

傅家谟 刘德汉 主编

天然气运移、储集及封盖条件

科学出版社

天然气运移、储集及封盖条件

傅家谟 刘德汉 主编

作者 (按姓氏笔划排列)

邓云山	卢家烂	申建中	史继扬
刘德汉	江德昕	朱莲芳	华保钦
汪本善	李本超	杨惠秋	吴石中
吴志勇	张惠之	张丽洁	陈欣荣
林木杰	欧阳沙怀	罗斌杰	周振杰
郑国东	胡伯良	施继锡	傅家谟
雷怀彦	潘中海	戴樟谟	魏俊超

科学出版社

1992

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书是以国家“七五”攻关项目“油气田地质理论和勘探技术研究”的部分成果为基础,并参考国内外最新资料撰写的一本专著。书中系统地论述了天然气运移、储集及封盖条件的基本理论与实际评价问题。全书共七章,主要内容包括天然气运移机制和运移效率,运移的地球化学指标;天然气聚集和储层特征,天然气封盖条件;天然气的探测与评价方法以及天然气藏形成的地质构造背景分析和气藏研究。本书内容丰富,资料新颖,反映了目前天然气藏形成条件研究的最新成果。

本书可供有机地球化学、石油、煤炭及天然气等地质专业技术人员及有关高等院校师生参考。

天然气运移、储集及封盖条件

傅家谟 刘德汉 主编

责任编辑 吴寅泰

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100707

北京宏伟胶印厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1992年4月第 版 开本:787×1092 1/16

1992年4月第一次印刷 印张:15 插页:5

印数:1—900 字数:344 000

ISBN 7-03-002879-1/P·568

定价: 26.70 元

前 言

作为一种优质能源和可贵的化工原料,天然气在下个世纪将要占据能源主导地位,被认为是世界能源发展最有前景的领域。据估计世界天然气工业发展高峰期在 2020 年前后,在世界能源结构中所占比例正迅速增长,预测 2000 年可达到 40% 以上。我国天然气资源十分丰富,预测资源量可达 33 万亿立方米,而目前探明储量仅占总资源量的 3% 左右,远远低于石油资源探明的比例(探明石油储量占总石油资源量 16%),说明天然气勘探开发潜力巨大。由于“六五”和“七五”计划期间将天然气研究列为国家科技攻关项目,80 年代以来我国天然气勘探和科研双获丰收。十年来天然气勘探取得的宝贵经验和天然气科学研究获得的丰硕成果必将大大促进我国天然气工业的迅速发展。

天然气运移、储集及封盖条件研究乃是“七五”国家科技攻关项目第 54 项(油气地质理论和勘探技术研究)的一个一级专题。该专题下设 13 个二级专题,分别由中国科学院地球化学研究所广州分部、兰州地质所和长沙大地构造所承担。

项目领导小组:刘光鼎、王福庆、翟冠军、张 荷、石宝珩、张 荫、何渊清、杨 生、胡龙孙

专题人员:专题主管人员:赵生才、傅家谟、闵育顺

专题负责人:傅家谟、罗斌杰、刘德汉

参加人员:(按姓氏笔划为序)

邓云山	卢承祖	卢家烂	申建中	申家贵	史继扬	刘德汉	江德昕
邢福健	朱莲芳	华保钦	向明菊	汪本善	应美红	李汉城	李本超
李钦雄	李继亮	李新宇	杨惠秋	麦碧嫻	吴石中	何跟巧	邱华宁
张尔匡	张丽洁	张惠之	陈 煊	陈欣荣	陈德玉	邵文兰	林禾杰
欧阳沙怀	罗斌杰	周振杰	赵必强	胡伯良	施继锡	洪紫青	耿安松
贾蓉芬	盛国英	傅家谟	傅碧宏	雷怀彦	蒲志平	蔡淑芝	潘中海
戴樟谟	魏俊超						

本书共分七章,各章执笔人如下:第一章,傅家谟。第二章第一节,傅家谟;第二节,刘德汉、张惠之、罗斌杰、吴志勇、郑国东;第三节,卢家烂、傅家谟;第四节,汪本善、张丽洁;第五节,华保钦、吴石中。第三章第一节,傅家谟;第二节,史继扬;第三节,罗斌杰、吴志勇、郑国东;第四节,施继锡、李本超;第五节,江德昕、杨惠秋;第六节,戴樟谟。第四章第一节,陈欣荣、邓云山;第二节,朱莲芳、雷怀彦。第五章第一节,林禾杰;第二节,林禾杰、潘中海。第六章第一节,魏俊超、周振杰;第二节,刘德汉、张惠之。第七章第一节,刘德汉;第二节,欧阳沙怀;第三节,胡伯良、申建中;第四节,申建中、胡伯良。全书由傅家谟、刘德汉审阅,肖贤明协助审阅,曾饶明统改编审完成。

本项专题是在地质矿产部、石油天然气总公司和中国科学院组织的项目小组领导下完成的,并得到有关油田、地球化学研究所、兰州地质研究所和长沙大地构造研究所及有机地球化学国家重点实验室等的支持与帮助。本书编写过程中还得到叶继荪等电脑打印中心人员和绘图组人员的帮助,在此一并致谢。

