

中国煤成大中型气田 地质基础和主控因素

戴金星 钟宁宁 刘德汉 等著
夏新宇 杨建业 汤达楨

石油工业出版社

中国煤成大中型气田 地质基础和主控因素

戴金星 钟宁宁 刘德汉 等著
夏新宇 杨建业 汤达祯

石油工业出版社

YS12/4502

内 容 提 要

本书是在国家“九五”重点科技攻关成果的基础上编写而成的。书中分析了我国煤成大中型气田天然气组分和同位素特征,通过模拟实验研究了烟煤显微组分的成烃特点,在此基础上对煤系的倾气倾油性,煤成大中型气田形成的地质条件等进行了综合研究。并指出了今后的有利勘探方向。

本书可供从事天然气勘探的地质科技工作者使用,也可作为大专院校相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

中国煤成大中型气田地质基础和主控因素/戴金星等著.
北京:石油工业出版社,2000.12

ISBN 7-5021-3237-6

I. 中…

II. 戴…

III. 地下气化煤气-石油天然气地质-研究-中国

IV. P618.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 79283 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

北京施奈德自动化录入排版中心排版

北京密云华都印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 15 印张 5 插页 374 千字 印 1—1000

2000 年 12 月北京第 1 版 2000 年 12 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3237-6/TE·2455

定价: 36.00 元

前 言

中国煤成烃的研究始于 70 年代末期,20 年间煤成气理论用于天然气勘探已取得了明显的效果。近年来我国天然气勘探有引人注目的进展,持续的大好形势与煤成气储量的增长密切相关。另外,吐哈盆地的油气发现则使得煤成油研究取得了明显的进展。

尽管经过了多年的研究,含煤盆地大中型气田的分布规律和勘探方向仍需要深入的认识;此外,随着勘探工作的进行以及资料的积累,含煤盆地是以找气为主、还是以找油为主,成为油气勘探中新的重大问题。在这样的背景下,国家“九五”重点科技攻关项目“中国大中型气田勘探开发研究”设置了“中国煤系地层大中型气田的研究”专题,以期通过详细的研究,阐明上述两个问题。该专题是在 1996 年至 1998 年完成的。在此期间,研究人员多次赴全国各主要含煤盆地,采集了大量的地质样品,收集了丰富的基础资料,通过测试分析、模拟实验获得了大量的数据,并进行了统计整理。在煤系聚煤特征、有机岩石学特征、气源岩发育、煤系烃产物的气/油比分配,煤系的有利生气相带、生烃机制、二次生烃能力、煤成天然气特征、大中型气田形成的地质条件等方面进行了系统的研究,在此基础上对煤系的倾气倾油性、煤成大中型气田的形成分布规律及有利勘探目标进行分析和综合,编写了五部子专题报告以及专题最终报告,取得了一系列有创新的成果。根据 1999 年初中国石油天然气集团公司科技发展部受国家科技部委托组织鉴定的结果(鉴定委员会主任为石宝珩、副主任为孙枢院士、田在艺院士),该专题“总体达到国际先进水平,部分研究达到国际领先水平”。由于专题既具有理论创新、又紧密结合生产,于 2000 年获得中国石油天然气集团公司技术创新二等奖。本书即是在上述专题总报告的基础上升华而成的,所采用的资料及数据基本截止于 1998 年底。

本书的研究内容有两个鲜明的特点。首先,从实验、地球化学和地质等方面充分阐明,煤系即使在相当于“生油窗”的长焰煤—焦煤前期这样的低演化阶段,其生成的烃类聚集也是以气为主而不是以油为主,回答了含煤盆地的油气勘探到底是以找油为主还是以找气为主这一问题;其次,在深入研究各主要盆地地质实际的基础上,指出了煤成大中型气田的分布规律和勘探方向。这两方面的研究内容对“九五”期间的勘探实践起了重要的指导作用,并在勘探实践中得到验证:一是近年含煤盆地的油气发现以天然气为主;二是全国煤成气探明储量从 1995 年底的 $6737 \times 10^8 \text{m}^3$ 增加到 1999 年底的 $10582.73 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

全书的统稿由戴金星、钟宁宁和夏新宇负责完成。需要说明的是,将一份研究报告提升为专著,其间需要进行大量细致的工作。尤其是本书涉及到多学科的研究,不同章节的内容来自不同的研究专题。编著过程中不仅要进行体例的统一,更需要保证内容的连贯、数据的准确和观点的清晰一致。本着精益求精的态度,各章节的作者在一年时间内三次集中进行讨论和编写,力求发现和改正原报告中大大小小的纰缪,为此不惜多次推迟出版时间,这是本书至今方得以面世的原因。当然,书中还会存在一些遗留的不当之处,恳请读者对其加以指正。

戴金星

2000 年 10 月

目 录

第一章 中国煤成大中型气田天然气组分和同位素特征 ····· 石昕 孙冬敏 夏新宇	(1)
第一节 煤成大中型气田天然气组分特征	(1)
第二节 煤成大中型气田天然气的同位素特征	(11)
第三节 煤成气和油型气的鉴别	(20)
第二章 烟煤显微组分的成烃实验研究与评价 ····· 刘德汉 钟宁宁 张惠之 盛国英	(24)
第一节 研究样品的基本特征	(24)
第二节 煤成气油的热模拟实验	(35)
第三节 模拟实验产物的组成特征	(43)
第四节 煤成气成油的 PY—GC 快速热解实验	(56)
第五节 煤成气成油规律与评价指标	(63)
第三章 含煤建造特征与煤系倾气倾油性关系 ····· 钟宁宁 陈恭洋 穆会珍	(66)
第一节 我国重要煤系的显微组分组成面貌	(66)
第二节 煤系显微组分组成的密度分布形式	(72)
第三节 煤系的气/油比分配特征	(77)
第四节 煤系层序发育特征与倾气倾油性关系	(87)
第四章 影响煤系气/油比再分配的地质—地球化学因素 ····· 陈恭洋 钟宁宁	(97)
第一节 煤化作用过程的气/油比再分配规律	(97)
第二节 影响煤系气/油比分配的地质因素	(105)
第五章 煤系烃源岩有机岩石学研究——以新疆地区侏罗纪煤系为例 ····· 杨建业 任德贻 赵峰华 许德伟	(117)
第一节 烃源岩形成时期的古环境与古植物群落	(117)
第二节 烃源岩显微组分特征	(124)
第三节 评价煤系烃源岩生烃性能的两种新方法	(131)
第四节 煤系烃源岩有机相	(136)
第六章 华北晚古生代煤系二次生烃作用 ····· 汤达桢 邹艳荣 杨起 刘大锰	(143)
第一节 二次生烃作用的地质背景	(143)
第二节 二次生烃的实验研究	(151)
第三节 二次生烃的动力学特征	(157)
第七章 中国主要隐伏含煤盆地大中型气田地质基础 ····· 夏新宇 赵林 洪峰	(165)
第一节 鄂尔多斯盆地石炭—二叠纪煤系	(165)
第二节 四川盆地三叠纪煤系	(180)

