

第一章 天然气成因模式

——多源复合、主源定型、多阶连续、主阶定名

基于十余年来我国天然气地球科学研究的积累，作者提出了天然气成因的新模式——多源复合、主源定型、多阶连续、主阶定名的天然气成因理论。

形成天然气以气态烃为主的物质来源，学术界公认有两类，即有机物质来源和无机物质来源。所形成的两类气体被称为有机成因气和无机成因气。当前国际学术界趋向于以生物成因气和非生物成因气来命名这两类气体，而以细菌气表示生物、化学作用形成的气体。对于生物成因的物质，又分为以 I、II 型有机质为主的成油母质和以 III 型有机质为主的成煤母质，前者形成的气体为油型气，后者形成的气体被称为煤成气或煤型气。作者倾向于用煤型气命名这种由煤系有机质形成的，经运移、聚集成藏的天然气资源。生物成因气是当前气态烃资源的基本类型。非生物成因气主要指地球原始俘获的气态烃和由无机物经化学合成形成的烃类气体，研究表明，这类气体确实在自然界广泛存在，而且就其绝对数量而言是非常巨大的。

天然气形成的多源性在近一二十年间已引起学术界的重视，也较广泛地得到承认。对于自然界天然气常常存在不同成因类型气体的混合，也引起了极大的关注（Stahl, 1977; Schoell, 1983; 戴金星, 1989; 刘文汇, 1993）。本章提出天然气成因的多源复合则认为不同来源的天然气，在自然界因受内在和外在因素的制约，构成有成因联系的各种来源天然气的复合储聚是天然气生成具有的本质性规律。这种复合，可以是成煤母质形成的煤型气与成油母质形成的油型气的二源复合，也可以是非生物成因天然气和生物成因天然气二源乃至三源的复合。如果我们把非生物成因气、煤型气、油型气视为三个端元成分，自然界可以有基本由某一端元组分所形成的天然气，但更多的情况则可能是几个端元组分的气体以不同比例复合存在。从中国地质实际出发，含油气盆地常具有复合、叠合的特征。在一个沉积盆地中，纵向上常常成油沉积建造和含煤沉积建造多旋回交替发育；平面上，盆地边缘为含煤岩系，而盆地中心为成油沉积建造。油气在形成后均需经历初次、二次运移才能聚集成藏，断裂体系、不整合面将垂向上和平面上不同地区的油气聚集到气藏中是天然气多源复合的地质背景条件。另一方面，由于天然气分子小、活性大、迁移能力强，这种物性特征和地质条件的结合造成在自然界的天然气，特别是天然气气藏，常常是多源复合，强调这一观点对于我们正确地认识天然气的形成和分布是有重大指导意义的。

对于天然气的形成，相对于生油门限，石油窗的成油概念，地学家较早地提出了成气具有多期性的认识。基于成气外生营力的差异，早已提出了天然气有以生物—化学作用形成的生物气（细菌气）以热催化作用促成有机质降解形成的热催化气，以及在高温作用下使有机质裂解形成的高温裂解气。在这种成因分类定名中，对于生物气和热催化气之间，在沉积剖面上大致 1 000 ~ 2 500m 的层段认为无天然气的形成作用。而生物—热催化

过渡带气理论的提出，使天然气形成构成多阶连续的图景。而成气的主导阶段、主导的外生营力对天然气藏的形成无论在气体的数量上还是在天然气的地球化学特征上都具有决定性的意义。多阶连续、主阶定名的观念可以使更客观地去认识天然气形成的规律。

第一节 天然气的多种来源

本书以甲烷为主的气态烃作为天然气的主体概念，而将与气态烃共生、共储的其他非烃和稀有气体作伴生、共生的物质予以讨论。由于它们的形成、储聚有着自身的特点，对于人类认识天然气的形成、运移、储聚和成藏提供了重要的科学信息。因而非烃气和稀有气体是研究以甲烷为主的天然气的重要内容。但本章讨论的多源和多阶的概念都不包括这些气体的本身，但研究中常用它们给出的信息作为讨论多源、多阶等概念的佐证。

1. 非生物成因气

主要指行星形成时即已形成并捕获于地幔的原生甲烷以及岩石在高温高压下经费—托反应所形成的烃类气体，岩石经无机化学反应形成的非烃气体不属本章讨论的非生物成因气的范畴。

幔源原始甲烷是非生物成因甲烷的主要类型，其判识主要指标为碳和伴生氦的同位素特征，一般以甲烷的 $\delta^{13}\text{C}$ 值大于 -20% 、 $\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2 > \delta^{13}\text{C}_3$ 、伴生氦气 $^3\text{He}/^4\text{He} > 10^{-6}$ 和 $\text{CH}_4/{}^3\text{He} < 5 \times 10^6$ 作为甲烷主要来至幔源的标志 (Welhan & Craig, 1981)。伴生气体氩具有高的 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值数千乃至上万是辅助性指标。

2. 油型气

是生物成因气大类中两大亚类型之一。其成气的有机质主要为 I、II 型于酪根有机质演化的各个阶段都可以形成，和另一亚类型煤型气比较，在相同的演化阶段油型气具有相对较湿的组分和相对较轻的同位素组成，其主要判识指标为 $\delta^{13}\text{C}_1 - R_o$ 相关方程及 $\delta^{13}\text{C}_2 < -28\%$ 。基于近年的研究对于 $\delta^{13}\text{C}_1 - R_o$ 。油型气判识方程大致应在 $R_o = 0.8\%$ 的阶段分开以不同的方程式表达其特征即：

$$\delta^{13}\text{C}_1 = 23 \lg R_o - 43.8(\%o)$$

$$R_o = 0.3\% \sim 0.7\% \text{ (张林晔, 1991)}$$

在 $R_o \geq 0.8\%$ 时可沿用目前常采用的一些 $\delta^{13}\text{C}_1 - R_o$ 模式 (Stahl, 1975 徐永昌等, 1985; 沈平等, 1987 戴金星, 1987)。

3. 煤型气

煤系有机质在热演化过程形成的以甲烷为主的气态烃，经运移、储聚形成的气态烃资源，是生物成因天然气的一个重要亚类。20 世纪 60 年代以来，其重要性显示出与日俱增的趋势。和油型气相比，在相同的热演化阶段其组分相对较干，而碳同位素组成相对富集 ^{13}C 。 $\delta^{13}\text{C}_1 - R_o$ 的相关性及 $\delta^{13}\text{C}_2 > -28\%$ 是判识煤型气的主要指标。近年研究同样表明，在 $R_o = 0.8\%$ 左右应有不同的 $\delta^{13}\text{C}_1 - R_o$ 的经验公式分别表达演化程度不同的煤型气的

特征 在 $R_o < 0.8\%$ 时作者建议采用

$$\delta^{13}C_1 = 40.5 \lg R_o - 32 \quad (\text{徐永昌等})$$

而在 $R_o > 0.8\%$ 仍采用通常惯用的 $\delta^{13}C_1 - R_o$ 煤型气的经验公式。

4. 其他

前已言及，在讨论天然气的多源时主要考虑甲烷为主的烃类气体。从来源、成因的角度讲， CO_2 、 N_2 、 H_2S 等非烃气体常常与气态烃具有不同的来源，而稀有气体一族，由于它们都是放射成因的，因而它们显然与气态烃是不同源的。在我们的科研工作中，常把非烃和稀有气体内涵的信息作为讨论天然气成因、运移、储聚的重要科学依据。如天然气藏中存在 CO_2 当 CO_2 量高达 70% 时，常为非生物成因 $\delta^{13}C_{CO_2} > -10\%$ 常与非生物成因有关，而 $< -10\%$ 常为生物成因者。又如天然气中的氦，主要来源为壳源、幔源，有时也来至大气，通常用氦的同位素 $^3He/^4He$ 比值来判识这三种来源的氦，其值相应为 1.1×10^{-5} 、 2×10^{-8} 和 1.4×10^{-6} 。氩的同位素也给出重要信息，大气氩其同位素丰度比 $^{40}Ar/^{36}Ar = 295.5$ 由于壳源氩和氦的年代积累效应，高 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 比值和低 $^3He/^4He$ 比值常是稀有气体源于壳源的证据。如我国最古老的气藏，四川威远震旦系气藏其氩、氦同位素丰度比分别为 7000×10^{-6} 平均值和 2.9×10^{-8} (徐永昌等, 1989)。而在我国东部含油气区，天然气主要来源第三系源岩 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 比值仅约高于大气，一般在 300 ~ 400 之间，但当有一定幔源挥发分加入时，此值将视幔源挥发分贡献的多少，可以有不同程度的增大。

