

煤型气地质 综合研究思路与方法

时华星 宋明水 徐春华 宋国奇 等编著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书系统总结了煤型气地质研究方法和勘探技术，主要介绍煤型气的分类、化学组成；煤层形成的堆积环境，沉积有机质相的类型及特征；煤系地层的地球物理特征及处理方法；煤型气产烃率模拟的基本方法；天然气成因的鉴别方法，最后介绍了煤型气的资源分类和计算方法等等。

本书可供从事煤型气地质勘探研究的人员及高等院校相关专业的师生使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

煤型气地质综合研究思路与方法/时华星等著.—北京：地质出版社，2004.6

ISBN 7-116-04118-4

. 煤 时 煤层-地下气化煤气-采矿地质学-研究 . P618.110.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 052346 号

MEIXINGQI DIZHI ZONGHE YANJIU SILU YU FANGFA

责任编辑：祁向雷 周乐耘

责任校对：郭慧兰

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) 82324577 (编辑室)

网 址：<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱：zbs@gph.com.cn

传 真：(010) 82310759

印 刷：北京中科印刷有限公司

开 本：787mm×1092mm¹/₁₆

印 张：15.25

字 数：371 千字

印 数：1—800 册

版 次：2004 年 6 月北京第一版·第一次印刷

定 价：40.00 元

ISBN 7-116-04118-4/P·2480

(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)

前 言

天然气的地质、地球化学研究表明，在世界上已探明的天然气储量中，相当大比例的天然气的形成与古生代以来的煤系地层密切相关，如西西伯利亚北部的特大型气田——乌连戈伊气田、荷兰的特大型气田——格罗宁根气田，前者与白垩系含煤岩系有关，后者的气源来自晚石炭世含煤地层。国内发现的长庆大气田、苏里格气田、东方 1—1 气田、东濮凹陷的文留气田和冀中凹陷的苏桥气田等也都与晚古生代以来的含煤地层有关。

现代煤成烃理论的发展可以追溯到 20 世纪 40 年代，德国学者首先提出煤系不仅能形成危害煤矿开采的瓦斯气，而且强调由煤系形成的气能够运移出来，并在储层中聚集形成常规气田，从而创立了煤成气地质理论。

我国从“六五”开始，对煤成气的研究和勘探给予了高度重视，经过“七五”及“八五”的科技攻关，总结并形成了系列煤成气地质研究方法和勘探技术。在煤型气和油型气理论的共同指导下，我国的天然气工业得到快速发展。

笔者多年从事煤型气的研究和勘探工作，工作中发现，目前煤型气研究成果较多，但均有不同的侧重点，缺少一部全面论述煤型气地质研究思路与方法的专著。于是萌发了对国内外的煤型气研究成果进行较为系统的总结的想法，并收集、整理和学习了很多的相关资料，也形成了一定的思路，但因理论水平和实践经验有限，迟迟未能下笔，在有关领导的鼓励和支持下，笔者终于在 2002 年初开始系统编写《煤型气地质综合研究思路与方法》一书，历时一年，完成了该书的编撰工作。

本书在吸收前人研究成果的基础上，结合笔者对煤型气研究的点滴认识，较为系统地总结了煤型气地质的基本理论和研究思路与方法。全书共分为十章：

第一章，简要介绍了煤型气在天然气资源中的重要性，重点介绍了煤型气的分类、煤型气研究的进展及其化学组成和特征。

第二章，介绍了煤层形成的堆积环境——泥炭沼泽的分类，形成煤层和煤系暗色泥岩的沉积环境及不同环境下形成的煤层的分布特点，重点介绍了潮湿气候条件下冲积扇和扇三角洲聚煤环境；简要论述了煤系地层的地震相、沉积有机相的类型及特征以及煤系等时地层格架的划分标志及不同体系域单元的煤层发育特点；最后介绍了含煤盆地的类型及煤系沉积的环境展布特点等。

第三章，介绍了煤系地层和煤层的追踪方法，包括煤层和煤系地层的地震反射特征、测井响应特征及电法勘探过程中的电性特征及处理方法等。

第四章，介绍了煤系烃源岩的分类、有机质的光学性质及鉴定方法、有机质生烃潜力评价以及二次生烃时的有机碳下限值等。

第五章，介绍了有机质堆积后的成煤作用类型、煤的热演化作用类型、影响因素及演化阶段的划分等；重点介绍了煤的二次演化作用及其迟滞效应。

第六章，介绍了煤型气产烃率模拟的基本方法及模拟条件的优选、不同显微组分和全

煤的产烃率、模拟产物及残余物的地球化学特点等；同时也简要介绍了利用计算法和岩石热解方法确定煤系烃源岩生气量的基本思路和方法，这两种方法主要应用于没有低成熟度煤样的地区，对于研究这类地区烃源岩的主生气期、计算煤型气资源量等具有重要意义。

第七章，介绍了天然气成因的鉴别方法，包括天然气组分组成、碳及氢同位素、苯、甲苯和甲基环己烷碳同位素、 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值等方法。

第八章，简要介绍了形成大—中型气田储层的沉积环境及孔、渗等物性特征，重点介绍了煤系储层的类型、发育特点及煤系地层中有机酸对成岩演化的影响等。

第九章，介绍了煤层气的基本地质特征，包括煤层气的赋存状态、煤层含气量的影响因素、含气量的测定方法以及煤层气地质评价选区的主要研究内容及标准。

第十章，分别介绍了煤成气和煤层气的资源量分类和计算方法，重点介绍了煤成气资源量计算过程中排烃系数的两种确定方法，这在资源评价的历史上是一个飞跃，使排聚系数的确定有了理论依据；另外还介绍了煤层连续性的研究方法，这些方法在煤层气勘探、开发及资源量计算过程中也是十分重要的。

考虑到煤型气生成之后，经过一次运移和二次运移到达圈闭，其成藏条件与油型气基本一致。因此，本书对煤成气的盖层、圈闭及保存条件没有进行论述，可以参考《天然气地质学》的有关章节。