第三节	塔里木盆地侏罗纪煤系·····	(191)
第四节	准噶尔盆地侏罗纪煤系·····	(198)
第八章	中国煤成大中型气田形成的控制因素及有利勘探方向	
	····· 戴金星 秦胜飞 洪峰 夏新宇 赵林	(206)
第一节	煤成大中型气田概况·····	(206)
第二节	中国煤成大中型气田形成的主要控制因素·····	(210)
第三节	中国主要隐伏含煤盆地大中型气田有利勘探区带·····	(223)
参考文献	·····	(230)
图版说明	·····	(235)

第一章 中国煤成大中型气田天然气组分和同位素特征

第一节 煤成大中型气田天然气组分特征

天然气由烃类气体和非烃类气体组成。烃类气体主要指甲烷和重烃气(C_{2-4});非烃气体常见的有 CO_2 、 N_2 、 H_2S 和 Ar、He 等稀有气体。煤成气是指由腐殖型有机质(包括腐殖煤和分散的Ⅲ型和Ⅱ_B型有机质)形成的天然气。

在自然界中,不同类型的天然气组分不仅受气源的影响,也受气源岩的热演化程度、天然气在形成后经历的运移、聚集、成藏等作用的影响,这一点对煤成气来讲也不例外。因而,研究和分析煤成大中型气田天然气组分特征对于气源判识、探讨气藏成因及寻找煤成大中型气田都具有重要意义。

本章通过对全国主要煤成大中型气田(分布在松辽盆地、渤海湾盆地、四川盆地、鄂尔多斯盆地、吐哈盆地、塔里木盆地、东海盆地和莺琼盆地)的 335 个天然气组分数据的系统分析和研究,得出了我国煤成大中型气田天然气组分特征的规律。

一、烃类气体

1. 组分含量特征

煤成大中型气田烃类气平均含量见表 1-1,烃类气含量峰值分布于 95%~100%,其次为 90%~95%(图 1-1a),绝大多数样品烃类气含量大于 80%,说明我国煤成大中型气田的天然气具有以烃类气为主的特征。

表 1-1 中国煤成大中型气田烃类气体平均含量及干湿程度

盆 地	气田(藏)	总烃含量 (%)	CH ₄ (%)	C ₂ ⁺ (%)	C ₁ /ΣC _n	C ₂ ⁺ /ΣC _n
四 川	磨 溪	97.10	95.96	1.14	0.988	0.012
	中 坝	98.93	89.22	9.71	0.902	0.098
	新 场	98.79	94.36	4.44	0.955	0.045
	平 落 坝	98.79	96.38	2.41	0.976	0.024
松 辽	汪 家 屯	96.16	93.64	2.52	0.974	0.026
吐 哈	丘 东	95.74	77.96	17.78	0.812	0.188
渤 海 湾	苏 桥	97.05	79.19	17.87	0.816	0.184
	文 留	98.32	93.11	5.21	0.947	0.053

续表

盆 地	气田(藏)	总烃含量 (%)	CH ₄ (%)	C ₂ ⁺ (%)	C ₁ /ΣC _n	C ₂ ⁺ /ΣC _n
莺 琼	崖 13—1	90.89	86.30	4.59	0.950	0.050
	东方 1—1	61.28	59.83	1.45	0.976	0.024
	乐东 15—1	30.54	28.95	1.59	0.943	0.057
东 海	平 湖	95.85	80.49	15.36	0.838	0.162
塔 里 木	柯 克 亚	98.45	85.63	12.82	0.870	0.130
	牙 哈	92.19	80.87	11.32	0.875	0.125
	羊 塔 克	96.75	85.85	10.90	0.886	0.114
	英 买 7	84.78	73.32	11.45	0.848	0.152
鄂尔多斯	长 庆	94.75	92.03	2.72	0.971	0.029

从图 1-1b 可见,甲烷含量的峰值为 85%~90%;而甲烷含量大于 80%的样品占全部样品总数的 73%以上。

重烃气含量的峰值在 0~2%之间(图 1-1c),其次分布在 2%~4%和 8%~10%,说明煤成天然气藏的重烃含量很少。重烃气含量的多少主要取决于有机质的热演化程度,热演化程度越高,重烃气的含量越少,天然气的干燥系数越大;其次,还与有机质类型、运移和细菌氧化等有关。

根据重烃气含量与甲烷组分含量,可将天然气分为湿气和干气。一般把含 95%或更多甲烷的天然气称为干气,重烃气含量达 5%或更多的则称为湿气。根据中国煤成大中型气田天然气组分具体特点,把干燥系数定义为甲烷和总烃气含量的百分比($C_1/\Sigma C_n$),湿度系数为重烃气与烃类气总量的比($C_2^+/\Sigma C_n$)。

煤成气生气母质为腐殖型有机质,在不同的生烃阶段具有不同生烃特征,并且显微组分不同的腐殖型有机质在不同演化阶段生成的天然气具有不同的组分特征。

我国煤成大中型气田天然气干燥系数分布的峰值为 0.95~1.00,占样品总量的 40.9%,其次为 0.85~0.90 和 0.90~0.95,分别占样品总量的 22.1%和 21.2%(图 1-2)。

