

关于有机质演化各阶段的门限值 计算公式的初步探讨

曾道富 曾学思

(地质矿产部西南石油地质局)

本文在前人工作的基础上,结合四川盆地实际,推导出含各类(I、II、III)型干酪根生油岩演化到各个阶段的八个门限值计算公式。以上二叠统生油岩运算为例,表明此计算公式在研究油气生成与圈闭形成时间的适时配套等动态问题具有实用价值。

近年来,除康南(1974)、乌德等(1975)、浅川忠(1977)、焦守谔和周培军(1982)等提出的有机质演化到成熟生油阶段的少数几个作用时间与温度之间的门限关系公式之外,有关演化到高成熟湿气阶段和过成熟干气阶段的门限值计算公式及其应用效果等论文,很少见到报导。本文试图结合四川盆地油气演化程度普遍较高的实际,对有机质演化到各个阶段的门限值计算公式进行了初步探讨,分别推导出了含I、II、III型干酪根生油岩各演化阶段的八个门限值计算公式,并计算出了四川盆地各生油岩系成熟生油、高成熟湿气和过成熟干气阶段的作用时间和门限温度等。通过四川盆地各生油岩系有机质成熟度及其演变规律的分析研究,其结果基本上符合四川盆地的油气产出现状,并取得了一定的地质成果。并以上二叠统生油岩为例,进一步阐明了应用这些公式的合理性和实用性。

一、问题的提出

有机质的热演化过程可以用干酪根热降解的动力学模式表征。许多研究都证明,温度对有机质成熟程度具有决定性作用,而时间可以补偿温度的不足,蒂索和韦尔特(1978)指出:烃类成熟所需要的地温将随作用时间的增加而减少。干酪根热降解反应,如干酪根的裂解(油、气的生成)、石油的裂化、甲烷的裂解等一般按一级化学反应动力学形式进行,这符合阿伦纽斯公式。即沉积岩中有机质形成油气的门限温度和时间的关系符合如下关系式:

$$\ln t = \frac{E}{RT} - A \quad \text{或} \quad \lg t = \frac{218.5E}{T} - B \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- t: 地质年龄,以百万年为单位
- T: 门限温度,即大量生成油或气的温度(°K)
- E: 大量生成油或气的活化能

R ：气体常数（ $8.3\text{J/mol}\cdot\text{K}$ ）

A ：常数

$B = A \lg e$ ，常数

从公式（1）中可见，只要求得了含不同类型干酪根生油岩的大量有机质成熟生油或高成熟，过成熟生气的活化能和常数 B ，就可建立不同类型干酪根生油岩演化到各个不同阶段的门限值计算公式。

近十年来，国内外许多学者根据自己的研究成果，在不同地区建立了计算生油门限的温度与时间关系式。如：

（1）康南（1974）根据12个油田的成油温度和时间，取 $E = 57752.7\text{J/mol}$ ，镜质体反射率相当于0.45%，建立的时间和温度关系式为：

$$\lg t = 3014/T - 6.498$$

（2）乌德等（1975）以LOM（有机质变质尺度），镜质体反射率 $R^\circ = 0.7\%$ ，作为生油门限值，其活化能相当于 75362.4J/mol ，并提出如下式：

$$\lg t = 3933/T - 9.443$$

（3）浅川忠（1977）以 $R^\circ = 0.5\%$ 为生油门限值，相应活化能为 59871.2J/mol ，建立的 $\lg t - \frac{1}{T}$ 关系式为：

$$\lg t = 3125/T - 7.505$$

（4）焦守论、周培军（1982）通过松辽盆地嫩江组的模拟实验，以 $R^\circ = 0.5\%$ 为生油门限值，在国内首次提出相应的活化能 $E = 65385.3\text{J/mol}$ ，建立的 $\lg t$ 与 $\frac{1}{T}$ 关系式为：

$$\lg t = 3412/T - 7.948$$

这些成果，对于有机质成熟度较低的沉积盆地来说，无疑是非常重要的，但是对于油气成熟度较高的南方海相地层分布区（如四川盆地）就不够用了。油气勘探实践和近年来的科研攻关表明，四川盆地各生油岩系不仅经历了成熟、高成熟阶段，而且大部分海相生油岩系几乎都还经历了过成熟干气阶段。因此，要研究四川盆地的油气成熟度及其演化规律，并根据油气大量生成与圈闭形成适时搭配关系，从地化角度比较有效地指出油气勘探较为有利的远景区。就应该根据四川盆地油气成熟度普遍较高的实际情况，分别建立沉积有机质向石油转化（成熟生油）和石油裂解（即高成熟湿气阶段、过成熟干气阶段）等的门限值计算公式。