参加本书撰写工作的作者依次为：前言、第一章由时华星、彭木高编写，第二章由解习农、徐春华编写，第三章由邹文勇、裴磊、宋维奇编写，第四章由宋明水、彭木高编写，第五章、第六章由解习农、王欣辉编写，第七章由孔凡顺、宋广达编写，第八章由宋国奇、徐春华编写，第九章由宋明水、徐春华编写，第十章由徐春华、程守田编写。全书由徐春华统稿，时华星、宋明水审定。

由于笔者水平有限，加之资料收集不全，在某些方面可能总结的不够全面，书中笔者的一些观点和认识也不一定完全正确，敬请有关专家和读者斧正。

作者

2004年2月

目 录

| | |
|-------------------------|--------|
| 第一章 天然气与煤型气 | (1) |
| 第一节 绪论 | (1) |
| 一、天然气在能源结构中的地位 | (1) |
| 二、煤型气在天然气资源中的重要性 | (2) |
| 第二节 煤型气研究现状 | (4) |
| 一、煤成气研究进展 | (4) |
| 二、煤层气研究进展 | (6) |
| 第三节 天然气及其类型 | (7) |
| 一、天然气的化学组成及物理性质 | (7) |
| 二、有机成因天然气类型 | (10) |
| 三、无机成因的天然气 | (14) |
| 四、天然气与石油性质的基本差别 | (14) |
| 第四节 煤型气的分类与化学特征 | (15) |
| 一、煤型气类型 | (15) |
| 二、煤型气的主要物理化学性质 | (16) |
| 第二章 煤及含煤岩系的沉积环境 | (19) |
| 第一节 成煤母质的堆积环境 | (19) |
| 一、沼泽与泥炭沼泽的概念及类型 | (19) |
| 二、泥炭沼泽的形成条件 | (22) |
| 三、从泥炭层到煤层的厚度缩减 | (23) |
| 四、成煤泥炭沼泽类型的重建 | (23) |
| 第二节 煤及煤系地层形成的沉积环境 | (24) |
| 一、冲积扇沉积与煤层的形成 | (24) |
| 二、扇三角洲沉积与煤层的形成 | (28) |
| 三、河流沉积与煤层的形成 | (36) |
| 四、三角洲沉积与煤层的形成 | (39) |
| 五、滨岸沉积与煤层的形成 | (44) |
| 第三节 含煤岩系的地震地层学研究 | (48) |
| 一、地震反射特征的地质意义 | (48) |
| 二、煤系地层的主要地震相类型 | (49) |
| 第四节 含煤岩系的沉积有机相研究 | (52) |
| 一、有机相的概念及划分指标 | (52) |
| 二、含煤岩系的沉积有机相 | (53) |

| | |
|--------------------------------|------|
| 三、煤的沉积有机相与煤岩类型 | (54) |
| 第五节 煤系地层的等时地层格架 | (55) |
| 一、煤系地层的层序界面 | (56) |
| 二、基准面变化与煤岩类型 | (58) |
| 第六节 不同类型盆地的聚煤模式 | (58) |
| 一、克拉通型含煤盆地的聚煤模式 | (58) |
| 二、大陆边缘型含煤盆地的聚煤模式 | (59) |
| 三、陆内拗陷型含煤盆地的聚煤模式 | (60) |
| 四、裂谷型含煤盆地的聚煤模式 | (61) |
| 五、四种含煤盆地主要沉积特征的对比 | (62) |
| 第三章 煤系地层的识别与追踪 | (64) |
| 第一节 煤系地层的地震反射特征与标定 | (64) |
| 一、煤层反射波的形成机理 | (64) |
| 二、煤系地层在地震剖面上的特征 | (65) |
| 第二节 煤层的测井响应 | (66) |
| 一、煤的视电阻率测井 | (66) |
| 二、声波测井 | (68) |
| 三、自然伽马测井 | (68) |
| 四、伽马 - 伽马测井 | (69) |
| 五、煤层测井解释实例 | (69) |
| 第三节 复杂地质体中煤系地层的电法识别 | (70) |
| 一、煤系地层的地球物理属性 (电阻率) | (70) |
| 二、电法勘探 (MT 或 CEMP) 的资料处理 | (71) |
| 三、煤系地层提取的方法和技术 | (78) |
| 第四章 煤系地层中的有机质 | (83) |
| 第一节 煤系烃源岩及有机质赋存方式 | (83) |
| 一、烃源岩及煤系烃源岩的概念 | (83) |
| 二、沉积有机质赋存方式 | (83) |
| 三、煤层的划分标准及成因分类 | (84) |
| 第二节 有机质的光学和化学分类 | (85) |
| 一、有机质的光学分类 | (85) |
| 二、有机质的化学分类 | (87) |
| 第三节 煤及煤系泥岩的岩石学特征及鉴定 | (90) |
| 一、煤岩宏观组成 | (90) |
| 二、宏观煤岩类型 | (91) |
| 第四节 煤系有机质的显微组分及其特征 | (91) |
| 一、煤岩显微组分划分类型 | (92) |
| 二、富氢与贫氢显微组分的组成及特征 | (96) |
| 第五节 煤系烃源岩干酪根类型及特征 | (97) |