多种信息的综合、叠加 使我们可以较为客观、较为科学地探讨天然气形成的特征 提出其成因模式。

第二节 多源复合、主源定型

自然界存在多种来源的天然气。以甲烷为主的烃类气体形成天然气资源，需经历形成、运移、储聚、保存。由于天然气活跃的物理性质及中国含油气盆地的地质特征 天然气在形成工业气藏时 可以主要由某种来源的气体为主 可以定型为非生物成因气、油型气、煤型气，但更多的情况下，各类型天然气常复合储聚成藏。相信随着理论认识水准的深化和测试技术的提高，天然气藏的多源复合性会得到愈来愈多的验证。

一、多源复合

多源复合可以是非生物气和生物气两大类型的气体，在特定的地质条件下，幔源挥发分中的气态烃类与壳源生物成因的气态烃复合储聚。通常幔源气态烃的贡献是较小的，一般均在百分之几以下，如辽河盆地地界 3 井，经计算幔源甲烷的复合约为 3% 但个别情况也可以在一些具有工业价值的气井中发现较大比例的幔源气态烃的复合，如张义纲报道的东海天外天 1 井的二个气样，气态烃的同位素值为 $\delta^{13}C_1 = -17\%$ ， $\delta^{13}C_2 = -22\%$ ， $\delta^{13}C_3 = -29\%$ 二氧化碳为 -30% ， $C_1/C_1 - C_5$ 为 0.97 气井产气量为 $500m^3/d$ 。张义纲认为 该气井二氧化碳为生物成因 甲烷则为煤型气和幔源甲烷的复合 非生物甲烷的复合

率可达 50%。当然，在多数情况下，特别是在具有较大经济价值的天然气藏中，多源复合常常是煤型气、油型气这两大生物成因亚类气体的复合。如我国最大气田鄂尔多斯盆地的中部大气田。此外，从天然气形成多阶连续的概念分析，气藏的形成是不同外生营力各阶段形成的气态烃的累积、复合，广义的多源复合应包含这一自然过程。

二、多源复合的地质背景

天然气的多源复合是天然气在形成、运移和聚集成藏这一动态过程中的最终结果，因之也是一种客观必然。如本章前述，天然气的多源复合有多种类型，而不同类型的天然气复合受控于不同的构造环境和油气地质条件。下面主要说明可燃常规天然气气藏主要复合类型形成的地质背景与构造条件

1. 克拉通稳定构造环境中的复合气藏

就中国的大地构造演变特征看，中部（主要包括鄂尔多斯和四川盆地）长期处于相对稳定的构造环境，其主要运动方式可能是在地块整体做较大规模水平运动的背景上，表现出地块的整体性多旋回的升降或海水的进退，由此造成了不同沉积环境的沉积盆地在时间上的演替和在空间上的复合叠置，而构造与沉积环境的不同又控制了不同类型的沉积相和烃源岩系在空间剖面上的叠置，也就是在同一地区的地质剖面上形成了不同时代、不同类型的烃源岩系的叠置，形成了天然气多源复合的物质基础与地质背景。

就中国稳定构造区的一般地质构造特征分析，早古生代为陆表海沉积环境，发育了以海相碳酸盐岩为主的烃源岩系；到晚古生代，扬子区继续为海相沉积环境，而华北区则演变为海陆交互相沉积环境。经印支运动后，海水退出，而南、北方拼合为一体，演变为内陆沉积环境。由于构造运动和海水的进退，造成了多期盆地和不同类型的烃源岩在空间上的叠置。如鄂尔多斯地区就形成了以下古生界碳酸盐岩、上古生界煤系和中生界河湖相沉积及含煤岩系为主的三大套烃源岩系。

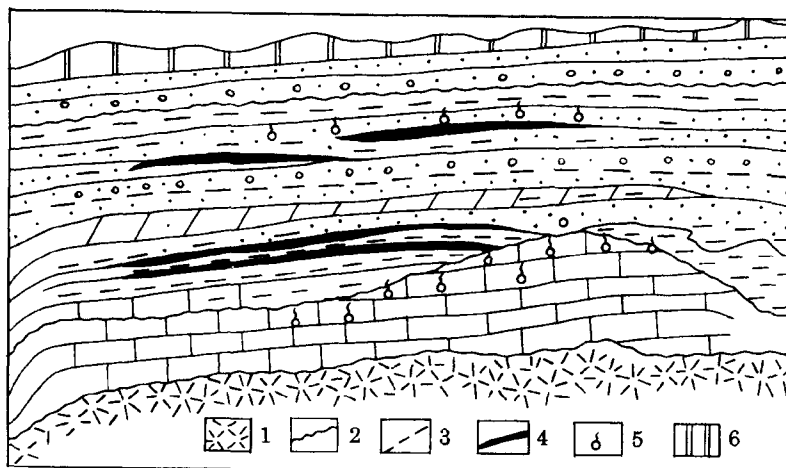


图 1-1 克拉通稳定盆地天然气多源复合成藏模式图

1 基底； 2 角度不整合面； 3 平行不整合面； 4 煤系； 5 气藏； 6 第四系

从稳定区的盆地构造与地质剖面结构分析，具有断裂与背斜类圈闭均不发育而构造变形微弱、地层产状平缓但不整合面发育的特点（鄂尔多斯最为典型）。在此种构造条件下，天然气运移的通道主要是地层不整合面而非断层，气体的储集与圈闭则主要受控于不整合面 风化壳 及其上、下的岩性 从而形成了以不整合面上、下烃源岩所生成气体为主的复合与成藏。图 1-1 为克拉通稳定盆地天然气多源复合成藏模式（示意图）

2. 裂谷型构造活动盆地多源复合气藏

裂谷型盆地多叠加在早期不同类型的沉积盆地之上。由于在后期裂谷构造的发育过程中，形成一系列的地堑式阶梯状张性正断层，而且断裂深度大，从而将包括裂谷盆地与其下早期盆地中充填的岩系切割为一系列的断块构造并形成古潜山构造。这些深度较大而具开启性的张断裂构成良好的油气运移通道而将早期盆地和裂谷盆地中不同深度、不同类型的源岩层切穿，使得这些源岩层所生成的气体沿这些断裂向上运移而在适当的储集与圈闭构造部位聚集成藏，形成断块或古潜山复合气藏。地层不整合面同样也可成为侧向运移通道。图 1-2 为其模式图。中国东部就具备上述多源复合成藏的地质条件。再如郯庐断裂带这种超壳断裂分布区，甚至可形成不同烃源岩形成的气体与幔源气体的复合 如下文所述的白庙气藏。