基于上述理由，笔者根据国内外研究现状，分别建立了含不同干酪根类型的生油岩演化进入成熟生油阶段、高成熟湿气阶段和过成熟干气阶段的八个门限关系式。将这八个公式应用于分析和研究四川盆地各生油岩系在各个主要构造时期的油气成熟度及其演变规律，其结果与四川盆地的油气产状基本吻合。

二、公式的推导过程

上述各家在建立 $\lg t$ 与 $\frac{1}{T}$ 关系式的同时，也认为干酪根热降解反应生成油气的活化

能与其镜质体反射率之间存在着线性关系，例如乌德等（1975）提出：

$$E = 26.71\lg R^\circ + 22.3 \quad (2)$$

焦守谔等（1982）通过对松辽盆地南部青山口组部分 I 型干酪根样品热失重曲线的模拟计算，把所得活化能值与实测的镜质体反射率值作回归分析处理，建立的线性关系式（其相关系数达 0.9）为：

$$E = 12.38\lg R^\circ + 19.34$$

同时，他们还通过对川 17 井 5 号样品的实验模拟证明：川北地区生油岩中干酪根热降解反应活化能（E）与镜质体反射率（R°）之间的关系适合于乌德（1975）提出的 E 值计算公式（2）。

另外，近年来国内外许多专家、学者几乎都把沉积岩中有机质向油气演化过程划分为未成熟、成熟、高成熟和过成熟四个阶段。我局李文国在四川盆地多年的研究成果（表 1）表明，未成熟生气阶段，R° < 0.5—0.7%，其主要产物是水、二氧化碳和甲

表 1 有机质演化阶段与镜煤反射率（R°）的关系

成熟阶段	R° (%)			烃类气体组成及特征
	I 型 (腐泥型)	II 型 (混合型)	III 型 (腐植型)	
未成熟生气阶段	<0.5	<0.6	<0.7	生气, CH ₄ CO ₂ H ₂ O NH ₃
成熟生油阶段	0.5—1.2	0.5—1.25	0.7—1.3	油伴生气, CH ₄ C ₂ H ₆ H ₂ S 重烃含量高 (15—40) %
高成熟湿气阶段	0.5—1.2	1.25—1.85	1.3—1.9	湿气, CH ₄ C ₂ H ₆ —H ₂ S N ₂ 重烃含量较高 (5—15%)
过成熟干气阶段	>1.8	>1.85	>1.9	干气: 以甲烷为主 重烃含量少 (<5%) H ₂ S CO ₂ N ₂

烷等。成熟生油阶段，R° > 0.5—0.7%，< 1.2—1.3%，主要产物是油伴生气，重烃含量很高，一般达 15—40%。高成熟湿气阶段 R° > 1.2—1.3%，< 1.8—1.9%，主要产物是湿气，重烃含量较高，一般介于 5—15% 之间。过成熟干气阶段，R° > 1.8—1.9%，以裂解甲烷气为主，重烃含量一般小于 5%。

推导公式时，采用了李文国的这种划分方案。并将各演化阶段 R° 的门限数字代入公式（2），即可分别求出含 I、II、III 型干酪根生油岩有机质演化到各个阶段的活化能（E）值。然后，再将这些 E 值分别代入公式（1），即可初步建立含 I、II、III 型干酪根生油岩演化到各个阶段的 lgt 与 $\frac{1}{T}$ 关系式：

（1）成熟生油阶段作用时间与温度之间的门限关系式的建立：

含 I、II 型干酪根生油岩分别以 R° = 0.5% 和 R° = 0.06% 作为成熟生油门限值，将它们分别代入公式（2），则可求出相应的活化能（E）值为 59716.3 J/mol 和 68567.2 J/mol。再将其代入公式（1），即可初步建立它们的门限关系式：

含 I 型干酪根生油岩：
$$\lg t = \frac{3116}{T} - B_{0.1}$$

$$\text{含 II 型干酪根生油岩: } \lg t = \frac{3578}{T} - B_0 \text{ II}$$

含 III 型干酪根生油岩成熟生油时的 $R^\circ = 0.7\%$ 。但是，由于它生成石油的能力极低，主要为气的成因物质，加之四川盆地海相层段很少含 III 型干酪根生油岩，故未推导其成熟生油阶段的门限公式。