| | |
|-------------------------------|-------|
| 一、煤系烃源岩干酪根特征及分类依据 | (97) |
| 二、干酪根类型的划分 | (99) |
| 第六节 煤系有机质的生烃潜力评价 | (107) |
| 一、有机质丰度特征 | (108) |
| 二、煤系烃源岩的评价标准 | (111) |
| 第五章 煤系地层的热演化与二次生烃 | (114) |
| 第一节 成煤原始有机质与成煤作用 | (114) |
| 一、成煤原始有机质 | (114) |
| 二、成煤作用类型及特征 | (115) |
| 三、煤化作用过程中煤岩组成及结构的演化特点 | (117) |
| 第二节 煤系烃源岩的热演化作用类型及其影响因素 | (118) |
| 一、煤系烃源岩的热演化作用类型 | (118) |
| 二、含煤岩系深成热演化作用的影响因素 | (122) |
| 第三节 有机质成烃演化阶段及评价方法 | (124) |
| 一、有机质成烃演化阶段划分 | (124) |
| 二、烃源岩成熟度评价方法 | (125) |
| 第四节 煤系地层的二次生烃与迟滞效应 | (128) |
| 一、煤系地层的埋藏类型 | (129) |
| 二、二次生烃的迟滞效应 | (130) |
| 第六章 煤型气的生成与模拟 | (137) |
| 第一节 有机质转化的物理化学作用 | (137) |
| 一、生物化学作用 | (137) |
| 二、热降解作用 | (139) |
| 三、热裂解作用 | (139) |
| 第二节 煤型气模拟试验的产率及其影响因素 | (140) |
| 一、试验条件与试验结果对比 | (140) |
| 二、煤的全岩模拟试验与产气率 | (143) |
| 三、不同显微组分的模拟试验与产气率 | (143) |
| 四、煤型气产率的影响因素 | (145) |
| 第三节 煤系烃源岩热模拟的产物及其特征 | (147) |
| 一、不同演化阶段模拟的产物的产率变化特征 | (147) |
| 二、不同演化阶段模拟产物同位素的变化规律 | (148) |
| 三、模拟过程中残余物元素组成的变化 | (149) |
| 第四节 算法确定煤系烃源岩的生气量 | (149) |
| 一、利用煤的挥发分含量计算烃源岩甲烷生气量 | (150) |
| 二、煤岩显微组分析法计算源岩生气量 | (150) |
| 第七章 煤成气的鉴别 | (152) |
| 第一节 煤成气的气体组分 | (152) |
| 一、煤成气中烃类气体的组分特征 | (152) |

| | |
|---|-------|
| 二、煤成气中非烃类气体的组成特点 | (154) |
| 第二节 煤成气的稳定同位素特征 | (156) |
| 一、煤成气的稳定同位素基本特征 | (156) |
| 二、稳定碳同位素在煤成气鉴别中的应用 | (158) |
| 三、利用 ⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar 比值鉴别煤成气 | (171) |
| 四、利用 C ₇ 系统三角图鉴别煤成气 | (172) |
| 第八章 煤系储层基本特征及评价 | (174) |
| 第一节 储层类型及特征 | (174) |
| 一、沉积环境与储层的岩石类型 | (174) |
| 二、大—中型气田的储层物性参数特征 | (176) |
| 第二节 煤系储层孔隙类型及次生孔隙的形成机理 | (178) |
| 一、孔隙类型及特征 | (178) |
| 二、煤系储层次生孔隙的形成机理 | (179) |
| 三、煤系有机质对储层发育的影响 | (180) |
| 第九章 煤层气地质特征 | (182) |
| 第一节 煤层气的赋存状态 | (182) |
| 一、吸附气及其含量的影响因素 | (182) |
| 二、游离气及其含量的影响因素 | (184) |
| 三、水溶气及其含量的影响因素 | (189) |
| 第二节 煤层气含量的控制因素 | (190) |
| 一、煤岩类型和煤岩组分 | (191) |
| 二、煤的变质程度 | (191) |
| 三、煤层承受的压力 | (192) |
| 四、煤层的埋深和煤阶 | (193) |
| 五、煤层的顶、底板岩性 | (195) |
| 六、火山活动对煤层含气量的影响 | (195) |
| 七、含煤岩系的地质年代 | (195) |
| 八、煤层所处的构造位置 | (195) |
| 九、地下水的活动 | (196) |
| 第三节 煤层含气量的测定方法 | (196) |
| 一、解吸法 | (196) |
| 二、吸附等温线法 | (200) |
| 三、图解法 | (201) |
| 四、估算法 | (202) |
| 五、测井曲线推测法 | (202) |
| 第四节 煤层气地质选区评价 | (203) |
| 一、煤系地层沉积环境 | (203) |
| 二、构造地质条件 | (204) |
| 三、煤层的孔隙性 | (205) |

| | |
|--------------------------|-------|
| 四、煤层的渗透性..... | (206) |
| 五、火成岩发育特征研究..... | (208) |
| 六、煤层气的含气性与含气饱和度..... | (208) |
| 七、构造应力场的研究..... | (209) |
| 八、煤层气勘探选区评价..... | (209) |
| 第十章 煤型气资源量的计算..... | (211) |
| 第一节 煤成气资源量的分类与计算..... | (211) |
| 一、煤成气资源分类和分级..... | (211) |
| 二、盆地模拟法煤成气资源量计算..... | (212) |
| 第二节 煤层气资源量和储量的划分与计算..... | (217) |
| 一、煤层气资源量和储量的划分..... | (217) |
| 二、煤层气的储量计算方法..... | (218) |
| 三、煤层气资源量计算参数..... | (218) |
| 后记..... | (224) |
| 参考文献..... | (225) |

第一章 天然气与煤型气

第一节 绪 论

天然气是指一切天然生成的气体，根据成因可分为有机成因气、无机成因气和混合成因气。根据生成天然气的母质类型，可以把有机成因天然气划分为油型气和煤型气两种类型。油型气是指沉积地层中的腐泥型有机质在热演化作用过程中伴随石油的形成过程而形成的天然气；煤型气是指煤系地层中腐殖型有机质在煤化作用过程中形成的天然气，包括煤层气（coal-seam gas）和煤成气（coal-derived gas）。煤层气是指煤化作用过程中形成的、目前仍然吸附在地下煤层中的天然气；煤成气是指煤化作用过程中形成的、经过初次和二次运移、聚集成藏后，目前仍然储存在地下圈闭中的天然气。

一、天然气在能源结构中的地位

煤炭、石油、天然气和核能是世界能源结构中的四大支柱，在当今这四大能源支柱中，石油占 38% ~ 40%，煤炭占 25% ~ 30%，天然气占 20% ~ 22%，核能占 8% ~ 17%。相比之下，作为优质、洁净的工业燃料、民用燃料以及化工原料的天然气资源的探明程度和综合利用程度仍然很低。

