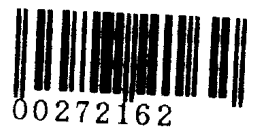


T 12

38991



石油地质勘探技术培训教材

# 天然气地质学概论

戴金星 戚厚发 郝石生 编著



5477 二



石油工业出版社

## 前 言

《石油地质勘探技术培训教材》自1982年内部发行后，受到广大读者欢迎。当时共印一万套，很快就被读者全部订购。石油工业部石油勘探司和教材编委会陆续收到数百封来函、来电，给予较高评价，并迫切希望得到教材。根据读者要求和工作需要，经领导批准，石油勘探司决定，适当调整和加强编委会力量；在现有基础上，吸取各方面的有益意见，改进不足之处，补充新内容，删简修订，由石油工业出版社正式出版。

补充修订的原则是：

- 一、反映在石油地质理论上不断开拓新领域的进展情况；
- 二、反映当代石油地质勘探技术的新理论、新工艺、新方法；
- 三、列举国内外石油地质勘探技术的新成果；
- 四、满足现场工作者解决理论和方法问题的实际需要。

教材正式出版的宗旨是：

- 一、补充、更新现有石油地质技术干部的专业技术知识；
- 二、作为石油地质勘探技术干部进修培训的课本，同时也可作为教学、科研人员的参考丛书；
- 三、推动石油地质勘探事业的发展。

教材内容的选取，既照顾该学科的系统性和完整性，又保证它的先进性和实用性。这些书是编委会成员数十年工作、教学、科研经验的积累，也是石油地质勘探技术理论的结晶。希望能在发展我国石油地质勘探事业中起到应有的作用。

教材编委会的成员有：

郝石生（主编） 翁文波 陆邦干 胡朝元 李德生 陈发景 吴崇筠 王曰才  
王鸿勋 张 恺 钱绍新 黄第藩 裘亦楠 应凤祥 刘和甫 陆克政 谭廷栋  
尚作源 张一伟 贾振远 樵汉生 彭振南 沈修志 戴金星 戚厚发 陆基孟  
赵激林 钟国森 曾文冲 欧阳健 何登春 朱恩灵 徐树宝 尚慧芸 李晋超  
郭舜玲 陈丽华 缪 昕 成云忭 袁幼庸 王雪吾

教材编委会的学术顾问是阎敦实、崔光明、李国玉、查全衡同志。

北京石油勘探开发科学研究院、华东石油学院北京研究生部对教材编委会的工作给予了大力支持和帮助，谨致深切谢意。

编委会成员以业余撰写为主，加以时间仓促，水平有限，不足之处恳请读者批评指正。

石油工业部石油勘探司

1985年10月

## 序 言

天然气是地球上重要能源之一，也是目前世界能源发展的一个方向。天然气工业的发展状况，从一个侧面反映了一个国家科学和生产的水平。

近年来，我国在加速发展石油工业的过程中，天然气工业也有了一定的发展，找到和开发了一批气田。通过勘探实践证明，我国不仅拥有巨大的天然气资源蕴藏量，而且从天然气成因分类来看，也是丰富多彩的，不仅有深层的裂解气，也有中、浅层热解气（伴生气、煤成气）和生物气。从地层系统上看，从中、上元古界到第四系普遍找到了气藏。在天然气的分布领域上，除四川盆地外，在南海的莺歌海海域已证实有巨大储量的天然气。中原地区、冀中拗陷、塔里木盆地、东海海域都发现了高产气井。此外，近期在松辽盆地、辽东湾、鄂尔多斯盆地的西缘和东部都有了重要发现，展示了我国天然气发展的美好前景。

天然气是一种优质的燃料，它的发热值相当于一般煤的2倍左右。随着天然气工业的发展，我国的气化城镇日益增多，将为人民创造更为方便、舒适的生活条件。

天然气不仅是一种优良的燃料，更是一种优质的石油化工原料。1985年，在我国天然气的总产量中，用于各种化工原料的天然气量占44.5%，产生了巨大的经济效益。

我国在发展天然气工业方面取得了一定的成绩，但与世界先进国家相比，还存在一定的差距，主要表现在油气的产、储量相对失调。为了增加天然气储量，首先要培养和建立一支天然气勘探和科学研究队伍，以提高天然气勘探工作的效率。作者在编著本书的过程中，较系统的吸收和综合了我国及世界上天然气的生产实践和科研工作所积累的成果，并充分利用自己研究天然气的主要成果。该书曾多次在“天然气培训班”作为教材试用，并根据试用结果反复修改。其目的是为了尽快提高我国天然气地质勘探人员的技术水平，为提高天然气勘探工作效率作些微薄的贡献。

本书在编著过程中，引用了我国天然气勘探和科研方面的大量实际资料，包括天然气有机地球化学，气的运移、聚集和气藏形成条件等方面内容。突出了天然气地质，是一本有别于石油地质学的科学专著，与国内外已出版的、为数不多的天然气地质学也有其一定的特色。

本书第一章由戴金星、郝石生合写，第二、三、四、十章由戴金星执笔，第五、六、七、八章由戚厚发撰写，第九章由郝石生完成。作者虽对该书作了很大努力，但由于是对该学科的初步尝试，加以水平有限，恳请专家和读者予以批评指正。