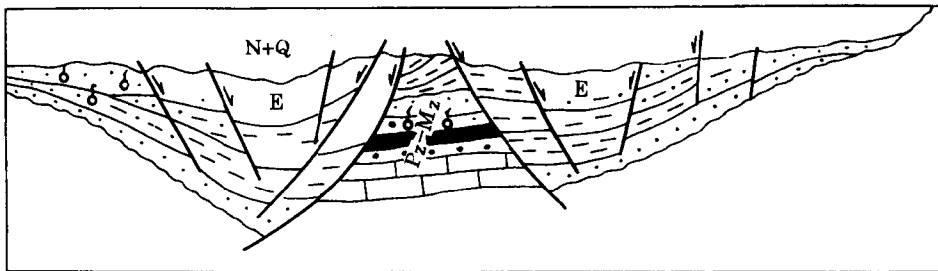


图 1-2 裂谷构造活动盆地复合气藏形成模式图

就中国含油气盆地的大地构造环境性质而言，除克拉通稳定构造和裂谷活动构造盆地之外，还存在构造次稳定盆地（如西北区各大盆地）。构造次稳定盆地的构造特征和天然气复合成藏的条件兼有前两种类型的某些特征或介于其间，因此不再赘述。

3. 烃源岩横向相变与多源复合

陆相环境中沉积相带的变化尤为明显，这主要是地形地貌复杂多变的原因，其中的水体分布及其深度变化也快。从沼泽边缘相到湖盆沉积中心，沉积物的粒度变细，在岩性相变的同时，一般有机质的丰度也有变化。特别是有机质的类型变化更为明显。一般而言，在沼泽边缘相陆生高等生物发育而以 III 型有机质为主，随着水体向湖中心的逐渐加深，含陆源有机质的碎屑充填物减少，而水生低等生物增加，沉积物中有机质则以腐泥型为主。马宝林^① 等认为 陆地生物经短距离搬运 在湖沼边缘堆积时 大量成分原地分解 埋藏

^① 马宝林等,1994 含气盆地沉积、成岩演化与天然气形成、储集、保存条件研究。85-102-05-02 报告 中国科学院兰州地质研究所。

而成泥炭，演变为腐殖型干酪根，而耐分解的类脂物及易分解的碳水化合物等则被搬运到深水区（或湖中央）沉积，并被改造为混合型和腐泥型干酪根。总之，在湖相沉积体系中，烃源岩有机质类型的相变是普遍存在的，一般滨湖沼泽相以腐殖型为主，而深湖相则以腐泥型为主，其间的浅湖相则为过渡的混合型。图 1-3 为松辽盆地南部白垩纪青白口组泥积相与干酪根类型分布图。

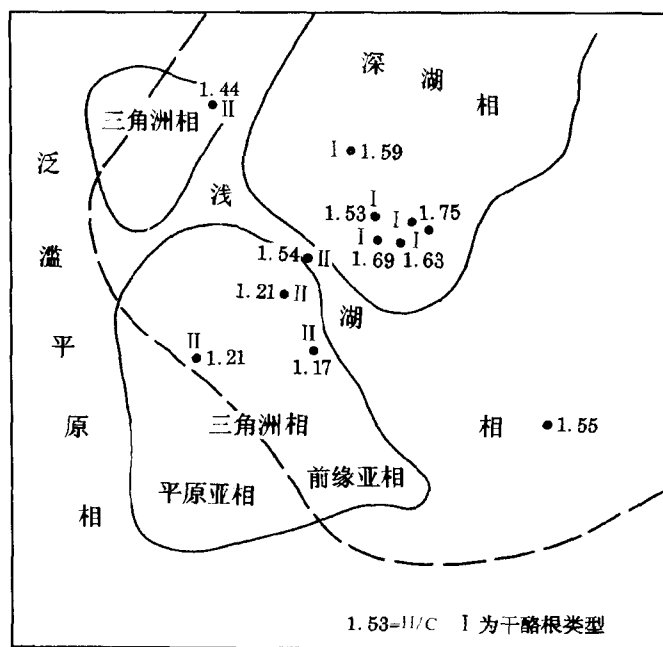


图 1-3 松辽盆地南部白垩系青白口组干酪根类型与沉积相分布图

(据王铮,1986 修改)

不同类型的源岩具有不同的生烃特征。这种源岩类型在横向上的相变与分布，造成了天然气横向多源复合的物质基础，而不整合面则往往成为此类天然气运移复合聚集藏的主要通道。

三、主源定型

如前所述，天然气具生物成因和非生物成因两大类，生物成因中按其母质类型可分为油型气和煤型气。各种天然气在形成演化聚集成藏过程中的多源复合广泛存在，但就单一气藏、单一气田乃至单一区块而言，天然气的成藏常具一个主要来源，这一来源气体的形成、演化、运移、聚集，基本代表了其主体特征。因此，就可以这一主要特征来探讨天然气形成聚集过程，这就是主源定型。在确定其主源的基础上，才有可能更清晰地认识天然气的整体特征、控制因素，从而有目的地提供天然气的勘探领域。

第三节 多阶连续主阶定名

多阶主要是对应于石油形成的门限值、液态窗理论而言。有机质演化过程，受不同的外生营力作用，在不同阶段可以形成具有不同地球化学性质的天然气，如生物气（细菌气）热催化气、高温裂解气。生物-热催化过渡带气的提出，使各个阶段形成的气体，构成相互衔接、连续过渡的图景。天然气成因分类中，以某种外生营力为主形成的气体来命名，如生物气、热裂解气等，即本章所说的主阶定名。

一、多阶连续

在油气成因理论中，天然气形成的多阶性是得到承认的，图 1-4 是 Hunt (1979) 的天然气的形成模式图。从图中可以看出，天然气形成可以分两个阶段，即温度 < 50℃ 成岩作用阶段的生物气、细菌气和有机质演化进入成油门限以后的深成热解作用阶段直至原油裂解大量成气。一般而言，后一个阶段包括了与石油形成伴生以湿气为主的阶段和石油消失形成干气的阶段，也有人把这几个阶段称为天然气形成的 3 个窗。

在这个气体形成的模式图中，无论是油型母质还是煤型母质，在大体相当于地温 50~100℃ 的阶段没有或很少有甲烷形成。可是，已探明的天然气藏却主要分布在这个层段。长期以来，天然气的这种分布格局，是用垂直运移等观点予以解释，即天然气的形成，在地层垂直剖面上，相当于

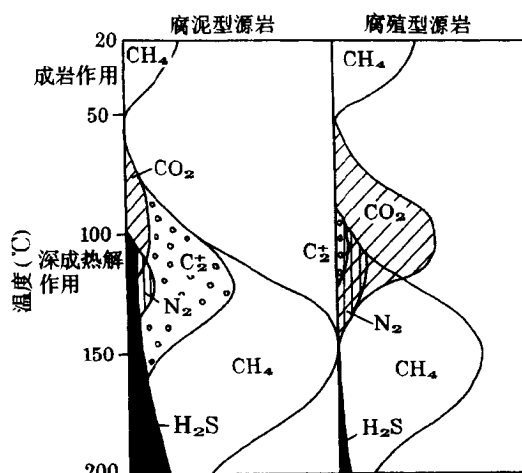


图 1-4 有机质转化成气的相对产量
(Hunt, 1979)

1 000~2 500m (乃至 3 000m) 层段天然气的形成间断了，储集于此层段的大量天然气主要属古生新储类型，即储气层下大于 4 000m 埋深的气源岩形成的气体，经垂直运移储集于浅层 1 000~3 000m)。

1986~1987 年间，通过对辽河盆地和苏北盆地的研究，我们发现了一组气体，其组分较干，以甲烷为主，乙烷以上重烃大于 2%，甲烷碳同位素 $\delta^{13}C_1$ 多处在 -55‰ 至 -50‰ 之间， δD_{CH_4} 为 -225‰ 至 250‰，产层埋深浅，一般在 1 000~2 000m 的范围，也就是前面讨论的成油门限上部的层段。在过去油气形成理论中，对此层段油气形成未考虑，这个层段发现的天然气，由于其地球化学特征介于生物气和热催化气之间，故 Stahl (1975)、Schoell (1983) 将这种天然气划为生物气和热催化气的混合气。由于这组气体埋藏浅，相应地层热演化程度低， $R_o < 0.5\% \sim 0.6\%$ ，因此也有人将之划为生物气。但结合实际地质背景和产气层段有机质演化特征，该组气体地球化学性质和该层段有机质热演化所应产出气体

