

天然气成因类型及判别标志

刘文汇 徐永昌

(中国科学院兰州地质研究所气体地球化学国家重点实验室, 兰州 73000)

提 要 本文通过前人对天然气类型划分的分析, 基于多年的研究结果, 以“多源复合、多阶连续”的天然气成因新模式, 提出了科学的天然成因类型划分方案, 并讨论了不同成因类型天然气的地球化学特征, 建立了天然气成因类型的判别标志

关键词 天然气成因 类型划分 多源复合 多阶连续 气体地球化学 判别标志

第一作者简介 刘文汇 男 38岁 研究员 天然气地质学、地球化学。

天然气分类方法有多种, 如根据天然气的湿度分为干气、湿气、贫气、富气。根据天然气中二氧化碳、氮、硫化氢等非烃气体的丰度或天然气中凝析油的含量也可将天然气划分为若干类型。在地质学中, 天然气成因分类由于对油气勘探有指导作用, 因此受到极大重视。相应各成因分类的判别标志更是服务于勘探的重要参数。50年代以来, 国内外学者对天然气成因分类提出了许多方案。本文基于作者多年从事天然气工作的实践, 以“多源复合、多阶连续”的天然气成因新模式为指导, 提出了笔者认为较为合理的成因分类方案, 并简述了各种类型天然气的判别标志。

1 天然气形成的“多源复合、多阶连续”的新理论

基于近十多年来我国天然气地球科学研究的积累, 徐永昌等^[1]提出了天然气成因的新模式——多源复合、多阶连续、主源定型、主阶定名的天然成因理论^[1]。多源: 指形成天然气来源物质不是单一的, 它包括非生物成因和生物成因两类物质来源。在生物成因中, 以成油为主的有机质母质和成煤为主的有机母质均可形成气态烃的工业气藏。通常由这些来源形成的天然气在一定成生因素的影响下, 可复合共生, 形成气藏。在特定情况下, 包括幔源非生物成因气也能与生物成因气复合形成气藏。在自然界以气态烃为主的天然气的形成, 可以是单一的端元成分, 但多源复合则是更主要的特征。

天然气的形成分为若干阶段, 各阶段相互间又连续过渡是天然气形成的另一特征。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, 以某种外营力为主形成的气体来命名, 如生物气、热裂解气等, 即本文所说的主阶定名。由于成气过程的连续性, 在沉积盆地没有显著的抬升剥蚀时, 各

阶段形成气体将构成复合储集,即累积储聚。若成气过程盆地有抬升剥蚀,其后再沉降成气,在此地质背景下聚集的气体,将损失部分成分,即瞬时式储聚。这一切必然影响所形成的天然气藏气体地球化学属性,用新模式去剖析一些存疑的自然实例,可获得较圆满的解决。

2 国内外学者对天然气的分类意见

天然气作为独立的研究对象,系统研究始于 50 年代。当时以前苏联学者为代表,对广义天然气进行了类型划分^[7, 8]。70 年代末至 80 年代,欧美学者也以广义天然气为基础,作为系统的类型划分^[9, 10, 11, 12]。广义天然气的划分,除地壳中能形成工业储集的天然气外,还包括了非工业储集的空气、岩石中分散的气体和水溶气、火山喷气以及岩石变质和相互作用形成的分散气体。这些划分从理论上无疑对认识自然界气态物质的形成演化起到重要作用,但对具有工业意义的天然气(烃类气体和非烃乃至稀有气体氦等)研究相对较薄弱和系统性较差。80 年代以来,国内外天然气研究取得了突飞猛进的发展,对天然气的成因类型以其工业意义的狭义天然气为主,提出了一系列的分类划分方案^[3, 5, 13, 14, 15, 16, 17, 18]。其主体上把天然气分为生物(有机)成因和非生物(无机深源)成因两大类。对生物成因气,不同的学者按有机质类型分为煤型气和油型气,或按有机质演化程度划分为生物(细菌)气,热解气和裂解气。这些分类研究对天然气工业的发展起到了积极的推动作用。总体而言,80 年代以前的分类方案多以广义天然气概念为主,80 年代以来则偏重于以甲烷同系物为主的狭义天然气为基础。后者对天然气勘探研究指导意义更为明确,因此本文分类属于后者。

表 1 天然气成因类型划分表

Table 1 Genetic classification of natural gases

大 类 划 分	成 因 类 型						
	按母质类型划分		按外生营力划分				
			R _o (%)				
		0.3	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 捕 获 气						
	岩 石 化 学 反 应 气						