# 目 录

|                               |         |
|-------------------------------|---------|
| <b>第一章 绪论</b> .....           | ( 1 )   |
| 第 1 节 概述 .....                | ( 1 )   |
| 第 2 节 天然气的分类 .....            | ( 5 )   |
| <b>第二章 天然气的组分及其成因</b> .....   | ( 9 )   |
| 第 1 节 概述 .....                | ( 9 )   |
| 第 2 节 天然气的化学组分及其成因 .....      | ( 9 )   |
| <b>第三章 天然气的同位素</b> .....      | ( 30 )  |
| 第 1 节 天然气的碳同位素组成 .....        | ( 30 )  |
| 第 2 节 天然气的氢同位素组成 .....        | ( 42 )  |
| 第 3 节 天然气的硫同位素组成 .....        | ( 48 )  |
| 第 4 节 天然气的氮同位素组成 .....        | ( 50 )  |
| 第 5 节 天然气的氦同位素组成 .....        | ( 52 )  |
| 第 6 节 天然气的氩同位素组成 .....        | ( 53 )  |
| <b>第四章 鉴别煤成气和油型气的指标</b> ..... | ( 55 )  |
| 第 1 节 普遍性指标 .....             | ( 55 )  |
| 第 2 节 局部性指标 .....             | ( 63 )  |
| <b>第五章 天然气的运移</b> .....       | ( 72 )  |
| 第 1 节 概述 .....                | ( 72 )  |
| 第 2 节 天然气运移的相态和方式 .....       | ( 72 )  |
| 第 3 节 天然气运移的动力 .....          | ( 79 )  |
| 第 4 节 天然气运移的时期、方向和距离 .....    | ( 86 )  |
| <b>第六章 天然气藏的形成与破坏</b> .....   | ( 90 )  |
| 第 1 节 地下天然气的赋存状态 .....        | ( 90 )  |
| 第 2 节 天然气藏形成及富集的基本地质条件 .....  | ( 96 )  |
| 第 3 节 天然气的散失与气藏的破坏 .....      | ( 109 ) |
| <b>第七章 气藏类型</b> .....         | ( 111 ) |
| 第 1 节 概述 .....                | ( 111 ) |
| 第 2 节 气藏类型 .....              | ( 111 ) |
| 第 3 节 非常规天然气类型 .....          | ( 118 ) |
| <b>第八章 天然气资源量预测方法</b> .....   | ( 123 ) |
| 第 1 节 概述 .....                | ( 123 ) |
| 第 2 节 天然气资源量预测方法之一——生聚法 ..... | ( 124 ) |
| 第 3 节 天然气资源量预测方法之二——圈闭法 ..... | ( 133 ) |

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| <b>第九章 天然气分布的某些规律</b> .....    | (136) |
| 第1节 富气区的大地构造分布 .....           | (136) |
| 第2节 天然气储量的时代分布特点 .....         | (137) |
| 第3节 生气中心及源岩的时代分布 .....         | (138) |
| 第4节 天然气储量按埋藏深度的分布 .....        | (138) |
| 第5节 沉积盆地中油气相态的分异 .....         | (139) |
| 第6节 天然气与煤、石油在分布上的关系 .....      | (142) |
| <b>第十章 含气盆地、大气田和典型气田</b> ..... | (143) |
| 第1节 含气盆地的分类 .....              | (143) |
| 第2节 大气田 .....                  | (144) |
| 第3节 四川油型气盆地 .....              | (154) |
| 第4节 维柳伊煤成气盆地 .....             | (163) |
| 第5节 西西伯利亚盆地北部煤型生物气区 .....      | (168) |
| 第6节 特兰西瓦尼亚生物气盆地 .....          | (180) |
| 第7节 中欧煤成气盆地 .....              | (185) |
| <b>参考文献</b> .....              | (197) |

# 第一章 绪 论

## 第1节 概 述

目前,对天然气的涵义有两种认识:广义的天然气是指自然界中的一切气体<sup>[1]</sup>,即包括气圈、水圈、岩石圈以至地核和地幔中一切自然气体;狭义的天然气系指一般以烃类气为主(在少数情况下也有以二氧化碳或氮为主,极个别情况有以硫化氢为主)的,分布于岩石圈、水圈以至地核和地幔中的气体。天然气地质学主要研究狭义的天然气,当然本书也不例外。

人类至少在三千多年前对天然气就有过记述,最初把在自然界燃烧的天然气叫做“长明火”。我国是世界上发现、记述和利用天然气最早的国家之一。公元前1122~770年,西周时期的《易经》就记载了“泽中有火”的现象,它可能是天然气出露湖泊水面的燃烧。晋朝常璩在《华阳国志》记述了公元前221~210年秦始皇时代在四川临邛(今邛崃县)开采天然气煮盐的场面“有火井,夜时光映上昭。民欲其光,以家火投之,顷许如雷声,火焰出,通耀数十里。以竹筒盛其光藏之,可拽行终日不灭也。井有二水,取井火煮之,一斛水得五斗(斗)盐。”<sup>①</sup>公元初班固描述了陕西省鸿门(今神木县西南)“有天封苑火井祠,火从地出”<sup>②</sup>的天然气苗燃烧情景。在15世纪以前,四川盆地已普遍发现天然气,在11世纪至15世纪开始大规模用天然气煎盐<sup>[2]</sup>。在汉朝就发现了四川自流井天然气,自流井气田开采约有两千年历史,是世界上开发最早的气田<sup>[3]</sup>。我国古代常称天然气为“火井”、“井火”、“煤气”、“阴气”、“毒气”、“火池”、“地火”、“圣灯”、“火龙”和“火泉”<sup>[4]</sup>。

在16世纪与17世纪之交,荷兰物理学家凡·格利蒙特首次使用天然气(Gas)这个名词,但不能肯定就是他的创用<sup>[5]</sup>。

天然气作为净洁的能源越来越受到人们的欢迎,天然气作为廉价的化工原料,在化学工业上用途越来越广泛。因此,天然气的研究日益被重视,天然气的勘探日益被加强。结果,发现的天然气田越来越多,探明的天然气储量越来越大。

世界油气工业实践证明,天然气工业最初均依附于石油工业,处于从属的地位,这主要是因为长期以来,总是将石油和天然气作为一个整体的勘探对象,而在油气勘探过程中,又往往将石油的勘探作为重点,将天然气主要看作单一的有机成因,即认为工业性天然气均来自腐泥型和混合型源岩,否定或轻视含煤地层在成气过程中的重大意义。近二三十年来,特别是最近十几年来,天然气工业逐渐得到发展、扩大,在一些油气大国中,例如苏联、美国,天然气工业已从滞后状况向超前发展,这是因为通过大量实践,逐步认识到石油与天然气既存在共性,又有许多不同:组成天然气的各组分气体的分子比石油的小

①引自《中国石油工业发展史》,第一卷,28页。

得多,生成天然气的地质环境较石油更为普遍,生气的范围广、温度段大、时间长、深度大,从浅层到深层都有天然气生成的条件,因而世界上天然气生成的规模要比石油的规模大。

关于世界上天然气总储量(包括可采储量+探明储量+远景储量),各学者预测不一: M.T.哈尔布蒂估算为约 $271 \times 10^{12} \text{m}^3$ ; A.A.迈耶霍夫推算为 $220 \times 10^{12} \text{m}^3$ ; B.格罗斯林估计为 $320 \sim 800 \times 10^{12} \text{m}^3$ ; L.维克斯等认为可采气储量为 $170 \sim 190 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。