目 录

前 言

第一章 绪论	1
第一节 天然气——能源发展最有前景的领域.....	1
第二节 勘探开发大中型气层气藏的重要性.....	2
第三节 我国天然气的主要成因类型.....	2
第四节 天然气地质学和地球化学研究.....	4
第二章 天然气运移机制和运移效率	5
第一节 概述.....	5
第二节 不同演化阶段天然气运移的主要形式和规律.....	6
第三节 气源岩的矿物组成和岩性特征对天然气运移的影响	16
第四节 气源岩排气效率的模拟实验研究	29
第五节 地层中流体势与天然气运移规律	39
第三章 天然气运移的地球化学指标	57
第一节 概述	57
第二节 天然气伴生凝析油、轻质油的运移分异模拟实验与运移指标.....	58
第三节 天然气运移的地质色层效应与指标	73
第四节 有机包裹体作为天然气运移指标和信息的探讨	89
第五节 天然气气源和运移途径的微化石踪迹.....	108
第六节 天然气运移和围岩对气藏中稀有气体组成的影响.....	117
第四章 天然气聚集和储层研究	124
第一节 天然气聚集的地质特征及构造裂隙与天然气聚集的关系.....	124
第二节 天然气储层的岩石学研究.....	135
第五章 天然气封盖条件	161
第一节 天然盖层的类型.....	161
第二节 盖层的微渗漏与自封闭.....	164
第六章 天然气探测与评价	172
第一节 天然气聚集的遥感信息.....	172
第二节 生气速率和散失速率在天然气藏普查评价中的意义.....	189
第七章 天然气藏形成的地质构造背景分析和气藏研究	197
第一节 概述.....	197
第二节 华北地区天然气藏形成的地质构造条件.....	197
第三节 塔里木盆地沙雅隆起油气运移和聚集的地质地球化学特征.....	211
第四节 塔里木盆地天然气地球化学特征及其成因的探讨.....	220
参考文献	228

• ii •

第一章 绪 论

第一节 天然气——能源发展最有前景的领域

专家估计,石油工业发展的高峰期是 1950—2000 年,高点是 80 年代;而天然气工业发展高峰期在 2020 年(图 1.1)。天然气在世界能源结构中所占比例呈上升趋势:1950 年为 9.8%,1983 年为 22%,而 2000 年预测可达 41%。这些数字有力地说明,天然气的确是当前世界能源发展最有前景的领域。

我国能源消费结构极不合理,主要消费的是煤炭,其次是石油,天然气消费水平甚低。世界能源消费三大支柱依次为石油、煤炭和天然气(图 1.2 和图 1.3)。我国天然气产量(按气油产量当量比)比世界发达国家小十余倍,与我们这样的大国极不相称。据统计,目前世界油气产量当量比为 1:0.9,苏联和美国分别为 1:1.23 和 1:1.21,而我国仅为 1:0.1。我国天然气资源量预测为 33 万亿立方米,探明天然气储量约占总资源量的 3%,远远低于石油的勘探程度(16%)。

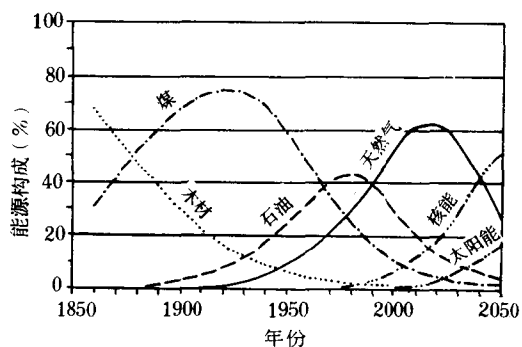


图 1.1 世界主要能源发展趋势

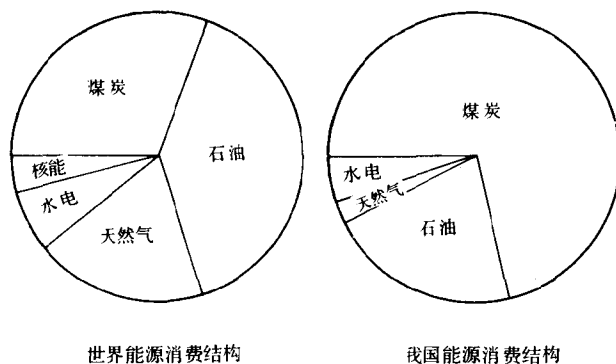


图 1.2 能源消费结构对比



图 1.3 天然气在各国能源消费量中的比重(1987)

从世界能源发展趋势及我国能源消费结构和油气资源勘探现状来看,天然气资源的勘探开发在我国潜力巨大,乃是我国未被充分利用而又具有广阔前景的优质能源和可贵的化工原料。

第二节 勘探开发大中型气层气藏的重要性

全世界至 1980 年共发现储量 1000 亿立方米以上的大气田 114 个,仅占发现气田数的 0.94%;而探明储量共 61.97 万亿立方米,占总探明储量的 59.45%。不到 1%的大气田累计储量竟高达探明总储量的约 60%,这充分说明大气田勘探的重要性。目前世界上年产气超过 1000 亿立方米的产气大国有苏联、美国和加拿大。它们之所以成为产气大国,都是因为他们十分重视大气田形成规律的研究,发现了一批大中型气田并投入生产。我国天然气工业要有很大的发展,也必须从我国地质实际出发,研究大气田成藏条件,力争发现一批大中型气田并投入开发。我国天然气资源丰富,虽然地质构造条件复杂,经过 40 年勘探,仍然发现了 14 个中型气田。尤其令人鼓舞的是近期勘探结果证实,南海崖 13-1 气田很可能成为我国第一个大型气田,塔东北、陕甘宁和莺歌海-琼东南很有可能成为大气田连片的重要地区。