3 本文的成因分类方案

根据成气的物质来源分为有机成因气和无机成因气。国际上目前倾向于将之命名为生物气和非生物气,过去分类中的生物气,按此划分被命名为细菌气^[3]。本文侧重讨论有机成因气,它是目前发现的工业气藏的主要成因类型。基于有机母质的特征,再将之划分为煤型气和油型气两大亚类。在此基础上,以成气的主要外生营力划分为若干阶段,即生物化学作

用形成的生物气(细菌气),热催化、热裂解作用形成的热解气及有机质演化到高成熟阶段的高温裂解气。徐永昌等^[2],提出了在有机质演化相当于 $R_o=0.3\%—0.6\%$ 的阶段,同样是地质垂直剖面上的一个成气带,由于成气的主要外生营力尚不十分清楚,故用“生物-热催化过渡带气”来命名。生物气、“过渡带气”也应有煤型和油型的区别。由于判识参数不够明确,暂未将之划开。我们建议以表1的形式,划分天然气的成因分类。

此表以“多源复合”,主源定型的原则确定了天然气的两大类型和两大亚型。根据“多阶连续”,主阶定名的原则,划分出的生物气、生物-热催化过渡带气、热解气和高温裂解气等气体。在自然界所发现的天然气,常常是多种来源以及不同形成阶段的气体,在一定地质背景下,形成有成因联系的复合储聚,各类型、各阶段气体复合组成的比例将直接影响天然气的地球化学属性。在研究自然界的实例时,非常需要用上述观点作为指导,进行实例的剖析。

4 天然气成因综合判识

本文以烃类气体的组分和同位素组成为主,结合非烃气体及液态轻烃的组分和同位素组成,对各种来源和不同阶段形成的天然气,按主源定型,主阶定名所确定天然气类型和名称,提出相应的判识标志。

4.1 有机成因气的地球化学特征简述

4.1.1 油型气

成气母质 I、II_A 型干酪根为主,整个演化阶段形成天然气的特征为:

(1)生物成因气 有机质成熟度低($R_o < 0.3\%$)。甲烷含量高,一般大于95%。重烃含量低,一般小于1—2%, $C_1/\Sigma C_1—C_5$ 为0.95—1.00, $C_2/C_3 > 2.0$,甲烷碳同位素富 ^{12}C , $\delta^{13}C_1$ 值小于-55‰, $\delta^{13}C_{CO_2} < -10‰$, δD_{CH_4} 分布范围大,主要受水介质影响,一般为-255‰—-150‰, $^3He/^4He$ 比值和 $^{40}Ar/^{36}Ar$ 比值与空气大致相当。

(2)生物-热催化过渡带气 有机质成熟度较低, R_o 为0.3%—0.6%,由微催化作用和脂肪酸脱羧、芳环缩合作用形成。甲烷含量大于70%, $C_1/\Sigma C_1—C_5$ 为0.7—0.97, C_2/C_3 为1.0—5.0,甲烷较富集轻同位素, $\delta^{13}C_1$ 为-55‰—-48‰, $\delta^{13}C_{CO_2} < -10‰$, $^3He/^4He < 1.4 \times 10^{-6}$, $^{40}Ar/^{36}Ar > 295.5$,轻烃中石蜡指数 < 1 ,庚烷值 $< 10\%$,烷芳指数 $< 2.5\%$ 。

(3)热解气 根据演化程度可分为正常原油伴生气和正常凝析油气。

正常原油伴生气:相当于石油演化的成熟阶段,其 R_o 为0.6%—1.3%,由热催化作用形成的天然气。气体中甲烷含量大于50%,重烃含量 $> 5\%$,最高可达40%—50%, $C_1/\Sigma C_1—C_5=0.50—0.90$, C_2/C_3 为0.9—3.5, iC_4/nC_4 小于1, $\delta^{13}C_1$ 为-48‰—-40‰。甲烷同系物碳同位素为 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3 < \delta^{13}C_4$, δD_{CH_4} 通常为-300‰—-200‰。轻烃中石蜡指数为1—3,庚烷值为10%—35%,烷芳指数为2.5%—22%, $^3He/^4He$ 比值 $< 1.4 \times 10^{-6}$, $^{40}Ar/^{36}Ar$ 比值 > 300 。

正常凝析油气:处于石油演化的高成熟阶段, R_o 为1.3%—2.0%,由热催化和热裂解复合作用形成。甲烷含量比正常原油伴生气高,属湿气,甲烷含量一般大于60%,重烃大于5%,最高可达20%—25%, $C_1/\Sigma C_1—C_5$ 为0.60—0.90, C_2/C_3 为0.9—3.0, iC_4/nC_4 明显小于1。甲烷富重碳同位素, $\delta^{13}C_1 = -40‰—-36‰$, $\delta^{13}C_{CO_2} < -10‰$, δD_{CH_4} 常 $> -300‰—$