不同盆地、不同气田的天然气干湿程度不同(表 1-1)。这是由于各气田的气源岩性质、热演化程度、天然气运聚成藏所经历的作用和过程不同所造成的。本书所统计的 17 个煤成大中型气田中,平均干燥系数大于 0.95 的有 7 个气田,即长庆气田、磨溪气田、平落坝气田、新场气田、汪家屯气田、东方 1-1 气田和崖 13-1 气田,其余气田的干燥系数均处于 0.80~0.95,属于湿气。其中四川盆地的磨溪气田干燥系数最高,达 0.988,吐哈盆地的丘东气田干燥系数最低,只有 0.812。

天然气中异丁烷与正丁烷比值(iC_4/nC_4)和异戊烷与正戊烷(iC_5/nC_5)比值与有机质类型有关,同时受有机质演化和天然气运移作用的影响。一般情况下,相同母质类型条件下,低成

熟、长距离运移的天然气该比值较高。我国煤成大中型气田 iC_4/nC_4 的主频率分布范围较宽,为 0.6~1.2,其次为 0.4~0.6 和 1.2~1.4(图 1-3a),大于 1.6 和小于 0.4 的样品很少; iC_5/nC_5 的主频率分布区间为 1~1.2(图 1-3b),约占样品数的 50% 左右。不同盆地、不同气田 iC_4/nC_4 、 iC_5/nC_5 比值的变化范围及平均值不同,如表 1-2 所示。东方 1-1 气田 iC_4/nC_4 平均值最高,为 1.66,柯克亚气田 iC_4/nC_4 比值(平均值)最低,为 0.5; iC_5/nC_5 比值长庆气田最高,为 3.00,柯克亚气田最低,仅为 0.42。

2. 烷烃的形成机制

煤成气中生物气的烃类组分是通过细菌对腐殖型有机质的改造而形成的,而煤成气中的热解气则是煤和腐殖型干酪根热降解形成的。按传统的天然气热裂解成因理论,在有机质热成熟度较低时,腐殖型干酪根的侧链可以直接断裂生成少量轻烃(凝析油和天然气);在有机质热成熟度较高(达到生气高峰)时,干酪根可以大量生成天然气,已生成的碳数较大的烃类也会进一步裂解为凝析油和天然气。不过,近年研究发现,热裂解成因说在解释轻烃的成因时,难以说明以下问题:

①如图 1-2 所示,不论成熟度的高低,煤成气藏的干燥系数均在 0.80 以上,但煤热模拟气产物的干燥系数一般小于 0.80,原油热模拟气产物的干燥系数更低;

②对中国不同煤成油气田 17 个原油样品的分析结果表明,不同演化阶段的样品中一些异构烷烃存在基本稳定的比值,例如[2-甲基己烷(2-MH)+2,3-二甲基戊烷(2,3-DMP)]与[3-甲基己烷(3-MH)+2,4-二甲基戊烷(2,4-DMP)]的比值基本为 1,这一现象与 Mango(1987)对 2000 余个原油(主要是海相原油)样品的分析结果一致,难以用热裂解机制来解释;

③煤的热模拟产物中异构烷烃和环烷烃含量远高于分离出的干酪根热模拟产物^①,而地质体中油气轻烃的异构烷烃、环烷烃及苯同系物的含量也远高于原油模拟实验直接裂解所产生的轻烃;

④天然气(湿气)的形成温度一般在 180~250℃,凝析油形成的温度更低,在此温度下,碳数较高的烃类比较稳定,难以直接分解为轻烃;

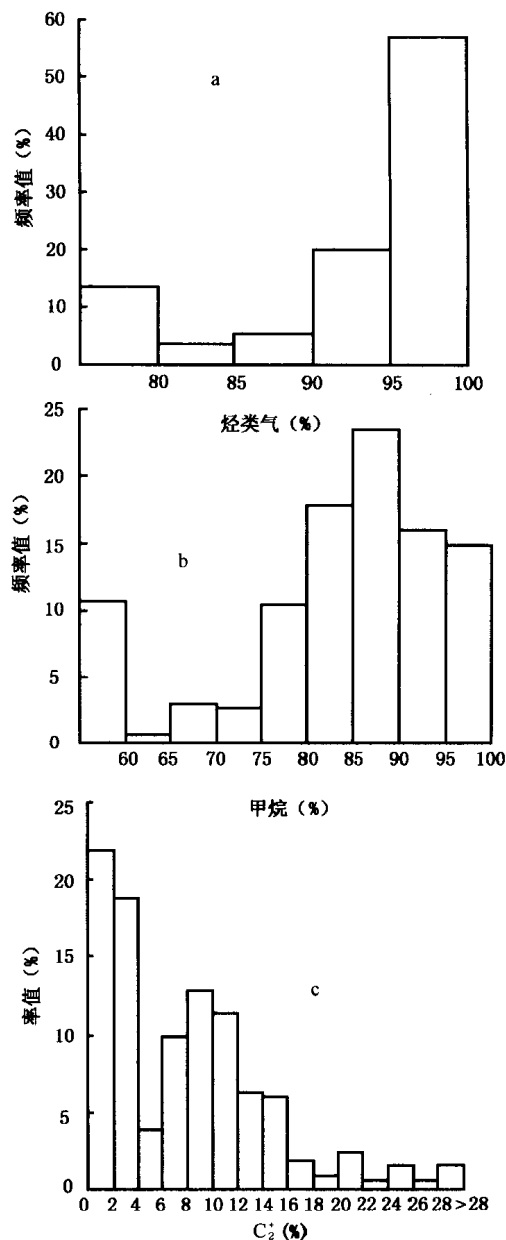


图 1-1 我国煤成大中型气田
天然气组分含量频率图

① 夏燕青,1998,关于干酪根生烃作用的新发现,见:第七届全国有机地球化学学术会议论文摘要汇编。

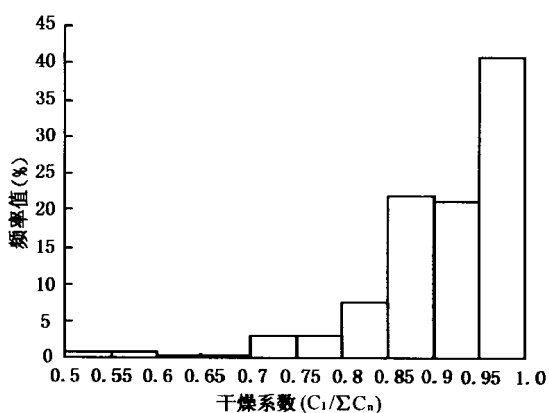


图 1-2 我国煤成大中型气田干燥系数分布图

有催化作用的介入。因此,油气中的轻烃实际主要是烃源岩有机质在稳态催化作用下伴随着重排作用而形成的(动力学过程),并非直接由热裂解转变而来(热力学过程)。该理论很好地解释了轻烃的成因,以及轻烃中一些异构体比值恒定的现象,既得到了实验的验证(Mango and Hightower,1997),又得到了动力学计算的支持(Van Duin *et al*,1997)。图 1-4 表示了异庚烷的稳态催化形成机制。煤系中轻烃的形成也可能是依靠上述机制,而不完全是直接从干酪根上直接断裂下来。