世界天然气探明储量的 90%是与石油分开的,真正与石油共存的油田伴生气的探明储量仅占 5%,这是因为天然气在成因上与石油有明显差异,有其自身的成因特点与分布规律。正由于这一区别,世界很多大气田独立存在,也还有一些独立的含气盆地。例如世界 102 个大气田中,纯气藏和凝析气藏占 83%,凝析油气藏、气油藏和油气藏仅占 17%。储量大于 1 万亿立方米的超大型气藏 14 个;其中纯气藏 8 个,凝析气藏 4 个,凝析油气藏 1 个,油气藏 1 个。这些事实说明,我国天然气工业要上台阶,要有重大突破,必须加强气层气藏的勘探与评价。我国天然气探明储量太少,而且主要是油田伴生气,气层气储量仅占 45%,这种极不合理的情况亟待解决。

第三节 我国天然气的主要成因类型

地壳中聚集的可燃天然气绝大部分是以甲烷为主的气态烃和某些非烃气体的混合物。这种富甲烷天然气可能通过有机和无机两种途径形成,有以下三种基本成气作用方式(包茨,1988):(1)生物成因气。富含有机质沉积物中的微生物生态演替作用和相应的地球化学环境的改变,导致一定条件下甲烷菌占优势而产生相当数量的甲烷。(2)热解成因气。沉积岩中分散和集中的有机质(干酪根和煤)以及已生成的液态烃,在热降解与热裂解作用下,其产物发生两极分化,即与芳烃聚合同时形成低分子烃——甲烷及其同系物。(3)深源无机成因气。地球深部高温下矿物间化学反应和上地幔脱气作用,通过无机合成以及早期封存的“化学甲烷”的释放,产生无机成因的甲烷。

MacDonald(1983)研究了天然气的成气作用模式,认为最具代表性的模式有六种:(1)沉积岩有机质的微生物降解;(2)沉积岩有机质的热降解;(3)原油的热裂解;(4)煤的变质作用;(5)岩浆岩的高温反应;(6)地幔原生甲烷的释放。

此外,还有两种新的成气模式。碳酸盐岩分散有机质有三种基本存在形式,即吸附有

机质、晶胞有机质和包体有机质(傅家谟和贾蓉芬,1984)。碳酸盐岩晶胞有机质的热降解作用也可以产生油气,成为天然气的来源(周中毅等,1983)。石油热演化过程中会产生各种热成熟度的固体沥青。在我国华北、南方和塔里木广泛发育的碳酸盐岩(甚至碎屑岩)中常常存在有独立产出并呈分散状或相对富集状的固体沥青,它们在经历进一步热作用时,可以热降解生成油气,特别是天然气。

天然气的成因类型较多,主要是有机成因的,但也不排除无机成因的。按母质类型不同,有机成因气又可分为煤成气和油型气。前者来源于富含腐殖型有机质的煤和含煤地层,后者则来源于陆相和海相成因的腐泥型有机质和过渡型有机质。按成熟度不同又可划分出生物气(煤型或油型生物气)、油田伴生气和热解气(傅家谟,1987)。

我国天然气预测资源量为 33 万亿立方米,按成因类型主要分属三大类:油型气或油田伴生气(36.4%)、海相地层热解气(30.9%)和煤成气(32.4%)(图 1.4)。生物气(0.3%)也很重要,在柴达木已发现一个中型生物气田。按照这一资源预测材料和我国地质特点分析,最有远景的大中型气层气成因类型应是煤成气和热解气。

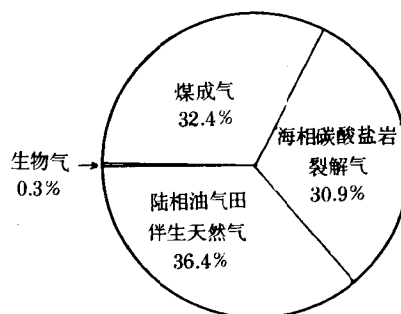


图 1.4 我国天然气资源量的组成

世界超大型气田 14 个中有 8 个是煤成气田,探明储量约占世界天然气总储量的五分之一至四分之一。我国陆上 82% 的大型沉积盆地($>1 \times 10^4 \text{km}^2$)为含煤盆地。我国陆上煤炭资源丰富,主要分属侏罗纪(占 67.7%)和石炭二叠纪(30.6%)。内蒙古、东北和新疆侏罗系含煤盆地和大华北石炭一二叠系含煤盆地是陆上煤成气勘探的主要地区。准噶尔和吐鲁番盆地南部属中亚侏罗系含煤带,煤层厚度大,埋藏深,是寻找大中型气田的有利地区。我国南海和东海位于第三纪重要成煤区——西环太平洋聚煤区,第三纪沉积厚度巨大,煤层薄,但含煤地层厚度大,有机质丰富,特别是作为盖层的上第三系厚层海相泥岩稳定分布。该区远景大,并在南海已发现我国最大的气田。

我国热解气主要与元古界至古生界海相地层(含碳酸盐岩和页岩)有机质热演化作用有关。主要远景地区是四川盆地、大华北(含鄂尔多斯盆地)和塔里木盆地。南方海相地层有机质演化程度高,主要产出纯气藏和凝析气藏。大华北和塔里木海相地层热演化程度较低,且差异大,情况较为复杂。塔里木盆地面积大,主力烃源层有三套,远景巨大,存在凝析气田、凝析油气田,还可能存在纯气田和油田,以及相对独立的含气区和含油区。