—200‰。石蜡指数为 3—10,庚烷值为 35%—60%,烧芳指数为 22%—60%, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比与正常原油伴生气相同。

(4) 高温裂解气 相应有机母质演化过成熟阶段 $R_o > 2.0\%$, 由液态烃裂解和残余有机质进一步演化形成。甲烷含量高,一般大于 95%,重烃含量 $< 5\%$, $C_1/\Sigma C_1 - C_5$ 值高,为 0.95—1.00, C_2/C_3 比为 1.0—3.0, 甲烷碳同位素富集 ^{13}C , $\delta^{13}\text{C}_1 > -36\%$, $\delta\text{D}_{\text{CH}_4} > -200\%$, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值, 主要与源岩时代有关。

4.1.2 煤型气

成气母质以 II_B、III 型有机质为主,是在煤化作用过程中形成的气态烃,其特征为:

(1) 生物成因气 有机质成熟度低, $R_o < 0.3\%$, 由生物化学作用形成,气体组分以甲烷为主,甲烷含量 $> 95\%$, $C_1/\Sigma C_1 - C_3$ 为 0.95—1.00, C_2/C_3 大于 2.0, 甲烷富集轻碳同位素, $\delta^{13}\text{C}_1 < -60\%$, 相同演化阶段 $\delta^{13}\text{C}_1$ 轻于腐泥型母质生物成因气。 $\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$ 反映母质沉积环境,一般 $< -200\%$ (大多为 -210% — -280%)。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值与大气大致相当。

(2) 生物—热催化过渡带气 有机质成熟度较低, $R_o = 0.3\% - 0.6\%$ 。甲烷含量大于 70%,重烃含量低,但一般大于 5%, $C_1/\Sigma C_1 - C_5$ 为 0.70—0.95, C_2/C_3 为 0.8—3.0, 甲烷碳同位素富集 ^{12}C , $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 -60% — -45% , $\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$ 与沉积环境水介质盐度有关。气体常伴生一定量的轻烃,轻烃中石蜡指数 < 1.5 , 庚烷值 $< 10\%$, 烧芳指数 $> 3.0\%$ 。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值近于或小于 1.4×10^{-6} , $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值近似或大于 295.5。

(3) 热解气 相当于煤化作用的长焰煤至瘦煤阶段, R_o 为 0.6%—2.0%, 由热催化作用形成的气体,其甲烷含量 $> 70\%$,重烃 $> 5\%$, $C_1/\Sigma C_1 - C_5$ 为 0.70—0.95, C_2/C_3 为 0.8—3.0, iC_4/nC_4 明显小于 1, 甲烷碳同位素相对富含 ^{12}C , $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 -45% — -30% , $\delta\text{D}_{\text{CH}_4}$ 为 -230% — -150% 。大部分伴生轻质油,特别是凝析油。轻烃中石蜡指数为 1.5—2.0, 庚烷值为 10%—60%, 烧芳指数为 3.0%—80%, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值 $< 1.4 \times 10^{-6}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值 > 300 。

(4) 高温裂解气 相当煤化作用的贫煤以上阶段, $R_o > 2.0\%$, 在高温裂解过程中形成的甲烷,气体为干气,甲烷含量 $> 95\%$,重烃 $< 5\%$, $C_1/\Sigma C_1 - C_5$ 比值高,为 0.95—1.00, C_2/C_3 比为 1.5—7.0 明显小于 1, 甲烷碳同位素明显富集 ^{13}C , $\delta^{13}\text{C}_1 > -30\%$, $\delta\text{D}_{\text{CH}_4} > -150\%$ 。由于在我国条件此类气体源岩时代一般是石炭—二叠系,故 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值远小于 1.4×10^{-6} (一般小于 10^{-7}), 而 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值大于 800。

在有机成因气中, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值具有明显 ^{40}Ar 源岩时代积累效应。另外,天然气中汞的丰度也是区别煤型气与油型气的重要指标,煤型气中和汞含量主要范围为 $n \times 10^2 - 10^6 \text{ng}$ (Hg/m^3)。而油型气中汞含量范围为 $10^1 - 10^4 \text{ng}$ (Hg/m^3)。一般情况下,煤型气汞含量 $> 700 \text{ng}$ (Hg/m^3), 油型气汞含量 $< 600 \text{ng}$ (Hg/m^3)。