⑤干酪根是在成岩过程中由沉积有机物缩合形成的,而原油中大量存在的轻烃,有许多并无对应的生源母质,在沉积物中也只以痕量存在。也就是说,这部分异构烷烃不能从干酪根上直接断裂下来。

近年提出的轻烃形成的稳态催化成因理论(Mango,1987)能够对以上疑点作出比较合理的解释。该理论的要点是,轻烃中一些比例恒定的异构烷烃化合物实际是由共同的生物母质转化生成的产物,由于同一种母体化合物在生成不同的异构体时伴随着碳骨架的重排,这种反应必然

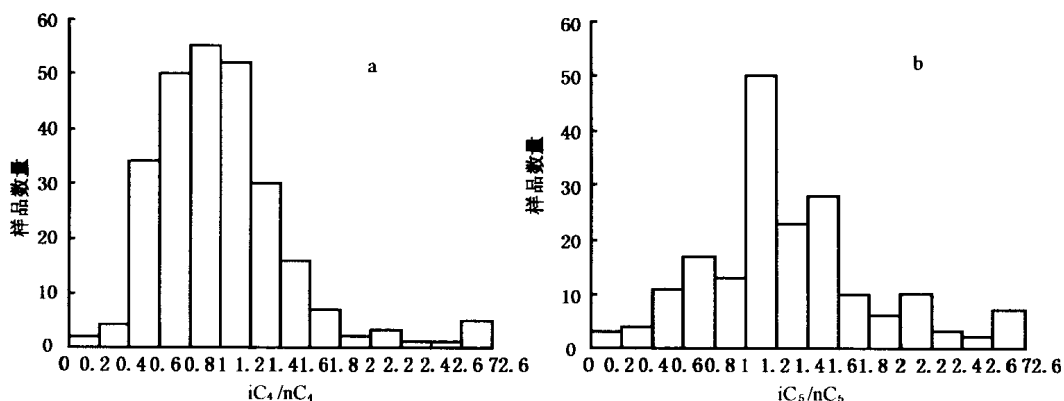


图 1-3 中国煤成大中型气田 iC_4/nC_4 、 iC_5/nC_5 比值分布频率图

表 1-2 中国煤成大中型气田 iC_4/nC_4 、 iC_5/nC_5 比值

气 田	iC_4/nC_4	iC_5/nC_5
东方 1-1	$\frac{6.05 \sim 0.81}{1.66}$	$\frac{1.76 \sim 1.40}{1.59}$
柯克亚	$\frac{1.19 \sim 0.38}{0.50}$	$\frac{0.54 \sim 0.38}{0.42}$
乐东 15-1	$\frac{2.32 \sim 0.88}{1.52}$	2.00
磨 溪	$\frac{1.07 \sim 1.00}{1.03}$	$\frac{2.76 \sim 2.48}{2.62}$
平 湖	$\frac{1.59 \sim 1.22}{1.41}$	$\frac{2.00 \sim 1.89}{1.94}$
平落坝	$\frac{1.68 \sim 1.25}{1.46}$	$\frac{2.75 \sim 1.43}{1.98}$

续表

气 田	iC_4/nC_4	iC_5/nC_5
丘 东	$\frac{1.97 \sim 0.50}{1.14}$	$\frac{3.88 \sim 0.08}{1.50}$
苏 桥	$\frac{0.85 \sim 0.44}{0.69}$	$\frac{1.50 \sim 0.83}{1.18}$
汪 家 屯	$\frac{4.33 \sim 0.44}{1.28}$	$\frac{1.50 \sim 1.00}{1.25}$
文 留	$\frac{0.82 \sim 0.33}{0.56}$	$\frac{1.00 \sim 0.76}{0.88}$
新 场	$\frac{2.50 \sim 1.22}{1.81}$	
牙 哈	$\frac{1.73 \sim 0.17}{0.85}$	$\frac{2.00 \sim 0.04}{1.04}$
崖 13-1	$\frac{6.15 \sim 0.70}{1.37}$	$\frac{1.91 \sim 1.10}{1.54}$
羊 塔 克	$\frac{1.32 \sim 0.67}{0.94}$	$\frac{3.00 \sim 0.50}{1.50}$
英 买 7	$\frac{1.62 \sim 0.11}{0.78}$	$\frac{3.25 \sim 0.57}{1.18}$
中 坝	$\frac{0.92 \sim 0.67}{0.83}$	$\frac{1.36 \sim 1.03}{1.17}$
长 庆	$\frac{3.50 \sim 0.50}{1.18}$	3.00

注: $\frac{\text{最大值} \sim \text{最小值}}{\text{平均值}}$ 。

稳态催化成因理论也可以很好地解释甲烷及其同系物的形成机制。图1-5中波折线为长链烷基, 波折线加双键表示 α -烯烃。双键到金属(M)之间的箭号表示弱共价键。图中的

