

# 试用数学地质法研究陕甘宁 盆地上古生界煤系地层热演化

王少昌 傅锁堂

(石油工业部长庆石油勘探开发研究院)

本文据煤层中所测的镜质体反射率( $R_o$ )代表煤系热演化地温指数的论点、煤热模拟试验过程中热演化指标( $R_o$ )随温度成函数递变的规律,研究煤系地层在不同地史过程中的 $R_o$ 值与其影响因素的内在联系。

陕甘宁盆地上古生界煤系地层分布面积达二十三万平方公里。据现有资料,笔者整理了井下及地面123个煤样的 $R_o$ 数据及二十一口井 $R_o$ 值纵向变化资料,利用四口深井井温曲线及部分中、深试油井井温曲线作参照对比,结合区域构造及地质发展历史对上古生界煤系地层中 $R_o$ 值及主要影响因素之间的关系、用数学地质的方法进行了赏试性的联系。从而应用于油气勘探。

## 一、影响煤系地层热演化的主要因素

煤系地层热演化受地温、埋藏时间和压力三者的影响。而这几种因素都集中表现在上覆地层增厚与减薄(上升剥蚀)的变化之中。煤变质是不可逆的,而目前所测定煤的 $R_o$ 值是该煤层演化条件的综合效应。地层上升剥蚀(见图1—B、C)温度和压力降低,亦不能促使煤反演化。因而研究煤系地层演化规律,选取地史中一直处于稳定下沉、很少有沉积间断(见图1—A)的区域最为理想。

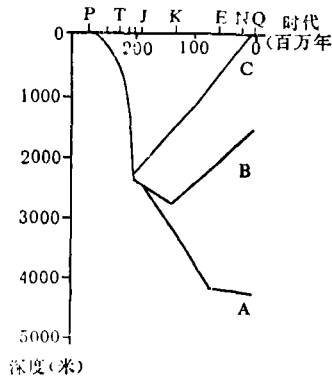


图1 上古生界煤系地层埋藏史曲线

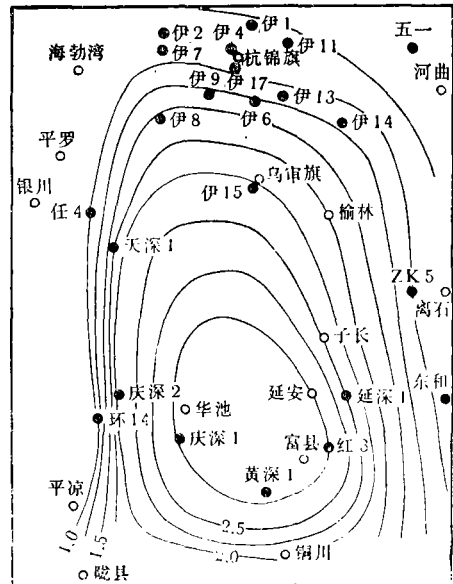


图2 太原组——山西组煤层 $R_o$ 等值线图

对盆地地面与井下煤样 $R_o$ 值进行测定，绘制等值线图（图2）。从图2可看出煤系热演化程度由盆地边缘向中心增高，且呈环带状分布。华池、富县一带为高变质区，盆地沉降中心为天池、环县等地，两者位置并不一致。

筛选位于各区沉积剖面连续的钻探资料，建立煤层 $R_o$ 值与相应埋深关系曲线（图3）。图中曲线总的趋势说明煤变质程度随埋深增大而不断加深，但深度不是唯一的影响因素，从图可见 $R_o$ 与深度基本呈三类线型关系，相同或相近深度点 $R_o$ 值差别甚大（表1）。从各关系曲线所代表井的分布位置，即可看出Ⅰ类代表井分布在盆地西部，Ⅱ类代表井分布在盆地中部及北部，Ⅲ类代表井则分布在盆地东南部。由此看来 $R_o$ 值不仅受埋深的影响而且受区域地温场的控制。三条曲线代表位于三个不同构造部位的地温梯度的变化。