的特征是一致的，应属自生自储的气体，由于对其成气机理了解不够，将这一层段形成的气体命名为生物-热催化过渡带气(王万春、徐永昌,1988 徐永昌等,1990)。这个成气带的提出，使天然气的形成作用，在地层垂直剖面上，呈现连续分布的格局。

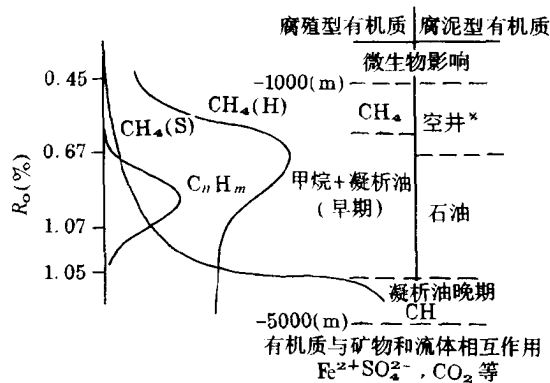


图 1-5 与有机质深成热解转换作用有关的烃分带 (Galimov, 1988)

从上述讨论可知，生物-热催化过渡带气的提出，使天然气成气模式构成多阶连续的格局而且“过渡带气”开拓了中浅层找气的新局面。因此，有必要适当展开对“过渡带气”的讨论。

对中浅层天然气的形成国内黄汝昌、张义纲都曾提出类似的见解。国外以 Galimov(1988) 的报道较系统，并讨论了其形成机制，Galimov 对西西伯利亚北部一批超巨型气田，如乌连戈依气田(探明储量 $8 \times 10^{12} \text{ m}^3$) 的成气机制提出了新的假说，他认为这些气田是腐殖型有机质在较低温度下，由芳环化合物缩合作用为主所

形成。经理论计算和模拟实验，得到了如图 1-5 所示的结果。

从图 1-5 可知对于腐殖型有机质而言在 R_o 仅为 0.45% 阶段地层埋深大约 1000m 微生物影响基本消失，即可形成相当数量的甲烷，到 $R_o = 0.67\%$ 时已可形成大量甲烷此时，液态烃类刚进入成烃阶段。Galimov 认为正是这个阶段形成的甲烷，构成了乌连戈依等白垩系的超巨型气田，而这些气田的储量，占世界探明天然气储量的 30% 经过对比，可以看出，Galimov 所划出的低温成气带和我们提出的生物-热催化过渡带气相当。

需要说明的是，Galimov 强调仅在有机母质为腐殖型时才出现相当于“过渡带”气的低温成气带。在我们的研究实例中，过渡带气的成气母质也是以 II_B-III 型为主如辽河盆地的东部凹陷。但也存在以腐殖-腐泥(II_A)有机母质为主形成的“过渡带气”如苏北金湖凹陷阜二段源岩形成的天然气(费富安1991)。济阳凹陷的中、浅层气体可能亦属此类型。

基于 Hunt 和 Galimov 的资料，编制了各成气阶段甲烷形成相对强度的模式图(图 1-6)。从图中可以看出，一个阶段甲烷的形成作用基本结束或尚未结束，另一个阶段的甲烷形成作用已经开始，即我们可以把甲烷的形成阶段分为生物气(BG)、生物-热催化过渡带气(BTG)、热催化气(TG)、热裂解气(TTG)等多个阶段某一个

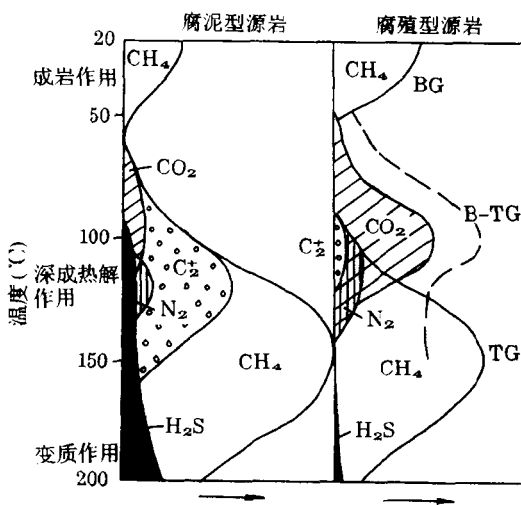


图 1-6 据文献改编的各成气阶段甲烷生成强度模式图

(Hunt, 1979; Galimov, 1988)
BG 生物气; B-TG 生物-热催化过渡带气;
TG 热催化气

阶段形成的气体以相应的外生营力为主，在天然气成因分类时，我们以主成气阶段确定所发现天然气的名称，但是，成气的各阶段是相互衔接的，而不适宜于将天然气的形成作用称为有若干窗。

二、多阶连续模式与气藏地球化学特征

天然气形成多阶连续模式的内涵，将清晰地反映到天然气藏的气体组成特征上。如天然气的 R_o - $\delta^{13}C_1$ 的数学模式，是确定天然气类型和名称的主要参数，Stahl(1977)用这一数学模式根据母质类型将有机成因气划分为煤型气和油型气，再根据有机质演化阶段定出生物气、热解气等。Stahl所得出的煤型气模式为 $\delta^{13}C_1 = 8.6 \lg R_o - 28(\text{‰})$ 。但是我们获得的模式为 $\delta^{13}C_1 = 8.6 \lg R_o - 32.8(\text{‰})$ 这意味着在 $R_o = 1$ 时我们的模式比 Stahl 模式轻 4.8‰。对此，我们曾与德国同行多次讨论了造成这种差异的原因，我们强调该差异是因盆地发展史不同而造成，德国同行的模式为沉降-抬升-沉降二次成气作用模式。沉积的间断，造成连续成气作用的中断、早期（第一期的）形成的气体在源岩抬升后散失，目前保存的仅是二次成气的产物。我们所回归的煤型气模式反映了多阶连续的模式，气藏中的煤型气是各阶段连续成气的复合，包括了成气初期具有较轻同位素组成的甲烷和成气中期较重同位素组成的甲烷。经过讨论，德国同行们同意了我们的意见。

最近 Galimov(1988 在引用和讨论 Stahl(1977) 和沈平 1987 煤型气的模式时(图 1-7)，用较恰当的数学语言对两种模式做了评述，他认为 Stahl 的模式近似于瞬时曲线，而沈平等的模式更近似于“累积”曲线。

Schoell(1988 在评述 Galimov 上述成果时指出：“盆地源岩在沉降过程中甲烷的 ^{13}C 浓度的变化是相当大的，这可能意味着甲烷的同位素组成在很大程度上取决于聚积史，即甲烷的早期圈闭和晚期圈闭，或积累的甲烷与瞬时的甲烷的关系，可以相信，甲烷的同位素变化的许多特征是由这些排放和圈闭的特定时间关系所造成的。”

关于天然气成气的连续性 鲍威尔^① 指出：“天然气可形成于陆相有机质成熟作用的任何阶段 液态烃被夹带到天然气中 意味着凝析油可形成于成熟作用的任何阶段。近年研究表明，凝析油的确从有机质演化未熟、低熟、成熟到高熟阶段其形成作用是连续的。陆相石油成因的研究也进一步证明其形成作用也存在有机质演化未熟、低熟、成熟阶段连续过渡的石油形成系列，大量研究成果揭示了各演化阶段所形成凝析油、石油具有其标志性的特征，这些成果极大地丰富了天然气和石油的成因理论，也开拓了干酪根晚期降解成