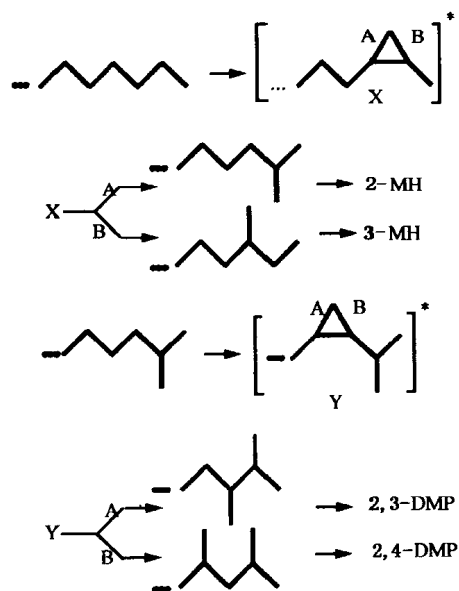


图 1-4 异庚烷稳态催化动力学
机制示意图(Mango, 1987)

* 表示亚稳态

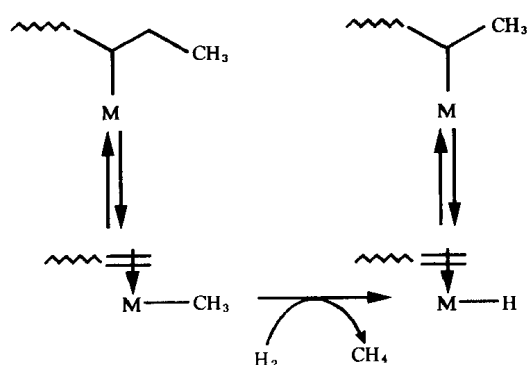


图 1-5 甲烷的催化形成机制
(据 Mango, 1997, 有修改)

四个中间体中,每个中间体的金属原子都通过一个 σ 键(图中的实线)与其它原子相连:在左上的中间体,与烷基的 3 位碳原子相连;在右上,与烷基的 2 位碳原子相连;在左下,与一个甲基相连;在右下,与一个氢原子相连。该图解释了烷基加氢形成甲烷的机制(氢由干酪根的富氢官能团分解而来)。由于 M 可以通过一系列的加成—消去反应来移动其在碳酸上的位置,该机制可以同样解释乙烷、丙烷等多碳烷烃的形成。由于 M 与位数较低的碳原子相连的概率更大(即 M 更易在干酪根侧链末端结合),因此形成的产物数量必然是甲烷大于乙烷大于丙烷。由此可见,该理论能够解释不同成熟度的天然气中为何甲烷总是占绝对优势。而金属 M 可推断为过渡金属中的 V、Ni、Co 等。

轻烃的稳态催化成因理论能够更好地解释烷烃形成过程中的碳同位素分馏效应,即甲烷碳同位素受热成熟度的影响较大,而乙烷碳同位素虽然也受成熟度的影响,但影响却非常小;到 C_5 以上的单体烃同位素,已很难看出热成熟度的影响(见下节)。在图 1-5 中,左上中间体与左下中间体之间的重排反应,可以说明甲烷同系物形成过程的同位素分馏。对于甲烷的形成来说,由于 $-^{12}CH_3$ 比 $-^{13}CH_3$ 的质量轻 6.25%,其动力学活性更大,因此当重排的甲基为 $-^{12}CH_3$ 时,反应更易进行。所以 $-^{12}CH_3$ 将比 $-^{13}CH_3$ 优先重排并生成甲烷;结果在低演化阶段生成的甲烷更富 ^{12}C 。对于乙烷的形成来说,含一个 ^{13}C 的 $-C_2H_5$ 比不含 ^{13}C 的 $-C_2H_5$ 质量只轻 3.33%,这种动力学分馏效应将大为减弱。

轻烃形成的稳态催化机制还能够对烃源岩烃产物的油气比作出合理解释。例如,当碳酸盐岩中的镜状体和固体焦沥青所代表的成熟度已较高时($R_o=1.1\% \sim 1.4\%$),其所包含的可溶重质沥青仍然保持着相当低的成熟度,生物标志化合物也未达到异构化的终点;相对于泥质岩,碳酸盐岩在较高的演化阶段其烃产物仍为石油^①。该现象也许可以归因于碳酸盐岩缺乏过渡金属对轻烃形成所起的稳态催化作用。类似地,由于煤富集过渡金属,所以在较低的演化阶段,其主要烃产物将是轻烃(包括凝析油和天然气)而不是石油,这也可能是煤系更易生气而不易生油的原因之一。

二、非烃气体

我国煤成大中型气田天然气组成中非烃气体以 CO_2 和 N_2 为主,其它成分甚微,故除 CO_2 和 N_2 外,其它气体在此不作阐述。从平均含量来看(表 1-3),多数煤成气田的非烃含量小于 10%,其中中坝气田最低,平均值仅为 0.89%,其次为平落坝气田(1.18%)和新场气田(1.19%)。莺琼盆地的乐东 15-1 气田非烃含量最高,为 69.23%。

表 1-3 中国煤成大中型气田非烃气含量(%)

气 田	非 烃	CO_2	N_2
东方 1-1	$\frac{76.12 \sim 6.72}{38.80}$	$\frac{69.10 \sim 0.12}{25.90}$	$\frac{31.21 \sim 1.01}{12.89}$
柯 克 亚	$\frac{4.24 \sim 0.11}{1.33}$	$\frac{3.99 \sim 0.02}{1.82}$	0.01
乐东 15-1	$\frac{93.97 \sim 31.46}{69.23}$	$\frac{93.02 \sim 16.81}{62.35}$	$\frac{14.65 \sim 0.95}{6.87}$