从天然气勘探的角度出发,下列问题值得注意。

1.天然气分子远比石油分子小得多,而扩散能力则比石油要强得多,这就导致它的移动能力要比油大得多,故天然气可以由气源区通过很厚的地层,或经过多个不整合面及断裂带,比较容易地运移到几十公里,以至百余公里以外的地区而聚集起来。因而天然气勘探者要比石油勘探者具有更高的想象力和冒险精神,同时也要求在工作中更为细心,工作质量要求的更高。

2.由于天然气可以是多来源的,这就必然造成在寻找天然气的领域上,无论是在广度还是在深度上(例如:我国工业性天然气最浅在柴达木盆地盐湖气田,深度仅88.8m,最深在四川盆地老关庙构造上,深度为7153.5~7175m),都比找油更为广阔。把盆地内各种气源都搞清楚,显然比研究“生油中心”要困难得多,它所要求的信息和所应进行的工作也要更为广泛,对它的认识也往往需要更为细心和多次实践。

3.天然气除部分与石油共生外,大部分呈单独的气藏和气田,有其固有的特征,因此勘探天然气和寻找石油是两种不同的体系。

4.天然气对储集条件的下限要求较低。石油可流过的孔道直径要求在 $50 \mu\text{m}$ 以上,但天然气仅为 $5 \mu\text{m}$ 就可以了。因而很多低孔隙度、渗透率的岩层不适于储油,但可作为储气层。除在碎屑岩及碳酸盐岩发现过气藏外,在具有次生缝洞的页岩和结晶岩中都曾发现过一定数量的天然气。天然气得以保存的重要条件是要求有质量较好而连续分布的盖层。

5.一般天然气的主要组分是由甲烷及其同系物、二氧化碳和氮组成,这些气体均具无色、无味的特点。故在钻井过程中,难以观察它的存在,即使是及时检测岩心和岩屑,也难免漏掉气层。尤其在泥浆比重偏大的情况下,更是如此。因而在钻井过程中必需及时进行高灵敏度的气测以及系列的测井和测试工作,以保证不漏掉气层并及时发现气层。故发现气层比发现油层要求有更仔细严格的作风,更配套系列的设备和测验技术。

6.深层气的勘探比深层油的勘探有利,这是由于:①深度大于4500m,地温一般高于 $150^\circ\text{C}$ ,石油开始裂解为天然气,故工业性油层发现很少,天然气存在的温度不低于 $250^\circ\text{C}$ ,甲烷在 $500^\circ\text{C}$ 才裂解,故从理论上推测天然气至少在8000~9000m深度是存在的。如在美国西内部盆地贾伊费尔德气田的最深气藏深达8088m;②一般储集层在4500m以下孔隙度减小很快,作为储油层几乎难以合格,但还可以作为储气层;③气的压缩比要比油的大得多,在7000m深处的甲烷,到地面的单位体积就要增大1600倍。因此相对来说一般深层气储量大、产量高。

7.尖端技术的应用大大提高了深层天然气勘探的效率。在美国,将应用于太空技术中的适应高速度、抗腐蚀合金用于钻具及井下作业工具上,使深井钻探速度加快。在中硬地层条件下,4500m的井约50天钻完,6000m的井约4个多月钻一口(目前四川地区是两年钻一口井)。应用于太空技术中的耐高温、高压的密封材料,用于深井作业上,可以在6000~7000m深度搞大型酸化压裂,以抗压强度比石英砂高七倍以上的高硬度人造烧结硅酸铅

小球取代石英砂作支撑剂，从而大大提高了深井压裂的成功率。过去深井压裂所用的石英砂，当卸压后地层闭合，所压入的石英砂被岩层静压压成粉末，实际成为堵塞剂。由于支撑剂的突破，使 $0.5 \sim 0.1 \text{m}^2$ 的深部气层在压裂后获得中、高产。这一技术突破，使美国和加拿大发现了大量的深层气田。

8. 天然气的大量储存和散装运输比油要困难一些，价格也昂贵些。一旦发现气田就要涉及到一系列净化处理、铺设管道外输和复杂的配气系统建设等问题。如果这些相应的环节跟不上，反过来必然又影响天然气的勘探与天然气工业的发展。

就全球来看，石油产量、储量增长的高峰期已经过去，但天然气产量、储量的发展高峰期可能在21世纪初出现（图1-1，表1-1）。这是因为世界上探明的天然气资源要比石油的大，没有找到的天然气资源也比石油的潜在资源大得多。从表1-1可见，在本世纪60年代至今，世界上天然气的储量和产量的增长比石油更快。这表明天然气在世界能源结构中的比例日益变大。

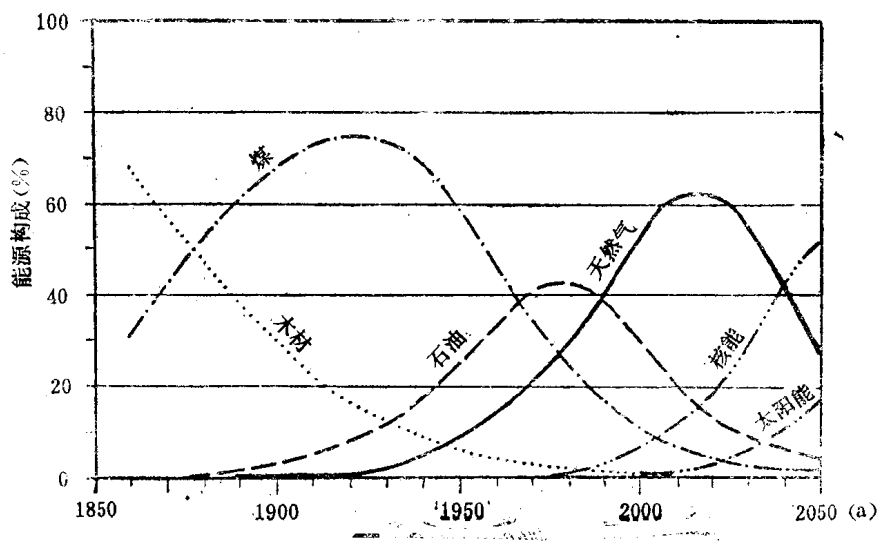


图1-1 世界主要能源发展替代趋势（据 C. Marchetti, 1979）

表 1-1 国外天然气、石油储量和产量增加比较表

| 年<br>代 | 天然气( $10^9 \text{m}^3$ ) |     |         |     | 石油( $10^8 \text{t}$ ) |     |         |     |
|--------|--------------------------|-----|---------|-----|-----------------------|-----|---------|-----|
|        | 储 量                      | 增加% | 产 量     | 增加% | 储 量                   | 增 加 | 产 量     | 增加% |
| 1950   | 80000                    |     | 1851    |     | 130                   |     | 5.3845  |     |
| 1960   | 169900                   | 112 | 4483    | 142 | 364                   | 181 | 10.8142 | 100 |
| 1970   | 416105                   | 145 | 10282   | 129 | 739.92                | 103 | 23.2665 | 115 |
| 1980   | 768811                   | 85  | 15435   | 50  | 877.88                | 17  | 28.6293 | 23  |
| 1985   | 977269                   | 27  | 17567.5 | 14  | 933.86                | 6   | 25.5034 | -11 |