重烃的碳同位素组成受母质控制明显,因此, $\delta^{13}\text{C}_2$ 和 $\delta^{13}\text{C}_3$ 是区别油型气和煤型气的重要标志之一,一般情况下, $\delta^{13}\text{C}_2 > -25.1\%$ 和 $\delta^{13}\text{C}_3 > -23.2\%$ 主要是煤型气, $\delta^{13}\text{C}_2 < -28.8\%$, $\delta^{13}\text{C}_3 < -25.55\%$ 者以油型气为主^[4], 张士亚等^[5] 将 $\delta^{13}\text{C}_2$ 为 -29% 作为划分油型气与煤型气的标志,即 $\delta^{13}\text{C}_2 > -29\%$ 为煤型气, $\delta^{13}\text{C}_2 < -29\%$ 为油型气。

4.2 无机成因气的地球化学简要特征

4.2.1 幔源气

主要涉及行星形成时即已被捕获在地幔中的原生甲烷等,在东太平洋中脊、东非裂谷及岩浆包体、温泉和热液喷出口常见,其特征:

Ⅱ(1)组分特征 幔源气属干气,烃类气体以甲烷为主,其在气体中含量 $<50\%$,一般仅含极微量重烃,同时含 CO_2 、 N_2 、 H_2S 等气体,含较高的 ^3He 。

(2)同位素特征 $\delta^{13}\text{C}_1$ 介于 -20% — -7% 左右。一般将 $\delta^{13}\text{C}_1 > -20\%$ 作为无机成因标志之一。在甲烷及其同系物碳同位素系列中具 $\delta^{13}\text{C}_1 > \delta^{13}\text{C}_2 > \delta^{13}\text{C}_3$ 特征,稀有气体同位素是鉴别幔源气重要标志,一般情况下, $^3\text{He}/^4\text{He} > 1.4 \times 10^{-6}$ 时具有幔源气混入, $^3\text{He}/^4\text{He} > 10^{-5}$ 时全为幔源气, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值变化较大,高者可达数千至上万。

4.2.2 岩石化学反应气

岩石化学反应气指岩浆活动和变质作用演化过程中无机矿物间的高温反应形成的气体和碳酸盐、硫酸盐分解产生的非烃气体。岩石化学反应形成的烃类气甲烷占优势。而整个气体中非烃气体比例很高,常见有 CO_2 、 N_2 、 H_2 、 H_2S 和 CO 。烃气中 $\delta^{13}\text{C}_1$ 变化范围较大,从 -2% — -41% ^[6],但以 -35% — -25% 区间最为普遍。若 $\delta^{13}\text{C}_1 < -20\%$,则需要其它辅助证据。重要的是根据 CO_2 与 CH_4 热平衡系统同位素分馏机制来判识是否为岩石化学成因。其 $\delta^{13}\text{C}_1$ 大多在 -25% — -15% ,而 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 大多 $< -8\%$,最大可达 $+27\%$ 。对于与岩浆作用和火山作用有关的岩石化学反应气,其稀有气体同位素组成为:以幔源物质为主的气体 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值均相对高,基本与幔源气一致,而变质作用和以壳源物质为主的岩石化学反应气,由于相对高的反应温度和壳源物质的加入, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值相对高于地壳沉积体自生有机成因气体, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值变化较大。

结 语

(1)天然气的形成具有多源复合、多阶连续的特点,不同类型有机质在演化早期阶段都能形成生物(细菌)气。地球原始捕获和岩石化学反应亦是部分甲烷和大量非烃气体的来源。

(2)总体来说,油型气的重烃含量比煤型气高,Ⅲ型母质可形成早期凝析(轻质)油。

(3)在 $R_0=0.5\%$ — 0.6% 时,腐泥型母质与腐殖型母质形成的天然气,甲烷碳同位素组成十分接近难以区分。 $R_0 < 0.5\%$ 时,腐泥型生成的气或许比腐殖型生成的气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 偏重,而 $R_0 > 0.6\%$ 时,随演化程度增高,煤型气的碳同位素组成重于油型气。

(4)生物—热催化过渡带气、热催化气和热催化—热裂解气伴生的轻质(凝析)油中石蜡指数、庚烷值和烷—芳指数在同等演化阶段煤型气比油型气为数值高。

(5)在有机成因气中, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比和 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值的的变化与源岩时代积累效应有关。即随源岩时代变老, $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值降低(1.4×10^{-6} — 1.1×10^{-7}), $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值增大($295.5 - n \times 10^3$)。而对无机成因气而言,由于原始地球捕获气体的地幔脱气,其 $\delta^{13}\text{C}_1$ 值高($> -20\%$), $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值大于 1.4×10^{-6} , $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 值一般在 $(0.35 - 20) \times 10^3$ 范围。