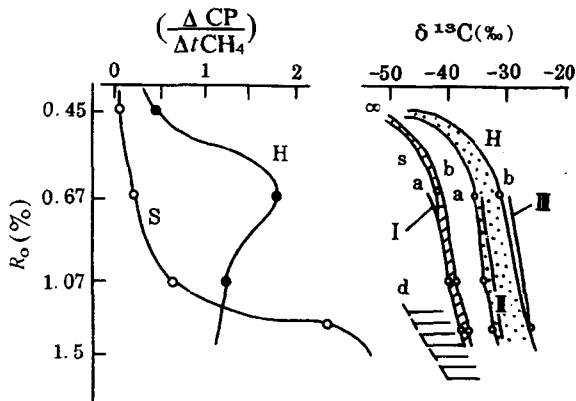


图 1-7 有机质深成作用甲烷形成模式图

(Galimov, 1988)

I、III 为 Stahl 模式；II 为沈平模式

① T.G.鲍威尔 陆相有机质生烃概念的发展 北京国际石油地质会议 1984。

油所未涉及的天然气和凝析油、石油勘探的新领域。

三、主阶定名

如上所述，天然气形成可划分为若干成气阶段，不同阶段以某种外生营力为主，使有机质转化为气态烃。在我们划分天然气成因类型时，即以这种为主的外生营力来命名该阶段形成的天然气。当然，有机质演化成气过程、某演化阶段形成的天然气总量中应包括此阶段之前有机质演化所形成的气体，即主阶定名的气体，它是此阶段前各阶成气的复合。用以判识类型和成气阶段的 $\delta^{13}C_1-R_0$ 公式本身就是这种情况下统计的经验数学模式。正因如此，才有前文所述连续沉降盆地和沉降-抬升-沉降盆地所形成天然气 $\delta^{13}C_1-R_0$ 数学模式的差异，但是，也应看到，主要成气外生营力所决定的主成气阶段对气体的地球化学特征的主导作用，这一方面是主成气阶段所形成的气体量是主要的，另一方面还由于气体成藏的动态平衡原理，导致主阶段前各阶的气体在不断地扩散逸失而又无补充。所以主阶定名的气体既有其前各阶段形成气体的复合性，更具有主阶形成气体的主导性。

基于上述讨论，我们对天然气成因按主源定型、主阶定名原则编制了成因类型表，如表 1-1 所示。

表 1-1 天然气成因类型划分表

大类划分	成因类型						
	按母质类型划分		按外生营力划分				
			$R_0(\%)$ 0.3~0.45 0.6 1.3 2.0				
有机成因气 (生物成因气)	I-II _A	油型气	生物成因气 (细菌气)	生物- 热催化 过渡带气	正常原油 伴生气	正常凝 析油气	裂 解 气
	II _{B-III}	煤型气			热解气		
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						

第四节 实例讨论

以我国含油气区的一些实际例子说明煤型气、油型气的复合、幔源气和壳源气的复合，以及煤型气、油型气、幔源气的复合。为此将应用一些端元成分气体的判识参数，如甲烷的碳同位素、天然气氦、氡同位素等。在条件具备时，还讨论了端元气体的主阶定名有关问题。

一、东濮拗陷煤型气、油型气的复合

东濮拗陷亦称中原油气区，是以古生界为基底，于中生代形成的地堑式断陷盆地。

下古生界奥陶系侵蚀面之上沉积了石炭-二叠系海陆交互相含煤建造，厚 700~1100m，其上为一套中生界红色砂泥沉积，可能为三叠系。三叠纪末的印支运动使本区上隆，遭受剥蚀。中生代的构造运动，使本区强烈断陷，除少量侏罗系、白垩系外，主体沉积为巨厚的新生界，仅下第三系厚度即达 6000m。下第三系沙河街组为泥质岩、砂岩和膏

盐层的间互沉积，是本区重要成油地层组合。拗陷内几套膏、盐岩层的分布及其对油气聚集的制约作用及中、新生界之下广泛分布的石炭 - 二叠煤系在新生界覆盖之下的二次成气作用（图 1-8），是东濮拗陷油气地质学的重要特色。

图 1-9 是东濮拗陷文留地区横剖面模式图，煤型气的主源来自石炭 - 二叠系煤系有机质（二次）成气作用储集的气体，为煤型气的端元成分。文留气藏为此型气体的代表，其储层为 E_{s4} 无

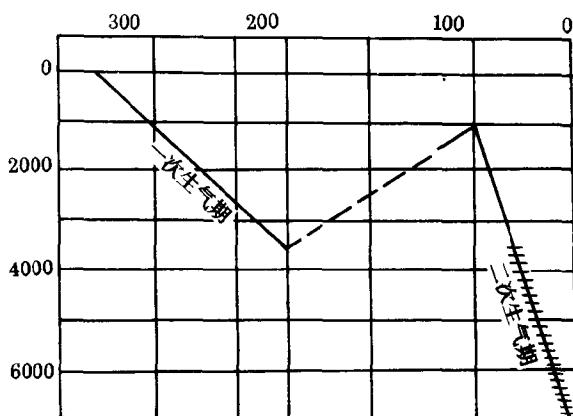


图 1-8 东濮拗陷石炭 - 二叠煤系演化过程示意图

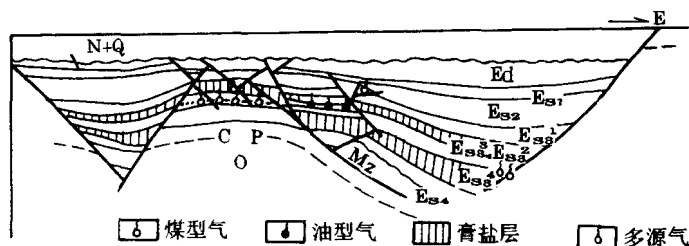


图 1-9 东濮拗陷文留地区气藏剖面图

生气潜力，由于膏盐层的封隔作用，第三系烃源岩形成的油型气无法进入该气藏，代表性的气井为文 23 井。其气体组分和同位素组成特征为： CH_4 93.45%、 $C_1 / \sum C_{1-5} = 0.977$ 、 $\delta^{13}C_1 = -28.2\text{‰}$ 、 $\delta^{13}C_2 = -26.3\text{‰}$ 、 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 比值为 1 175 它表明文 23 井的气体是以甲烷为主的干气，甲烷碳同位素高度富集 ^{13}C ，对油型气而言，即令有机质达到过成熟演化阶段，甲烷也不可能具有如此重的同位素值，其乙烷碳同位素 $\delta^{13}C_2 > -27\text{‰}$ 具有明显的煤型乙烷的特征 氩同位素 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 比值达 1 175，远高于第三系源岩的 ^{40}Ar 的年代积累效应 而与石炭 - 二叠系源岩的年代积累效应相吻合。文留气田的其他一些气井如文 31、文 108、文 109 总体特征与文 23 井相同，从该区地质背景和气田气体地球化学特征可以将文留气田定为主源为石炭 - 二叠系煤系有机质形成气体经运移、储聚成藏的煤型气 该气体的其他特征如凝析油 $\delta^{13}C$ 平均值为 -25.5‰ ，较该区与油型气相关的凝析油富集 ^{13}C 达 2‰ 气体中汞含量 $5 \times 10^4 \mu\text{mg}/\text{m}^3$ 较区域内油型气高两个量级 ($10^2 \mu\text{mg}/\text{m}^3$)……等都显示该组气体主源为煤型气。还须说明的是由于东濮拗陷石炭 - 二叠煤系地层经历了沉降 → 抬升 → 再沉降的过程，其成气的多阶连续性曾有中断，因此，其甲烷碳同位素与有机质成熟度的相关性更接近于 Stahl (1977) 的煤型气判识模式，因为该模式正是来自中欧的沉降 - 抬升 - 沉降盆地二次成气模式的总结，基于这种认识，东濮拗陷文留气藏的气体为煤系有机质演化成熟 - 高成熟阶段的产物。