① 黄第藩等,1995,塔里木盆地油气生成与演化。

续表

气 田	非 烃	CO ₂	N ₂
磨 溪	$\frac{3.29 \sim 1.20}{1.70}$	$\frac{1.27 \sim 0.09}{0.36}$	$\frac{2.02 \sim 1.01}{1.36}$
平 湖	$\frac{3.02 \sim 2.12}{2.57}$	$\frac{1.71 \sim 1.53}{1.62}$	$\frac{1.31 \sim 0.57}{0.94}$
平 落 坝	$\frac{1.91 \sim 0.68}{1.18}$	$\frac{0.83 \sim 0.09}{0.53}$	$\frac{1.35 \sim 0.02}{0.50}$
丘 东	$\frac{29.84 \sim 0.12}{6.07}$	$\frac{7.59 \sim 6.21}{7.13}$	$\frac{29.84 \sim 0.12}{4.62}$
苏 桥	$\frac{4.76 \sim 1.09}{2.87}$	$\frac{2.99 \sim 0.95}{1.83}$	$\frac{1.88 \sim 0.15}{1.27}$
汪 家 屯	$\frac{6.75 \sim 0.26}{2.58}$	$\frac{1.07 \sim 0.06}{0.34}$	$\frac{6.64 \sim 0.18}{2.99}$
文 留	$\frac{3.39 \sim 0.65}{2.07}$	$\frac{0.99 \sim 0.46}{0.82}$	$\frac{2.34 \sim 0.08}{1.24}$
新 场	$\frac{2.24 \sim 0.60}{1.19}$	$\frac{1.41 \sim 0.40}{0.69}$	$\frac{1.27 \sim 0.09}{0.50}$
牙 哈	$\frac{65.67 \sim 1.40}{7.87}$	$\frac{14.38 \sim 0.01}{1.18}$	$\frac{61.25 \sim 1.12}{6.79}$
崖 13-1	$\frac{12.10 \sim 4.81}{9.13}$	$\frac{12.00 \sim 0.17}{8.12}$	$\frac{4.65 \sim 0.10}{1.08}$
羊 塔 克	$\frac{7.92 \sim 1.14}{3.25}$	$\frac{0.73 \sim 0.04}{0.20}$	$\frac{7.86 \sim 1.06}{3.06}$
英 买 7	$\frac{99.65 \sim 1.01}{15.65}$	$\frac{3.75 \sim 0.04}{0.75}$	$\frac{99.43 \sim 0.65}{14.98}$
中 坝	$\frac{1.70 \sim 0.35}{0.89}$	$\frac{0.76 \sim 0.03}{0.40}$	$\frac{0.90 \sim 0.03}{0.45}$
长 庆	$\frac{25.2 \sim 0.04}{5.21}$	$\frac{7.05 \sim 0.07}{1.67}$	$\frac{10.86 \sim 0.12}{2.41}$

注: $\frac{\text{最大值} \sim \text{最小值}}{\text{平均值}}$ 。

1. 氮气(N₂)

氮是地球上一种丰度较低的元素,在地球圈层中分布不均。各种类型的氮可在一定地质作用下相互交换,从而造成氮的局部分散或聚集。高含氮气藏就是氮局部聚集的结果。

天然气中 N₂ 有三种主要来源(戴金星等,1992),即生物来源、大气来源和岩浆来源,其中生物来源最为重要。

(1) 生物来源

生物来源 N₂ 是天然气中氮的主要来源,岩石中分散有机质或石油中的含氮化合物在生物化学改造过程或岩石中分散有机质的热催化改造过程中都会生成 N₂,因此,天然气藏中常含有一定含量的生物来源 N₂。在含氮有机质含量高的地层或适宜 N₂ 形成的条件下,气藏中 N₂ 的含量会相对较高。

(2) 大气来源

N_2 是大气的主要成分之一,由于地表水与地下水的循环作用,大气中的 N_2 被地表水带入地下,然后从饱和空气的水中析出进入气藏或储层,这类成因 N_2 往往富集在浅部地层中。戴金星等(1992)认为,煤田天然气中的 N_2 基本上均为大气成因的,这是由于煤田中的煤层埋藏浅(我国二十多个煤矿中采集气样的煤层埋深几乎都介于 200m 至 800m 之间),处于气水交换带。大气中的主要成分 O_2 和 N_2 同时被地下水带入储层,而后 O_2 与其它物质发生氧化作用而消耗掉, N_2 则相对富集。

(3) 岩浆来源

是指在火山活动期或其后,与地下岩浆活动有关的地质过程所析出的 N_2 。在我国尚未发现岩浆成因的高含 N_2 气藏。

天然气藏中 N_2 含量变化较大。研究表明,世界上 83% 的气藏中 N_2 的浓度在 0.4% ~ 12.5% 之间。一般 N_2 含量达到 10% 以上的气藏称为高 N_2 气藏。古老的地台与年轻的地台相比,前者含 N_2 量较高。高 N_2 分布带除与基底隆起带有关外,还常与煤成气藏(田)气有密切的关系。

通过对我国 17 个煤成大中型气田中 N_2 含量的研究发现, N_2 含量相差极大。其中英买 7 气田含 N_2 量最高,单井样品最高值可达 99.43% (表 1-4);柯克亚气田含 N_2 平均值最低,仅为 0.01%;东方 1-1 气田含 N_2 平均为 12.89%;英买 7 气田含 N_2 平均值为 14.98% (表 1-3),均属于高 N_2 气田。

表 1-4 我国煤成大中型气田天然气高含 N_2 的气井

盆 地	气 田	井 号	层 位	N_2 (%)
鄂尔多斯	长 庆	陕 10	P	10.47
		陕 16	P	10.86
塔 里 木	牙 哈	牙 哈 3		11.37
		牙哈 301	N	61.25
		牙哈 302	N	59.17
		牙哈 401	E	16.27
	英 买 7	英买 2	O	26.08
		英买 2	O	14.32
		英买 201	O	19.97
		英买 201	O	77.81
		英买 203	O	79.18
		英买 9	E	99.43
吐 哈	丘 东	丘 东 9	J	29.84
莺 琼	东方 1-1	东方 1-1-2	N	23.02
		东方 1-1-2	N	18.11
		东方 1-1-4	N	18.2
		东方 1-1-5	N	32.21
	乐东 15-1	乐 15-1-1	N	14.65
		乐 15-1-2	N	13.73

根据 300 个 N_2 数据绘制成频率图(图 1-6),可见中国煤成大中型气田 N_2 含量分布的主峰位于 0~2%,约占样品总数的 40%,其次为 14%~16%、2%~4%和 4%~6%,均占样品总数的 20%左右。其中属于高含 N_2 ($N_2 > 10\%$) 的样品占 27.2%。高含 N_2 天然气在塔里木盆地、莺琼盆地、鄂尔多斯盆地都有发现,但主要分布于塔里木盆地的英买 7 气田、莺琼盆地的东方 1-1、乐东 15-1 气田(表 1-4)。