从 1960 年起，天然气储量和产量呈逐年快速增长的趋势，其年增长率超过了石油资源，特别是近 30 年得到了迅猛发展。从发展趋势来看（Marchetti C, 1979），21 世纪前 25 年的天然气资源将有更大的增长，在能源结构中将有更重要的地位（图 1 1），并将逐渐取代石油而成为头等重要的能源，这种发展趋势已成为国内外许多经济专家与石油地质学家的共识。因此，从 20 世纪 80 年代起，各国普遍加强了天然气的勘探与开发。

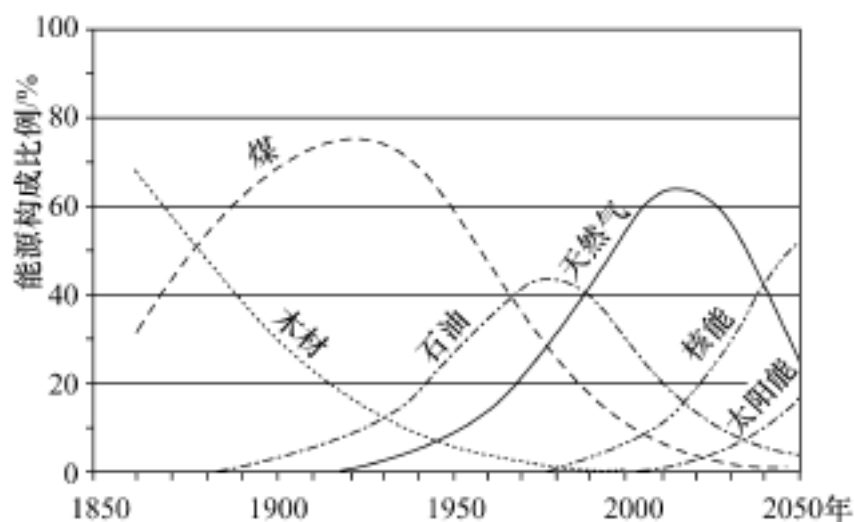


图 1 1 世界主要能源增长趋势预测图

（据 Marchetti C, 1979）

中国作为世界上最大的发展中国家，在四大能源支柱中，煤炭约占 75%，天然气仅占 2%，天然气的探明程度和综合利用水平与世界先进水平相比还有相当大的差距，正因为如此，其发展潜力巨大。1994 年，中国石油天然气总公司和中国海洋石油总公司根据当时的勘探程度和研究状况，预测我国常规天然气资源量为 $38 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，不包括致密砂岩气、煤层气、水溶气和第四系浅层天然气等非常规天然气资源量，但根据有关专家分析，这部分天然气的总量可能超过常规天然气的资源量。近十余年来，我国的天然气勘探得到了迅猛发展，成为天然气工业发展史上取得成效最好的时期。“陕气入京”和“西气东输”两大天然气系统工程启动，从另一个侧面证明了天然气在我国国民经济发展过程中的地位已日益重要。

二、煤型气在天然气资源中的重要性

近 40 年来，天然气资源的快速增长，主要是煤成气田的发现与开发的结果。煤成气作为天然气的一种重要组成类型，具有重要的地位和广阔的勘探前景。国内外近十几年来对煤成气的勘探和研究表明，大部分天然气来自于煤系地层，而特大型—大型天然气田也主要与煤系地层有关。在世界已探明的天然气储量中，相当大比例的天然气的形成与古生代以来的煤系地层密切相关，如前苏联西西伯利亚北部的特大型气田——乌连戈伊气田、荷兰的特大型气田——格罗宁根气田，前者与白垩系含煤岩系有关，后者的气源主要来自晚石炭世含煤地层。国内发现的鄂尔多斯盆地长庆大气田、苏里格气田、东濮凹陷的文留气田、塔里木盆地克拉 2 气田、莺琼盆地崖 13-1 气田和东方 1-1 气田等也与晚古生代以来的含煤地层有关（关德师、张文正，1986；许化政，1987；夏新宇等，2002）。

据粗略估计，在世界上已探明的天然气藏中，煤成气储量所占的比例超过 40% ~ 50%（有的专家估计为 70% ~ 80%）。通过对世界上天然气储量大于 $10 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 的 26 个特大型气田的天然气成因研究，发现其中有 16 个是煤成气田，占特大型气田总数的 61.5%（哈尔布特，1970）。这 16 个煤成气田的探明储量占 26 个特大型气田总储量的 72.2%。根据储量大小排列，世界上前 5 名的特大型气田依次为乌连戈伊气田、尤比列伊气田、格罗宁根气田、北极气田和扎波里昂气田，以上气田均为煤成气田。

显而易见，全球发育众多的含煤盆地、纵向广布的含煤地层和丰富的煤炭资源为煤成气的生成和聚集提供了雄厚的物质基础。由此表明：世界含能源盆地中的煤成气资源十分丰富。因而，对含煤盆地成藏条件的研究也越来越受到石油勘探家们的重视。

近 40 年来，由于对煤成气田的勘探与开发，使一些国家的天然气产量不断增加，并逐步改善了能源结构。如苏联 1955 年天然气产量仅 $90 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，后因勘探开发了西西伯利亚等 7 个含煤成气盆地，使得天然气产量自 1960 年的 $453 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增至 1980 年的 $4350 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，在短短 25 年间，使得年产量增长了近 48 倍，其天然气在能源结中的比例迅速增长。由于格罗宁根煤成气田的勘探与开发，荷兰由能源进口国一跃而成为能源输出国。

在 20 世纪 80 年代以前，我国仅以油型气地质理论为指导，还没有把煤型气作为主要的能源进行勘探和研究，导致天然气勘探避开了具有良好含气远景的含煤盆地和含煤地层。因此，在天然气勘探领域方面，中国共发现了 6 个大—中型气田（即可采储量大于 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，戴金星等，1996），探明天然气地质储量仅为 $1475.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，其中大—中型煤成气田 2 个，探明天然气储量仅占探明总储量的 9%，特别是没有发现高产大气田。但