(2) 高成熟生成湿气阶段作用时间与温度之间的门限关系式的建立：

先将含 I、II、III 型干酪根生油岩进入高成熟湿气阶段的镜质体反射率 (R°) 值 (表1) 分别代入公式 (2)，求出相应的活化能 (E) 值分别为 102216.5 焦耳/摩、104201.1 J/mol 和 106108.9 J/mol。再将这些活化能 (E) 值代入公式 (1)，则可初步建立含 I、II、III 型干酪根生油岩大量生成湿气阶段的门限关系式分别为：

$$\text{含 I 型干酪根生油岩: } \lg t = \frac{5335}{T} - B_{w \text{ I}}$$

$$\text{含 II 型干酪根生油岩: } \lg t = \frac{5435}{T} - B_{w \text{ II}}$$

$$\text{含 III 型干酪根生油岩: } \lg t = \frac{5537}{T} - B_{w \text{ III}}$$

(3) 过成熟生成干气阶段作用时间与温度之间的门限关系式的初步建立：

和上述建立成熟生油阶段和高成熟湿气阶段作用时间与温度之间的门限关系式一样，先将含 I、II、III 型干酪根生油岩进入过成熟干气阶段的镜质体反射率值 (表1) 分别代入公式 (2)，求出相应的活化能 (E) 值。然后再将所求得的活化能 (E) 代入公式 (1)，即初步建立了它们的门限值计算公式分别为：

$$\text{含 I 型干酪根生油岩: } \lg t = \frac{6362}{T} - B_g \text{ I}$$

$$\text{含 II 型干酪根生油岩: } \lg t = \frac{6431}{T} - B_g \text{ II}$$

$$\text{含 III 型干酪根生油岩: } \lg t = \frac{6499}{T} - B_g \text{ III}$$

上述 $B_0 \text{ I}$ (II)、 $B_{w \text{ I}}$ (II、III) 和 $B_g \text{ I}$ (II、III) 均为常数，分别代表含 I (II、III) 型干酪根生油岩演化进入成熟生油、高成熟湿气和过成熟干气阶段时，上述各门限公式中的常数达到平衡的系数。求取这些系数有两种方法，一种是通过模拟实验直接求取 (如焦守谏和周培军，1982)；另一种是通过某一已知地质年代的生油岩系进入各演化阶段的门限温度计算。

有关油、气生成温度范围内各类干酪根的考查报告极少，图1是根据这为数不多例子中的普西 (Pussey, 1977) 的报告修编的。该图显示了几乎经历1亿年 (白垩系) 的地层内石油、湿气及干气的门限温度点。普西等 (1977) 认为当沉积有机质堆积埋藏1亿年时，含 I、II 型干酪根生油岩成熟生油的门限温度分别为 70°C 和 85°C ；高成熟生成湿气或先前生成的液态烃石油裂化成湿气的门限温度为 150°C ，含 III 型干酪根生油岩生成湿气的门限湿度为 100°C ，而沉积有机质深埋1亿年时，各类干酪根或石油裂化成干气的门限温度，几乎都为 175°C (表2、图1)。将时间在1亿年条件下，各种不同类型干酪根生油岩成油成气的这些门限温度分别代入上列各式。即可求出各公式中的常数：

表2 干酪根种类与油气生成门限温度表

干酪根类型 演化阶段	温度 (°C)		
	I 型	II 型	III 型
成熟生油阶段	>75	>85	/
高成熟湿气阶段	>150	>150	>100
过成熟干气阶段	>176	>175	>175

注：有机质深埋时间约1亿年

- $B_{O I} = 7.086$
- $B_{O II} = 7.996$
- $B_{W I} = 10.611$
- $B_{W II} = 10.856$
- $B_{W III} = 12.845$
- $B_{g I} = 12.201$
- $B_{g II} = 12.356$
- $B_{g III} = 12.506$

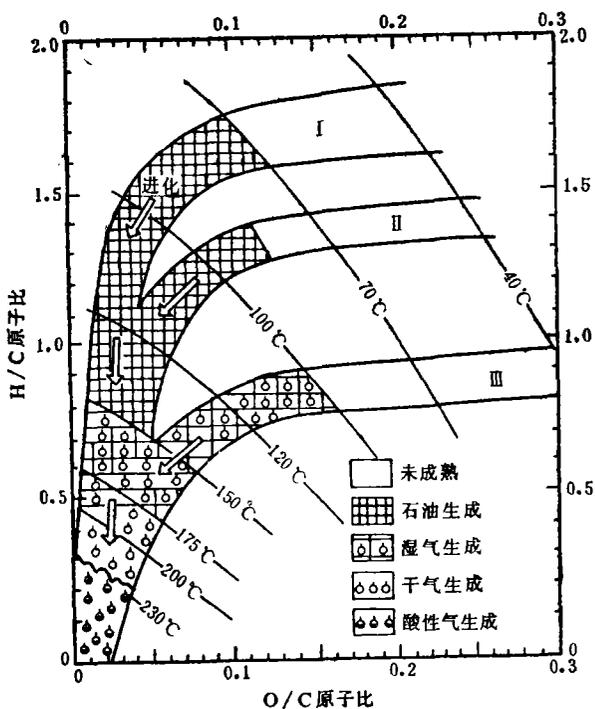


图1 干酪根种类和油气生成温度的关系
时间约1亿年，据Pussey (1977)修编

将这些常数值分别代入原式，便完成了含 I、II、III 型干酪根生油岩演化进入成熟生油阶段，高成熟湿气阶段和过成熟干气阶段的门限值计算公式的推导过程。推导出计算公式如下：

1. 成熟生油阶段的门限值计算公式

含 I 型干酪根生油岩 $lgt = \frac{3116}{T} - 7.086$ (3)

含 II 型干酪根生油岩 $lgt = \frac{3578}{T} - 7.996$ (4)

2. 高成熟湿气阶段的门限值计算公式

含 I 型干酪根生油岩 $lgt = \frac{5665}{T} - 10.611$ (5)

含 II 型干酪根生油岩 $lgt = \frac{5438}{T} - 10.854$ (6)

含 III 型干酪根生油岩 $lgt = \frac{5538}{T} - 12.845$ (7)

3. 过成熟干气阶段的门限值计算公式

$$\text{含 I 型干酪根生油岩 } \lg t = \frac{6362}{T} - 12.201 \quad (8)$$

$$\text{含 II 型干酪根生油岩 } \lg t = \frac{6431}{T} - 12.356 \quad (9)$$

$$\text{含 III 型干酪根生油岩 } \lg t = \frac{6499}{T} - 12.507 \quad (10)$$

式中： t ：生油岩大量形成油（气）被埋藏的作用时间（单位，百万年）；

T ：生油岩大量形成油（气）的门限温度（°K）。

三、四川盆地各生油岩系各个演化阶段门限温度的确定

在预测四川盆地各生油岩系演化到各个阶段的埋藏作用时间的基础上，进行综合分析和归纳，计算出了四川盆地各生油岩系演化到各个阶段的门限温度（表3）。基本上反映了四川盆地各生油岩普遍成油（或成气）的作用时间及其门限温度。它表明各生油岩系有机质埋藏的时间越长，各个演化阶段的门限温度则较低，反之，埋藏作用时间短，各演化阶段的门限温度则较高。

但是，表3所列各生油岩系演化进入各个阶段的作用时间和门限温度并不是绝对的。时间和温度可以互为补偿。如果某一地区在地史过程中，沉积速率和增温率大，某一地层被埋藏以后的作用地温高，其作用时间将减少；反之，如果某一地区增温率小，某一地层被埋藏以后的地温则低，而需要的作用时间就增加。因此，表3仅反映四川盆地各生油岩系油气普遍形成的时间及其门限温度。只有当某一生油岩系被埋藏的时间等于或大于表中的作用时间时，方可采用表中的门限温度。在某一地质时期，如果生油岩系被埋藏的时间尚未达到表中的作用时间，那么其门限温度将需要采用上述推导的八个公式分别作具体计算，其结果往往大于表中的数字。

在地质历史中，如果需要分析某一构造时期生油岩系的油气成熟度及其分布规律，则需先计算出它在盆地内各资料点在各地质时期被埋藏的古地温。如果它等于或大于这一构造时期该地层成油（或成气）的门限温度，那么，这套生油岩在这时便开始进入了大量成油（或成气）的阶段；反之亦然。

各生油岩系在各个构造时期的古地温一般等于古地表温度加上它被埋藏所增加的温度。前者为今地表恒温带温度与地壳冷却温度之和，后者则为目的层上覆各地层的厚度（ H_j ）与其古地温梯度（ G_j ）之积。其计算公式为：

$$T_{\beta} = T_a + 2 + \sum_{j=1}^n \alpha_j B_j + \sum_{j=1}^n G_j H_j \quad (11)$$

式中： T_{β} 为各构造时期的古地温， β 代表某一构造时期，本文则分别代表海西期末、印支早期末、燕山期末和喜山期末； T_a 代表这一构造时期某一地区的常年平均气温（ a 为某一地区），它加上 2°C 则为这一地区恒温带的地温¹⁾； α 为地壳冷却系数，按