总之,天然气勘探和评价虽应大中小型兼顾和多种成因类型并重,根据我国地质实际并参照国外经验分析,天然气资源开发要有重大突破和上台阶,必须狠抓大中型气田、气层气以及煤成气藏和热解气藏的成藏条件研究和勘探开发。

第四节 天然气地质学和地球化学研究

强化天然气勘探和科学研究是开发天然气的先导和基础。近十年来,国家计委组织了有关煤成气开发和天然气开发的攻关课题研究,大大推进了我国天然气地球科学的研究工作,出现了一大批研究成果和一系列论文及专著,例如《天然气地质学》(包茨,1988)、《天然气地质学》(陈荣书,1989)、《天然气地质学概论》(戴金星等,1989)、《中国煤成气研究》(地质矿产部石油地质研究所,1989)等。在天然气地球化学方面,最近出版了两本分别针对海相地层热解气和煤成气的专著:《碳酸岩有机地球化学》(傅家谟等,1989)和《煤成烃地球化学》(傅家谟等,1990)。

《天然气运移、储集和盖封条件》乃是在前人研究基础上编写的又一本天然气地质学地球化学专著,重点论述了天然气运移机制和运移效率、天然气运移的地球化学指标和运移信息、天然气聚集和储层研究、天然气封盖条件、天然气的探测与评价方法以及天然气藏形成的地质构造背景分析和气藏研究。

第二章 天然气运移机制和运移效率

第一节 概 述

天然气和石油相似,都是流体矿产,其最大的特征就是具有运移性,油气自生成起就开始了运移,可以说油气生成、聚集和散失的全过程就是一部运移史。天然气与石油相比,有两个突出的特点:一是它比石油的活动性更强;二是它在水中的溶解度比石油更大。这两大特点决定了天然气运移除与石油有相似性外,还具有其自身特有的性质。

天然气运移和石油相同,可以划分为初次运移和二次运移两个阶段。初次运移是指天然气在气源岩中生成后向储层运移的过程,而天然气在储层内部的运移直至天然气聚集成藏的全过程属二次运移。实际上,天然气初次运移和二次运移乃是一个连续的过程,不能截然分开。

天然气运移研究的问题很多,诸如天然气运移的方式、相态、动力;天然气何时从源岩排出和运移及运移的方向;天然气何时在何处聚集成藏;天然气运移、聚集和散失的条件;天然气运移定量研究(例如排出量、运移、聚集和散失的量)等。这些问题的研究和解决,无疑对于指导天然气的勘探工作具有十分重要的意义。

运移研究是一个难度很大而又对天然气勘探开发十分重要的课题。李明诚^①认为运移研究具有很强的综合性和推理性。这是因为油气运移是一个涉及多学科的复杂问题,它与地球科学、物理学和化学的许多领域都有密切关系。油气运移现象又难于在野外实际观察,也难于在实验室中模拟。运移问题涉及生、储、盖、保各个环节,实际上油气运移是一个自然连续的、动态的和综合的复杂过程。例如源岩的性质(有机质的丰度、类型、组构)决定了生烃强度,同时也决定了排烃相态、排烃饱和度、排烃时期和排烃量的多少。而大量排烃时期又往往与二次运移期基本上是同步的。如果这时存在圈闭条件就有可能形成油气藏。如有沉积间断或不整合存在就必须弄清楚大量排烃和运移时期是在这之前还是之后发生,才能判断圈闭的有效性和含油气远景。因此必须开展综合性的动态研究。

本章重点探讨了天然气初次运移模式、初次运移模拟实验和流体势概念在二次运移研究中的应用。

根据具体地质情况,现已提出与水相运移和烃相运移(气相运移和油相运移)有关的多种油气初次运移模式,如(1)深盆地热水垂直运移模式;(2)压实盆地中烃类的溶解-出溶运移模式;(3)甲烷与二氧化碳气体溶载运移模式;(4)连续油相运移模式;(5)孔隙中心网络运移模式;(6)干酪根网络运移模式;(7)气相扩散运移模式;(8)气相溶液运移模式;(9)甲烷-微裂隙运移模式等。每一种模式适用于一定的地质条件,至今尚没有一种适用于各种情况的统一模式。Tissot 和 Welte(1978)认为初次运移的机制随地下条件的不同而改

^① 李明诚,1989,加强油气运移的研究——进一步开发我国天然气资源。

变,主要与埋深有关。在 1000—1500m 的浅地层中水溶液运移比油相运移有利,但只包含一定的轻烃,形成大油气田的可能性很小;在中等深度(2000—4000m)以油相运移为主;较大深度(>4000m)则以气相运移为主,但也不排除少量水溶液运移的作用。本章第二节考虑埋深(有机质成熟度)条件同时又考虑干酪根类型与岩石类型的基础上,提出了一个天然气初次运移综合模式。该模式还注意到浅层生物气阶段气相运移的可能性与有关证据。

前面谈到,天然气运移难于在室内进行模拟。尽管如此,我们仍进行了初步尝试,设计了初次运移模拟实验装置,开展排烃定量模拟和在不同矿物介质及不同矿物基质/有机质条件下的天然气生成与排出的实验模拟,获得了一些新认识,例如矿物基质/有机质与异常高压、间歇突发性运移的关系等。