从“六五”天然气科技攻关开始，由于应用油型气和煤成气“两元论”指导天然气的勘探，使我国大—中型煤成气田的数量和储量在天然气总储量中的比例日益提高，从“六五”至“八五”的15年时间里，累计发现大—中型气田27个，探明天然气地质储量 $8622 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。这一时期发现大—中型气田的数量和探明总储量分别是“六五”前的4.5倍和5.8倍。“六五”、“七五”和“八五”期间发现大—中型气田逐次增加，发现大—中型气田的数量分别为2个、10个和15个；同时所发现大—中型气田的平均探明储量也逐次增加，分别为 $221 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $248 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $380 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

截至1995年底，我国累计发现大—中型天然气田中属于煤成气田的有20个，占大—中型气田总数的55%，煤成气探明储量占全国气层气总储量的40%。从1996年开始至2002年底的6年时间里，又新发现大—中型气田15个，其中有12个属于煤成气田，占新发现大—中型气田总数的81%；在7个探明储量超过 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的大气田中，储量位居前5位的都是煤成气田，其中的克拉2气田和苏里格气田均属于储量超过 $2000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的特大型气田。目前，伴随着我国探明天然气储量的大幅度增加，煤成气储量已达到天然气总储量的64%，使我国天然气储量结构渐趋合理（表11，12）。

表11 我国已发现大—中型煤成气田统计表（资料截至2002年底）

| 盆地 | 气田名称 | 规模 | 探明时间 | 主力产层 | 储层类型 | 主要气源 |
|------|--------|----|------|--------------------------------|---------|-------------------|
| 四川 | 中坝 | 中 | 1972 | T ₃ 、T ₂ | 砂岩、碳酸盐岩 | T ₁ 煤系 |
| | 新场 | 大 | 1994 | J | 砂岩 | |
| | 平落坝 | 中 | 1997 | T ₃ 、J | | |
| | 白马庙 | 中 | 2000 | J | 碳酸盐岩 | P ₂ 煤系 |
| | 磨西 | 大 | 1987 | T ₂ | | |
| | 渡口河 | 中 | 1997 | T ₁ | | |
| 鄂尔多斯 | 长庆 | 大 | 1992 | P、O | 砂岩、碳酸盐岩 | C—P煤系、O灰岩 |
| | 长东 | 大 | 1999 | P | 砂岩 | C—P煤系 |
| | 大牛地 | 中 | 2000 | P | 砂岩 | |
| | 柯克亚 | 中 | 1985 | N | | |
| 塔里木 | 英买7 | 中 | 1993 | E | | |
| | 牙哈 | 大 | 1994 | E | 砂岩 | J煤系 |
| | 羊塔克 | 中 | 1995 | E | | |
| | 吐孜洛克 | 中 | 2000 | N | | |
| 吐哈 | 克拉2 | 大 | 2000 | K | | |
| 吐哈 | 丘东 | 中 | 1992 | J | 砂岩 | J煤系 |
| 准噶尔 | 呼图壁 | 中 | 1999 | J | 砂岩 | J煤系 |
| 柴达木 | 台南 | 大 | 1989 | | 砂岩 | Q亚煤系 |
| | 涩北二号 | 大 | 1990 | Q | | (生物成因煤成气) |
| | 涩北一号 | 大 | 1991 | | | |
| 松辽 | 南八仙 | 中 | 1998 | N、E | 砂岩 | J煤系 |
| | 汪家屯 | 中 | 1987 | K | 砂岩 | K煤系 |
| 渤海湾 | 文留 | 中 | 1976 | E | 砂岩 | |
| | 苏桥 | 中 | 1983 | O、P | 砂岩、碳酸盐岩 | C—P煤系 |
| 莺琼 | 崖13-1 | 大 | 1990 | E | | |
| | 乐东15-1 | 中 | 1995 | | 砂岩 | E煤系 |
| | 东方1-1 | 大 | 1995 | N | | |
| | 乐东22-1 | 大 | 1997 | | | |
| 东海 | 平湖 | 中 | 1990 | | | |
| | 宝云亭 | 中 | 1995 | E | 砂岩 | E煤系 |
| | 春晓 | 中 | 1998 | | | |
| | 天外天 | 中 | 2000 | | | |

表 1 2 我国不同时期大中型煤成气田和煤成气储量对比统计表

| 项 目 | 1978 年底 | 1991 年底 | 1995 年底 | 2002 年底 |
|------------------|---------|---------|---------|---------|
| 发现大中型煤成气田累计个数 | 2 | 10 | 20 | 32 |
| 大中型煤成气田数占大中型气田比例 | 33% | 50% | 66.7% | 80% |
| 煤成气储量占全国气层气储量比例 | 9% | 36% | 40% | 64% |

我国煤成气储量迅速增长的一个重要原因就在于煤成气地质理论的形成和发展，这一理论大大拓宽了我国天然气的勘探领域。

国外煤层气的研究和开发始于 20 世纪 50 年代，在 80 年代进入高峰阶段，其中尤以美国对煤层气的开发和利用较为深入。美国在 20 世纪 70 年代就对煤层气的开采作了大规模的规划和部署，并取得了大量的研究成果和显著的经济效益。迄今为止，世界上已经有 29 个国家和地区开展了煤层气的勘探、开发和研究活动，占世界产煤国的 39%。我国煤层气的地质研究也由 20 世纪 90 年代以前的煤矿瓦斯排放逐渐转变为有计划、有步骤地进行选区、研究和勘探，截至 2002 年底，我国已经在 30 余个实验区开展煤层气的勘探，共钻井 214 口，在山西晋城和大宁—吉县、山西吴堡、江西丰城、湖南冷水滩、河南焦作、河北大城、辽宁欧利坨子等地区进行了煤层气的开发试验，在河东煤田的柳林地区、沁水盆地的晋城和潘庄地区、陕西吴堡、河北大城、安徽淮南和淮北等试验区取得了突破，并发现了我国第一个大型煤层气田——沁水煤层气大气田（蔚远江等，2001）。但是，与我国丰富的煤炭资源相比，煤层气的勘探和开发仍然处于相对落后的地位。目前，我国在煤矿开采过程中年排放的甲烷量约为 $194 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，约占世界采煤排放甲烷总量的三分之一，造成了巨大的能源浪费和环境污染。因此，从节约能源、保护环境、保证煤矿安全生产和稳定高产等方面，迫切要求我国的煤层气工业在不远的将来有一个大的发展。

