13}C$	轻 ($-26‰ > \delta^{13}C > -35‰$)	重 ($-23‰ > \delta^{13}C > -30‰$)	
源岩氯仿沥青“ A ”对应组分 $\delta^{13}C$	较轻	较重		
气组分	CO ₂	多数 $< 4\%$		一般 $> 20\%$
	汞蒸气	$< 600 \text{ ng/m}^3$	$> 700 \text{ ng/m}^3$	
	C ₁ + C ₂₊₃	大部分 < 15 , 绝大部分 < 10 (油型热解气)		大于 180, 绝大部分 > 400
	C ₂₋₄	一般 C ₂ $> 0.5\%$, 大多数有 C ₃₋₄		痕量 C ₂ , 绝大多数无 C ₃₋₄
轻烃	甲基环己烷指数	$< 50\% \pm 2\%$	$> 50\% \pm 2\%$	无
	C ₆₋₇ 支链烷烃含量	$> 17\%$	$< 17\%$	无
	甲苯/苯	一般 < 1	一般 > 1	
	苯	$148 \mu\text{g/l} \pm$	$475 \mu\text{g/l} \pm$	
	甲苯	$113 \mu\text{g/l} \pm$	$536 \mu\text{g/l} \pm$	
	凝析油 C ₄₋₇ 烃族组成	富含链烷烃, 贫环烷烃和芳烃, 一般芳烃 $< 5\%$	贫链烷烃, 富环烷烃和芳烃, 一般芳烃 $> 10\%$	无
	C ₇ 的五环烷、六环烷和 nC ₇ 族组成	富 nC ₇ 和五环烷	贫 nC ₇ , 富六环烷	无
凝析油和储层沥青中生物标志物	Pr/Ph 值	一般 < 1.8	一般 > 2.7	无
	杜松烷、桉叶油烷	没有杜松烷, 难以检测到桉叶油烷	可检测到杜松烷和桉叶油烷	无
	松香烷系列和海松烷系列	贫海松烷和松香烷	成熟度不高时, 可检测到海松烷系列和松香烷系列化合物	无
	二环倍半萜 C ₁₅ /C ₁₆ 值	< 1 和 > 3	$1.1 \sim 2.8$	无
	双杜松烷	无	有	无
	C ₂₇₋₂₉ 甾烷	一般 C ₂₇ 、C ₂₈ 丰富, C ₂₉ 含量少	一般 C ₂₉ 丰富, C ₂₇ 、C ₂₈ 较少	无

(据戴金星等, 1992, 修改)