1) 黄景城 石油地质中地温研究的一些方法，《石油普查探勘资料情报科技(内部资料)》1979年第二期，第34页。

3CM (达科普期和阿里安, 1956) 计算: 中生代 (α_{zh}) 为 $0.05^\circ\text{C}/\text{Ma}$, 古生代 (α_g) 为 $0.06^\circ\text{C}/\text{Ma}$, 震旦纪 (α_z) 为 $0.07^\circ\text{C}/\text{Ma}$, 新生代 (α_x) 为 $0.15^\circ\text{C}/\text{Ma}$; B 为各构造时期距今的地质时间 (单位 10^8 年); i 代表不同的地质时代; $\sum_{j=1}^n \alpha_i \beta_j$ 为地壳冷却温度;

$\sum_{j=1}^n G_j H_j$ 为某一目的层被埋藏的温度, j 代表其上覆地层数。新生代 (α_x) 为 $0.04^\circ\text{C}/\text{Ma}$; B 为各构造时期距今的地质时间 (单位 10^8 年); i 代表不同的地质时代;

$\sum_{i=1}^n \alpha_i B_i$ 为地壳冷却温度; $\sum_{j=1}^n G_j H_j$ 为某一目的层被埋藏的温度; j 代表其上覆地层数。

四川盆地各生油岩系都可以从表3中查出相应的成油或成气各演化阶段的深埋作用时间和门限温度等。根据公式(3) — (10) 和 (11), 我们还可以计算出任何地层, 在任何地史时期的门限温度和作用地温。从而便为我们研究各生油岩系在各个构造时期的动态演变过程奠定了良好的基础。

四、公式的应用效果

在利用时间补偿原理分别求取四川盆地各地层的古地温及古地温梯度和利用相对沉积速率比值, 剥蚀速率及古地温分别恢复各构造时期剥蚀地层厚度的基础上, 将上述八个门限值计算公式应用于四川盆地各生油岩系, 并分别对加里东期、海西期、印支期、燕山期和喜山期的油气成熟度及其演变规律进行了研究与分析¹⁾, 从而揭示了各生油岩系的动态演变历史, 表明四川盆地自寒武纪以来, 具有印支早期和燕山中、晚期两次重要的成油成气时期。前者是古生界绝大多数生油岩系成熟生油的重要时期; 后者是中生界绝大多数生油岩系进入过成熟干气阶段, 中生界三叠系和中、下侏罗统大多数生油岩系进入高成熟湿气阶段或成熟生油阶段的重要时期。因此, 与其适时配套的印支期和燕山期形成的圈闭则具有特别重要的意义。本文则仅以上二叠统生油岩系为例, 来说明上述公式的应用效果。

图2表明了四川盆地上二叠统生油岩系在各个主要地质时期的油气动态演化过程。在海西期末, 上二叠统生油岩系仅被埋藏了 $10M_a$, 根据公式(3) 可计算出其成熟生油的门限温度应为 112°C 。再根据公式(11) 可以求出四川盆地各个地区上二叠统生油岩在海西期末的作用温度。例如三台和重庆地区上二叠统的厚度 (H_{p_2}) 分别为 200m 和 210m , 占地温梯度 (G_{p_2}) 为 3.21 和 3.4 , 它们目前的常年平均气温 (T_{i_a}) 分别为 16.7°C 和 18.7°C , 海西期末至今已持续了 $248M_a$ (B), 其中中生代为 $183M_a$ (B_{zh}), 新生代为 $65M_a$ (B_x)。将这些参数代入公式(11), 可求出这两个地区上二叠统生油岩在海西期末的作用地温分别为:

1) 曾道富、曾学思：四川盆地海相各生油岩系油气成熟度及其演变规律，全国海相地层油气勘探学术讨论会论文，1986年

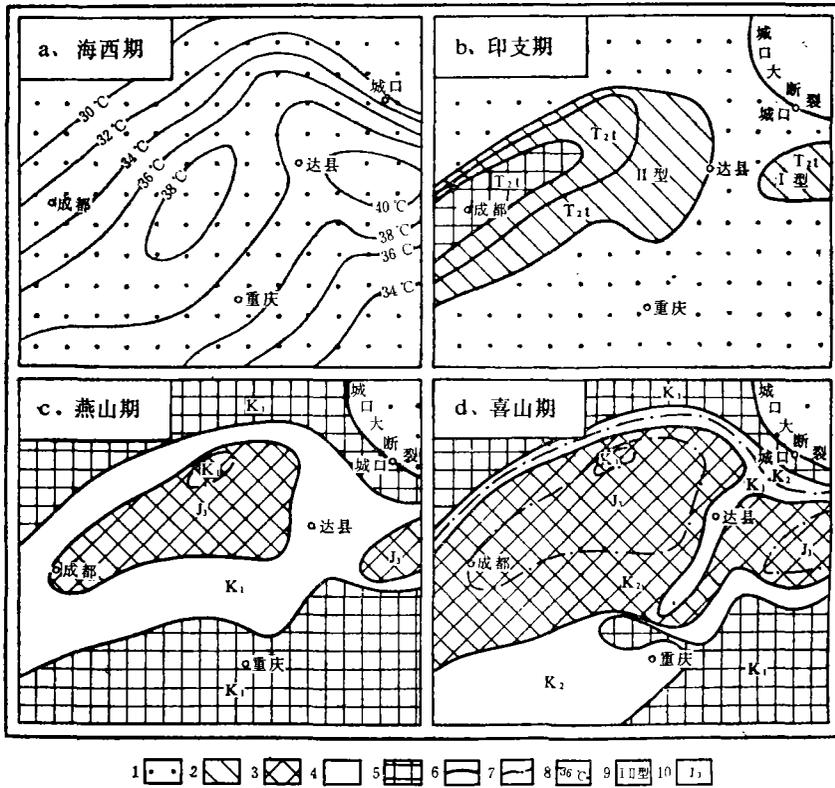


图2 四川盆地上二叠统油气演化平面图

1. 未成熟生气区 2. 成熟生油区 3. 过成熟干气区 4. 高成熟湿气区 5. III型干酪根高成熟生成湿气和I、II型干酪根生油成熟生油混合区 6. 成熟度分区线 7. 油气演化时代界限 8. 古地温等值线 9. 干酪根类型 10. 油气形成时期

三台地区

$$T_{印} = T_a + 2 + \alpha_z B_z + \alpha_x B_x + Gp_2 Hp_2$$

$$= 16.7 + 2 + (0.05 \times 183 + 0.04 \times 65) + \frac{3.21}{100} \times 200 = 36.87 (^\circ\text{C})$$

重庆地区

$$T_{印} = 18.7 + 2 + (0.05 \times 183 + 0.04 \times 65) + \frac{3.4}{100} \times 210 = 39.59 (^\circ\text{C})$$

同样，可以求出盆地内任何一个地区上二叠统生油岩在海西期末的作用温度。从而，可编制出上二叠统在海西期末的作用地温等值线（图2a），表明海西期末四川盆地上二叠统的作用地温仅在30—40℃之间，远未达到其成熟生油的门限温度，均处于未成熟生气阶段（图2a）。

到了印支早期末，上二叠统生油岩一般也仅埋藏约 25×10^6 ，根据公式（3）、（4）、（7）计算，上二叠统含I、II型干酪根生油岩分别应为94.3℃和107.9℃，而含III型干酪根生油岩进入高成熟湿气阶段的门限温度则为115.7℃。根据公式（11）同样可计算出四川盆地各地区的二叠统生油岩在印支早期的作用温度。例如印支早期在盆地

内分别沉积了一套下三叠统飞仙关组、嘉陵江组、中三叠统（雷口坡组和天井山组）碳酸盐岩，它们在三台地区的厚度（ H_j ）分别为450、680、1350m，而在重庆地区则为510、550、510m；并通过古地温研究表明它们在三台地区的古地温梯度（ G_j ）分别为3.50、3.20、3.25℃/100m，而在重庆地区则为3.50、3.50、3.40℃/100m；印支早期末至今已持续了231M_a（ B ），其中中生代为166M_a（ B_{zh} ），新生代为65M_a（ B_x ）。将这些参数代入公式（11），亦可求出印支早期末上二叠统生油岩在这两个地区的作用地温分别为：

三台地区

$$\begin{aligned} T_{印} &= T_{三台} + 2 + (\alpha_{zh} \times B_{zh} + \alpha_x B_x) + G_{p2} H_{p2} + G_{T1f} H_{T1f} + G_{T1j} H_{T1j} \\ &\quad + G_{T2} H_{T2} \\ &= 16.7 + 2 + 0.05 \times 166 + 0.04 \times 65 + \frac{3.21}{100} \times 200 + \frac{3.50}{100} \times 450 + \frac{3.20}{100} \times 680 + \\ &\quad \frac{3.25}{100} \times 1350 \\ &= 117.405 (\text{℃}) \end{aligned}$$