第二节 煤型气研究现状

20 世纪 60 年代以前，天然气工业发展缓慢，究其原因主要是由于天然气与石油在成因和分布上密切相关，基于这种地质现象，在相当长的时期内，把天然气作为成油过程中的伴生物；同样，将天然气藏的发现亦作为寻找石油资源的副产品。

天然气勘探的加强和深入研究始于 20 世纪 60 年代以后，1959 年在荷兰北部的格罗宁根发现特大型煤成气田，这一发现推动了世界天然气工业的发展，也带动了煤成气的勘探和研究。此后，在前苏联及世界各地相继发现了与煤系地层有关的煤成气田（藏），从而出现了天然气储量和产量持续增长的良好局面。同时，受这些煤成气田（藏）发现的启迪，开始把煤型气的研究、勘探和开发作为天然气工业的新领域。

一、煤成气研究进展

20 世纪 70 年代末，我国开始系统研究煤成烃，其标志是戴金星（1979）发表的《成煤作用中形成的天然气与石油》。“六五”期间，煤成气的勘探研究在我国得到高度重视，并列为国家重点科技攻关项目之一，标志着我国煤成气的勘探与开发工作全面展开。经过“六五”、“七五”及“八五”的科技攻关，总结并形成了系列煤成气地质研究方法和勘探技术，相继出版了《石油与天然气地质文集——中国煤成气研究》、《煤成烃地球化学》等

专著和大量的研究论文，全面论证了煤系烃源岩的评价及演化、生烃模拟技术及产气率、煤成气的聚集及成藏规律、盆地煤成气勘探前景等，使我国长期以来仅以油型气理论为指导发展成为油型气和煤型气理论并存来指导天然气勘探，即由一元论转变为二元论，并形成了6种新技术。

第一，煤系烃源岩评价技术。在煤成气研究的早期，对煤系烃源岩的评价主要是沿用陆相烃源岩的评价标准，将有机碳含量为0.5%以上的岩石定义为烃源岩，随着对煤系烃源岩研究的不断深入，发现煤系地层是一套高有机碳、低转化率的烃源岩，于是提出有机碳对于煤层生烃能力的评价没有实际意义的认识（程克明等，1996；徐春华，2000），并提出根据热演化程度及H/C比值作为主要参数之一，同时将代表煤岩的含烃量（ S_1 ）和生烃潜力（ S_2 ）及其之和的（ $S_1 + S_2$ ）作为主要的评价指标来评价煤系烃源岩的生烃能力（刘德汉，1987；傅家谟等，1990；秦建中等，2000）。此外，何生等（1992）、陈建平（1998）还分别根据不同地区的实际，从有机碳含量的角度对煤、炭质泥岩和暗色泥岩进行了定义。

第二，煤系烃源岩生烃模拟评价技术。该项技术包括烃源岩快速模拟评价技术（王新洲等，1996）、小样催化模拟技术、亚显微组分分离及模拟技术等。当人们认识到这种技术与地下地质条件存在一定差距时，又发展完善了加水加催化剂模拟技术、开放与封闭系统模拟技术等等。利用这些技术，刘宝泉等（1984）和高瑞祺等（1984）分析了孢粉和现代松科花粉的产烃率；何中恒（1983）、王涵云（1983）、刘玉英（1986）、贾荣芬等（1987）、傅家谟等（1987）、关德师等（1987）、张文正等（1987）、沈平等（1987）、许化政（1987）及程克明等（1989）对我国石炭—第三系的煤及显微组分进行了热模拟试验。通过大量的模拟试验，建立了全煤及不同显微组分的产烃率曲线和生烃演化模式，并系统研究了模拟产物和残渣的地球化学特征。

第三，同位素气源岩判识技术。气源对比是油气有机地球化学研究的重要组成部分，它对于确定有效供烃单元具有重要的地质意义。同位素地球化学在天然气源对比确定生气母质类型方面发挥了重要作用，并建立了一系列判识图版和方程。张士亚等（1988）建立了 $^{13}\text{C}_1$ — $^{13}\text{C}_2$ 天然气类型图版，郝石生教授建立了依据 $^{13}\text{C}_1$ — $^{13}\text{C}_2$ — $^{13}\text{C}_3$ 鉴别煤成气的图版，刚文哲等（1997）在研究塔里木盆地天然气碳同位素特征时利用（ $^{13}\text{C}_2$ — $^{13}\text{C}_1$ ）的差值和 $^{13}\text{C}_1$ 的关系判别煤成气。另外，Martin、W J Stahl、G E Claypool、戴金星等、郝石生等（1984）建立了不同母质类型 $^{13}\text{C}_1$ 与 R_o 之间的关系方程，用以确定母质类型。此外，又发展了利用 ^{40}Ar — ^{36}Ar 比值以及苯、甲苯和甲基环己烷碳同位素鉴别煤成气的新方法（李剑等，2000）。

第四，含煤岩系沉积有机相分析技术。将沉积有机相的研究引入含煤岩系，国内最早报道的是陈安宁等（1987）的《鄂尔多斯地区上古生界煤系沉积—有机相及其生烃能力》；此后郝芳等（1994）、王兆云等（1998）、秦建中等（2000）对不同地区含煤岩系的沉积有机相进行了研究，并划分出有机相类型。该项技术在含煤岩系中的应用还处于起步阶段，但由于该技术在烃源岩评价中的重要地位，若能够与层序地层学理论相结合，以体系域为单元研究有机相的构成，将是有机相研究的发展趋势，特别是在湖相含煤盆地中，该技术将得到迅速发展和广泛的应用。