第二节 不同演化阶段天然气运移的主要形式和规律

地壳中天然气的聚集和散失乃是天然气运移的结果和表现。为了解释和寻找地层中天然气的聚集,已提出了多种观点和模式,其中各类模式争论要点和核心是初次运移的相态和动力。例如关于运移相态方面的重要观点有水相运移——包括水溶液和胶束溶液状态的运移;烃相运移——包括烃类呈油珠、气泡状态随水体一起运移和连续油相运移、连续气相运移和间隙式微裂隙混相运移等多种模式。在运移动力方面的主要观点有压实作用、水热膨胀作用、渗透作用、粘土矿物脱水作用、烃类及非烃气体的生成作用、扩散作用、异常压力作用等(Chapman, 1983; 包茨, 1988; 李明诚, 1987)。虽然自然界中天然气的聚集和散失为不可否认的客观事实,但又是很难直接观察、模拟和论证的地质问题。以上各种观点都有它的可取性和局限性,很难用一种观点和模式解释不同条件下天然气运移聚集的复杂过程。

地层剖面中天然气各种产出的事实和天然气生成运移的模拟实验结果表明,天然气产出的地质地球化学条件是多种多样的。天然气的成因、组成、数量和产出的地质地球化学环境,决定了天然气的运移形式和规律。因此本节主要以综合研究天然气产出过程为基础,以详细观测不同条件地层中烃类物质运移现象为根据,探讨不同条件下天然气的运移规律,为天然气的普查勘探提供依据。

地壳中能产出天然气的源岩很多,除了按生油指标能划为生油岩的各类岩石以外,由于天然气产出范围比石油广泛,运移效率比石油高,一些按生油指标不能划为生油岩的很多岩石,也可成为产生天然气的重要气源岩。从天然气产出机制和效率来看,泥质岩、碳酸盐岩和煤三类主要气源岩的差别较大,它们在不同地质环境和演化阶段中烃类产出的数量、组成和运移形式都很不相同。下面简要探讨各类气源岩在不同演化阶段的运移条件和运移形式。

一、气源岩演化阶段的划分与生气模式

据目前干酪根生油理论和生烃模式,一般将烃源岩的生烃过程划分为以下主要阶段(见图 2.1):

- (1)未成熟阶段——生物甲烷主要生成带；
- (2)低成熟阶段——重油主要生成带；
- (3)成熟阶段——正常原油主要生成带；
- (4)高成熟阶段——凝析油和湿气主要生成带；
- (5)过成熟阶段——裂解甲烷主要生成带。

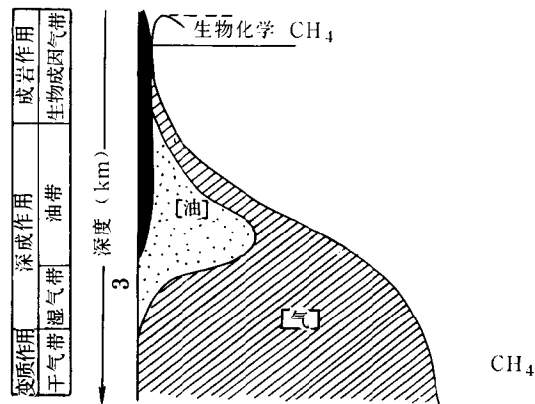


图 2.1 油气生成阶段和一般模式

为了具体研究各类气源岩在不同演化阶段的运移形式,首先必须了解不同气源岩在各演化阶段天然气产物的组成和数量。图 2.2 是对各类生气有机质进行玻璃管真空密封

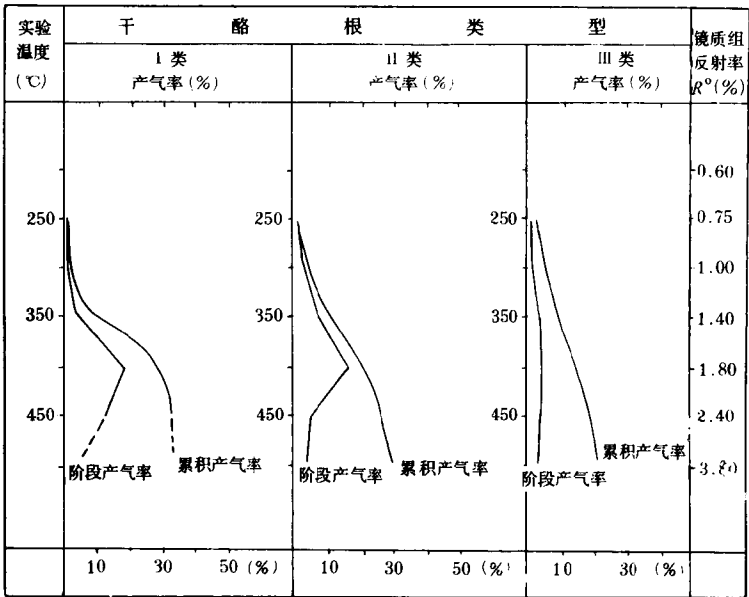


图 2.2 各类有机质在热演化中的产气率

体系的热演化生气实验结果,图中表明各热演化阶段都有相当数量的天然气产出,因而各演化阶段都有天然气运移的物质基础。下面将结合不同地质条件进一步讨论各演化阶段天然气的运移形式和规律。

二、不同演化阶段天然气初次运移的主要方式

(一) 未成熟阶段

湖相或海相泥质气源岩未成熟阶段的埋深一般在 1500m 以内。随盆地沉降速度、地温梯度和埋藏时间不同而有较大差别。我国松辽盆地白垩系烃源岩未成熟带的深度较浅,一般在 1200m 以内;渤海湾盆地第三系烃源岩未成熟带一般在 1800m 或 2200m 左右;新疆地区由于中、新生代地层沉降速度快和盆地古地温梯度低,未成熟带烃源岩的深度可达 2600—3000m。一般未成熟阶段的泥质气源岩孔隙大,孔隙度高,孔隙率多数在 35% 以上,孔隙的含水饱和度高。泥质沉积物中含有较多未经完全分解的生物大分子,生物化学作用强烈,是生物甲烷气的重要产出带。生物甲烷杆菌、球菌为厌氧嗜温型或嗜热型微生物,一般在沉积物硫酸盐还原带之下的碳酸盐还原带比较发育。生物甲烷繁殖的最佳条件是 $E_h < -300\text{mV}$, $\text{pH} = 7.2-7.6$, 温度为 $37-42^\circ\text{C}$ 。在有利条件下每公斤碳水化合物可产出 0.37m^3 甲烷,每公斤蛋白质可产出 0.49m^3 甲烷,每公斤脂类可产出 1.04m^3 甲烷。但是地质样品和地质历史中每克有机碳产出的甲烷量很难测算,据目前已知天然气储量统计,生物甲烷气藏约占 20%。据陈安定等用含有机质的软泥、泥炭等进行人工生化甲烷产出的实验结果^①,每克有机碳的甲烷产率为 3—100ml,变化范围很大。按照这种比例,若气源岩有机碳为 1%,每立方米源岩可产出甲烷 $0.06-2\text{m}^3$ 。甲烷在有一定压力的条件下,在水中的溶解度 $> 3\text{m}^3/\text{m}^3$,一般未成熟气源岩的含水饱和度很大,在软泥阶段含水量达 80%,在埋深 1000m 时含水量也可达 30% 以上。这说明未成熟阶段泥质气源岩产出的生物甲烷可大量溶解在水中,随孔隙水运移,在压力相对较低的圈闭中进一步分离形成生物甲烷气藏,也可在温度 $0-30^\circ\text{C}$ 、压力 $2.6-100\text{MPa}$ 的条件下形成甲烷水合物气藏。此外,由于未成熟阶段不仅岩石的孔隙度大,而且孔隙平均直径也较大,有利于甲烷气相运移。

我国青海柴达木盆地未成熟的第四系,东海和南海未成熟的第四系、第三系以及渤海湾盆地未成熟的第三系都存在有生物气运移聚集的重要事实。但是目前未见报道未成熟阶段碳酸盐岩中产出和赋存有重要生物甲烷气藏,可能是由于碳酸盐类气源岩成岩作用很快,孔隙水和有机物在浅部就大量排出和耗损,生物甲烷气的产出和保存有限,其运聚规律也有待进一步研究。

有机质丰富的含煤地层,在含水量较低的内陆沉积盆地,由于腐殖酸含量很高,将大大抑制甲烷菌的繁殖,甲烷气产出数量有限。只有在近海平原和多水湖沼盆地沉积的含煤岩系,在未成熟阶段有大量生物甲烷气产出,并大量溶解在富含 CO_2 的水中,以水溶性或成气相沿泥炭、褐煤中植物碎屑孔洞与层理裂隙运移。

^① 陈安定等,1988,泥炭等地质样品的生化甲烷形成试验,75-54-01 成果交流会论文摘要汇编,132 页。

(二) 低成熟阶段

我国低成熟阶段的泥质气源岩在我国东部地区和海上第三纪沉积盆地分布较广,埋深界线一般为 2000—2500m,孔隙度一般在 20%以上,含水饱和度较高,有比较好的运移条件。据表 2.1 列出的各类干酪根低演化阶段产气量的实验结果,Ⅰ型干酪根产气量约 25m³/t,Ⅱ型干酪根产气量约 20m³/t,Ⅲ类干酪根产气量约 16m³/t。产物组成的最大特点是 CO₂ 含量很高,可以占低演化阶段气体产物的 50—80%,烃类气体一般只占 5—40%,其中甲烷约为 4—10%。在有压力条件下 CO₂ 在水中的溶解度一般可达 1m³/m³ 以上,饱和和 CO₂ 的水对甲烷等烃类气体的溶解度也有很大的增溶性。因此,低演化阶段产出的气体可大量溶解在孔隙水中,随孔隙水运移。

表 2.1 气源岩干酪根低成熟阶段累计产气率和气体组成

气源岩 干酪根类型	产气率 (m ³ /t)	气体组成 (%)				资料来源
		CH ₄	总烃气	CO ₂	H ₂	
Ⅰ	25—40	15—50	20—60	20—80	1—5	模拟实验 数据综合
Ⅱ	20—30	7—10	8—10	50—80	1—4	
Ⅲ	5—10	3—6	4—7	70—80	1—2	

低成熟阶段的碳酸盐岩,由于有机质含量一般比泥岩低,碳酸盐岩矿物导热率低并对晶间和晶胞有机质有强烈的保护作用,演化程度一般比相同深度的泥质岩低,产烃率少。河北宣化下马岭页岩中包含的透镜状碳酸盐岩的显微荧光研究结果表明,下马岭页岩已开始进入了生油阶段,而碳酸盐岩透镜体本身未见明显的生油迹象,但其本身不发荧光,但其裂隙有强烈的荧光和烃有机包裹体。从烃的分布和运移特征来看,它们是由下马岭页岩运移到透镜状碳酸盐岩裂隙的。烃类在碳酸盐岩中的运移主要以裂隙混相运移为主(图版 I-1)。

