

塔里木盆地北部天然气 地球化学特征及气源探讨

李先奇 戴金星

(中国石油天然气总公司石油勘探开发科学研究院, 北京 100083)

本文从天然气组份、碳同位素及伴生凝析油等方面综合分析了塔里木盆地北部天然气的地球化学特征和成因类型。并利用碳同位素特征和天然气运移指数(ΔR_3)对该区天然气气源进行了探讨。

关键词 天然气 地球化学特征 成因类型

第一作者简介 李先奇 男 25岁 博士生 天然气地质

塔里木盆地天然气储藏量丰富,天然气储气层系多、跨度大,与油藏在平面和纵向上交叠分布。天然气的成因类型多样,具多气源、多阶段生成的特征。目前以塔里木盆地北部(以下简称塔北)发现的天然气最为丰富、储量最多,本文就塔北天然气地球化学特征和气源作一探讨。

1 天然气地球化学特征及成因类型

1.1 天然气组份特征

塔北天然气以烃类气为主,非烃气体一般小于10%,其中 N_2 含量一般低于8%, CO_2 低于2%。烃类气体中以甲烷为主,但总体湿度较大,60%的天然气样品中甲烷含量在80%~95%之间,仅有6.6%的气样中甲烷含量大于95%(图1)。稀有气体He、Ar含量在0.01%~0.06%之间。

在塔北隆起上,桑塔木断垒带和LN59井区气藏中天然气甲烷含量最高,非烃气体含量最少,其中的LN14(C、O)、LN22(C)、LN59(C)等井中天然气属于干气。在塔北隆起北缘靠近库车拗陷的斜坡带上,提1井、YM7、YM9井及牙哈、红旗、羊塔克等构造带上的气样,甲烷含量平均为85%,重烃含量在10%左右,这些天然气被确认为煤成气(下述),湿度较大。

1.2 天然气重组份特征

这里的重组份系指天然气组份中 C_6 、 C_7 的单体烃。天然气中不同程度地都含有一定量的重烃,它们的形成演化与天然气息息相关,且往往包含着更多的反映母质类型和成熟程度

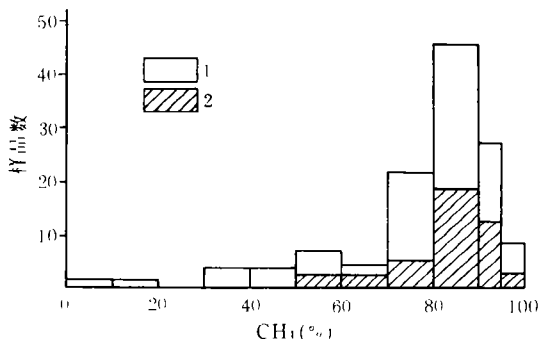


图1 塔北地区天然气甲烷含量频率图
1. 伴生气中的甲烷; 2. 气藏气中的甲烷

的信息量。本文用的指标有石蜡指数(PID_1)和庚烷值(PID_2)及 C_7 烃系统三角关系。

石蜡指数 $PID_1 = (2\text{-甲基己烷} + 3\text{-甲基己烷}) / \text{二甲基环戊烷之和}$; 庚烷值 $PID_2 = \text{正庚烷} / \text{环己烷至甲基环己烷之间所有化合物之和}$ 。一般随热演化程度增加, 石蜡指数与庚烷值也增大(沈平等, 1991)。由本区天然气两个指数的关系图(图2)可看出, 塔北天然气主体处于成熟至高熟状态, 看不到过成熟天然气的存在。这可能是因为石蜡指数、庚烷值是两个由 C_6 、 C_7 系列重烃组份构成的参数, 而在过成熟天然气中这些重烃组份不易出现, 这样过成熟气就不能由石蜡指数、庚烷值反映出来, 而要借助于同位素值等特征来确认。 C_7 烃系列中的甲基环己烷(MCH)主要来自高等植物木质素、纤维素、酯类等, 是反映陆源母质类型的良好参数, 热力学性质稳定; 各种异构的二甲基环戊烷(RCPC₇)主要来自水生生物类的脂化合物, 并受成熟度的影响; 正庚烷(nC_7)主要来自藻类和细菌, 对成熟作用十分敏感, 是良好的成熟度指标。所以用 nC_7 、MCH、RCPC₇ 的内分布关系可以反映天然气的母源及演化程度(戴金星, 1993)。