第五，煤层及煤系地层识别与追踪技术。煤层及煤系地层的识别与追踪技术包括煤层

的测井识别、煤系地层的地震识别和电法识别。黄智辉等（1986）编著了《煤田地球物理测井》一书，系统介绍了煤层的测井响应特征；黄永玲等（1995）、赵澄林等（1997）研究了煤系地层在地震剖面上的识别方法；吕希学等（2002）利用煤系地层的低电阻特征研究了合肥盆地石炭—二叠系的分布；林玉祥等（2002）还利用振幅信息和小波分析技术等来进行煤系地层厚度的计算。随着非地震物化探技术的快速发展，重磁电震联合反演技术将逐步用于复杂构造带含煤地层的识别，这项技术将为煤型气的研究提供更加准确、可信的地质依据。

第六，盆地模拟资源量评价技术。煤成气资源量的计算，在20世纪90年代主要采用蒙特卡罗法、全煤煤气发生率法、物质平衡法等（李明潮等，1990；张福礼等，1994）。随着盆地模拟技术在常规油气资源评价中的成熟应用，该项技术已引入到煤成气的资源量计算，但目前还没有一套针对煤成气资源量评价的模拟软件，各单位在进行煤成气资源量评价时一般将原有软件进行改进，增加一些排烃模型，使之更适合于煤系烃源岩多种源岩类型、多期次生排烃的特点（李春山等，1997；林玉祥，2002）。

二、煤层气研究进展

我国从1952年起在抚顺龙凤煤矿开始煤矿瓦斯的抽放，其目的是为了煤矿安全生产。从广义上来讲，我国是世界上煤层气开发比较早的国家之一。经过40多年，积累了丰富的煤层气研究和瓦斯抽放的理论和经验。1990年，黄景诚出版了《煤层甲烷开采概述》一书；1991年，李明潮、张新民等分别出版了关于我国煤成气及煤层气的研究专著，涉及了煤层气评价的有关内容；但直到20世纪90年代的中期才开始煤层气的研究和勘探选区，相继出版了《煤层气勘探与开发》、《煤层气开发利用手册》等专著，开始涉及煤层气的赋存特征、煤层气含量测定及计算方法、勘探开发技术等，归纳起来包括3个方面的技术：

1. 煤层含气量测试分析技术

杨申镛等（1994）、李明潮等（1996）、秦勇（1996）、钱凯等（1997）编写了关于煤层气勘探及煤层气含量的测试技术、开发方案设计等内容的专著，详细介绍了煤层含气量与煤层埋深、煤阶、煤岩显微组分等的关系。原新星石油公司华北石油局和中石油勘探开发研究院廊坊分院等单位通过引进、吸收国外的先进技术和设备，结合自行改造和研制，建立了煤层含气量测定实验室，形成了一套煤层含气量、含气饱和度测定等实验技术，为国内近年来的煤层气选区、勘探和开发奠定了实验条件。

2. 煤层气勘探选区评价技术

根据国外煤层气勘探研究的成功经验：煤层单层厚度1~5m，总厚度10~30m，埋深一般小于1500m，甲烷含量较高（一般大于 $10\text{m}^3/\text{t}$ ），渗透率为 $2 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，并且具有一定的面积和适宜的埋藏深度，即可形成煤层气田。针对我国含煤地层的实际情况，优选确定了适合我国实际的煤层气勘探选区评价参数，包括煤层埋深、煤的变质程度、煤层厚度、含气量、渗透率、构造地质条件、煤层压力、顶底板岩性、火山活动、水文地质条件、资源量、经济条件等（赵庆波等，1999）。以这些评价参数为依据，在全国范围内优选了山西沁水、陕西柳林、河北大城、安徽淮南等多个煤层气勘探试验区，并在沁水盆地发现了我国第一个大型煤层气田。

通过总结和完善的，明确指出制约煤层气勘探选区的关键并不是煤级，而是煤层的渗透率和含气饱和度，突破了煤层气勘探选区过程中煤级的局限（王生维等，2002），形成了具有我国特色的煤层气勘探选区评价技术。

3. 煤储层物性研究及评价技术

对于煤储层的研究，国外以美国为代表，已经形成一套较为成熟的方法和技术。参照国外煤储层研究理论和方法，国内强调煤储层宏观与微观特征相结合进行研究，利用煤储层露头详细解剖与钻孔资料相结合的方法，采用煤层气地质学与储层工程相结合、静态与动态相结合的研究思路，来描述煤储层的基本特征。建立了煤储层物性室内试验测试技术，研制开发了进行煤储层标定和评价的测井技术系列及相应的处理软件，引进了美国成熟的煤储层模拟软件。这些方法和技术的引进、借鉴和研制开发，大大推动了我国煤储层评价技术的发展，逐步形成了适合我国煤系地层特征的煤储层预测与描述技术。

在煤型气理论的指导下，我国的煤型气研究得到迅猛发展，特别是煤成气的勘探成果显著，大中型煤成气田的发现数量和煤成气的储量在整个天然气储量中的地位日益提高，并已成为我国天然气勘探的重要领域。

第三节 天然气及其类型

广义地讲，天然气是指一切天然生成的气体，根据成因可分为有机成因气、无机成因气和混合成因气；按气体组成划分为烃类气体和非烃类气体。天然气以各种气体的混合物形式存在于地下地质体中。