不同煤岩组成在低成熟阶段的生烃性能和生烃数量很不相同。一般由褐煤演化到气煤阶段的生气量可达 36m³/t,气体产物中 CO₂ 的含量很高,可达 50%以上(见表 2.1);而低演化阶段的煤一般含水量在 10%以下,产生的大量 CO₂ 和烃类气体不可能全部溶解在煤的孔隙水和内在水分中。未溶解的部分可储存和通过煤中丝炭和镜煤的裂隙与层理等成气相运移。据一些低演化阶段的长焰煤、气煤的研究结果,发现煤中有较多丝炭孔隙是未经矿物质充填的,这种现象可能与孔隙被气体产物充填有关(图版 I-7,8;Ⅱ-3,4)。

(三) 成熟阶段

据干酪根生烃模式,烃源岩成熟阶段是液态烃主要生成阶段,但是根据气源岩的模拟实验结果和地层剖面中油气产出事实,在生油岩的成熟阶段也有 5—10%的天然气产出(图 2.2)。由于这个阶段液态烃产率较高,产出的气体可大部分溶解在液态烃中随液态烃一起运移。

我国东部地区中、新生代泥质烃源岩,成熟阶段的埋深一般为 2000—3000m,源岩的孔隙度 6—15%,古地温 130—150℃。由于本阶段烃类的大量生成作用及粘土矿物的大量脱水作用,源岩中的流体具有很大的膨胀压力并改善和增加矿物颗粒表面及孔隙表面的浸油性,有利于液态烃沿岩石孔隙、裂隙、层面等发生连续油相运移。同时这种流体具有异常高压,产出的气态烃在液态烃中有较高的溶解性,异常高压也容易使气源岩产生微裂隙或使层面张开,造成烃相与孔隙水和粘土矿物排出的自由水沿各种微裂隙混相运移。

一些有机质含量较高的成熟阶段的泥质岩,常见有大量烃类沿层理横向运移的现象(图版 I-2),可见烃源岩层面间的荧光沥青物质沿层理、层纹呈连续状分布,烃类可不受毛细管阻力而在有机相中连续运移。此外,在模拟实验样品中见成熟阶段的烃源岩有明显的裂隙与裂纹。烃类首先充填在这些裂隙间并向低压区运移。

一些厚层泥质烃源岩,由于源岩孔隙度低,层理结构不明显,微裂隙的数量也少,液态烃的运移效率不高,仅气态烃优先运移,以致源岩中残留较多的沥青物质,如贵州、广西泥盆系厚层泥岩中目前仍富含这类残留沥青。

据我国南方大量成熟阶段碳酸盐岩的观察研究结果,碳酸盐岩中烃类运移的主要形式为沿各种裂隙和孔隙、溶孔等呈气、液、水混相运移。例如,在不少碳酸盐岩裂隙中,矿物包裹体捕获的流体物质常常为气态烃+水的多相包裹体,表明碳酸盐岩裂隙是烃类运移的主要通道。运移中流体主要为多相体系,为烃与水的混相运移(图版 I-4,5)。如果烃源岩中缺乏这些裂隙,则产出的烃类只能发生局部运移,在孔隙、溶孔或晶洞中形成零星分布的油气微量聚集的团块,很难大量聚集成有工业价值的油、气藏。在贵州、广西、四川等地均可见到重要的实例,如在贵阳倪儿关三叠系灰岩露头剖面上,只要打开数厘米厚的新鲜面就能发现含油、气的晶洞团块。这个现象一方面说明三叠系细晶灰岩对含油气团块的封闭性很好,地表经长期风化尚能保留较丰富的含油团块;另一方面也说明由于本区三叠系细晶灰岩缺少微裂隙通道,油气未能大量运移聚集,也未大量散失,烃源层中保存有较多的原生气油物质。

煤及含煤沉积物在成熟阶段有大量气态烃和少量液态烃产出。产出数量和性质直接与煤岩组成有关。如果煤岩组成主要为丝质组,则主要产气态烃,不产液态烃;如果煤岩组成含类脂组高,则产较多的液态烃;如果煤岩组成主要为镜质组,则以产气态烃为主,也产少量液态烃(见表 2.2 和图版 I-6)。煤中包含荧光沥青渗出体,其荧光性质表明,处于成熟阶段的煤有大量生烃作用。产出的烃类通过丝炭夹层、层理和裂隙运移的现象比较明显。但是当煤中含有较多生烃能力较强的基质镜质体时,对产出烃类的吸溶性会很大,特别是对液态烃的吸溶性很大,一般很难运移。

表 2.2 气源岩干酪根成熟阶段累计产气率和气体组成

气 源 岩 干酪根类型	产气率 (m ³ /t)	气 体 组 成 (%)				资料来源
		CH ₄	总烃气	CO ₂	H ₂	
I	250—400	30—45	40—70	10—20	5—10	模拟实验 数据综合
II	100—130	28—40	30—60	20—40	9—20	
III	40—50	10—30	15—40	35—50	5—15	

但是,煤中加入粘土和石英砂在可以连续排烃的半封闭性热压生烃与排烃实验结果表明:煤中加入矿物质后,由于改变了烃源岩的物理化学性质,提高了试样的初次排烃效率,也提高了每克有机物质的产气率。当煤中混入1:1的粘土后可提高产气率1.9倍;混入1:1的石英砂后可提高产气率1.5倍。这说明产气率的提高与矿物的物理因素和粘土的催化作用因素都有关系(详见本章第四节)。