图 1-9 中油型气是东濮拗陷第三系烃源岩成油同时产生的天然气，由于断层和膏盐的封隔 石炭 - 二叠系煤系形成的煤型气不可能进入这种条件的油气圈闭中，代表性的油

气藏如濮 3-84、文 12、文 13、文 212、文 115 等井区，该组气体的地球化学特征也与地质背景相吻合，甲烷平均丰度 65.6%， $C_1/\Sigma C_{1-5} = 0.66$ 为典型的湿气， $\delta^{13}C_1 = -44.6‰ \sim -40‰$ 是油型气成熟阶段的表征值，该组气体 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 为 400~626 为区域内的最低值代表东濮拗陷第三系源岩的 ^{40}Ar 年代积累效应值。

图 1-9 中还标明膏盐层和多源气，从图中可以看出，在多源气分布的区段，石炭—二叠系煤系形成的煤型气可储聚于此，同时储集层本身为第三系烃源岩组，地质背景表明，由于断层的沟通，造成了将上古生界的煤型气和新生界油型气形成复合储聚的条件，而该区域中气体的地球化学特征有力地证实了是两种来源的天然气复合成藏的结果，这种二源复合型气体形成的油气藏可以白 10、白 14、濮深 3、卫 25-1、卫 102 井区为代表 其甲烷丰度平均值为 79.5、 $C_1/\Sigma C_{1-5} \approx 0.84$ ， $\delta^{13}C_1$ 为 $-32‰ \sim -39‰$ ， $^{40}Ar/^{36}Ar$ 为 682~868 其值均介于煤型气和油型气之间，与地质背景所显示的特征吻合，证明该区域气体为油型气和煤型气的二源复合型气体。表 1-2 是三种气体地球化学特征的汇总。

表 1-2 东濮拗陷气源综合对比表

项 目	分 组	I 组	II 组	III 组
	指标范围			
天然 气 特 征	CH ₄ (%)	48~78	80 左右	89~95
	C ₂ /C ₃	1.51	2.25	3.78
	C ₁ /ΣC ₁₋₅	<0.8	0.65~0.95	>0.95
	δ ¹³ C ₁ (‰)	-44.6~-40.0	-39~-32	-31.1~-26.4
	δD _{CH₄} (‰)	-235~-176	-223~-171	-200~-164
	Δ ¹³ CC ₂ -C ₁	13.6~12.4	11.9~7.7	3.4~2.1
	Δ ¹³ CC ₃ -C ₁	14.3~16.2	12.6~6.8	3.1~2.3
	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	410~626	682~868	889~1175
汞含量 ng/m ³		5.9×10 ²	2.4×10 ³	2.6×10 ⁴
凝 析 油 特 征	氧芴(相对%)	0	-	64~94
	硫芴(相对%)	98~99	-	0~4
	芴(相对%)	1~2	-	6~32
	δ ¹³ C(‰)	<u>-28.6~-26.3</u> -27.3	-	<u>-26.2~-25.2</u> 25.5
	δD(‰)	<u>-177~-116</u> -151	-	<u>-143~-139</u> -141
气源判识		第三系自生自储油型气,盐湖相,热演化处于成熟期	复合气源 I、III 组气体不同比例复合形成	来源于石炭—二叠系古生新储煤型气,滨海沼泽相,高成熟期

二、白庙气田三源复合气

白庙气田也处于东濮拗陷，就其基本地质背景白庙气田应属煤型和油型的两源复合气，但 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 比值却明显高于复合型氩同位素比值，现将白庙气田有关数据列于表 1-3，为进行对比，也列入了文留气田的相应资料。

如前所述，文留气田典型煤型气 $\delta^{13}C_1$ 为 $-27‰$ 至 $-28‰$ ， $^{40}Ar/^{36}Ar$ 平均比值 1068 而白庙气田甲烷碳同位素平均值为 $-36‰$ 比文留平均轻 $8‰$ 。就中原地区而言，这主要是煤型、油型二源复合的结果，但 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 平均值 1270 却高于以石炭—二叠系为源岩的煤型

表 1-3 白庙、文留气田气体组分及同位素组成数据表

地区	井号	层位	气 体 组 分			$\delta^{13}C$ 值 (‰)			$\Delta^{13}C_2 - C_1$	$\Delta^{13}C_3 - C_1$	$^{40}Ar/^{36}Ar$	$^3He/^4He$	R/R_s
			CH_4 (%)	C_2/C_3	$C_1/\Sigma C_{1-5}$	CH_4	C_2H_6	C_3H_8					
白庙气田	白3	E_{S3}									1239		
	白8	E_{S2}	77.70	2.11	0.796	-36.8	-25.8	-24.4	10.0	12.4	1368	1.10×10^{-6}	0.78
	白10	E_{S3}	79.76	2.60	0.819	-34.3	-24.4	-22.5	9.9	11.8	1270	1.09×10^{-6}	0.78
	白14	E_{S3}	81.70	1.62	0.901	-38.6					803	8.48×10^{-7}	0.61
	白20	E_{S3}	63.47	1.12	0.641	-34.1	-25.5	-23.8			703		
		E_{S2}	76.25	2.05	0.797	-36.7			10.2	12.9	1140	1.12×10^{-6}	0.80
文留气田	文23	E_{S4}	93.45	3.77	0.977	-28.2	-26.1	-25.5	2.1	2.7	1175	3.23×10^{-7}	0.23
	文31	E_{S4}	93.12	3.30	0.982	-28.0	-25.7	-25.7	2.3	2.3	1093	3.03×10^{-7}	0.23
	108	E_{S4}	94.07	3.40	0.982	-27.8	-24.6	-24.6	3.4	3.1		3.28×10^{-7}	0.23
	109	E_{S4}	89.41	2.10	0.969						938	3.18×10^{-7}	0.23

气。由于白庙气田紧邻东濮拗陷的边界断层——南聊断层，该断层可能是深切达上地幔的超壳断层 幔源挥发分可沿此断层渗入到上部沉积壳层 如前所述 幔源挥发分氦、氩具有较高 $^3He/^4He$ 和 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 同位素比值，因而，我们曾预测幔源挥发分的加入可能是白庙气田二源复合气 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 比值高于石炭—二叠系为源岩的煤型气的原因。由于研究白庙气田时我国尚无法测量天然气中 $^3He/^4He$ 比值，因此只能作为一种构想。1990年我们曾测定东濮拗陷一批气井的 $^3He/^4He$ 比值，特意测定了白庙气藏的一些气井。结果证明，紧邻南聊断层的白庙气田， $^3He/^4He$ 比值为东濮拗陷各气井中的最高值。白庙及文留气田气体组分中 $^3He/^4He$ 比值如表 1-3 所列。经用壳—幔复合二元模式计算，幔源氦的份额可达 10% 从而对白庙气田 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 异常高比值获得合理的答案，同时也说明白庙气田成为壳—幔、煤型—油型三源复合气藏的实例之一。

此外 华北油气区 即冀中拗陷 其地质背景与上述东濮拗陷相似 亦存在石炭—二叠的煤系烃源岩和第三系湖相以成油为主的烃源岩。后者是目前华北油气区的主要油气来源。古潜山储集油气为冀中拗陷油气地质学特色之一，其储层时代可以是新元古界的震旦系 下古生界的奥陶系和上古生界的石炭—二叠系以及新生界的第三系。但研究表明天然气的来源则主要为第三系烃源岩形成的油型气和石炭—二叠系的煤型气。通常储于第三系者基本为油型气 如岔河集的岔 81 井、227 井 刘其营的东 256 井 储集于古潜山中者虽然储层时代很老，常为震旦系，但其气体来源仍为第三系油型气，代表性气井的地球化学特征为 $\delta^{13}C$ 为 $-45.5‰ \sim -44.7‰$ ， $^{40}Ar/^{36}Ar$ 比值为 334~443 为有机质演化进入液态窗的油型气。该区煤型气可能的代表井为深县泽 43 井 储层为奥陶系 有石炭—二叠系煤系覆盖，煤系形成气体可运移储聚于奥陶系圈闭中，其气体地球化学特征体现为 $\delta^{13}C_1$ 为 $-34.5‰ \sim -33.9‰$ 具有较高的 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 比值 达 1339 为区域内石炭—二叠系源岩年代积累效应的代表值。而苏桥地区，由于两种来源的气体均可运移储集于该区圈闭中，具备了二源气体复合储集的地质条件，研究其气体地球化学特征，也印证了此点，其碳、氩同位素比值介于上述两组端元气体之间， $\delta^{13}C_1$ 为 $-37‰ \sim -35‰$ ， $^{40}Ar/^{36}Ar$ 为 435~636。是该区油型气、煤型气二源复合的印证。