由上可知，世界上已发现的天然气储量大约是推测总储量的一半，还有大量天然气储



量还有待今后发现。

1987年初,世界上探明天然气储量已突破 $100 \times 10^{12} \text{m}^3$ 大关,即为 $102.6154 \times 10^{12} \text{m}^3$ ,探明天然气储量在 $1 \times 10^{12} \text{m}^3$ 以上的国家有14个(表1-2)。

表 1-2 世界上天然气探明储量大于 $10^{12} \text{m}^3$ 的国家(1977.1.1)

| 名次 | 国家    | 探明储量( $10^8 \text{m}^3$ ) | 名次 | 国家    | 探明储量( $10^8 \text{m}^3$ ) |
|----|-------|---------------------------|----|-------|---------------------------|
| 1  | 苏联    | 438650                    | 8  | 加拿大   | 28187                     |
| 2  | 伊朗    | 127350                    | 9  | 墨西哥   | 21650                     |
| 3  | 美国    | 52468                     | 10 | 荷兰    | 19923                     |
| 4  | 卡塔尔   | 43016                     | 11 | 委内瑞拉  | 16697                     |
| 5  | 沙特阿拉伯 | 35089                     | 12 | 马来西亚  | 13992                     |
| 6  | 阿尔及利亚 | 29998                     | 13 | 印度尼西亚 | 13992                     |
| 7  | 挪威    | 29200                     | 14 | 尼日利亚  | 13301                     |

除苏联的为探明的、半探明的和一些可能的储量,加拿大的为探明的和一些半探明的储量外,其它国家均为探明的可采储量。

(据Oil and Gas Journal, 1986年年终号)

1986年世界天然气总产量达 $18022 \times 10^8 \text{m}^3$ ,年产量在 $200 \times 10^8 \text{m}^3$ 以上的国家有10个(表1-3),其中年产量最高的是苏联,占世界年总产量的38%,这显然与其探明天然气储量也占世界总储量之冠(占43%左右)有关。在1961~1985年,苏联天然气产量逐年递增,特别是从1971~1975年、1976~1980年和1981~1985年这15年间增加量越来越大,每五年间平均年增长分别为 $183 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ , $291 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ 和 $357 \times 10^8 \text{m}^3/\text{a}$ ,这种持续高速增长,是与相应期间天然气探明的储量有关。例如:1971~1975年探明的储量增长 $10.5 \times 10^{12} \text{m}^3$ ,1976~1980年增长 $13.1 \times 10^{12} \text{m}^3$ 和1981~1985年增长 $5.6 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。

表 1-3 世界上1986年年产天然气超过 $200 \times 10^8 \text{m}^3$ 的国家

| 名次 | 国家  | 年产量( $10^8 \text{m}^3$ ) | 名次 | 国家    | 年产量( $10^8 \text{m}^3$ ) |
|----|-----|--------------------------|----|-------|--------------------------|
| 1  | 苏联  | 6853.0                   | 6  | 墨西哥   | 354.4                    |
| 2  | 美国  | 4722.7                   | 7  | 阿尔及利亚 | 350.4                    |
| 3  | 加拿大 | 896.6                    | 8  | 罗马尼亚  | 342.4                    |
| 4  | 荷兰  | 742.3                    | 9  | 印度尼西亚 | 327.1                    |
| 5  | 英国  | 462.4                    | 10 | 挪威    | 256.4                    |

(据Oil and Gas Journal, 1987.3.9)

解放以来,我国天然气工业有了很大的发展,解放前仅发现两个气田(石油沟、圣灯山),至1986年发现气田总数则达近百个。1950年年产天然气仅 $646 \times 10^4 \text{m}^3$ ,1986年年产达 $133.84 \times 10^8 \text{m}^3$ (不包括台湾省),即在37年内增加2071倍。尽管解放后我国天然气工业有了很大的发展,但与世界上天然气工业相比,以及国家对其要求还相差很大。突出的矛盾一是油气产量的能量比失调,即我国的为9:1,世界上的约为1.5:1,美国的

为1.1:1, 苏联的为0.9:1; 二是探明天然气储量尚少, 并且在已探明的储量中, 能适于高速开采的气层气储量的比例不大, 仅占43%左右; 三是大中型气田少, 小型气田多。

探明天然气储量少、气层气储量占的比例少和大中型气田少, 是阻碍我国天然气工业快速发展的主要问题。但我国具有迅速发展天然气工业的良好地质条件: ①天然气资源丰富, 据有关专家推测<sup>[6,7,8]</sup>, 我国天然气资源量在 $15\sim 17\times 10^{12}\text{m}^3$ 至数十万亿立方米。目前天然气探明储量占资源量的比例比石油的低2~3倍, 说明我国今后天然气工业有比石油工业发展更快的基础; ②我国沉积岩面积为 $669\times 10^4\text{km}^2$ 左右, 沉积岩体积约 $2257\times 10^4\text{km}^3$ 。与国外沉积岩面积和体积大的苏联、美国和加拿大等国相比, 该三国单位面积和单位体积沉积岩探明天然气储量分别比我国目前的高6~37倍和6~35倍; ③气源岩类型齐全广布。腐泥型和混合型源岩在我国广泛分布, 面积约 $500\times 10^4\text{km}^2$ , 由其形成的油型气约占我国目前探明气层气储量的85%。虽然含煤地层源岩分布面积没有油型气源岩的大, 但由于其成气有机质的丰度比油型气源岩一般高3~4倍, 故其分布区形成的煤成气浓度大而肥, 是寻找大中型气田的有利地区。我国最大气田是煤成气田(崖13-1气田), 世界发现储量超过 $1\times 10^{12}\text{m}^3$ 的14个特大气田, 其中煤成气田占8个就是例证。由上可见, 只要加强天然气勘探与研究, 注意到天然气勘探的特点, 正确处理油和气勘探的关系, 我国天然气工业定会快速发展起来。