(四) 高成熟阶段

我国东部中、新生代泥质气源岩进入高成熟阶段的埋深一般大于3500m,孔隙度一般为5—10%。岩石的粒间孔隙和含水量大大减小。据剖面中油气产出规律和烃源岩的模拟实验结果,高成熟阶段有机质的生烃作用主要产轻质油、凝析油和天然气,总产烃率为7—10%,数量和组成与源岩中有机质母质类型有关(表2.3)。在高成熟阶段地层压力较高,产出的部分液态烃可大量溶解在气态烃中,烃类主要呈气相状态沿微裂隙和孔隙运移。

表 2.3 气源岩干酪根高成熟阶段累计产气率和气体组成

气 源 岩 干酪根类型	产气率 (m ³ /t)	气 体 组 成 (%)				资 料 来 源
		CH ₄	总烃气	CO ₂	H ₂	
I	550—650	80—85	—	3—4	5—10	模拟实验 数据综合
II	400—480	70—75	—	6—10	10—20	
III	150—200	60—65	—	10—20	6—15	

高成熟阶段的碳酸盐岩一般重结晶作用比较明显。有机质在重结晶作用中常常被排挤到重结晶矿物颗粒晶间。碳酸盐岩的重结晶作用不仅改变了岩石的物理性质和孔隙结构,而且也改变了源岩中有机质的赋存状态,有利于释放出具有生烃意义的晶胞有机质和包体有机质,并沿重结晶矿物的膨胀孔隙或岩石的各种裂隙运移。

高成熟阶段的煤和含煤地层仍有较大的生气能力,产物主要为富含甲烷的干气。高演化阶段的煤一般孔隙度为10—15%,而且有大量的微裂隙,特别是富含镜质组的条带状煤有较多垂直层面的裂隙,产出的气体组分不仅可以沿层面横向运移,而且也可能沿垂直裂隙进行纵向气态连续运移。由于煤层的孔隙和裂隙较多,吸附甲烷的能力强,如果煤层顶板盖层非常致密,煤中也可储聚大量瓦斯。即高演化阶段的煤既是重要的气源层也可能为部分天然气的储集层。煤中天然气的运移具有初次运移的特征,有时也具有二次运移的特征。

(五) 过成熟阶段

过成熟阶段的气源岩在地质历史中的最大埋藏深度一般大于5000m,经受的最大古地温往往达200℃以上,气源岩在过成熟阶段的生气物质不仅包括源岩中干酪根的进一

步裂解作用,而且包括残留在源岩中一些未运移出去的液态烃和沥青质,以及地层剖面中的大量储层沥青,如沥青砂岩、沥青灰岩、沥青脉等。根据储层沥青和沥青脉热演化生气实验结果,这类沥青的生气量很大,是地层中的重要气源岩(表 2.4)。

表 2.4 不同演化阶段的沥青在热模拟实验中的产气率和气体组成

样品原始 演化程度	实验温度 (℃)	产气率 (ml/g)	气 体 组 成 (%)							
			CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	H ₂	CO ₂	H ₂ S	N ₂	O ₂
脆沥青	500	549	76.5	9.7	0.018	4.44	2.80	0.12	4.74	0.43
焦沥青	500	248	65.4	1.37	微	13.1	9.13	0.098	8.52	1.23
碳沥青	500	17	70.85	/	/	14	6	/	/	/

沥青砂岩和沥青灰岩往往都曾经是孔隙很好的储层,由于沥青等有机物质的充填,影响了岩石在晚期成岩作用中的交代作用和重结晶作用。在过成熟阶段,沥青等有机物质的生气作用会造成膨胀压力,易形成气相连续运移的网络结构,因而天然气的原生运移效率较高。

由图版Ⅱ-1,2可见,高演化的碳沥青在生气作用的同时产生了大量有规律分布的原生微裂缝,为天然气运移提供了良好的通道。

高变质煤和含煤岩石中镜质体的内生裂隙也很发育。煤在高变质阶段的孔隙度比中等变质阶段煤的孔隙度增加很多,可达10%以上。因此,一般高变质阶段煤成气的主要运移形式为气相连续运移。

三、天然气运移模式

地层中天然气运移是比较复杂的地质历史过程,受多种地质地球化学条件控制,不同条件下可能具有不同的运移机制和运移形式。国内外学者已提出了多种烃类运移的模式用以解释地层中油气聚集和赋存的各种事实,当前研究的重点问题是试图解释石油的运移相态和运移形式。关于天然气的运移问题很少重点研究和单独论述。本文作者着重注意观测了地层中天然气运移的各种信息,在此基础上综合分析并经模拟实验研究了天然气产出和运移的机制,在前人研究工作的基础上提出了不同演化阶段天然气运移的多相态模式,现将该模式要点综合归纳于表 2.5。

四、浅层生物气早期气相运移成藏

生物气形成阶段是天然气形成的一个重要阶段。来源于低等水生生物和陆源植物的有机母质含有相当量的碳水化合物,是甲烷生成菌的营养源,在整个早期成岩阶段,将生成相当量的生物气。据 Rice 和 Claypool(1981)的统计,已探明的生物气储量占天然气总储量的 21.3%。嗜热型甲烷生成菌的生存温度可达 70℃ 以上,因此,生物气形成阶段的深度可以从地表以下延伸到 2000m 深的范围。生物气运移机理的研究显得十分重要。