重庆地区

$$\begin{aligned} T_{印} &= T_{重庆} + 2 + (\alpha_{zh} B_{zh} + \alpha_x B_x) + G_{p2} H_{p2} + G_{T1f} H_{T1f} + G_{T1j} H_{T1j} + G_{T2} H_{T2} \\ &= 18.7 + 2 + (0.05 \times 166 + 0.04 \times 65) + \frac{3.4}{100} \times 210 + \frac{3.5}{100} \times 510 + \frac{3.5}{100} \\ &\quad \times 550 + \frac{3.4}{100} \times 510 \\ &= 93.18 (\text{℃}) \end{aligned}$$

同样，还可以求出盆地内其他任何地区上二叠统生油岩在印支早期的作用温度，从而可根据四川盆地上二叠统生油岩在印支早期的作用温度分布规律，表明在印支早期四川盆地仅成都、三台一带含Ⅲ型干酪根生油岩达到了其高成熟湿气阶段的门限温度（115.1℃），为含Ⅰ、Ⅱ型干酪根生油岩成熟生油与含Ⅲ型干酪根生油岩生成湿气的混合带，在混合带周围分布了一圈含各类干酪根生油岩成熟生油区。再往外一圈到达县以西和云阳地区则仅为含Ⅰ型干酪根生油岩的成熟生油区；四川盆地的其余广大地区（如重庆地区）均未达到其成熟生油的门限温度，故处于未成熟生化气区（图2b）。

同时，将作用温度与门限温度的差值除以中三叠世地层的古地温梯度和增温率，可求出其成熟或高成熟的厚度和地质时间。例如三台地区中三叠世所增加的地温约为43.9℃，持续时间为12M_a年，则其沉积速率为3.66℃/Ma，因此可求得上二叠统含Ⅰ型干酪根生油岩成熟生油的地质时间 = 231Ma + $\frac{(117.4 - 94.3) \text{℃}}{3.66 \text{℃/Ma}} = 237.3\text{Ma} =$ 属中三叠世中期；而其成熟生油的厚度 = $\frac{(117.4 - 94.3) \text{℃}}{3.25 \text{℃/100m}} = 711\text{m}$ 。同样还可以计算出

其他任何地区上二叠统含各类干酪根生油岩在任何地质时期的成油成气的厚度和地质时期，从而可编制油气动态演化剖面图，从纵向上揭示了油气动态演变规律。

在燕山期末，四川盆地上二叠统被埋藏了160.5M_a，达到或超过了四川盆地上

二叠统生油岩系普遍成熟生油时期，含 I、II 型干酪根生油岩成熟生油的门限温度分别为 63℃ 和 78℃（表 3），但未达到其高成熟和过成熟的作用时间，因通过公式（5）、（6）计算出这时它们进入高成熟湿气阶段的门限温度应为 143℃ 左右。含 III 型干酪根生油岩高成熟的门限温度则为 95℃。而他们进入过成熟干气阶段的门限温度几乎都在 168.6℃ 左右。

由于在晚印支—燕山期期间，四川盆地沉积了 4000—7000m 以上的陆相地层，沉积速率大，增温率高，尤其是燕山中、晚期，是四川盆地大量形成油气的重要时期之一。根据公式（11）也可计算出四川盆地各地区上二叠统在燕山期的作用地温。表明在燕山期末，成都—三台一带和川东云阳地区已开始大量生成干气，其周围则为一环带状的高成熟湿气分布区。川南、川东南和鄂西地区以及盆地北部、西部边缘地带则为含 I、II 型干酪根生油岩成熟生油与含 III 型干酪根生油岩高成熟生成湿气的混合带。只是城口大断裂以北地区由于上覆陆相地层不发育，仍处于未成熟生化气阶段（图 2c）。

在四川盆地内部，上、下二叠统之间无明显的沉积间断。因此，在燕山期后，上二叠统生油岩先前形成的烃类继续向更高的成熟阶段演变。表 3 可见含 I、II 型干酪根生油岩成熟生油的门限温度和燕山期一样，分别为 63℃ 和 78℃，含 I、II、III 型干酪根生油岩进入高成熟湿气阶段的门限温度分别为 141℃、141℃ 和 95℃；而它们进入过成熟干气阶段的门限温度则几乎都在 165℃ 左右。

图 2d 表明了上二叠统生油岩系在喜山期，也就是现今的油气成熟度及其分布规律。即上二叠统生油岩系的油气成熟度主要受控于泸州古隆起和华莹山大断裂，因为它们与川西凹陷基本上控制了上覆陆相地层的沉积格局。在大断裂以西，古隆起以北的川西凹陷及其邻区均为过成熟干气分布区。往东、往南及盆地边缘地区油气成熟度变低。泸州古隆起地区以高成熟的湿气为主。盆地边缘及城口大断裂以北地区为含 III 型干酪根生油岩高成熟生成湿气与含 I、II 型干酪根生油岩成熟生油的混合区，如川西龙门山前河湾

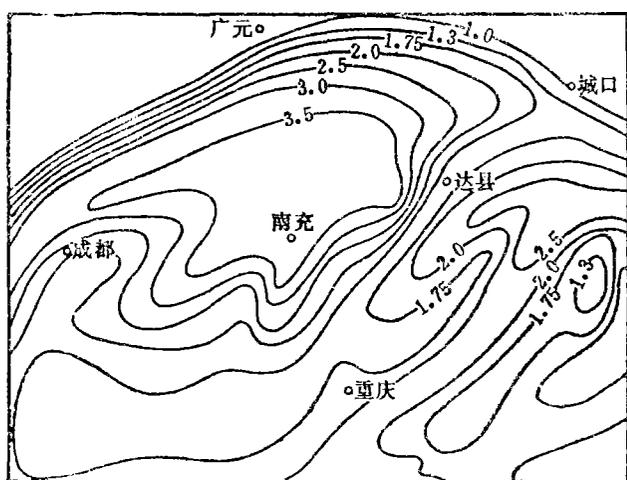


图3 四川盆地上二叠统R^{max}等值线图
（据中国南方上二叠统R^{max}等值线图）

场上二叠统仍有液态石油。华莹山及其东部地区的向斜地段区一般为过成熟干气分布区，如石宝寨、卧龙河等，重烃含量都在 0.5% 以下，而背斜部位则以高成熟湿气为主，局部可能产油，如雷音铺、薄包山等，重烃含量一般大于 5%，为高成熟分布区；而天府煤矿磨心坡煤坑发现油流和华莹山以东的长条状背斜局部产肥煤和焦煤等，表明它们正处于成熟生油阶段。四川盆地上二叠统镜质体反射率值的分布（图 3）和四川省煤种分布等资

料都验证了我们的上述结论,同时它还与四川盆地30多年来的油气勘探成果基本相符。因此,我们认为运用这种方法和上述公式来研究生油岩系的油气动态发展过程,能够更准确地确定油气大量形成的时期,再结合圈闭形成时间等基础地质资料,便可作出比较客观的油气评价。

五、结 语

油气大量生聚时期与圈闭形成时间的适时搭配问题,已得到广泛的重视。在油气演化程度较高的地区进行远景评价时,应该把各生油岩系的有机质热演化的动态演变过程弄清楚。在其他条件相近地区,着重考虑大量成油成气时期与圈闭形成时期适时配套的地区和层位。那么,在研究有机质成熟度时,不管地层新老和作用时间的长短,只单纯地采用 R° 值划分各个演化阶段显然是不够的,必须考虑作用时间的补偿问题,方能使这项科研工作臻于完善。

本文介绍的八个门限值计算公式和各地史时期古地温计算的公式,并应用于研究四川盆地各生油岩系热演化史的动态演变过程,虽然取得了一定的地质成果,但它仅仅是开始。随着工作的不断深入,该项研究工作将取得更加重要的成果。

在完成这项研究和撰写本文过程中,承蒙李汶国、安凤山、唐泽尧、张子枢、陈子恩、程跃黄等的帮助与支持,在此一并致谢!

(收稿日期:1986年8月28日)

APPROACH TO THE CALCULATIVE FORMULA FOR THE THRESHOLD VALUES OF THE EVOLUTIONARY STAGES OF ORGANIC MATTER

Zeng Daofu

Zeng Xuesi

(Southwest China Bureau of Petroleum Geology,
Ministry of Geology and Mineral Resources)

Abstract

Connan (1974), Hood (1975), Asamhawa (1977), Jiao Shouquan and Zhou Peijun (1982) proposed the formula of the threshold values for the maturation of organic matter based on the relationship between temperature and time. In consideration of the previous works and the fact that the maturity of oil and gas in Sichuan Basin is generally high, eight calculative formulas for the threshold values of source rocks with various types of kerogen are deduced. Taking Upper Permian of Sichuan Basin as an example, the effectiveness of those formulas applied to the dynamic evolutionary process of organic matter in various major tectonic movements in Sichuan Basin is expounded. It is further indicated that for the amount on the timing of the formation of traps with respect to the formation of large amount of oil/gas, the calculative formula is viable and could provide useful in formations.