本世纪50年代之前, 天然气的勘探和研究基本依附在石油勘探与研究之中。50年代之后, 在过去天然气勘探与研究成果积累的基础上, 出现了天然气地质学的萌芽。至70年代, 天然气地质学作为一个分支学科基本形成, 世界上第一本较系统的天然气地质学<sup>[5]</sup>出版就是一个标志。

## 第2节 天然气的分类

天然气的分类方法繁多, 根据不同的分类原则可将天然气分为不同的类型。通常, 可按天然气生成的原始物质的性质、天然气形成的成熟度或化学作用形式、天然气的组分、天然气的产状和天然气经济价值等等对天然气进行分类。

### 一、根据天然气生成的原始物质的分类

#### 1. 无机气

成气的原始物质是无机物。目前对这种气的研究还较薄弱, 它往往通过板块的俯冲带、缝合线, 裂谷带和“冷断层”等从地球深处向地表运移。例如: 我国云南腾冲硫磺塘喷出的天然气; 加勒比海分隔开曼海槽和牙买加水下山岭的深大断裂附近外逸的天然气。

#### 2. 有机气

成气的原始物质是有机质。有机气再根据源岩类型又可分为以下两种。

(1)油型气 I、II型源岩在未成熟期、成熟期和过成熟期生成的天然气。一般油田气(伴生气)和气顶气为油型气。

(2)煤成气 腐殖型含煤地层中的煤及其分散有机质在成煤作用中, 或III型源岩在未成熟期、成熟期和过成熟期生成的天然气。煤成气的同义词有腐殖气<sup>[9]</sup>、煤系天然气或煤系气<sup>[10]</sup>和煤型气<sup>[11]</sup>。

煤成气在天然气工业中具有重要的意义。世界上有许多由煤成气田组成的含气盆地，例如卡拉库姆盆地、西西伯利亚盆地北部、维柳伊盆地、中欧盆地、库珀盆地和阿科马盆地等。有些国家煤成气在天然气的储量中占优势，例如联邦德国探明的天然气储量中93%是煤成气，荷兰探明的天然气储量中煤成气也占90%以上，苏联大约有65%的探明天然气资源与含煤地层有关<sup>[12]</sup>，世界最大的乌连戈伊气田是煤成气田，其探明天然气原始储量为 $78064 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

## 二、根据天然气形成的成熟度或化学作用形式的分类

### 1. 生物气

I、II、III型源岩在泥炭化和成岩阶段未成熟期内 ( $R_o < 0.5\%$ )，通过甲烷生成菌的生物化学作用形成的天然气。此阶段I、II、III型源岩主要是成气，均为干气。由于甲烷生成菌活动温度不能高于 $75^\circ\text{C}$ ，故生物气是在 $75^\circ\text{C}$ 以下形成的，最适于甲烷生成菌大量繁殖的温度是 $35 \sim 42^\circ\text{C}$ <sup>[13]</sup>，也是生物气形成强度最大阶段。生物气在天然气工业中具有重要地位，占世界天然气总探明储量的20%以上<sup>[14]</sup>。

### 2. 热解气

I、II、III型源岩在成熟期内 ( $R_o = 0.5 \sim 2.0\%$ )，通过热催化降解作用形成的天然气，均为湿气，在成气同时还形成石油。不同类型源岩形成油气的比例不同。I、II型源岩在此阶段以成油为主，成气为辅，气往往溶解于石油之中，故常称之为溶解气或伴生气；含煤地层源岩在此阶段则以成气为主成油为辅。

### 3. 裂解气

I、II、III型源岩在过成熟期内 ( $R_o > 2\% \sim 5\%$ )，通过热裂解作用形成的天然气。此阶段各类源岩主要生成以甲烷为主的干气，在本阶段之前生成的液态烃，在高温作用下也裂解为热稳定性高的甲烷。

## 三、根据天然气组分的分类

由于天然气一般由多种组分组成。故此种分类方法较多，通常以某有用组分的多寡来分类。

### 1. 按烃类气湿度的分类

所谓湿度系指重烃气（主要是 $\text{C}_2\text{-}_4$ ）组分含量与甲烷组分含量的比值 ( $\text{C}_2^+/ \text{C}_1$ )。

一般把含95%或更多甲烷的天然气称为干气 ( $\text{C}_2^+ / \text{C}_1 < 5\%$ )，甲烷含量小于95%的则称为湿气 ( $\text{C}_2^+ / \text{C}_1 > 5\%$ )。但也有些学者对划分干气和湿气的标准有不同认识：P. A. 迪基认为不含可凝烃类的非伴生气称为干气，而把每立方米含有4l以上的可凝烃类的气则称为湿气<sup>[15]</sup>；K. П. Кофанов把重烃气含量从0~5%的称为干气，6~10%称为半湿气，11~25%称为湿气，大于25%的叫高湿气<sup>[16]</sup>；F. B. Curtis(1968)则依据天然气含烃组分的差异，把含 $\text{CH}_4 \sim \text{C}_4\text{H}_{10}$ 的称为干气，含 $\text{CH}_4 \sim \text{C}_{10}\text{H}_{22}$ 的命名为湿气，含 $\text{CH}_4 \sim \text{C}_{16}\text{H}_{34}$ 的叫凝析气等。

### 2. 按硫化氢组分的分类

有关学者根据天然气含硫化氢量的不同提出如下的分类。

戴金星把天然气中含硫化氢量在70%以上的称硫化氢型气；含量在2~70%的叫高硫

化氢型气；含量在0.5~2%的划为低硫化氢型气；含量大于零，小于0.5%的为微（贫）硫化氢型气；不含硫化氢的命名为无硫化氢型气<sup>[17]</sup>。

G.I. Amursky等把天然气中含硫化氢量在5%以上称为高含硫气；含量在1~5%的叫中含硫气；含量0.3~1.0%的划为含硫气；含量0.0014~0.3%为低含硫气；含量小于0.0014%的命为无硫气<sup>[18]</sup>。