(6)鉴于腐殖型母质比腐泥型母质成气作用更早,生物成因气与生物—热催化过渡带气的甲烷同位素组成界限也有差别。将腐泥型母质生物气下降定为 $\delta^{13}\text{C}_1 = -55\%$,腐殖型母质定为 -60% ,与国内外腐殖型母质天然气在 $\delta^{13}\text{C}_1$ 为 -55% — -60% 的气体组分中含有一定重烃的地质实际吻合。

(7)综合天然气地质、地球化学研究,按照多源复合、主源定型;多阶连续、主阶定名的原则,将天然气进行成因类型的系统划分(见表1)。

收稿日期:1994-12-5

参 考 文 献

- [1] 徐永昌、沈平,天然气成因新模式,中国科学, B 辑, 1983, 23(7)。
- [2] 徐永昌、沈平、刘文汇、王万春,一种新的天然气成因类型——生物—热催化过渡带气,中国科学(B 辑), 1990, (9): 975—980。
- [3] Schoell, M., Multiple origins of methane in the Earth, *Chemical Geology*, 1988, 71:1—10.
- [4] 戴金星,我国天然气藏类型划分,石油学报, 1982, 3(4)。
- [5] 张士亚、郜建军、蒋泰然,利用甲、乙烷碳同位素判识天然气类型的一种新方法,石油与天然气地质文集(1),中国煤成气研究,北京:地质出版社, 1988。
- [6] Hoefs, J., *Stable Isotope Geochemistry*, Springer—Verleg, Berlin, Heidelberg, New York, 1980.
- [7] Козлов, А. Л., *Проблемы геохимии природных газов Недр*, Москва, 1950.
- [8] Соколов, В. А., *Процессы образования и миграции нефти газа, М.*, Недр, 1965, 276.
- [9] Tissot, B. P. and Welte, D. H., *Petroleum Formation and Occurrence—A New Approach to Oil and Gas Exploration*, Springer—Verleg, Berlin, Heidelberg, New York, 1978.
- [10] Hunt, J. M., *Petroleum Geochemistry and Geology*, W. H. Freeman and Company, San Francisco, 1979.
- [11] Высоцкий, Н. В., *Гелогия природного газа*, Недр, Москва, 1979.
- [12] Tiratsoo, E. N., *Natural Gas — A Study* (3rd ed.), Scientific Press, Beaconfield, 1979.
- [13] MacDonald, G., The many origins of natural gas, *Journal of Petroleum Geology*, 1983, 5:341—362.
- [14] 熊寿生、张文达、卢培德、吴德源,试论我国天然气的多种成因作用与多种成气模式,石油实验地质, 1984, 6(3): 213—228。
- [15] 徐永昌、沈平,中原、华北油地区《煤型气》地化特征初探,沉积学报, 1985, 3(2):37—46。
- [16] 包茨,天然气地质学,北京:科学出版社, 1988。
- [17] 陈书荣,天然气地质学,武汉:中国地质大学出版社, 1989。
- [18] 张厚福、吕福亮,天然气成因类型及其判识标志,天然气地质研究论文集,北京:石油工业出版社, 1989, 90—100。

Genetic Indicators for Natural Gases

Liu Wenhui and Xu Yongchang

(State Key Laboratory of Gas Geochemistry, Lanzhou Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract

Systematic classification for natural gases is not only a foundation for development of natural gas geological theory, but also very significant in exploration of natural gases. Based on a great deal of geological and geochemical data obtained from many years of academic research of our group and others, a new classification for natural gases was put forward under the

guidance of “multi—source complex and multi—stage continuity”. In this classification, natural gases were classified into the biogenic and abiogenic substantially, the biogenic natural gas was further divided into oil type gas and coal type gas according to its source organic matter. Natural gases were also classified dynamically as microbial gas, biothermo-catalytic transitional gas, thermo-catalytic decompositional gas, and high temperature decomposition gas. Different types of natural gases often show different geochemical behaviours for the reason of variation in organic input, source rocks and thermal maturity. These geochemical properties provide indicators for classification of natural gases. The indicators include chemical compositional related ones: CH₄ Index, C₁/C₁₋₅, C₂⁺, C₂/C₃, and Hg abundance; isotopic compositional ones: δ¹³C₁, δ¹³C₂, δ¹³C₃, δ¹³C₄, δ¹³C_{CO₂}, δD_{CH₄}, ³He/⁴He, ⁴⁰Ar/³⁶Ar; the accompanying liquid hydrocarbon indices: paraffin index, heptane index, alkane/aromatics index; and their internal relations.

Key Words: natural gas genetic classification multi-source complex and multi-stage continuity gas geochemistry indicator