图3是塔北天然气 C_7 系统三角图, 以 $MCH = 46\%$ 为界可分煤成气和油型气两大类。煤成气主要来自提1井、YM7井、YM9井等塔北北部邻近库车拗陷的斜坡断隆带第三系产层和库车拗陷内的油气藏中。油型气分布较广, 从英买力到东河塘、雅克拉, 再到轮南、桑塔木、吉拉克等均有分布。总体而言, 油型气的热演化程度较煤成气要高。

1.3 天然气碳同位素特征

天然气的稳定同位素特别是碳同位素是反映气源岩母质类型、热演化程度的良好指标。作者分析了塔北近30个气样的碳同位素, 总体上, 甲烷碳同位素变化区间为 $-32\text{‰} \sim -45\text{‰}$, 乙烷碳同位素区间为 $-20\text{‰} \sim -40\text{‰}$, 丙烷区间值为 $-20\text{‰} \sim -35\text{‰}$ 。每个气样的碳同位素值基本都符合 $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3 < \delta^{13}C_4$ 的正碳同位素系列, 说明塔北天然气是有机成因的天然气(戴金星, 1989)。

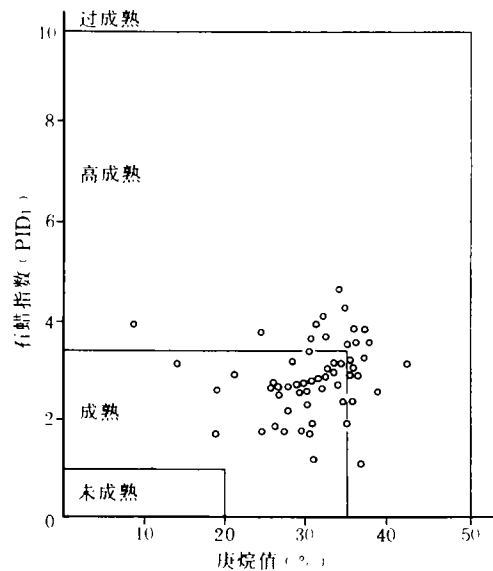


图2 塔北天然气石蜡指数与庚烷值关系图

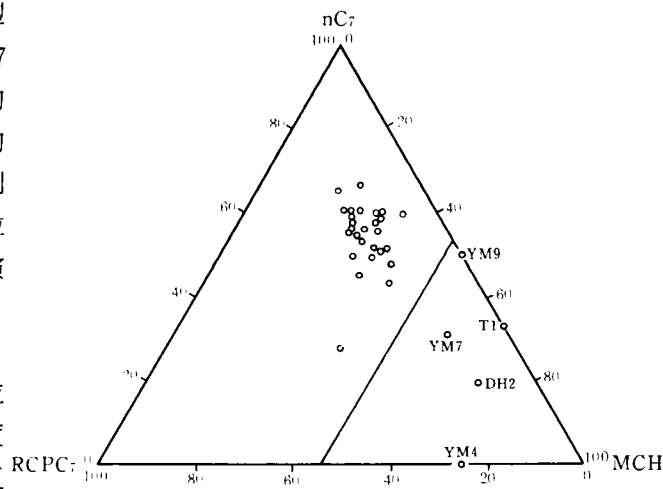


图3 塔北天然气 C_7 烃系统三角图

图4是戴金星提出的有机成因烷烃气鉴别图版。该图版是在我国477个有机成因天然气的碳同位素系列组合的数据基础上,并利用了国外7个盆地(地区)已研究确定烷烃气成因类型的129个碳同位素系列组合数据而编制成的(戴金星等,1992),具有很好的代表性和鉴别作用。

将塔北近30个气样的碳同位素系列数据投于该图版上,可以看到塔北大部分天然气分布在Ⅰ区,即油型气区;落在Ⅰ区即煤成气区的是提1、YM7、YM9等井天然气;落于Ⅴ区的沙3、Y464井天然气,从烃类其它特征可以判定为煤成气;Ⅳ区内的沙16(K)、草2(C)两口井的天然气主体应为油型气,但有少量煤成气的混入,导致其 $\delta^{13}C_2$ 、 $\delta^{13}C_3$ 发生局部倒转。

塔北隆起油型气产出层系比煤成气为多。由于成熟程度的不同,它们之间又有所差别。根据油型气的甲烷含量 $C_1/\Sigma C_{1-5}$ 与甲烷的碳同位素 $\delta^{13}C_1$ 值的关系(图5),可以看出油型气的成熟度分布情况,位于Ⅰ区的天然气 $\delta^{13}C_1 > -35\%$, $C_1/\Sigma C_{1-5} > 95\%$,为热演化程度最高的高温裂解气;Ⅱ区天然气 $\delta^{13}C_1$ 值在 $-43\% \sim -35\%$ 之间, $C_1/\Sigma C_{1-5}$ 在 $82\% \sim 98\%$ 之间,热演化程度中等,为凝析气或伴生气;Ⅲ区的天然气 $\delta^{13}C_1$ 值在 $-40\% \sim -45\%$, $C_1/\Sigma C_{1-5}$ 变化范围较宽,热演化程度最低,主要是正常原油伴生气。Ⅰ类气主要分布在桑塔木断垒带及草湖地区,Ⅱ类气包括轮南、吉拉克、雅克拉等地的天然气,Ⅲ类天然气分布在东河塘、英买力等地。沈平等(1991)对我国许多盆地油型气 $\delta^{13}C_1$ 与 $C_1/\Sigma C_{1-5}$ 关系的研究中,也提出过相似的油型气成熟度划分。

1.4 凝析油地球化学特征

天然气与其伴生的凝析油的生成、演化一般经历相似的地质环境和热演化历史,具密切的共源性,所以通过对凝析油的研究,也可加深对天然气地球化学特征的认识。

凝析油全油碳同位素,其组成和变化主要受制于源岩有机质类型和热演化阶段。据国内外学者的研究(戴金星,1992;Chung,1992),一般油型油的碳同位素小于 -29% ,比煤成油

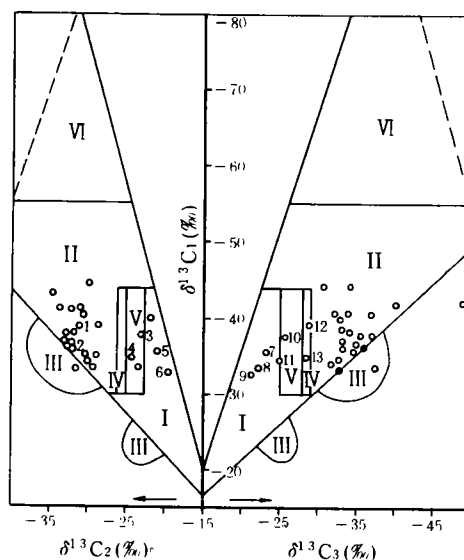


图4 塔北地区有机成因烷烃气鉴别图

Ⅰ. 煤成气区; Ⅱ. 油型气区; Ⅲ. 碳同位素系列倒转气区;
Ⅳ. 煤成气和油型气区; Ⅴ. 煤成气、油型气和混合气区;
Ⅵ. 生物气和亚生物气区

1. S16; 2. C2; 3. S3; 4. Y464; 5. T1; 6. YM9; 7. T1;
8. YM7; 9. YM9; 10. S3; 10. S3; 11. Y464; 12. S16; 13. C2

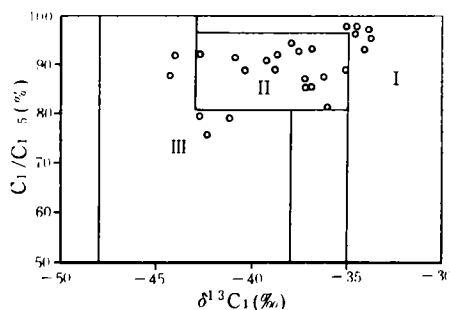


图5 塔北地区油型气 $\delta^{13}C_1$ 与 C_1/C_{1-5} 关系图

Ⅰ. 高温裂解气; Ⅱ. 凝析气或伴生气; Ⅲ. 正常原油伴生气

的轻 5‰~7‰,而且随成熟度增加,其全油碳同位素有变重的趋势。另外,凝析油的 Pr/Ph 比值也反映母质类型和沉积环境(戴金星,1992)。本文利用塔北凝析油全油 $\delta^{13}C_1$ 与 Pr/Ph 关系图(图 6),以此区分不同生成环境和热演化程度的凝析油。

图 6,以 $\delta^{13}C = -29\text{‰}$ 为界,上部为油型油,下部为煤成油,煤成油的 Pr/Ph 值一般大于 2.0。油型油中又可分为两个区域,Ⅰ区 $\delta^{13}C$ 大部分低于 -32‰ , Pr/Ph < 1.1, Ⅱ区 $\delta^{13}C$ 在 $-29\text{‰} \sim -32\text{‰}$ 之间, Pr/Ph 在 1.1~1.6 之间,这主要是由于 Ⅰ区内凝析油热演化程度更高的原因。这与前面天然气的地球化学特征相一致。

1.5 天然气成因类型及其分布

根据以上的分析,塔北隆起天然气大致可分为 3 种类型:(1)油型热解气,塔北大多数天然气属此种成因,从轮南、吉拉克到雅克拉、东河塘、英买力等地区均有分布;(2)高温热裂解气,平面上分布在塔北隆起桑塔木断垒带及其附近及草湖地区,纵向上主要集中于 O、C 产层中;(3)煤成气,主要分布在塔北北部断裂构造带和库车拗陷内,产气层系较新,主要是第三系、侏罗系、白垩系。这 3 类天然气的分布如图 7 所示。

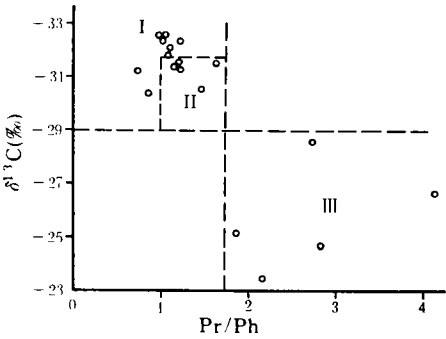


图 6 塔北地区凝析油 $\delta^{13}C_1$ 与 Pr/Ph 关系图
Ⅰ. 正常凝析油; Ⅱ. 高成熟凝析油; Ⅲ. 煤成油

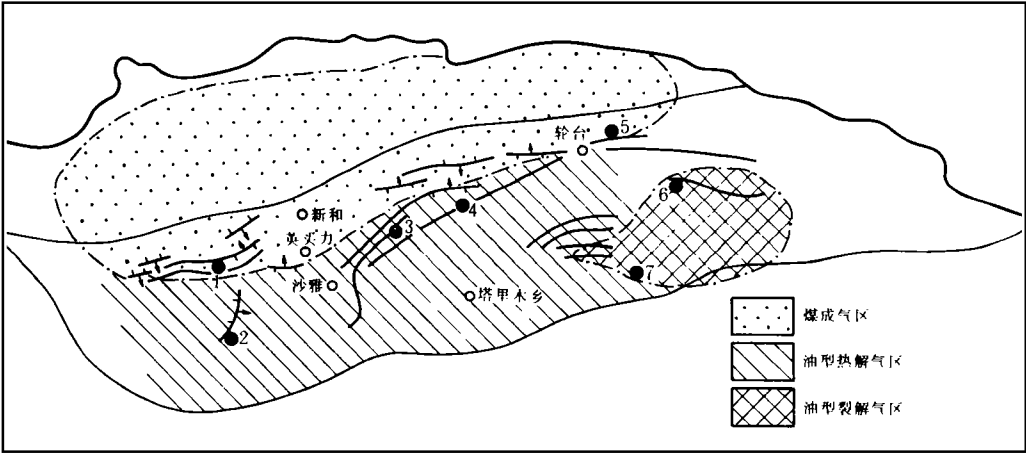


图 7 塔北地区 3 类天然气分布略图
1. YM7; 2. YM2; 3. DH1; 4. SC2; 5. T1; 6. C1; 7. LN59

2 塔北天然气气源探讨

从前面的分析可知,塔北天然气既有煤成气又有油型气,即源自两种截然不同的生成环境。那么本区应具有腐泥、腐殖两类母源,下面就深入探讨一下本区的气源问题。

2.1 利用碳同位素判识

2.1.1 成熟度判识

利用戴金星(1989,1992)提出的我国油型 $\delta^{13}\text{C}_1$ 与 R° 关系回归方程: $\delta^{13}\text{C}_1 = 15.801\lg R^\circ - 42.20$;煤成气 $\delta^{13}\text{C}_1$ 与 R° 关系回归方程: $\delta^{13}\text{C}_1 = 14.121\lg R^\circ - 34.39$ 。分别对塔北 26 个油型气样和 5 个煤成气样进行成熟度回归。油型气 R° 回归值如表 1。

表 1 塔北地区油型气回归 R° 值数据表

地 区		井号	层系	$\delta^{13}\text{C}_1(\text{‰})$	回归 R° 值范围
塔 北 隆 起	轮 南 桑塔木断垒和草湖周缘	LN48	O	-34.62	$\frac{2.79 \sim 3.40}{3.121}(7)$
		LN44	O	-34.57	
		S18	C	-33.81	
		JF123	O	-35.16	
		LN59	C	-34.57	
		JL107	C	-33.94	
		草 2	C	-34.15	
	轮 南 桑塔木南、吉拉克	JF131	T	-37.13	$\frac{2.09 \sim 2.50}{2.331}(9)$
		JF132	T	-36.34	
		吉 106	T	-36.09	
		LN51	T	-36.24	
		吉南 1	T	-36.96	
		JF100	T	-36.04	
		LN55	T	-36.91	
		吉 102	T	-36.03	
		LN58	T	-35.92	
	轮 南 轮南断垒带	LN101	T	-38.87	$\frac{1.62 \sim 1.95}{1.74}(3)$
		LN10	O	-37.61	
		LN34	T	-38.77	
	雅克拉	SC2	O	-40.91	$\frac{1.21 \sim 1.53}{1.343}$
		S4	J	-39.30	
		S5	K	-40.43	
	东河塘	DH1	C	-41.28	$\frac{0.92 \sim 1.14}{1.03}(2)$
		DH11	C	-42.75	
	英买力	英买 2	O	-42.39	$\frac{0.97 \sim 0.76}{0.865}(2)$
		S16	O	-44.05	

注:分子为区间值、分母为平均值、括号内为样品数

表 1 中可以看出,油型气中除了英买力地区气样回归 R° 值低于 1.0%外,塔北其它气样回归 R° 值均大于 1.0%,且在塔北隆起上 R° 值从西向东逐渐升高。

表 2 是塔北地区可能的油型气的烃源岩实际 R° 值分布(童晓光等,1992),表中 C 的 R° 普遍低于 1.0%,而 E、O 热演化程度非常高,除英买力地区(O) $R^\circ < 1.0\%$ 外,普遍大于

1.0%，而且在塔北隆起 R^o 值从西向东渐次升高。从回归值与实际 R^o 值的对比来看，显然本区油型气的主力气源岩应是 $E-O$ 。

表 2 塔北地区 $E、O、C$ 源岩实测 R^o 值数据表

地区、井号		E	O	C
草湖次凹		2.0~4.0		0.63~0.84
轮南	LN5		1.35~1.55/1.48(6)	
	LN10		1.20~1.40/1.29(5)	0.75~0.89
	LN16			0.7~1.19/0.8(8)
雅克拉		1.0~2.0		
英买力 YM1			0.72~1.22/0.9(9)	
群克 1			1.05~1.63/1.33(14)	
满加尔				0.6~1.10(31)
TH1				0.66~0.95/0.85(5)

注：分子为区间值、分母为平均值、括号为样品数

表 3 是库车拗陷 T-J 烃源岩实际 R^o 值(杨斌等,1989)与煤成气回归 R^o 值的对比,从表中可以看出,二者成熟度相近,反映了塔北地区煤成气和库车拗陷 T-J 煤系的紧密生源关系。

表 3 库车 T-J₂ 源岩 R^o 实测值与煤成气甲烷回归 R^o 值对比表

天然气产区	井 号	层 系	$\delta^{13}C_1(\text{‰})$	R°
英买力	YN7	E	-33.53	$\frac{1.15\sim1.25}{1.20}(2)$
	YM9	E	-33.02	
提尔根和库车	T1	N	-35.71	$\frac{0.60\sim0.94}{0.783}(3)$
	S3	K-E	-37.56	
	依 464	J	-34.79	
源岩地区或井号	井 段	层 系	实测 R° 值	
比尤勒包古孜	地面	J_{1-2}	0.66	
	地面	$T_3(\text{煤})$	0.96	
卡普沙良	地面	J_{1-2}	0.67~1.09	
	地面	T	1.09~1.43	
阳霞煤	地面	J_{1-2}	0.95	
库车河煤	地面	$J_{1-2}(\text{煤})$	0.63	
吐深 4 井	1196~1440m	J	0.62	

注：分子为区间值、分母为平均值、括号内为样品数

2.1.2 气、油、岩系列同位素对比

根据碳同位素的继承性和分馏效应,从源岩到降解生成的原油、凝析油直到天然气,其碳同位素依次变轻,可以形成有规律的递变序列。本文选用 37 个气样能反映其母质类型的

乙烷碳同位素 $\delta^{13}\text{C}_2$ 、33 个(凝析)油样的饱和烃、全油、芳烃碳同位素及塔北 3 套可能烃源岩抽提物的饱和烃、芳烃和干酪根碳同位素。做出本区气、油、岩系列对比图(图 8)。

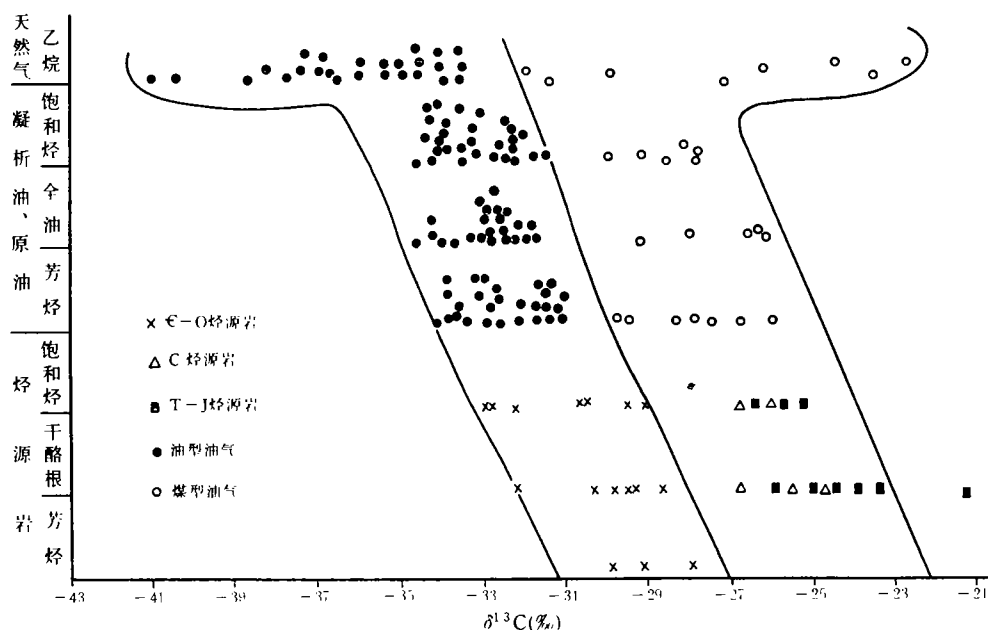


图 8 塔北地区气油岩系列同位素对比图
1. E-O 烃源岩; 2. C 烃源岩; 3. T-J 烃源岩; 4. 油型油气; 5. 煤型油气

图 8 中碳同位素的演化基本分成两个序列。左边序列包括了塔北地区除煤成气、煤成油外的所有天然气、凝析油及正常原油的同位素值, 3 套烃源岩中只有 E-O 源岩干酪根及抽提物的同位素落入此序列; 右边序列的天然气和凝析油产自塔北隆起北侧斜坡带和库车拗陷的煤成气和煤成油, 落入此序列的烃源岩有 C 和库车的 T-J, 但根据油气的产出地区判断, 库车拗陷的 T-J 源岩与油气的关系更密切。

另外, 图 8 中油、气、源岩的碳同位素演化具有很好的线性和继承性。这两个演化序列直观地反映了本区天然气的两大来源, 一个为海相的 E-O 烃源岩, 另一个是陆相的 T-J 煤系烃源岩。

2.2 利用天然气运移指数 ΔR_3 的分布进行气源探讨

对天然气运移方向和距离的研究, 有助于分析天然气的来源, 本文试图在这一方面做些尝试。根据前人总结的规律, ΔR_3 是天然气运移判识的良好指标(傅家谟, 1992)。

$$\Delta R_3 = |R_3 - R_4|/R_4, R_3 = iC_4/nC_4, R_4 = iC_4/C_3$$

随运移距离的增加 R_3 递增、 R_4 递减, 致使 ΔR_3 呈现更大幅度的增加。本文计算了塔北地区 45 个气样的 ΔR_3 值, 如表 4。这些数值的分布特征大体上反映了天然气的运移情况。

首先在轮南地区, ΔR_3 最大值平面上分布于轮南断垒带和轮南中部区, 纵向上处于这里的 O 和 J 产层, ΔR_3 最低位于桑塔木断垒带的 O 产层。桑塔木断垒带上, 从下向上, 从 O 到

C 和 T,天然气 ΔR_3 值依次增大。但轮南断垒带和轮南中区最下部 O 产层的 ΔR_3 值却比上部产层的都大。

表 4 塔北地区天然气运移指标 ΔR_3 数据表

地 区	O	C	T	J	K	N—E
轮南断垒带	LN4;0.64, LN1;0.66 LN10;0.68, S9;0.64 平均;0.66		LN1;0.59, LN10;0.41 LN2;0.55, LN26;0.39 LN3;0.68, LN5;0.44 平均;0.51	LN2;0.66 LN3;0.66 S3;0.62 平均;0.65		
轮南中部区	LN30;0.68, LN8;0.60 平均;0.64	LN9;0.61	LN30;0.46			
桑塔木断垒带	LN14;0.31, LN44;0.61 LN48;0.47, LN54;0.54 JF123;0.13, 平均;0.41	LN14;0.58 LN22;0.68 LN44;0.66 LN48;0.45 S17;0.62 平均;0.60	LN22;0.76 S18;0.53 S17;0.60 平均;0.63			
解放渠东			LN53;0.35, LN55;0.41 JF132;0.60, JF100;0.63 平均;0.50			
吉拉克			LN57;0.57, LN58;0.73 吉 106;0.50, 平均;0.60			
雅克拉	SC2;0.61			S7;0.64	S5;0.69	
北部斜坡带	YM7;0.53					提 1;0.84 YM9;0.73 YM7;0.80 平均;0.79

根据 ΔR_3 值的分布情况,笔者认为轮南—吉拉克地区天然气存在两次运移聚集期。第一期天然气主要聚集于 O、C 储层中,推测其运移期大致在海西晚期到印支期,天然气主要来源于桑塔木断垒带和东侧的草湖次凹的 C—O 源岩,当时地势北高南低,地层南倾,天然气主要从桑塔木断垒向上运移,侧向上由此向北运移。第二期天然气主要聚集于中生界的储层中,推测运移发生于喜山期,这时烃源岩(O)普遍进入二次生烃期,生成的天然气主要沿轮南断垒带和桑塔木断垒带上的“Y”字型断裂向上运移,赋存于中生界的披覆构造中,晚第三纪康村时期,库车拗陷强烈沉降,塔北地层发生“倒倾”,一部分天然气通过断层和砂质疏导层南移进入解放渠东和吉拉克背斜圈闭中。

雅克拉地区,天然气 ΔR_3 值从 O 到 T、J 依次增大,反映出天然气由下向上,由 O 源岩向上部储层运移的特征。

塔北隆起北部斜坡带,提 1、YM7、YM9 第三系的天然气 ΔR_3 平均值为 0.79,在塔北是

最大的,这显然中由于库车拗陷生成的煤成气经漫长的运移到此聚集的结果。

从以上的分析可以看出,塔北隆起油型气的运移距离普遍没有北侧的煤成气运距离远,这就说明塔北油型气可能主要源自隆起上或草湖次凹中的 $\text{C}-\text{O}$ 源岩,而满加尔拗陷的烃源岩似乎对塔北目前发现的天然气没有直接的贡献。

3 结论

通过对塔北天然气地球化学特征的分析 and 气源岩的探讨,本区天然气主要有 3 种成因类型,即煤成气、油型热解气和油型裂解气。主力气源岩为两套,即油型气主要来自隆起上和草湖次凹内的 $\text{C}-\text{O}$ 烃源岩,煤成气主要源自库车拗陷 T-J 煤系源岩。库车煤成气勘探近年形势很好,发现了一批煤成气田(藏),验证了早已提出的中亚煤成气聚集域东部存在大量煤成气聚集区带的预测(戴金星,1986、1993)。

(收稿日期:1993 年 12 月 30 日)

参 考 文 献

1. 沈平,徐永昌等.气源岩和天然气地球化学特征及成气机理研究.兰州:甘肃科技出版社,1991
2. 戴金星.利用轻烃鉴别煤成气和油型气.石油勘探与开发,1993,20(5)
3. 戴金星,戚厚发,郝石生.天然气地质学概论.北京:石油工业出版社,1989
4. 戴金星,裴锡古,戚厚发主编.中国天然气地质学.北京:石油工业出版社,1992
5. Chung HM. Carbon Isotope Composition of Marine Crude Oils, AAPG,1992,76(7)
6. 童晓光,梁狄刚主编.塔里木盆地油气勘探论文集.乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社,1992
7. 杨斌,陈克迅.塔里木盆地主要生油层系评价及生油期研究初探.中国含油盆地烃源岩评价,北京:石油工业出版社,1989
8. 傅家谟,刘德汉主编.天然气运移、储集及封盖条件.北京:科学出版社,1992
9. 戴金星.我国煤成气藏的类型和有利的煤成气远景区.天然气勘探,北京:石油工业出版社,1986
10. 戴金星.我国煤成气资源勘探开发和研究的重大意义.天然气工业,1993,13(2)

AN APPROACH TO THE GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND GAS SOURCES OF NATURAL GAS IN THE NORTH TARIM BASIN

Li Xianqi Dai Jinxing

(Scientific Research Institute of Petroleum Exploration and Development, CNPC)

Abstract

In this paper, the geochemical characteristics and genetic types of natural gas in the North Tarim Basin are comprehensively analysed from the respects of gas compositions, carbon isotopes and associated condensates. Moreover, the gas sources of natural gas in this area are approached by means of carbon isotope characteristics and migration index (ΔR_3).