### 3. 按氦氩比值(He/Ar)的分类

K.П.Флоренский把He/Ar<0.4的称为现代气，He/Ar在0.4~4的叫混合气，He/Ar>4的命之为古代气<sup>[19]</sup>。

## 四、根据相态的分类

### 1. 游离气

呈气态，能独立运移、聚集。有重要工业价值的天然气是游离气聚集成的气藏气、气顶气和凝析气。

### 2. 溶解气

天然气溶解于液相的石油或水中，液相是气的存在体和载体。

### 3. 吸附气

气体分子被固体表面分子所吸引，在吸附体表面形成多层分子组成的凝缩弹性气体

表 1-4 按存在条件、化学成分和成因划分的天然气分类（根据B.A.Соколов，1966）

| 气体类型                    | 化 学 成 分  |  |  | 气 体 的 成 因  |
|-------------------------|--|--|--|--|
|                         | 主要组分   | 少见为高浓度的组分  | 微 组 分  |  |
| I 大气                    | N <sub>2</sub> 、O <sub>2</sub> 、Ar、CO <sub>2</sub>       | —  | O <sub>2</sub> 、NO <sub>2</sub> 、N <sub>2</sub> O、H <sub>2</sub> 、惰性气                                  | 化学成因，生物化学成因和放射性成因气的混合物   |
| II 地表气和地下水沉积层的气；土壤和母岩的气 | CO <sub>2</sub> 、N <sub>2</sub> 、O <sub>2</sub> 和大气圈的其它气 | —  | CH <sub>4</sub> 、N <sub>2</sub> O、CO、H <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> S、NH <sub>3</sub> 、挥发性有机质、空气中来的惰性气 | 主要是生物化学成因气，并混有其它气。由于与大气进行气交换，因而在土壤中生成的部分气和其它气均与空气混合                                |
| 沼泽气和泥炭气                 | CH <sub>4</sub> 、CO <sub>2</sub> 、N <sub>2</sub>         | —  | H <sub>2</sub> 、CO、N <sub>2</sub> O、NH <sub>3</sub> 、H <sub>2</sub> S、挥发性有机质、空气中来的惰性气                  | 主要是生物化学成因气，并混有其它气，有时也有空气。气中的氮气大部分是空气中的氮气   |
| 海洋的水下沉积物气               | CO <sub>2</sub> 、CH <sub>4</sub> 、N <sub>2</sub>         | —  | H <sub>2</sub> 、NH <sub>3</sub> 、H <sub>2</sub> S、挥发性有机质、空气中来的惰性气                                      | 主要是生物化学成因的气。据某些分析结果，深海沉积物的气中主要的组分是CO <sub>2</sub> 、NH <sub>3</sub> 、N <sub>2</sub> |
| III 沉积岩气体；油田气           | CH <sub>4</sub> 、重烃                                      | N <sub>2</sub> 、CO <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> S<br>He、Ar | H <sub>2</sub> 、惰性气  | 主要是化学成因气，并混有生物化学成因和别的成因的气。在深度很大的地方，由于温度的升高，微生物的正常活动停止了，因而不存在生物化学气                  |
| 气田气                     | CH <sub>4</sub>  | 重烃、N <sub>2</sub> 、CO <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> S、He、A  | H <sub>2</sub> 、惰性气  | —  |

续表

| 气体类型                     | 化 学 成 分  |   |  | 气 体 的 成 因               |
|--------------------------|--|---|--|-------------------------|
|                          | 主要组分   | 少见为高浓度的组分   | 微组分  |                         |
| 煤田气                      | CH <sub>4</sub>  | CO <sub>2</sub> 、N <sub>2</sub><br>H <sub>2</sub> | 重烃、H <sub>2</sub> S、<br>NH <sub>3</sub> 、惰性气 | —                       |
| 地层水气 <sup>①</sup>        | CH <sub>4</sub> 、CO <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> 、<br>N <sub>2</sub> 、O <sub>2</sub> | 重烃  | 重烃、H <sub>2</sub> 、惰性气                       | —                       |
| 盐层气                      | CH <sub>4</sub> 、H <sub>2</sub> 、N <sub>2</sub> 、                                    | H <sub>2</sub> S、重烃H <sub>2</sub> 、               | 惰性气  | —                       |
| 分散气                      | CO <sub>2</sub>  | H <sub>2</sub> S、重烃N <sub>2</sub>                 | 惰性气  | —                       |
| IV变质<br>岩气               | CO <sub>2</sub> 、N <sub>2</sub> 、<br>H <sub>2</sub>                                  | CH <sub>4</sub> 、H <sub>2</sub> S、<br>重烃          | 惰性气  | 化学成因气并混有辐射化学和放射成因气      |
| V花岗岩圈和玄<br>武岩圈气          | CO <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub>  | N <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> S、<br>HCl、HF       | CH <sub>4</sub> 、惰性气                         | 化学成因气并混有辐射化学和放射成因气      |
| VI火山气：<br>岩浆气（来自熔<br>岩湖） | CO <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> 、SO <sub>2</sub> 、<br>HCl、HF                         | CO、N <sub>2</sub> 、NH <sub>3</sub>                | CH <sub>4</sub> 、惰性气                         | 化学成因气并混有辐射化学和放射成因气      |
| 喷气孔喷<br>气                | CO <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> 、H <sub>2</sub> S、<br>SO <sub>2</sub>                | CO、HCl、<br>HF、N <sub>2</sub>                      | CH <sub>4</sub> 、惰性气                         | 火山气是在某种程度上起了变化的<br>上地幔气 |

① 按B. A. 索科洛夫的分类法，沉积岩气也包括地层水气，因其数量远高于气田气含量（Л. М. Зорькин, 1973）。

膜。此种气体膜的气就是吸附气，它失去了自由运移的能力。

#### 4. 固体气

在自然界存在的低温条件下，天然气(氢、氦、氩除外)能够与水结合，形成结晶水化物(固体气)。它为密度0.88~0.90g/cm<sup>3</sup>的固体结晶物质，通式为M·H<sub>2</sub>O，式中M为形成水化物的气体分子。固体气可视为固体溶液，其中“溶剂”是由水分子组成的立方晶系的结晶骨架，其内分布着“溶解”气分子[5]。