以上列举了几个点的例子，实际上由于广大的华北地区上述两套烃源岩分布广泛，在各种地质条件的影响下，油气的多源复合现象是普遍的。

三、鄂尔多斯盆地中部大气田的二源复合成藏

鄂尔多斯盆地属于广义华北地台的组成部分，它是在地台基底上发育起来的一个大型稳定叠合型沉积盆地。从新元古代至奥陶纪沉积了一套海相的碳酸盐岩及少量砂、页岩沉积，厚度达千米以上，下奥陶统为潟湖相沉积，夹有 270 余米的膏盐层，该潟湖区分布于鄂尔多斯东部，湖盆面积达 50 000 多平方公里。它既是盆地重要气源区也是形成气田的重要封盖条件。和广大华北地区一样，奥陶系沉积以后盆地抬升，遭受长期的剥蚀，直至石炭 - 二叠纪时始下沉，接受晚古生代海陆交互相的煤系沉积。这套沉积成为鄂尔多斯成盆以前地台的盖层，厚度达 2 000m。中生界的三叠系，盆地广泛发育湖相沉积侏罗系为湖相、湖沼相环境。现有研究表明，鄂尔多斯盆地的奥陶系为海相烃源岩，在上覆地层作用下，是一套过成熟的成气岩系。石炭 - 二叠系为海陆交互相煤系烃源岩，目前处于成熟到高成熟阶段。三叠系和部分侏罗系为湖相烃源岩，有机质演化处于石油窗阶段，是目前长庆油田的主力源岩层。

鄂尔多斯中部大气田主力产层为下奥陶统的马家沟炭岩。图 1-10 为前石炭纪古地质图。被称为中部气田四沟、两洼、三带共潜台的格局。在“沟”中沉积了石炭 - 二叠纪煤系沉积，构成两种来源的天然气形成复合储聚的地质背景

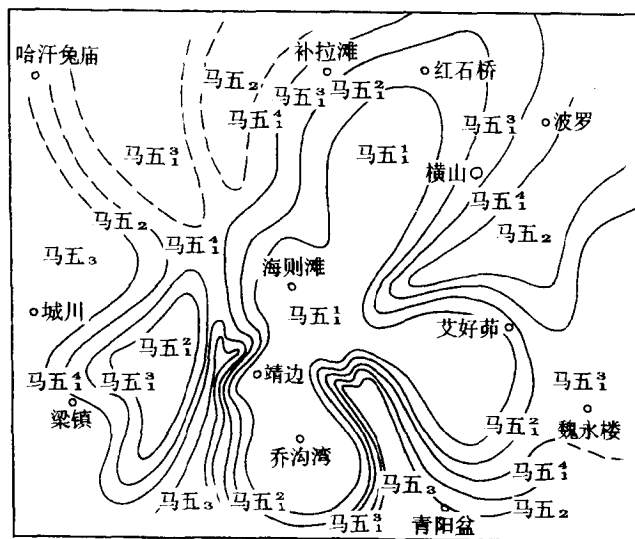


图 1-10 陕甘宁盆地中部前石炭纪古地质图

(据谢庆邦、马振芳等 引自杨俊杰 1993)

我们仅在盆地中北部靖边气区采集了 13 个钢瓶气样，分析了烃类组分、碳氢同位素组成及 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 和 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 丰度比值，结果如表 1-4 所示。

关于中部大气田气源问题目前认为该气田是下古生界海相过成熟的油型气和上古生界石炭 - 二叠系煤型气二源复合气的看法大体一致。但由于端元点及其组分建立的思路不同、方法不同，从而端元组分判识指标也不同，导致二源复合比率计算的差异也较大。

表 1-4 靖边气区天然气组分及同位素组成表

井号	层位	深度 (m)	CH ₄ (%)	C ₂ ⁺ (%)	δ ¹³ C ₁ (‰)	δ ¹³ C ₂ (‰)	δ ¹³ C ₃ (‰)	δD _{CH₄} (‰)	⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	³ He/ ⁴ He (× 10 ⁻⁸)	R/R _a
铺 1	C ₃ t	2251	93.38	1.38	-32.4	-27.7		-164	1219	3.11	0.02
铺 2	P ₁ s	2220	93.86	3.48	-32.5	-26.0	-24.2	-180	1350	2.23	0.02
榆 12	O ₁ m	1771	89.95	5.74	-37.1	-28.0	-24.3	-169	1500	2.66	0.02
麒参 1	O ₁ m	2797.6	92.71	2.12	-32.8		-25.2	-169	2141	2.25	0.02
陕参 1	O ₁ m	3543	97.27	1.17	-34.4			-176	1030	2.09	0.02
陕 8	O ₁ m		90.05	1.38	-33.0			-187	606	4.33	0.03
陕 3	O ₁ m	3153.6	88.07	0.78	-33.5			-177	704	2.19	0.02
陕 18	O ₁ m		85.89	1.12				-182	771	3.13	0.02
陕 17	O ₁ m	3182	81.23	0.89	-33.5			-158	887	2.87	0.02
陕 7	O ₁ m		90.07	1.15	-35.2			-171	1355	3.23	0.05
陕 5	O ₁ m	3507	91.10	0.54	-35.6	-31.0		-157		1.91	0.014
陕 6	O ₁ m	3616	90.80	0.17	-33.4			-185		3.25	0.02
陕 11	O ₁ m	3144	88.26	1.28	-34.0			-196		2.55	0.02

我们在讨论此问题时的基本思路是：① 甲烷是最主要的成分，讨论端元特征以甲烷碳同位素特征为主，关于甲烷运移中碳同位素分馏问题，可以认为在达到动平衡的条件下分馏值一般在 1‰~2‰。② 由于两种来源气体源岩时代差异很大，在确定鄂尔多斯天然气中氦、氩为壳源型的情况下，可以用 ⁴⁰Ar/³⁶Ar 比值作为端元气体选择的辅助指标。

乙烷碳同位素是一项天然气类型判识的有效指标，复合比率计算中是有意义的，由于我们在鄂尔多斯占有资料的局限性，研究中仅用作端元成分判识的辅助标志。因此端元条件建立，复合比计算主要借助于甲烷碳同位素和源岩成熟度的相关性，辅以氦的同位素比值和乙烷碳同位素。下古生界天然气的 δ¹³C₁-R₀ 模式应有别于惯用的油型气模式。在目前尚无针对下古生界由自然剖面统计出的经验模式的情况，我们暂采用传统的油型气 δ¹³C₁-R₀ 模式。表 1-5 为利用几个模式计算源岩不同 R₀ 值相对应的甲烷碳同位素值的结果。

表 1-5 δ¹³C₁-R₀ 有机类型相关模式演算数据表

作者	油 型 气						煤 型 气					
	0.8	1	1.2	1.5	2	2.3	0.8	1	1.2	1.5	2	2.3
Stahl(1977)	-42.4	-41	-40.88	-38.4	-36.5	-35.6	-28.8	-28	-27.3	-26.5	-25.7	-24.9
戴金星(1985)	-43.7	-42.2	40.9	-39.4	-38	-36.5	-35	-34.4	-33.3	-31.9	-30.5	-29.2
沈平(1987)	-45.5	-43.4	-41.2	-39.5	-37.5	-35.5	-33.6	-32.8	-32.8	-32.1	-31.3	-30.2