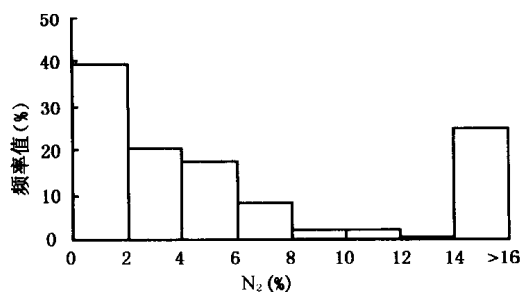


图 1-6 中国煤成大中型气田 N_2 分布频率图

2. 二氧化碳(CO_2)

总体上看,天然气中 CO_2 含量较 N_2 更低,分布相对更集中。概括来说, CO_2 的成因分为有机成因和无机成因。

(1) 有机成因

是有机物(石油、煤、泥炭和动植物残骸)在细菌作用下,遭受生物化学降解而生成的 CO_2 ;干酪根特别是Ⅲ型干酪根的热降解可形成一定量的 CO_2 ;此外,有机质与无机矿物发生氧化还原反应也可形成 CO_2 。

(2) 无机成因

无机成因 CO_2 又包括两种成因机制,即碳酸盐化学成因和幔源岩浆成因。

1)碳酸盐化学成因 碳酸盐岩在高温热解、低温水解以及被地下水中的酸类(主要为生烃过程中产生的有机酸)溶解过程中都可以生成 CO_2 。在有水时,不纯的碳酸盐在 $75^\circ C$ 就开始产生二氧化碳,海相成因的石灰岩在地下温度达 $150^\circ C$ 时即可分解产生大量二氧化碳。在较高温度作用下,碳酸盐岩与各种硅酸盐作用可以形成绿帘石或绿泥石,同时释放出二氧化碳。

2)幔源岩浆成因 在岩浆上涌过程中,由于温度、压力降低,可析出大量二氧化碳。国内外不少学者对火成岩所含气体进行了研究,发现不同火成岩样加热后释放的气体主要是二氧化碳和水蒸气(戴金星等,1992)。

从图 1-7 可见,我国煤成大中型气田二氧化碳含量多寡不一,总体上二氧化碳含量不高,峰值为 0~0.5%,占样品总数的 42%,主频率区间为 0~5%,占样品总数的 83%,含量介于

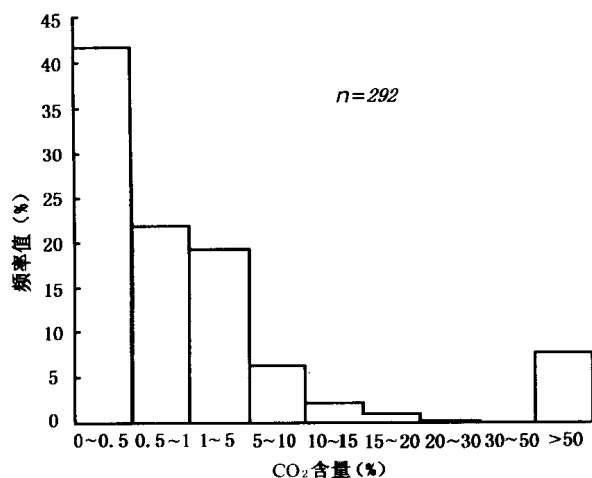


图 1-7 中国煤成大中型气田 CO_2 分布频率图

5%~20%的样品只占较小的比例,说明 CO_2 含量普遍较低。但部分样品具有高的 CO_2 含量(表 1-5),主要分布在莺琼盆地的东方 1-1 气田和乐东 15-1 气田。这两个气田中不同井 CO_2 含量相差极为悬殊。例如东方 1-1-5 井为 0.21%,而东方 1-1-2 井 CO_2 含量可达 66.66%,乐 15-1-1 井 CO_2 含量竟高达 93.02%。另外,同一口井不同深度 CO_2 含量变化也很大,例如东方 1-1-2 井,在 1284~1296m 井段, CO_2 含量仅为 1.23%;在 1331~1344m 井段平均为 53.6%;1414~1452.5m 井段达到 66.66%。乐 15-1-1 井 1417~1557m 井段, CO_2 含量仅为 16.8%;

2200~2225m 井段为 78.72% ;2335~2340m 井段高达 93.02%。这两个气田中,乐东 15-1 气田 CO₂ 平均含量较高,达到 62.35%,东方 1-1 气田 CO₂ 平均含量也达到 25.9%。

表 1-5 莺琼盆地天然气中 CO₂ 含量

气 田	井 号	深度(m)	CO ₂ (%)
东方 1-1	东方 1-1-2	1331~1361	61.26
	东方 1-1-2	1355~1361	57.32
	东方 1-1-2	1414~1452.5	66.66
	东方 1-1-3	1287~1307	55.03
	东方 1-1-3	1333.5~1372.5	69.10
乐东 15-1	乐 15-1-2	1371.5~1383.5	54.74
	乐 15-1-3	1425~1442.5	68.36
	乐 15-1-3	1449.3~1455	77.99
	乐 15-1-3	1572.0~1576.5	54.31
	乐 15-1-1	2335~2340	93.02
	乐 15-1-1	1414~1429	66.50
	乐 15-1-1	2200~2225	78.72

莺琼盆地天然气中 CO₂ 的来源问题引起众多学者的关注。何家雄(1988)认为 CO₂ 主要源于埋藏 3100m 以下($R_o=0.8\%$)的莺黄组二段及黄流组富含碳酸盐岩的砂泥岩;朱岳年(1997)认为 CO₂ 是中新世和第四纪初期由盆地基底花岗岩系热脱气作用和 2000~5000m 及其以下第三系沉积岩系中碳酸盐矿物的热分解作用或低温水解作用联合贡献的,两种机制形成的 CO₂ 贡献量分别为 15%~100%和 0~85%;孙玉梅等(1998)认为莺歌海盆地 CO₂ 气主要为深源无机成因,来自第三系的可能性不大。