固体气的同义词有气水化物、气水络合物、甲烷水化物、甲烷水合物和固态气水合物。

1966年，B. A. 索科洛夫根据存在条件、化学成分和成因的综合原则，对天然气进行了分类(表1-4)[5]。

可以把两个分类原则分出的天然气名称，进行复合命名，例如由I、II型源岩在生物化学作用阶段(未成熟阶段)形成的天然气，可称之为油型生物气，我国红岗油田明水组的油型生物气就属此类。由含煤地层在泥炭化和褐煤阶段(未成熟阶段)形成的天然气称为煤型生物气，例如苏联西西伯利亚盆地北部赛诺曼阶的煤型生物气。以此类推，可进行多种复合分类。

## 第二章 天然气的组分及其成因

### 第1节 概 述

除个别特殊情况，天然气由单一气体组成外，绝大多数是气体化合物与气体元素的混合物。天然气中常见气体化合物和气体元素有：烃类气( $C_{1-5}$ )、二氧化碳、氮、硫化氢、汞蒸气、氢、氧、一氧化碳、二氧化硫和稀有气体（氦、氖、氩、氪、氙）。

天然气中最常见并往往占比例很大的可燃性天然气，在国民经济中具有重大的意义，既可以作一系列重要化工产品的原料，又是洁净的能源。

由于天然气中的各组分比石油的各组分的分子小、重量小、粘度小和被岩石吸附能力小，而运移速度快、扩散能力强和运移途径长等特征，所以天然气中，特别是聚集在一个气藏或气苗中诸气体组分，除同一成因外，也常见到不同成因气体组分的混合物。因此，单独了解和研究各自气体组分的各种成因，对天然气的，特别是单一气藏多源成因的判别是有益的，同时对天然气运移和气源对比研究有重要意义。

### 第2节 天然气的化学组分及其成因

本节主要阐述天然气中常见的化合物气体和元素气体的特征及其成因。

#### 一、甲烷( $CH_4$ )及其成因

##### 1. 甲烷的物性特征

甲烷是无色、无味、无毒的可燃性气体，是重量最轻的、分子最小的及结构最简单的碳氢化合物。从有机成因观点来看，它是最简单的有机化合物，也是最简单的脂肪族烷烃。甲烷具有高的热稳定性，明显开始分解的温度不低于 $600^{\circ}C$ 。在 $1atm$ 与 $0^{\circ}C$ 时，每立方米重 $0.716kg$ 。

在沉积层中甲烷的平均含量不超过 $48.5g/t$  ( $67cm^3/kg$ )，在地球的结晶壳中其平均含量为 $0.09g/t$  ( $0.12cm^3/kg$ )<sup>[19]</sup>。甲烷一般是天然气中最常见又往往是占比例最大的一个组分。它在油、气田中大量富集，在煤系地层中，特别在煤层中普遍存在。由于它比重几乎比空气轻一半（表2-1），故在煤矿里往往停积在坑道的上部。坑道中甲烷含量增高给煤矿安全带来很大危险，当矿井空气里混有 $5\sim 16\%$ 的甲烷，并接近高温热源时便可发生爆炸。

甲烷的一些主要物理参数见表2-1。

##### 2. 甲烷的成因

###### (1) 有机成因

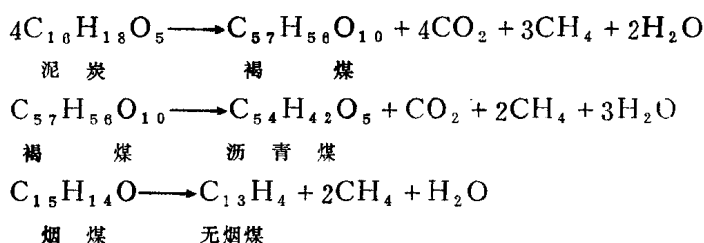
①油型气型 腐泥型有机物或I、II类干酪根在未成熟、成熟和过成熟阶段所形成的甲烷。

②煤成气型 由腐殖型煤系或亚煤系中煤与分散的有机质形成的甲烷。成煤作用各个

表 2-1 天然气中常见组分主要物性参数表

| 项 目<br>气体名称 | 比 重             | 熔 点<br>(1atm)°C | 沸 点<br>(1atm)°C | 临界温度<br>°C | 临界压力<br>(atm) | 分子直径<br>(Å) |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------|---------------|-------------|
| 甲 烷         | 0.554           | -182.48         | -161.49         | -82.57     | 45.44         | 3.8         |
| 乙 烷         | 1.038           | -183.23         | -88.60          | 32.27      | 48.16         | 4.4         |
| 丙 烷         | 1.522           | -187.69         | -42.04          | 96.67      | 41.94         | 5.1         |
| 丁 烷         | 正丁烷             | 2.006           | -138.36         | -0.50      | 152.03        | 37.47       |
|             | 异丁烷             | 2.006           | -159.61         | -11.72     | 134.94        | 36.00       |
| 戊 烷         | 正戊烷             | 2.491           | -129.73         | 36.07      | 196.50        | 33.25       |
|             | 异戊烷<br>(2-甲基丁烷) | 2.491           | -159.91         | 27.88      | 187.28        | 33.37       |
|             | 新戊烷<br>(四甲基甲烷)  | 2.491           | -16.57          | 9.50       | 160.63        | 31.57       |
| 二氧化碳        | 1.519           | -56.00          | -78.50          | 31.06      | 72.88         | 3.9         |
| 氮           | 0.967           | -209.76         | -195.78         | -146.89    | 33.55         | 3.8         |
| 硫化氢         | 1.177           | -82.89          | -60.33          | 100.39     | 88.87         | 3.6         |
| 氫           |                 | -189.20         | -185.87         | -122.35    | 47.90         | 2.9         |
| 氦           | 0.138           | -272.00         | -268.70         | -267.90    | 2.25          | 2.0         |
| 氖           | 0.069           | -259.20         | -252.70         | -239.90    | 12.80         | 2.8         |

阶段都可形成煤成气型甲烷，可由下列示意反应式表示



煤成气型甲烷是煤成气的主要组成部分，我国中原油田文留沙四段气藏、四川盆地中坝气田须二段气藏、鄂尔多斯盆地胜利井气田、苏联西西伯利亚盆地北部赛诺曼阶气藏和澳大利亚库珀盆地二叠系气藏中甲烷均属煤系成因的。

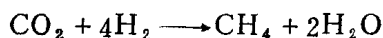
### (2) 无机成因

无机成因的甲烷无疑是存在的，地球内部往往向地壳上部直至地表和洋底排出大量的含甲烷量不等的天然气。

在国内外不乏无机成因的甲烷。例如云南省腾冲县黄瓜菁硫磺塘火山期后的热喷气中含0.396%的甲烷；含甲烷90%的天然气与热液蒸汽一起从肯尼亚的奈瓦沙湖裂谷中的太古代基底向上运移；在加勒比海将牙买加水下山岭与开曼海槽隔开的深大断裂附近，发现大规模以甲烷为主的天然气外逸，每10天逸出气体量为1Mm<sup>3</sup>（即1000年为360×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>）〔20〕。

地壳内部无机成因甲烷的来源可能有以下三个途径。

①无机合成甲烷 地壳内部的CO<sub>2</sub>或CO和H<sub>2</sub>在高温条件下,由于铁族元素(Fe、Co、Ni等)作催化剂形成甲烷。实验证明:当250℃时,上述气体便可合成大量甲烷,可用以下反应式表示



②地球原始大气中甲烷(Golg, 1981) 当地球开始凝聚时,含有CH<sub>4</sub>的原始大气被“吸收”保存在地幔和地壳中。之后,由于深断裂、火山活动和地震作用等,使之发生脱气作用,以不同形式和规模向地面排出。

③板块俯冲带甲烷 当由含水的玄武质岩石及蛇绿岩组成洋壳的大洋板块,向大陆板块俯冲到地幔之下,因进入高温高压而发生脱水使之变为密度大的榴辉岩,同时部分重熔而形成以安山岩为主的火山岩共生组合,与此同时,分解产生的氢、碳和碳的氧化物在高温高压下合成甲烷。

## 二、重烃气(C<sub>2-5</sub>)及其成因

### 1. 重烃气的分类

①乙烷(C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) 无色、无臭的可燃性气体,在自然界中一般与甲烷伴生,未发现纯乙烷单独存在。

②丙烷(C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) 无色的可燃性气体,在自然界中亦与甲烷伴生,未见其单独存在。

③丁烷(C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) 有两种异构体。a.正丁烷,无色可燃性气体。在+15℃,1.8kgf/cm<sup>2</sup>压力下,转变为密度为0.582g/cm<sup>3</sup>的液体。b.异丁烷,无色可燃性气体,其化学组成同正丁烷,但分子内部的结构则不同,故其物性也有所差异(详见表2-1)。从表2-1可知,在标准压力情况下,正丁烷在温度低于-0.50℃就变为液体了,但异丁烷在-11.72℃还处于气态。

④戊烷(C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>) 有三种异构体。a.正戊烷CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>CH<sub>3</sub>,无色易燃液体,极微溶于水,溶于烃类和醚。b.异戊烷CH<sub>3</sub>-CH(CH<sub>3</sub>)-CH<sub>2</sub>CH<sub>3</sub>,又名2-甲基丁烷,无色

易燃液体,不溶于水,溶于烃类和醚。c.新戊烷CH<sub>3</sub>-C(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>,又名四甲基甲烷,无色可燃性气体或易挥发可燃液体,不溶于水,溶于乙醇。

重烃气的一些主要物理参数见表2-1。由表2-1可知,在常温常压下,乙烷、丙烷、正丁烷、异丁烷和新戊烷呈气态。一般所谓重烃气系指这些气体,而正戊烷和异戊烷则是液体。重烃气和甲烷伴生,其一般以乙烷含量最多,其次是丙烷、丁烷和新戊烷含量通常比乙烷及丙烷低,往往极微。

### 2. 重烃气成因

#### (1) 有机成因

①油型气型 在未成熟与过成熟阶段重烃气的含量很低甚至没有;而在成熟阶段则形成较多的重烃气。重烃气不仅与甲烷伴生成成为溶解气的主要组分之一,并且是油气藏或气



表 2-2 国内外在煤化作用初、中阶段形成的煤成气中的重烃气

| 地 点                 | 类型 | R. %<br>或煤阶 | 井 深<br>(m)      | 重 烃 气 含 量 (%)                 |                               |                                |                                |    | 总 和             |
|---------------------|----|-------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----|-----------------|
|                     |    |             |                 | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> |    |                 |
| 鄂尔多斯盆地图 1 井         |    | 0.76        | 1618            | 1.25~2.06                     | 0.15~0.42                     |                                |                                |    | 1.40~2.48       |
| 鄂尔多斯盆地伊 17 井        |    | 0.886       | 2745.4          | 3.81                          | 0.83                          |                                | 4.64                           |    | 9.28            |
| 华北盆地濮深 1 井          | 煤  | 1.237       | 4424            | 23.00                         | 5.00                          |                                |                                |    | 34.00           |
| 华北盆地苏 15 井          | 层  | 0.544       | 2926.30~2926.42 | 平均                            | 平均                            | 平均                             | 平均                             | 平均 | 平均              |
| 伯朝拉盆地沃尔库塔斯克煤田       | 气  |             |                 | 10.33                         | 3.05                          | 0.79                           | 0.49                           |    | 14.66           |
|                     |    |             |                 | 5.30                          | 1.20                          | 0.60                           | 0.01                           |    | 7.11<br>(未碎样品)  |
|                     |    | 烟煤          |                 | 8.40                          | 2.70                          | 0.70                           | 0.40                           |    | 12.20<br>(破碎样品) |
| 鄂尔多斯盆地任 4 井         |    | 0.760       | 2299~2303       | 5.62                          | 1.11                          | 0.45                           |                                |    | 7.18            |
| 鄂尔多斯盆地任 6 井         | 煤  | 0.75        | 2243~2250       | 4.48                          | 1.12                          | 0.51                           |                                |    | 6.11            |
| 华北盆地苏 20 井          | 成  | 0.729       | 3344.6~3392.4   | 12.58                         | 5.68                          |                                |                                |    | 18.66           |
| 中欧盆地格鲁宁根气田          | 气  | 烟煤          |                 | 2.90                          | 0.36                          | 0.14                           | 0.04                           |    | 3.44            |
| 中欧盆地伊特贝特-哈勤气田 Z10 井 | 藏  | 0.7~0.9     |                 | 2.81                          | 0.45                          | 0.15                           | 0.05                           |    | 3.46            |
| 中欧盆地维仑气田 Z4 井       |    | 0.6~0.7     |                 | 3.31                          | 0.78                          | 0.33                           | 0.13                           |    | 4.55            |