以靖边勘探区为例,该区下奥陶统气源岩 R_0 相当于 2.0% 时所形成的天然气, $\delta^{13}C_1$ 值约 -37‰ 如榆 12 井的甲烷碳同位素组成的特征; 烃源岩 R_0 相当于 2.3% 其相应 $\delta^{13}C_1$ 值约为 -35.5‰ 应为奥陶系自生自储的油型气 如陕 7、陕 5 井 这几口井的 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 为区域内较高比值 (1 355 ~ 1 500), $\delta^{13}C_2$ 为 -31‰ ~ -28‰ 也辅助性说明它为古生界油型气 石炭 - 二叠系在该区的成熟度 R_0 为 2% ~ 2.2% 相应的 $\delta^{13}C_1$ 值约为 -30‰ 本章将油型气 $\delta^{13}C_1 = -35‰$ 煤型气 $\delta^{13}C_1 = -30‰$ 定为靖边区油型气和煤型气的端元值 用二元法复合模式计算 即

$$C = A \cdot X + B \cdot (1 - X)$$

其中: A 为油型气端元; B 为煤型气端元; C 为 A 、 B 复合值(即实测值)求得 X 油型气的复合率

计算结果,靖边勘探区天然气中油型气复合率平均值为 70% 煤型气的平均复合率为 30%。

综上所述,鄂尔多斯盆地中部大气田天然气主要来自奥陶系,在靖边 - 绥德一带有一定量的石炭 - 二叠系煤型气的复合。为煤型气 - 油型气二源复合气,主源应为下古生界海相碳酸盐岩形成的高温裂解油型气。

四、“多阶连续”与吐哈盆地天然气

吐哈盆地^① 呈东西向展布,南北宽约 60 ~ 130km 东西长 660km 面积约 53 500km²。既有上古生界基底,又存在前寒武系结晶基底。

根据盆地基底、沉积发育、地层力学性质及变形特征可以划分为四个构造层次:

- (1) 深层次主要由深变质的前寒武纪结晶碎块及浅变质的古生界褶皱基底所组成,具有变质及强烈变形特点。
- (2) 中层次主要由上石炭统 - 二叠系组成,在盆地边缘博格达山具有强烈褶皱及逆断层发育,但至吐哈盆地内部变形微弱。
- (3) 浅层次主要为中生代及第三纪地层组成,具有薄皮构造变形特点,发育冲断及伴生的断弯褶皱、断展褶皱和断滑褶皱等。
- (4) 表层次主要为第四系,具有弱变形平缓褶皱或变形,有时出现小型冲断层及正断层。

盆地内主要烃源岩为中 - 下侏罗统。三叠 - 二叠系也是重要的烃源岩,不排除石炭系作为烃源岩的可能。目前发现的油气主要储于中侏罗统,三叠系也发现相当数量的油气储集。目前吐哈盆地已成为中国的重要油气区之一。特别是煤系地层中构成大中型油气田储聚,在中国是首次发现。

吐哈盆地探明天然气已达中型气田规模。天然气多与现确定为煤系形成的原油即煤成油相伴生或为凝析油气。储集层位主要为中侏罗统,天然气组分组成的特点是重烃含量较高 以湿气为主 典型油气井气体组成如表 1-6 所示。

^① 吐哈盆地是吐鲁番 - 哈密盆地的简称,下同。

表 1-6 吐哈盆地天然气化学组成综合数据表

区块	编号	井号	层位	深度 (m)	CH ₄ (%)	N ₂ (%)	CO ₂ (%)	C ₂ ⁺ (%)	$\frac{C_1}{C_{1-5}}$	$\frac{C_2}{C_3}$	$\frac{iC_4}{nC_4}$	
托克逊	1a	托参1	T _{3h}	2366.6	61.05	21.70	0.04	14.66	0.806	0.94	0.68	
	1b	托参1	T _{2k}	2435.0	62.60	5.90		31.50	0.582	0.78	1.00	
台	胜南 火焰山	2	胜南1	J _{2s}	2330.0	73.44	0.28	0.21	23.25	0.760	1.85	1.34
		3	连2	J _{2s}	2619.2	88.97			11.05	0.890	0.94	2.14
		4	胜38	J _{2q}	728.0	62.94	1.36	0.44	34.91	0.643	1.09	
		5	葡北101	J _{2q}	3347.2	41.96	0.50	0.28	60.77	0.408	0.89	1.37
	胜北	6	胜北3	J _{3k}	2992.5	60.46			39.45	0.605	1.61	0.81
		7	台参2	J _{3k}	2915.8	87.84			12.12	0.879	1.17	0.93
		8	巴21	J _{2x}	1741.0	78.79	0.04		21.17	0.788	4.45	2.52
	丘陵	9	柯7	J _{2x}	1848.0	78.55			17.58	0.817	1.01	1.12
		10	陵16-23	J _{2x}	2741.0	85.77	0.40		7.70	0.918	2.62	1.55
		11	陵2	J _{2s}	2758.0	97.37			2.62	0.974	1.78	
		12	陵25	J _{2s}	2747.0	71.80			29.18	0.711	1.17	1.32
		13	鄯13-15	J _{2s}	3100.0	83.50			13.78	0.858	2.03	2.04
		14	台参1	J _{2q-s}	3247.0	73.08	5.41		23.00	0.761	1.63	
		北	温吉桑	15	米1	J _{2x}	3184.0	84.85	2.23			0.868
16	丘东3			J _{2x}	3741.0	82.53			20.71	0.799	1.45	1.58
17	温1			J _{2s}	2362.0	84.40			15.59	0.844	2.74	1.29
18	温21			J _{2x}	2828.0	78.25	4.66	0.42	16.62	0.825	1.86	1.16
19a	温西1			J _{2x}	2860.0	84.40			15.67	0.743	2.00	0.62
19b	温西1			J _{2s}	2627.0	76.62			22.08	0.776	3.05	0.57
20	勒1			J _{2x}	2687.0	60.99	3.03	0.68	35.23	0.634	1.38	1.18
红台	21	红台2	J _{2x}	2965.0	85.47	3.36	0.11	10.86	0.887	1.73		
	22	红台203	J _{2s}	2402.5	86.88			14.15	0.860	0.74	1.12	
	23	红台202	J _{2x}	2865.2	89.56			10.39	0.896	1.08	1.18	
哈密	24	哈2	T _{3h}	2778.0	85.94			14.07	0.859	2.93	0.86	

和常见的煤型气相比，其最大特征为乙烷以上的重烃组分较通常的煤型气组分明显偏高。仅从组分看，它们与正常原油伴生气的组分特点相似。

吐哈盆地天然气甲烷的碳同位素组成分布区间为 $-45.2‰ \sim -35.6‰$ ，平均值 $-40.7‰$ ，主峰群为 $-42‰ \sim -39‰$ ，与正常原油伴生气的同位素组成相似。气体组分和甲烷碳同位素通常是我们判别油型气或煤型气的主要依据。吐哈盆地天然气的上述特征对于其属性的判识产生了很大的困惑。

乙烷碳同位素已被证实是判识煤型气或油型气非常有意义的指标，通常 $\delta^{13}C_2 > -28‰$ 基本为煤型气，而 $\delta^{13}C_2 < -30‰$ 时基本为油型气（不包括生物气阶段），吐哈盆地主要油气井天然气同位素资料列于表 1-7 中，从表中可以看出 $\delta^{13}C_2 < -30‰$ 的天然气仅 4 个，主体部分均为 $\delta^{13}C_2 > -28‰$ 。

根据上面的讨论可以看出，吐哈盆地天然气按 $\delta^{13}C$ 的特征，它们主要应为煤型气，即这种天然气是与吐哈盆地发现的原油同属煤系有机质形成的煤型油气。

应如何认识吐哈盆地天然气 $\delta^{13}C_1$ 所表现的特征？前文讨论了天然气形成具多阶连续的特征，在生物气和热催化气之间存在有机质低演化阶段形成的过渡带气，而甲烷碳同