一、天然气的化学组成及物理性质

1. 化学组成

天然气藏中可燃气体的元素组成以碳、氢为主，碳一般占 65% ~ 80%，氢占 12% ~ 20%，另外还有少量的氮、氧及其他微量元素。

可燃天然气化学组成主要是烃类气体，其中以甲烷为主，其次为重烃。非烃类气体常见的有氮气、二氧化碳、硫化氢、氢气及微量的惰性气体（表 1 3）。

表 1 3 世界主要天然气田天然气主要成分统计表

| 油田或气田 | 产气层位 | 气体成分（体积分数/ %） | | | | | |
|-----------|--------------------------------|-----------------|-------------|-----------------|----------------|------------------|----------|
| | | CH ₄ | 重烃 | CO ₂ | N ₂ | H ₂ S | 其他 |
| 西西伯利亚气田 | K | 97.8 ~ 99.01 | 痕量 | 0.1 ~ 1.69 | 0.45 ~ 1.69 | 0 ~ 0.004 | 0 ~ 0.07 |
| 罗马什金油田 | D | 40.0 | 49.9 | 0.1 ~ 1.0 | 10.0 ~ 2.4 | 1.3 | |
| 奥伦堡凝析气田 | P ₁ -C ₃ | 81.5 | 5 ~ 10 | 3.2 | 3.2 | 4.5 | |
| 阿塞拜疆凝析气藏 | N | 91.3 ~ 97.93 | 1.58 ~ 8.66 | 0 ~ 0.5 | | | |
| 美国沙德利油田 | C ₁ | 65.6 | 31.00 | 0.90 | 21.0 | | 0.01 |
| 美国霍戈登气田 | P | 74.3 | 11.4 | | 14.0 | | 0.25 |
| 澳大利亚图拉奇气田 | P ₁ | 71.1 | 16.5 | 11.8 | 0.6 | | |
| 库珀盆地大湖气田 | P ₂ | 78.8 | 4.6 | 16.3 | 0.3 | | |

根据世界上不同时代、不同构造单元的 2000 个气藏、15000 个分析数据统计 (雅科琴尼, 1976), 绝大多数气藏的成分以烃类为主 (图 1 2)。烃类气体含量高于 80% 的占气藏总数的 85% 以上; 按储量统计, 90% 的天然气储存于烃含量大于 90% 的气藏中。氮气为主要成分的仅占百分之几, 其中氮气含量高于 90% 的气藏不到气藏总数的 1%。二氧化碳或硫化氢为主要成分的气藏为数甚少, 远远低于 1%。由此可见, 世界上主要油气区或油气田的天然气都是以烃类为主, 并且绝大多数烃类含量在 80% 以上, 最高达 99%, 仅有少数气田的烃类含量低于 80%。

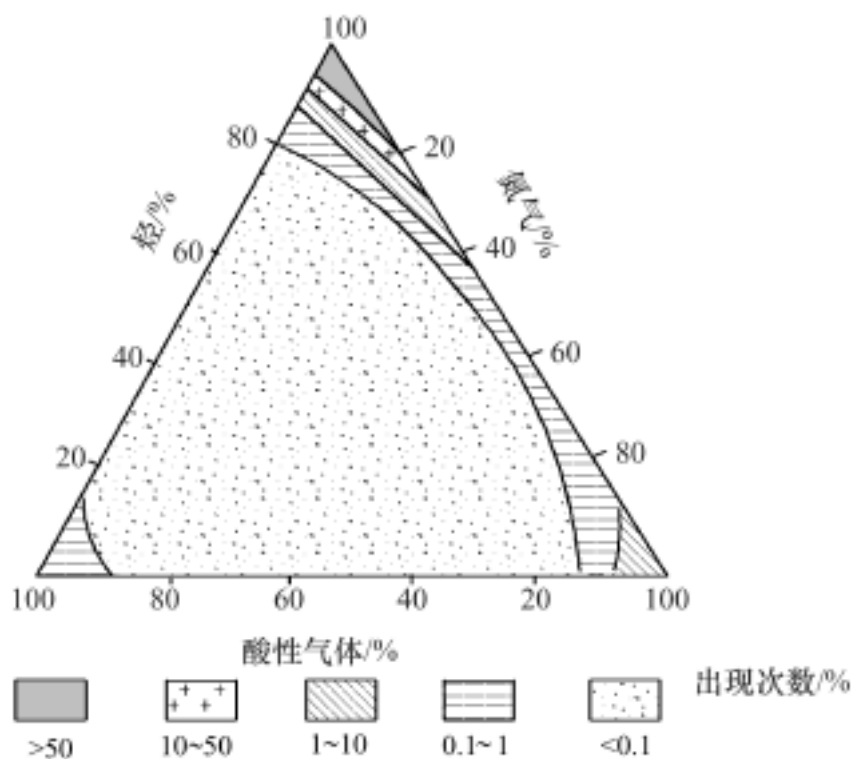


图 1 2 世界主要气田成分统计分布图
(据雅科琴尼, 1976)

在某些以烃类为主的天然气藏中, 非烃类气体含量较高。如前苏联什卡普夫气藏, 氮气含量高达 47%; 而格罗宁根气田、哈令根气田、霍戈登气田和罗马什金等气田的天然气中, 氮气含量都大于 10%。有的气田二氧化碳或硫化氢含量亦较高。

以非烃类气体为主的气藏为数较少, 如美国科罗拉多的维尔登气田, 二氧化碳含量高达 92%; 我国广东三水盆地沙石圩背斜下第三系中发现高纯度二氧化碳气藏, 二氧化碳含量高达 99.53%; 临清坳陷梁古 1 井奥陶系气藏二氧化碳含量高达 99.58%; 苏北盆地黄桥气田, 二氧化碳含量达 93% 以上。加拿大阿尔伯达潘塞河泥盆系气藏中硫化氢含量达 88%; 美国得克萨斯西部陆罗克气田的二叠系气藏中, 氮气含量为 84% ~ 86%; 我国鄂尔多斯盆地东部府谷地区的 ZK6802 孔, 氮气含量高达 99.4%; 塔里木盆地塔中 10 井石炭系氮气含量为 90.94% ~ 94.25%, 轮南 12 井奥陶系氮气含量为 96.63%。

天然气藏中的一些惰性气体, 如氦气、氙气、氡气、氩气、氪气等在沉积圈中不能单独形成气藏, 大多溶于油、水或与烃气共存。在浓度较高、储量较大时, 可作为特种气藏进行开发。

2. 物理性质

在常温常压下, 天然气以气态混合物的形式存在, 具有无色、可燃, 并有硫化氢气味, 其重要的物理性质有以下几点: