

SY

中华人民共和国石油天然气行业标准

SY/ T 5735—1995

陆相烃源岩 地球化学评价方法

1995-11-08 发布

1996-05-01 实施

中国石油天然气总公司 发布

目 次

前言	
1 范围	1
2 符号与缩略语	1
3 陆相烃源岩剖面类型	2
4 陆相烃源岩有机质丰度指标	2
5 陆相烃源岩有机质类型	2
6 陆相烃源岩部分有机质丰度、类型参数恢复	4
7 陆相烃源岩有机质成熟度及成烃演化阶段	4
8 煤成烃评价方法	8
9 陆相烃源岩油气生成模拟计算	11
10 原油组成与分类	11
11 天然气化学组成、成因分类与鉴别	13
12 陆相烃源岩—石油、天然气对比	16
附录 A (标准的附录) 陆相烃源岩油气生成模拟计算公式与方法	19

前 言

“陆相烃源岩地球化学评价方法”，在国内、外尚未见正式标准，本标准系国内首次编制和发布。本标准规定了陆相烃源岩地球化学的评价方法，适用于陆相生油盆地烃源岩地球化学评价（未包含碳酸盐岩烃源岩）。由于有机地球化学发展较快，重大进展较多，尚处于探索的问题仍然很多，本标准作为推荐性标准。

本标准的附录 A 是标准的附录。

本标准由石油地质勘探专业标准化委员会提出并归口。

本标准由中原石油勘探局勘探开发研究院负责起草。

本标准起草人 黄 飞 辛茂安

参加人 魏向丹 王 峻

陆相烃源岩 地球化学评价方法

1 范围

本标准规定了陆相烃源岩（除碳酸盐岩外）地球化学评价方法。
本标准适用于陆相生油盆地烃源岩（除碳酸盐岩外）地球化学评价。

2 符号与缩略语

- TOC——烃源岩残余有机碳含量，%；
 C_o ——烃源岩原始有机碳含量，%；
 C_{om} ——成熟烃源岩有机碳含量，%；
 “A”——烃源岩残余氯仿沥青“A”含量，%；
 HC——烃源岩总烃含量， 10^{-6} ；
 (S_1+S_2) ——烃源岩生烃潜量（烃质量/岩石质量），mg/g；
 S_0 ——烃源岩原始生烃潜量（烃质量/岩石质量），mg/g；
 S_1 ——烃源岩可溶烃量（烃质量/岩石质量）mg/g；
 S_2 ——烃源岩热解烃潜量（烃质量/岩石质量），mg/g；
 S_3 ——烃源岩有机质热解产生的 CO_2 含量（ CO_2 质量/岩石质量），mg/g；
 T_{YC} ——烃源岩热解类型指数（ $T_{YC} = S_2 / S_3$ ），小数；
 T_{YC_o} ——烃源岩原始热解类型指数（ $T_{YC_o} = S_0 / S_3$ ），小数；
 I_H ——烃源岩热解氢指数（烃质量/有机碳质量），mg/g；
 I_{H_o} ——烃源岩原始热解氢指数（烃质量/有机碳质量），mg/g；
 I_o ——烃源岩热解氧指数（ CO_2 质量/有机碳质量），mg/g；
 0.083——有机碳换算为烃的换算系数；
 C_p ——烃源岩热解有效碳含量〔 $C_p = 0.083 \times (S_1 + S_2)$ 〕，%；
 C_{p_o} ——烃源岩原始热解有效碳含量（ $C_{p_o} = 0.083 \times S_0$ ），%；
 T_{max} ——烃源岩热解最高峰温度，℃；
 D ——烃源岩干酪根烃降解率，%；
 D_o ——烃源岩干酪根原始烃降解率，%；
 R ——烃源岩原始生烃潜量恢复系数（ $R = S_0 / S_2$ ），小数；
 C_Q ——成熟烃源岩中已生烃碳〔 $C_Q = 0.083 \times S_2 \times (R-1)$ 〕，%；
 C_{S_1} ——成熟烃源岩中游离烃碳（ $C_{S_1} = 0.083 \times S_1$ ），%；
 C_{re} ——热模拟实验残渣有机碳含量，%；
 1.22——有机质与有机碳的换算系数；
 C_d ——烃源岩热解已降解碳，%；

- R_c ——烃源岩有机质丰度（有机碳）恢复系数，小数；
 W ——烃源岩某演化阶段的油、气产率， kg/t 和 m^3/t ；
 R_o ——烃源岩干酪根（煤岩）在油浸条件下的镜质体反射率，%；
 T_i ——干酪根镜检类型指数，小数；
 H/C ——干酪根中氢碳原子比，小数；
 O/C ——干酪根中氧碳原子比，小数；
 $\sum \text{HP}$ ——干酪根各显微组分累积热解产烃指数；
 $\sum \text{OP}$ ——干酪根各显微组分累积热解产油指数；
 SCI ——孢粉颜色指数，小数；
 Q ——孢子体显微荧光光谱“红/绿”值参数，小数；
 TTI ——时间—温度指数，小数；
 Tm —— $17\alpha\text{H}-22, 29, 30$ -三降藿烷；
 Ts —— $18\alpha\text{H}-22, 29, 30$ -三降藿烷；
 H_{op} ——藿烷；
 M_{or} ——莫烷；
 Me ——甲基；
 Pr ——姥鲛烷；
 Ph ——植烷。

3 陆相烃源岩剖面类型

陆相烃源岩常为以下剖面类型：

- 泥岩型烃源岩剖面；
- 含膏盐泥岩型烃源岩剖面；
- 泥岩夹油页岩型烃源岩剖面；
- 含炭泥页岩型烃源岩剖面；
- 含钙质泥岩烃源岩剖面；
- 煤及含煤系烃源岩剖面。

4 陆相烃源岩有机质丰度指标

生产实践中常采用以下指标评价烃源岩有机质丰度：

- 烃源岩残余有机碳含量（ TOC ）；
- 烃源岩残余氯仿沥青“ A ”含量；
- 烃源岩总烃含量（ HC ）；
- 烃源岩生烃潜量（ S_1+S_2 ）。

陆相烃源岩有机质丰度评价指标见表 1。

对于勘探程度较高地区，上述指标可用平面等值线图表示。

5 陆相烃源岩有机质类型

5.1 陆相烃源岩有机质类型的划分

5.1.1 采用三类五分法（见表 2），即：

- I_1 ——标准腐泥型；
- I_2 ——含腐植的腐泥型；
- II ——腐植—腐泥型；

表1 陆相烃源岩有机质丰度评价指标

指 标	湖盆水体类型	非生油岩	生油岩类型			
			差	中等	好	最好
TOC	淡水—半咸水	< 0.4	0.4~0.6	>0.6~1.0	>1.0~2.0	>2.0
%	咸水—超咸水	< 0.2	0.2~0.4	>0.4~0.6	>0.6~0.8	>0.8
"A" %	—	< 0.015	0.015 ~0.050	> 0.050 ~0.100	>0.100 ~0.200	>0.200
HC 10^{-6}	—	< 100	100 ~200	> 200 ~500	> 500 ~1000	>1000
(S_1+S_2) mg/g	—	—	< 2	2~6	>6~20	>20

注：表中评价指标应用于烃源岩（生油岩）成熟度较低（ $R_o=0.5\% \sim 0.7\%$ ）阶段的评价，当烃源岩热演化程度高时，由于油气大量排出以及排烃程度不同，导致上列有机质丰度指标失真，应进行恢复后评价（见第6章）。

——Ⅲ₁—含腐泥的腐植型；

——Ⅲ₂—标准腐植型。

5.1.2 三类四分法见表3，即：

——Ⅰ—腐泥型；

——Ⅱ₁—腐植腐泥型；

——Ⅱ₂—腐泥腐植型；

——Ⅲ—腐植型。

5.2 有机质类型划分指标

5.2.1 利用生物群组合特征及有机相定性划分有机质类型：

——低等浮游水生生物组合及深湖—半深湖强还原—还原相常为腐泥型母质；

——陆源或水生高等植物组合及滨浅湖强氧化—氧化相常为腐植型母质；

——两者兼而有之形成混合型母质。

5.2.2 利用岩石热解参数及关系图版划分有机质类型：

—— I_H （见表2、表3）与 I_o 及其关系图版；

—— I_H 与 T_{max} 关系图版；

—— T_{YC} （见表2、表3）；

—— D （见表2、表3）及与 T_{max} 图版；

——(S_1+S_2)（见表2、表3）。

5.2.3 利用干酪根参数划分有机质类型：

——干酪根镜检及 T_i （见表2、表3）；

——干酪根元素H/C与O/C（见表2、表3）及Van Krevelen图版；

——干酪根红外光谱特征参数（见表2）；

——干酪根热解气相色谱宏观特征；

——干酪根模拟实验参数 $\sum HP$ 与 $\sum OP$ （见表3）；

——干酪根碳同位素 (见表 2);

——干酪根热失重率 (见表 2)。

5.2.4 利用烃源岩可溶有机质特征划分有机质类型:

——“A”族组成 (见表 2、表 3);

——饱和烃色谱特征 (见表 3);

——生物标志化合物 C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 生物构型甾烷相对含量、三角图及其比值 (见表 2、表 3)。

注: 划分有机质类型的参数较多, 许多参数受热演化因素影响。根据目前研究程度, 干酪根镜检、元素和岩石热解三项参数为必选参数, 其余参数根据研究内容不同可任选。上述参数适用于生油门限 (低成熟) 附近 ($R_o = 0.5\% \sim 0.7\%$) 的烃源岩有机质类型划分; 对于高成熟烃源岩则将各参数进行恢复后方可使用 (见第 6 章)。

6 陆相烃源岩部分有机质丰度、类型参数恢复

6.1 岩石热解参数恢复

利用下列公式进行岩石热解参数恢复:

$$T_{YC_o} = S_o / S_3 = \frac{S_2 \times R}{S_3} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$I_{H_o} = \frac{S_2 \times R \times 10}{C_{om} + C_o + C_{S_1}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$D_o = \frac{C_{P_o} \times 100}{C_{om} + C_o + C_{S_1}} \quad \dots\dots\dots(3)$$

6.2 有机质丰度参数恢复

——热模拟实验法:

$$R_c = C_o / C_{re} \quad \dots\dots\dots(4)$$

利用 R_c 与模拟样品的成熟度参数 (R_o 、 I_H 、 H/C 、 T_{max} 等) 进行一元或多元回归, 即可求出各演化阶段的恢复系数。

——物质平衡法:

$$R_c = C_o / (C_o - W / 1.22) \quad \dots\dots\dots(5)$$

——热解法:

$$R_c = C_o / C_d \quad \dots\dots\dots(6)$$

7 陆相烃源岩有机质成熟度及成烃演化阶段

7.1 陆相烃源岩有机质成烃演化阶段的划分

陆相烃源岩有机质成烃演化阶段划分为 (见表 4)

——未成熟阶段;

——低成熟阶段;

——成熟阶段;

表2 陆相烃源岩有机质类型划分表
(三类五分法)

项 目		指 标	有 机 质 类 型				
			I ₁	I ₂	II	III ₁	III ₂
干 酪 根	镜 检	壳质组 %	>90	90~70	<70~50	<50~10	<10
		镜质组 %	<10	10~20	>20~30	>30~80	>80~90
		T _i	100~60	<60~40	<40~20	<20~-10	<-10~-100
	元 素	H/C	>1.50	1.50~1.30	<1.30~1.00	<1.00~0.80	<0.80
		O/C	<0.10	0.10~0.12	>0.12~0.20	>0.20~0.25	>0.25
	热失重	总失重率 %	>70	70~60	<60~40	<40~30	<30
	红 外 光 谱	2920cm ⁻¹ / 1600cm ⁻¹	—	>4.3	4.3~1.6	<1.6~0.5	<0.5
		1460cm ⁻¹ / 1600cm ⁻¹	—	>1.00	1.00~0.40	<0.40~0.15	<0.15
	碳同位素 ‰		<-30.0	-30.0~-28.0	>-28.0~-25.5	>-25.5~-22.5	>-22.5
	可 溶 有 机 质	“A” 族 组 成	饱和烃 %	60~40	<40~30	<30~20	<20~15
芳烃 %			10~15	>15~17	>17~20	>20~25	>25~30
(非烃+沥青质) %			20~40	>40~50	>50~60	>60~70	>70~80
饱/芳			>3.0	3.0~1.6	<1.6~1.0	<1.0~0.5	<0.5
生 物 标 志 化 合 物		5 α -C ₂₇ , %	>55	55~45	<45~35	<35~20	<20
		5 α -C ₂₈ , %	<16	16~25	>25~35	>35~45	>45
		5 α -C ₂₉ , %	<25	25~35	>35~45	>45~55	>55
		5 α -C ₂₇ / 5 α -C ₂₉	>2.0	2.0~1.5	<1.5~1.0	<1.0~0.5	<0.5
岩 石 热 解		I ₁₁	>700	700~500	<500~350	<350~150	<150
		(S ₁ +S ₂)	>20	20~6	<6~3	<3~2	<2
	D	>70	70~45	<45~20	<20~10	<10	
	T _{YC}	>20.0	20.0~10.0	<10.0~5.0	<5.0		

表3 有机质类型划分表
(三类四分法)

项 目		I 型 (腐泥型)	II 型		III 型 (腐植型)	
			II ₁ 型 (腐植-腐泥型)	II ₂ 型 (腐泥-腐植型)		
“A”族 组成	饱和烃 %	60~40	<40~30	<30~20	<20	
	饱/芳	>3.0	3.0~1.6	<1.6~1.0	<1.0	
	(非烃+沥青质) %	20~40	>40~60	>60~70	>70~80	
	(非烃+沥青质) / 总烃	0.3~1.0	>1.0~2.0	>2.0~3.0	>3.0~4.5	
岩石热 解参数	I_H	>700	700~350	<350~150	<150	
	T_{YC}	>20.0	20.0~10.0	<10.0~5.0	<5.0	
	D	>70	70~30	<30~10	<10	
	(S_1+S_2)	>20	20~6	<6~2	<2	
饱和烃色 谱特征	峰型特征	前高单峰型	前高双峰型	后高双峰型	后高单峰型	
	主峰碳	C_{17} 、 C_{19}	前 C_{17} 、 C_{19} 、后 C_{21} 、 C_{23}	前 C_{17} 、 C_{19} 、后 C_{27} 、 C_{29}	C_{25} 、 C_{27} 、 C_{29}	
干酪根	元素 分析	H/C	>1.5	1.5~1.2	<1.2~0.8	<0.8
		O/C	<0.1	0.1~0.2	>0.2~0.3	>0.3
	镜 检	壳质组 %	>70~90	70~50	<50~10	<10
		镜质组 %	<10	10~20	>20~70	>70~90
		Ti	>80~100	80~40	<40~0	<0
	模拟 实验	$\sum HP$	>550~620	550~400	<400~150	<150
$\sum OP$		>550	550~300	<300~100	<100	
生物标志 化合物	$5\alpha-C_{27}$ %	>55	55~35	<35~20	<20	
	$5\alpha-C_{28}$ %	<15	15~35	>35~45	>45	
	$5\alpha-C_{29}$ %	<25	25~35	>35~45	>45~55	
	$5\alpha-C_{27} / 5\alpha-C_{29}$	>2.0	2.0~1.2	<1.2~0.8	<0.8	

——高成熟阶段；

——过成熟阶段。

7.2 判断烃源岩有机质成熟度主要指标

判断烃源岩有机质成熟度指标很多。对于陆相烃源地球化学评价研究来讲， R_o 为必选指标，下述其余指标视研究内容不同可任选。

表 4 陆相烃源岩有机质成烃演化阶段划分及判别指标

演化阶段	陆相烃源岩有机质成熟度判别指标										
	镜质体反射率 R_o %	孢粉颜色指数 SCI	岩石热解最高峰温 T_{max} °C	H/C 原子比	孢子体显微荧光 Q	孢粉(干酪根)颜色	生物标志化合物		时间-温度指数 TTI	古地温 T °C	油气性质及产状
							$\frac{20S}{\alpha\alpha\alpha - C_{29}20(S+R)}$	$\frac{\beta\beta}{C_{29}\beta\beta + \alpha\alpha}$			
未成熟阶段	< 0.5	< 2.0	< 435	> 1.6	> 1~1.4	浅黄色	< 0.20	< 0.20	< 15	> 50~60	生物甲烷 未成熟油 凝析油
低成熟阶段	> 0.5~0.7	2.0~3.0	435~440	1.6~1.2	> 1.4~2.0	黄色	0.20~0.40	0.20~0.40	15~75	> 60~90	低成熟重 质油 凝析油
成熟阶段	> 0.7~1.3	> 3.0~4.5	> 440~450	< 1.2~1.0	> 2.0~3.0	深黄色	> 0.40	> 0.40	> 75~160	> 90~150	成熟中质油
高成熟阶段	> 1.3~2.0	> 4.5~6.0	> 450~580	< 1.0~0.5	> 3.0	浅棕色 — 棕黑色	—	—	> 160~1500	> 150~200	高成熟轻质 油凝析油 湿气
过成熟阶段	> 2.0	> 6.0	> 580	< 0.5	> 3.0	黑色	—	—	> 1500	> 200	干气

7.2.1 利用干酪根参数判断有机质成熟度主要指标有 (见表 4):

- R_o ;
- H/C (应在母质类型确定的前提下利用);
- 干酪根红外吸收光谱特征;
- 干酪根颜色。

7.2.2 利用岩石热解参数判断有机质成熟度:

- I_H 与 I_o 关系图版;
- T_{max} (见表 4)。

7.2.3 利用孢粉参数判断有机质成熟度 (见表 4):

- 孢粉颜色;
- SCI。

7.2.4 利用孢子体显微荧光特征判断有机质成熟度:

- 孢子体显微荧光光谱变化趋势;
- 孢子体显微荧光光谱参数 (Q) (见表 4)。

注: 在 R_o 小于 1.3% 情况下, 上述指标有效。

7.2.5 可溶有机质组分特征判断有机质成熟度:

- 烃转化率;
- 正构烷烃分布特征参数。

7.2.6 利用生物标志化合物参数判断有机质成熟度 (见表 4)。

7.2.7 利用时间—温度指数 (TTI) 计算有机质成熟度 (见表 4)。

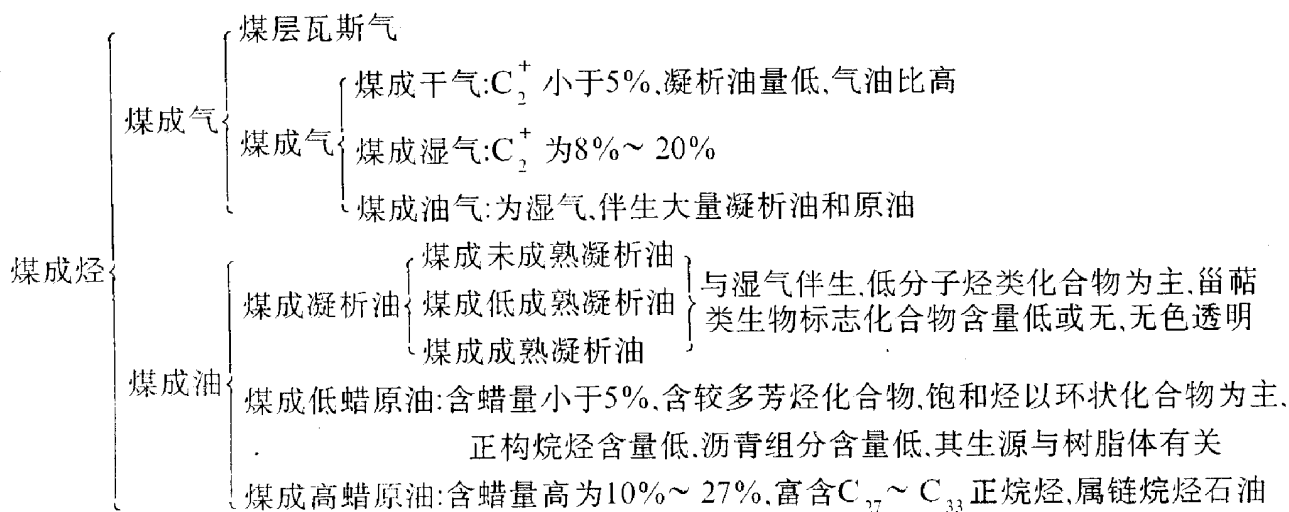
7.2.8 利用古地温判断有机质成熟度 (见表 4), 重塑古地温常用以下方法:

- 利用镜质体反射率重塑古地温, 方法有
 - 1) R_o —温度—时间卡威尔 (Karwel) 图版法;
 - 2) Hood 图版法;
 - 3) R_o — T 关系式法;
- 孢粉色变重塑古地温;
- 特征矿物 (磷灰石) 裂变径迹重塑古地温;
- 矿物流体包裹体测温重塑古地温;
- 粘土矿物和自生矿物重塑古地温;
- 今地温梯度和地表温度重塑古地温;
- 地球热力学法重塑古地温;
- 地球热力学与地球化学相结合的方法重塑古地温;
- 康南公式 (J.Connan) 重塑古地温;
- 甾萜类生物标志物异构化参数重塑古地温。

8 煤成烃评价方法

煤不仅可以生成大量的天然气 (煤成气), 而且可以形成数量可观的石油 (煤成油)。

8.1 煤成烃分类



8.2 煤的组成与分类

8.2.1 煤的演化程度分类

煤的演化程度分类见表5。

8.2.2 煤的宏观组成与分类

常用肉眼方法观察煤的光泽、颜色、硬度、脆度、断口、形态及主要特征来区别煤的各种宏观组分, 分类如下:



8.2.3 煤的显微组成与分类

将煤磨制成薄片、光片, 在透射光、反射光和荧光显微镜下观察, 可进一步区分煤中各种有机显微组分和亚组分分类(见表6)。

8.3 煤成烃源岩评价方法

8.3.1 有机相法

煤成烃源岩有机相带划分为:

- 滨海—浅海弱氧化红树林木本腐植相;
- 海湾—泻湖微咸水缺氧木本—含藻腐植腐泥相;
- 滨海平原多水沼泽弱还原木本—草本腐植相;
- 滨海湖沼缺氧草本—含藻腐植腐泥相;
- 淡水湖沼缺氧草本—藻类腐植腐泥相;
- 内陆森林沼泽弱氧化木本腐植相;
- 内陆森林沼泽氧化木本腐植相;
- 内陆高地沼泽弱氧化木本腐植无定形相。

在上述有机相带中属于氧化—弱氧化环境的木本—腐植相主要为煤成气态烃相, 属于弱还原—还原草本—含藻—无定形腐植—腐泥相(腐泥—无定形相)为煤成气—液态烃相。

8.3.2 煤岩学法

利用煤岩学法评价煤成烃源岩指标见表7。

表5 煤的演化程度分类表

煤的类型(煤阶)		煤的演化程度(R_o) %
泥 炭		0.10~0.30
褐 煤		0.30~0.50
低变质煤	长烟煤	0.50~0.65
	气 煤	0.65~0.85
中变质煤	肥 煤	0.85~1.15
	焦 煤	1.15~1.50
高变质煤	瘦 煤	1.50~1.70
	贫 煤	1.70~2.10
无烟煤		2.10~3.50

表6 煤的显微组分分类表

组	显微组分、亚组分
镜质组	结构镜质体、结构半镜质体、无结构镜质体、无结构半镜质体、碎屑镜质体、碎屑半镜质体
壳质组	孢粉体、角质体、树脂体、木栓质体、树皮体、壳屑体
腐泥组	藻质体、腐泥基质体、富氢无定形体、沥青质体
丝质组	微粒体、半丝质体、丝质体、菌类体、惰屑体

表7 煤岩学法评价煤成烃源岩指标

级 别	组 分 %					
	镜质组		丝质组		壳质组	
	镜质体 A	镜质体 B	丝质体	半丝质体	“壳质体”	“类脂体”
A (优)	>40	>50	<10	<10	>10	>15
B (良)	40~35	50~40	10~15	10~15	10~5	15~5
C (中)	<35~30	<40~20	>15~20	>15~20	<5~2	<5~2
D (差)	<30	<20	>20~40	>20	<2	<2

注：镜质体A为具结构镜质体；镜质体B为不具结构的富氢镜质体；“壳质体”相当于表6中“壳质组”，“类脂体”相当于表6中“腐泥组”。

8.3.3 有机地球化学指标法

利用有机地球化学指标法评价煤成烃源岩见表8。

表 8 不同演化阶段煤成烃源岩有机地化指标评价表

演化阶段	级别	"A" %	(S ₁ +S ₂) mg/g	H/C
未成熟—低成熟阶段 (R _o < 0.7) %	1	> 3.0	> 200	> 2.0
	2	3.0~2.0	200~120	1.0~0.8
	3	< 2.0	< 120	< 0.8
成熟阶段 (0.7% < R _o < 1.3%)	1	> 2.5	> 150	> 1.0
	2	2.5~1.5	150~100	1.0~0.8
	3	< 1.5	< 100	< 0.8
高成熟阶段 (1.3% < R _o < 2.0%)	1	> 2.0	> 100	> 0.7
	2	2.0~1.5	100~60	0.7~0.6
	3	< 1.5	< 60	< 0.6
过成熟阶段 (R _o > 2.0%)	1	> 1.0	> 50	> 0.6
	2	1.0~0.5	50~30	0.6~0.4
	3	< 0.5	< 30	< 0.4

注：“级别”栏中，1—非常好的；2—比较好的；3—比较差的。

8.3.4 模拟实验法

用各种模拟方法，模拟不同地质条件下煤及不同煤岩显微组分和含煤地层的实际生烃性能（煤气发生率，产油率曲线）和生烃过程。

9 陆相烃源岩油气生成模拟计算

目前，陆相烃源岩油气生成模拟计算常采用盆地模拟方法即在地史、热史以及分析化验和热模拟实验资料基础上进行油气生成模拟计算。常用计算公式和方法见附录 A（标准的附录）。

10 原油组成与分类

10.1 原油的化学组成

原油的化学组成包括

- 饱和烃：包括正构、异构烷烃（石蜡烃）和环烷烃；
- 芳香烃：包括纯芳香烃、环烷—芳香烃和环状含硫化合物；
- 非烃和沥青质：原油中含氮、硫、氧原子的高分子多环化合物以及金属有机络合物。

10.2 原油的分类

10.2.1 原油的组分分类

原油的组分分类见表 9。

表9 原油的组分分类

组分含量 %		原油类型	含硫量 %
S > 50 AA < 50	P > N 且 P > 40	石蜡型原油	< 0.5
	P < N 且 P < 40	石蜡—环烷型原油	
	N > P 且 N > 40	环烷型原油	
S < 50 AA > 50	P > 10		> 0.5
	P < 10	N < 25	
		N > 25	芳香—环烷型原油

注：S—饱和烃；AA—芳香烃+非烃+沥青质；P—石蜡烃；N—环烷烃。

10.2.2 原油的成熟度分类

- 未成熟原油（重质油、凝析油）；
- 低成熟原油（重质油、凝析油）；
- 成熟中质油；
- 高成熟轻质油、凝析油。

10.2.3 原油物理性质分类

原油的物理性质分类见表 10。

表 10 原油的物理性质分类

地面原油密度分类			地层原油粘度分类		地面原油凝固点分类	
原油类别	密度 g/cm ³ (20℃)	° API	原油类别	粘度 mPa·s	原油类别	凝固点 ℃
凝析油	< 0.706	≥ 69.21	特低粘度油	< 1	低凝油	< 0
挥发油	0.706~0.805	< 69.21~44.28	低粘度油	1~5		
轻质油	> 0.805~0.870	< 44.28~31.14	中粘度油	> 5~10	中凝油	0~40
中质油	> 0.870~0.934	< 31.14~20.00	高粘度油	> 10~50	高凝油	> 40
重质油	> 0.934	< 20.00	稠油	> 50		

10.2.4 重质油成因分类

重质油的成因分类见表 11。

表 11 重质油成因分类表

热演化程度	生物降解程度			
	轻度生物降解	中等生物降解	重度生物降解	特严重生物降解
不成熟				
低成熟	轻度生物降解 低成熟重质油	中等生物降解 低成熟重质油	重度生物降解 低成熟重质油	特严重生物降解 低成熟重质油
高成熟	轻度生物降解 高成熟重质油	中等生物降解 高成熟重质油	重度生物降解 高成熟重质油	特严重生物降解 高成熟重质油

11 天然气化学组成、成因分类与鉴别

11.1 天然气的化学组成

——烃类气体（包括甲烷与重烃）；

——非烃气体（包括 CO_2 、 N_2 、 H_2S 、 H_2 及 He、Ar 等）。

11.2 非烃气体的成因

非烃气体的成因划分见表 12。

表 12 非烃气体的成因

非烃气体	有机成因		无机成因					
	生物成因	热化学成因	大气成因	岩浆成因	化学成因	地幔成因	放射性成因	宇宙成因
N_2	✓	✓	✓	✓	—	✓	—	—
CO_2	✓	✓	—	✓	✓	—	—	—
H_2S	✓	✓	—	✓	—	—	—	—
H_2	—	✓	—	✓	—	✓	✓	✓
稀有气体 (He、Ar)	—	—	—	—	—	✓	✓	✓

11.3 天然气的成因分类

天然气的成因分类见表 13。

表 13 天然气成因分类方案

无机成因气	宇宙气、幔源气、岩浆岩气、变质岩气、无机盐类分解气								
有机成因气	热成熟度 母质类型	未熟阶段 ($R_o < 0.5\%$)		低成熟阶段 ($0.5\% < R_o < 0.7\%$)	成熟阶段 ($0.7\% < R_o < 1.3\%$)		高成熟和过熟阶段 ($R_o > 1.3\% \sim 2.0\%$)		
		腐泥型天然气 (油型气)	生物气	腐泥型生物气 (油型生物气)	过渡带气	热解气	油型热解气	原油伴生气	裂解气
	腐植型天然气 (煤成气)			腐植型生物气 (煤成生物气)			煤(成)热解气	成熟气 凝析油气	
	混合成因气	大气、气水合物、同岩两源混合气、异岩两源混合气、热成熟气与生物成因气混合气、有机成因气与无机成因气混合气							

11.4 各类成因天然气的鉴别

11.4.1 有机成因与无机成因天然气的鉴别方法

11.4.1.1 有机成因甲烷和无机成因甲烷的鉴别:

——地质综合分析方法;

——碳同位素法(见表 14)和 $\delta^{13}C_1-C_1/C_{2+3}$ 图版法。

11.4.1.2 有机成因烷烃气和无机成因烷烃气的鉴别(见表 14):

——有机成因烷烃气是正碳同位素系列, 即: $\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3 < \delta^{13}C_4$;

——无机成因烷烃气是负碳同位素系列, 即: $\delta^{13}C_1 > \delta^{13}C_2 > \delta^{13}C_3$ 。

11.4.1.3 有机成因 CO_2 与无机成因 CO_2 的鉴别见表 14。

11.4.2 不同有机成因气中烷烃气组分的鉴别

11.4.2.1 有机成因甲烷气的鉴别

——生物气甲烷与伴生气甲烷的鉴别:

1) 生物气甲烷: $\delta^{13}C_1 < -60\%$ (干气, 不与油伴生);

2) 伴生气甲烷: $\delta^{13}C_1 > -40\% \sim -50\%$ (湿气, 与油共生)。

——伴生气甲烷和油型裂解气甲烷的鉴别:

1) 伴生气甲烷: $\delta^{13}C_1 > -40\% \sim -55\%$ (与重烃伴生, $C_2^+ > 5\%$);

2) 油型裂解气甲烷: $\delta^{13}C_1 > -37\% \sim -30\%$ ($C_2^+ > 5\%$, 不含丁烷)。

11.4.2.2 油型气与煤成气的鉴别

常用以下方法:

a) 图版法与图解法: 利用 $\delta^{13}C_1-R_o$ 关系图版、 $\delta^{13}C_1-\delta^{13}C_2-\delta^{13}C_3$ 图版和 $\delta^{13}C-C_{1-4}$ 图版及 $\delta^{13}C_1-\delta^{13}C_{2-1}(x)$ 图版进行鉴别;

b) 解方程法: 利用 $\delta^{13}C_1-R_o$ 资料建立回归方程并求解鉴别(见表 14);

表 14 天然气成因类型综合鉴别表

项 目	气的类型	有机成因气		无机成因气
		油型气	煤成气	
同 位 素	$\delta^{13}C_1$	$-30\% > \delta^{13}C_1 > -55\%$	$-20\% > \delta^{13}C_1 > -43\%$	一般 $> -20\%$
	$\delta^{13}C_2$	$< -29\%$	$> -29\%$	
	$\delta^{13}C_3$	$< -27.5\%$	$> -27.5\%$	
	碳同位素系列	$\delta^{13}C_1 < \delta^{13}C_2 < \delta^{13}C_3 < \delta^{13}C_4$		$\delta^{13}C_1 > \delta^{13}C_2 > \delta^{13}C_3$
	$\delta^{13}C_1-R_0$ 关系	$\delta^{13}C_1 \approx 15.80 \lg R_0 - 42.21$	$\delta^{13}C_1 \approx 14.13 \lg R_0 - 34.39$	
	$\delta^{13}C_{CO_2}$	$< -10\%$		$\geq -10\%$
	$\delta^{13}C_{1-4}$ 连线	较轻	较重	
	与气同源凝析油 $\delta^{13}C$	轻(一般 $< -28\%$)	重(一般 $> -28\%$)	
	凝析油的饱和烃和芳烃 $\delta^{13}C$	饱和烃 $\delta^{13}C < -27\%$ 芳烃 $\delta^{13}C < -27.5\%$	饱和烃 $\delta^{13}C > -27\%$ 芳烃 $\delta^{13}C > -27.5\%$	
	与气同源原油 $\delta^{13}C$	轻($-26\% > \delta^{13}C > -35\%$)	重($-23\% > \delta^{13}C > -30\%$)	
气 组 分	CO ₂ 含量, %	$< 20\%$, 多数 $< 4\%$		一般 $> 20\%$
	汞蒸气含量	$< 600 \text{ ng} / \text{ m}^3$	$> 700 \text{ ng} / \text{ m}^3$	
	C_1 / C_{2+3}	大部分 < 15 , 绝大部分 < 10 (油型热解气)		大于 180, 绝大部分 > 400
	C_1 / C_{2-4}	一般 $C_2 > 0.5\%$, 大多数有 C_{3-4}		痕量 C_2 , 绝大多数 无 C_{3-4}
轻 烃	甲基环己烷指数	$< (50\% \pm 2\%)$	$> (50\% \pm 2\%)$	无
	C_{6-7} 支链烷烃含量	$> 17\%$	$< 17\%$	无
	甲苯/苯	一般 < 1	一般 > 1	
	苯含量	$148 \mu\text{g} / \text{l}$	$475 \mu\text{g} / \text{l}$	
	甲苯含量	$113 \mu\text{g} / \text{l}$	$536 \mu\text{g} / \text{l}$	
	凝析油 C_{4-7} 烃族组成	富含链烷烃, 贫环烷烃和 芳烃, 一般芳烃 $< 5\%$	贫链烷烃, 富环烷烃和芳 烃, 一般芳烃 $> 10\%$	无
	C_7 的五环烷, 六环烷和 nC_7 族组成	富 nC_7 和五环烷	贫 nC_7 , 富六环烷	无
凝析 油和 储集 层沥 青中 生物 标志 物	Pr/Ph 值	一般 < 2.5	一般 > 2.5	无
	杜松烷, 桉叶油烷	没有杜松烷, 难以检测到 桉叶油烷	可检测到杜松烷和桉叶油 烷	无
	松香烷系列和海松烷系列	贫海松烷和松香烷	成熟度不高时, 可检测到 海松烷系列和松香烷系列 化合物	无
	双杜松烷	无	有	无
	C_{27-29} 甾烷	一般 C_{27} , C_{28} 丰富, C_{29} 含 量少	一般 C_{29} 丰富, C_{27} , C_{28} 较 少	无

c) C_{1-5} 碳同位素对比法;

d) 轻烃法:

轻烃法常采用:

1) C_7 轻烃系统三角图版法:

三端点化合物为:

——正庚烷(nC_7), %, 来自藻类与细菌;

——甲基环己烷 (MCC_6), %, 主要为高等植物木质素、纤维素、酯类来源 (煤成气特征);

——各种结构的二甲基环戊烷 ($\sum DMCC_5$), %, 主要来自水生生物类脂化合物 (油型气特征);

2) 甲基环己烷指数 (MCI) 法 (见表 14):

$$MCI = \frac{MCH \times 100\%}{MCH + RCPG + nC_7} \dots\dots\dots(7)$$

式中: MCI——甲基环己烷指数, %;

MCH——六元环烷烃, %;

RCPG——五元环烷烃, %;

nC_7 ——正庚烷烃, %。

3) C_{6-7} 芳烃 (苯、甲苯) 和支链烷烃的组合法 (见表 14): 煤成气 C_{6-7} 芳烃比油型气高 2 至 4 倍, 其支链烷烃含量小于 17%;

4) 利用 C_{5-7} 脂烃族组成三角图法鉴别:

三端点化合物为

——正构烷烃 nC , %, 腐泥型母质来源;

——异构烷烃 iC , %, 腐植型母质来源;

——环烷烃 CYC , %, 陆源母质来源;

5) 烷一芳指数法 (见表 14);

烷一芳指数系指凝析油中苯和甲苯之和与正构烷 nC_8 以前馏分中所有异构烷烃和环烷烃总和之比 (百分数);

e) 生物标志化合物法:

常用以下指标 (见表 14):

1) 姥植比 (Pr/Ph);

2) 桉叶油烷和杜松烷;

3) 松香烷系列和海松烷系列;

4) 五环三萜烷中双杜松烷;

5) C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 甾烷内组成。

11.4.3 煤成凝析油与油型凝析油碳同位素的鉴别

11.4.3.1 煤成凝析油碳同位素比油型凝析油重, 平均重 4‰。统计表明:

a. 煤成凝析油碳同位素: $-21.74\text{‰} \sim -28.70\text{‰}$, 平均 -25.60‰ ;

b. 油型凝析油碳同位素: $-24.29\text{‰} \sim -33.85\text{‰}$, 平均 -29.80‰ 。

11.4.3.2 煤成凝析油组分碳同位素比油型凝析油重。

12 陆相烃源岩—石油、天然气对比

12.1 对比原理

陆相烃源岩中有机质生成的石油和天然气，只有其中一部分运移到储集层中，部分则永远保留在烃源岩中。因此，烃源岩中有机质（沥青、干酪根）与来自该层系储层的油气有着亲缘关系，在化学组成上有着某种程度的相似性，即“相似同源”的原理。

12.2 对比内容

烃源岩—石油、天然气对比内容有

- 油—油对比；
- 油—岩对比；
- 气—气对比；
- 气—岩对比；
- 气—油对比。

12.3 油气源对比中采用的有机地球化学对比参数

12.3.1 原油轻烃配对组分对比为

$$R_i = \frac{C_a / C_b}{C'_a / C'_b} \dots\dots\dots(8)$$

式中 R_i ——对比度；

C_a 和 C_b ——一种油、气的一对组分的浓度；

C'_a / C'_b ——用以比较另一种油、气、岩中一对同样组分的浓度。

当 R_i 为 1.00~0.90 时，两者具有好的亲缘关系；

当 $R_i < 0.90 \sim 0.85$ 时，两者具有较好的亲缘关系；

当 R_i 为 $< 0.85 \sim 0.80$ 时，两者具较差的亲缘关系；

当 $R_i < 0.80$ 时，两者基本不具亲缘关系。

12.3.2 天然气组分浓度配对成分对比。

12.3.3 凝析油、烃源岩的轻烃配对成分对比，常用以下参数：

- 石蜡指数 1（庚烷值）；
- 石蜡指数 2（异庚烷值）；
- 苯 / 环己烷；
- 甲苯 / 甲基环己烷；
- 苯 / 正己烷；
- 甲基环己烷指数；
- iC_4 / nC_4 ；
- iC_5 / nC_6 ；
- iC_6 / nC_6 。

12.3.4 利用甾萜类生物标志化合物参数对比，常用

- 相对组成分布图对比；
- 甾烷配对组分对比（ $5\alpha-C_{28} / 5\alpha-C_{29}$ ， $5\alpha-C_{27} / 5\alpha-C_{29}$ ，重排甾烷 / 5α -规则甾烷等）；
- 萜烷配对组成对比（三环萜烷 / 17α -藿烷，Tm / Ts）；
- 芳构化甾类（单芳甾）配对成分对比（ $C_{27} / C_{27}-C_{29}$ ， $C_{28} / C_{27}-C_{29}$ ， $C_{29} / C_{27}-C_{29}$ ）；
- 选用多种甾烷、萜烷参数，采用相关、聚类等方法进行分析对比。

通常选择以下参数：

$$\text{甾烷类: } \alpha\alpha\text{-C}_{29} \frac{20S}{20(S+R)}; \quad \text{C}_{29} \frac{\beta\beta}{\alpha\alpha+\beta\beta};$$

4-MeC₃₀ 甾烷 / C₂₉ 规则甾烷; 重排甾烷 / 规则甾烷;

$$\text{萜烷类: } \text{C}_{30}\text{-Mor} / \text{C}_{30}\text{-Hop}; \quad \text{Tm} / \text{Ts}; \text{C}_{31}\text{-Hop} \frac{22S}{22R}; \quad \text{C}_{29}\text{-(Hop+Mor)} / \text{C}_{30}\text{-(Hop+Mor)};$$

$$\text{C}_{30\sim 35}\text{-(Hop+Mor)} / \text{C}_{29\sim 30}\text{-(Hop+Mor)}$$

12.3.5 利用原油组分、烃源岩“ A ”族组分和干酪根及天然气碳同位素进行油、气、岩对比。

常用对比方法是: 作出各组分与碳同位素关系曲线进行对比, 其趋势是:

$$\text{a. } \delta^{13}\text{C}_{\text{干酪根}} > \delta^{13}\text{C}_{\text{沥青质}} > \delta^{13}\text{C}_{\text{油}} > \delta^{13}\text{C}_{\text{气}};$$

$$\text{b. } \delta^{13}\text{C}_{\text{干酪根}} > \delta^{13}\text{C}_{\text{沥青质}} > \delta^{13}\text{C}_{\text{气}} > \delta^{13}\text{C}_{\text{非烃}} > \delta^{13}\text{C}_{\text{芳烃}} > \delta^{13}\text{C}_{\text{饱和烃}}。$$

12.3.6 利用氮、氦稳定同位素含量进行天然气对比。

12.3.7 鉴别油型气和煤成气以及油型凝析油与煤成凝析油的鉴别指标均可作为油、气、岩对比参数 (见表 14)。

12.4 烃源岩 / 油 / 气对比参数

常用的烃源岩 / 油 / 气对比参数汇总见表 15。

表 15 烃源岩 / 油 / 气对比参数汇总表

对比指标		油—岩 对 比	油—油 对 比	油—凝析油 对 比	油—气 对 比	气—气 对 比	气—岩 对 比
天然气组分浓度配对成分对比		—	—	✓	✓	✓	✓
轻烃组分浓度配对成分对比		✓	✓	✓	✓	✓	✓
甾 烷 萜 烷 化 合 物	C ₂₇ 甾烷 / (C ₂₈ +C ₂₉) 甾烷	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	某些特征化合物浓度	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	5 α -C ₂₈ / 5 α -C ₂₉	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	5 α -C ₂₇ / 5 α -C ₂₉	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	重排甾烷 / 5 α -规则甾烷	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	芳构化甾类配对组分对比	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	三环萜烷 / 17 α -藿烷	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Tm / Ts	✓	✓	✓	✓	✓	✓
甾烷萜烷反映成熟度和母质类型参数的相关分析对比		✓	✓	✓	✓	✓	✓
稳定 同位素	稳定碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	稳定氮、氦同位素 $^{40}\text{Ar} / ^{36}\text{Ar}$ 和 $^4\text{He} / ^{40}\text{Ar}$	—	—	—	—	✓	—

陆相烃源岩油气生成模拟计算公式与方法

表 A1

方法原理		计算公式	参数意义
化学动力学法		$① \frac{dX_i}{dt} = -K_{oi} X_i$ $② \frac{dU_i}{dt} = K_{gi} Y$	<p>X_i: t时刻干酪根中含第 i种活化能物质质量分数, g/g(TOC);</p> <p>U_i: t时刻由液态烃 Y生成气数量, g/g(TOC);</p> <p>K_{oi}, K_{gi}: 生油(气)阶段干酪根中含第 i种活化能物质的反应速率, Ma^{-1};</p> <p>Y: t时刻液态烃的数量, g/g(TOC)</p>
热(解)模拟实验法	降解率— R_0 图版法	$E_o = \frac{10^{-12}}{R_{o2} - R_{o1}} \int_{R_{o1}}^{R_{o2}} (Z_2 - Z_1) \cdot M \cdot d \cdot C \cdot \frac{D}{0.083(1 - 0.01 D) _{t=0}} dR_o$	<p>E_o: 烃源岩生油强度, $10^4 \text{t}/\text{km}^2$;</p> <p>$R_{o1}$, R_{o2}: 烃源岩顶、底界 R_o值, %;</p> <p>Z_1, Z_2: 烃源岩顶、底界深度, m;</p> <p>M: 烃源岩暗色泥岩含量, %;</p> <p>d: 烃源岩暗色泥岩密度, t/km^3;</p> <p>C: 残余有机碳含量, %;</p> <p>D: 干酪根降解率, %;</p> <p>$D _{t=0}$: $t=0$时(今天)时干酪根降解率, %</p>
	产烃(油、气)率— R_0 图版法	$① E_o = \frac{10^{-12}}{R_{o2} - R_{o1}} \int_{R_{o1}}^{R_{o2}} (Z_2 - Z_1) \cdot M \cdot d \cdot C \cdot \frac{O_r}{(1 - 0.01 D) _{t=0}} dR_o$ $② E_g = \frac{10^{-15}}{R_{o2} - R_{o1}} \int_{R_{o1}}^{R_{o2}} (Z_2 - Z_1) \cdot M \cdot d \cdot C \cdot \frac{G_r}{(1 - 0.01 D) _{t=0}} dR_o$	<p>E_o, E_g: 烃源岩生烃(油、气)强度, $10^4 \text{t}/\text{km}^2$, $10^8 \text{m}^3/\text{km}^2$;</p> <p>$O_r$, G_r: 产烃(油、气)率, $\text{kg}/\text{t}(\text{TOC})$, $\text{m}^3/\text{t}(\text{TOC})$;</p> <p>其余参数同上</p>
	热降解率史法	$E_{hc} = \frac{10^{-11}}{D_2 - D_1} \int_{D_1}^{D_2} (Z_2 - Z_1) \cdot M \cdot d \cdot C \cdot \frac{D}{(1 - 0.083 D) _{t=0}} dD$	<p>E_{hc}: 烃源岩生烃强度, $10^4 \text{t}/\text{km}^2$;</p> <p>$D_1$, D_2: 烃源岩层顶底界降解率, %;</p> <p>其余参数同上</p>
	有机碳恢复系数	$① E_o = S \cdot H \cdot O_r \cdot d \cdot C_r$ $② E_g = S \cdot H \cdot G_r \cdot d \cdot C \cdot C_r$	<p>S, H: 成熟烃源岩分布面积(km^2)与平均厚度(km);</p> <p>C_r: 残余有机碳恢复系数;</p> <p>其余参数同上</p>
煤成烃(油、气)计算方法	生—聚法	$E_o = S \cdot H \cdot d \cdot O_r \cdot A_o$ $E_g = S \cdot H \cdot d \cdot G_r \cdot A_g$	<p>A_o, A_g: 煤成烃(油、气)聚集系数;</p> <p>其余参数同上</p>
	圈闭体积法	$Q = S_r \cdot H_r \cdot \phi(1 - S_w) \cdot K_c \cdot Z$	<p>Q: 煤成烃圈闭资源量, 10^4t;</p> <p>S_r, H_r: 储集层面积与厚度, km^2, km;</p> <p>ϕ: 储集层孔隙度, %;</p> <p>S_w: 储集层含水饱和度, %;</p> <p>K_c: 充满系数;</p> <p>Z: 气体压缩系数</p>