研究表明,莺歌海盆地东方 1-1 气田和乐东 15-1 气田中,高含 CO₂ 的样品(CO₂ 含量大于 55%) $\delta^{13}C_{CO_2}$ 值很重,东方 1-1 气田 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 值平均为 -3.29‰,乐东 15-1 气田 $\delta^{13}C_{CO_2}$ 平均值为 -4.9‰,为典型的无机成因来源。同时,这两个气田中稀有气体 He 和 Ar 含量甚微,东方 1-1 气田(高含 CO₂ 样品)He 含量平均为 5×10^{-6} , $^3He/^4He$ 平均为 2.5×10^{-7} , R/R_a 平均为 0.17,Ar 含量最高为 540×10^{-6} ;乐东 15-1 气田(高含 CO₂ 样品)He 含量为 $7.6 \times 10^{-6} \sim 19.2 \times 10^{-6}$, $^3He/^4He$ 平均为 3.5×10^{-7} , R/R_a 平均为 0.43,Ar 含量为 $200 \times 10^{-6} \sim 2500 \times 10^{-6}$, $^3He/^4He$ 和 R/R_a 明显低于空气,并且与邻区珠江口盆地西部珠三坳陷及我国东部典型幔源稀有气体组成有明显差异,属于典型的壳源变质成因气,而不太可能属于深源无机成因气。

岩石化学分析资料显示,莺歌海盆地上第三系梅山组普遍含钙,含量为 10%~25%,该套地层在盆地中部埋深几乎都在 4000m 以下。该区的地温梯度平均为 4.25℃/100m,按这个值计算,在埋深 4000m 以下,地温可达 170~290℃,如此高的地温足以使碳酸盐矿物发生热分解。所以莺歌海盆地的 CO₂ 可能是埋深大于 4000m 的梅山组碳酸盐矿物分解的产物。

第二节 煤成大中型气田天然气的同位素特征

一、煤成烷烃气碳同位素特征

1. 烷烃气碳同位素基本特征

在天然气诸多化合物的元素同位素中,研究程度较高、应用最广的是烷烃气的碳同位素。其中,甲烷碳同位素既与母质类型有关,又与热演化程度有关,但受热演化程度影响较大。乙烷碳同位素组成较甲烷具有较强的稳定性和母质类型的继承性,受热演化程度的影响较小,主要反映成烃母质类型。

从图 1-8 和表 1-6 可见,我国煤成大中型气田天然气烷烃 $\delta^{13}\text{C}$ 分布具有以下特征:甲烷碳同位素的分布范围为 $-44.1\text{‰} \sim -23.6\text{‰}$,主频率段为 $-38\text{‰} \sim -32\text{‰}$,峰值为 $-38\text{‰} \sim -34\text{‰}$;乙烷碳同位素分布范围为 $-29.4\text{‰} \sim -17.9\text{‰}$,主频率段为 $-28\text{‰} \sim -22\text{‰}$,峰值为 $-26\text{‰} \sim -24\text{‰}$;丙烷碳同位素分布范围为 $-30.3\text{‰} \sim -14.6\text{‰}$,主频率段为 $-28\text{‰} \sim -20\text{‰}$,峰值为 $-26\text{‰} \sim -24\text{‰}$;丁烷碳同位素分布范围为 $-18.0\text{‰} \sim -29.8\text{‰}$,主频率段为 $-28\text{‰} \sim -18\text{‰}$,峰值为 $-24\text{‰} \sim -22\text{‰}$ 。而且,各盆地烷烃碳同位素值分布区间各不相同。就全国范围而言,随着烷烃气中碳分子数增加, $\delta^{13}\text{C}$ 的分布范围和众数范围一般都变窄。但具体到某一盆地,有时会出现与之相反的现象(表 1-6),这往往是由于甲烷同系物的碳同位素倒转所致。

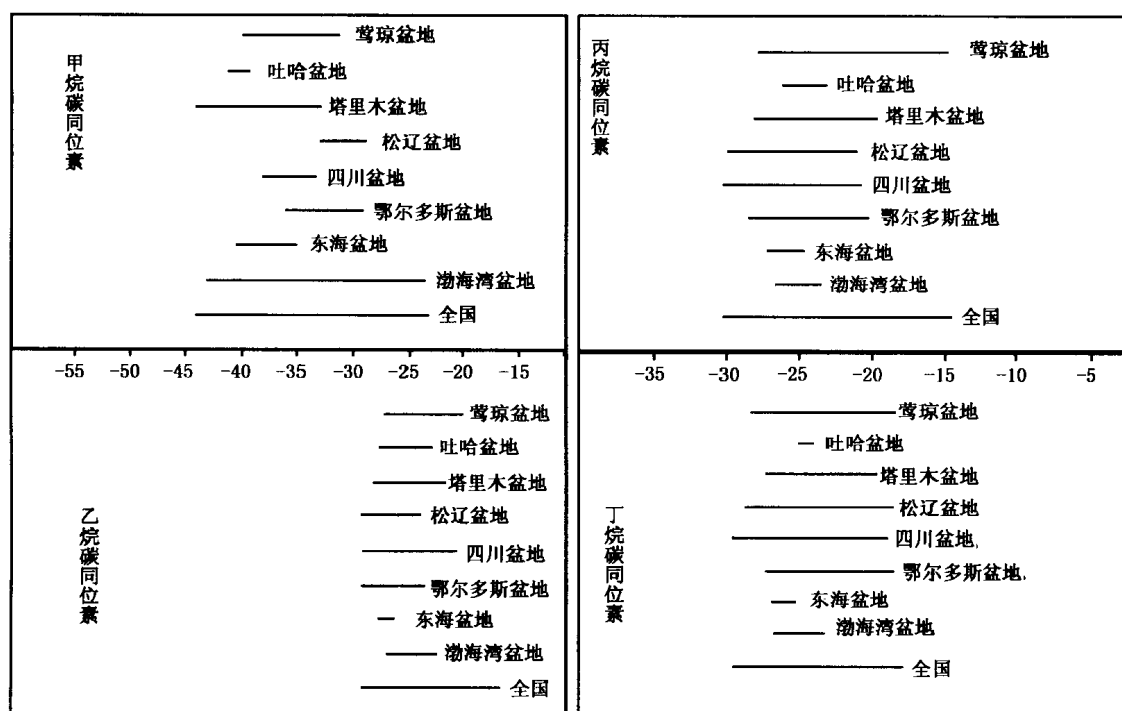


图 1-8 中国煤成大中型气田烷烃碳同位素分布范围($\delta^{13}\text{C}$, ‰, PDB)