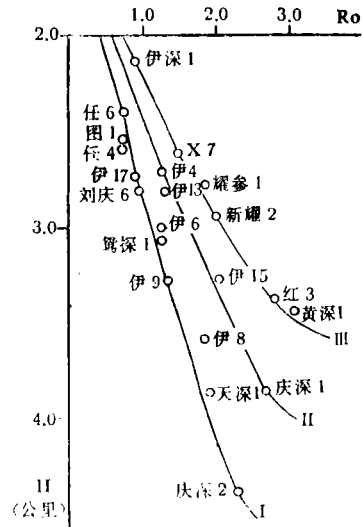


图3 源岩埋深与 $R_o$ 关系图

表1 相近深度 $R_o$ 变化类别表

项目 区 类	井 号		井 号		井 号	
	井深(米)	$R_o$ (%)	井深(米)	$R_o$ (%)	井深(米)	$R_o$ (%)
Ⅰ	伊17		伊9		天深1	
	2745	0.886	3271	1.30	3850	1.901
Ⅱ	伊13		伊15		庆深1	
	2817	1.268	3272	2.043	3837	2.754
Ⅲ	跃参1		红3		黄深1	
	2780	1.811	3371	2.875	3436	2.915

盆地西部地处过渡带，地壳受挤压加厚，地幔下陷，莫霍面埋藏深（42~43.5公里，见图4），煤系受地温烘烤作用弱，地温梯度低。东部地壳拉张，地幔变浅（39~41公里），煤系近热源受地温作用较西部强，地温梯度高。这一变化规律在煤系地层 $R_o$ 值平面变化图上也得到了验证。

概括起来讲：煤系地层热演化程度的高低是长期地温作用的结果。对经历了相同演化历史的同一煤系而言其本身变质的深浅是由埋深和地温梯度综合效应的大小而决定的。地温梯度的高低受莫霍面变化的控制（见图5）。

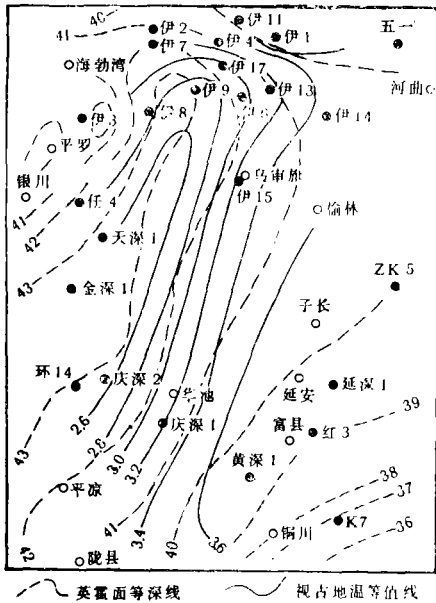


图4 陕甘宁盆地莫霍面等深视古地温梯度等值线图

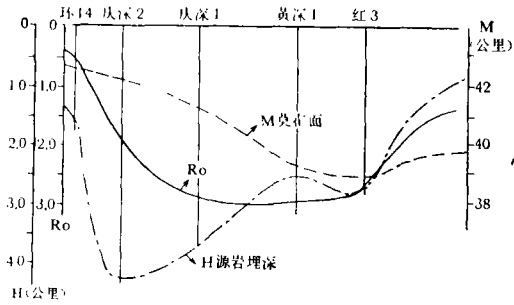


图5 太原组——山西组源岩变质程度与源岩埋深及莫霍面深度关系图

## 二、求视古地温梯度 (G) 的方法

为了研究地温对煤系地层热演化的作用就必须研究盆地地温梯度的变化规律, 利用已知地区煤系的埋深和实测 $R_0$ 值可以求得视古地温梯度。

母岩热演化的温度是本身的埋深 ( $H_n$ ) 和地温梯度 ( $G$ ) 来决定的。因此, 把现今煤系地层的 $R_0$ 值可以认为是接受上覆沉积时上覆地层厚度逐渐增大 (温度逐渐增大) 到

一定程度的最终结果。可用函数式  $R_0 = f(\sum_{i=1}^n H \cdot G)$  表示。式中 $\sum H$ 与 $R_0$ 可以实际测

定。而 $G$ 仅能利用在不同深度上的 $R_0$ 值与今地温的对应变化值来求得。求得的 $G$ 值仅能反应近似古地温梯度。其方法及步骤如下:

### 1. 求 $R_0$ 每增加1%时, 相应温度的增加值 $K$

利用盆地中心煤系埋深在3500~4500米, 上覆地层沉积齐全, 很少有沉积间断的四口深井, 测得各井 $R_0$ 纵向变化值, 求出 $R_0$ 每增加1%时, 相应地温的增加值 ( $K$ )。

$$K = \frac{T_2 - T_1}{R_{02} - R_{01}}$$

$K$ : 单井 $R_0$ 增加1%时, 地温的增加值 (单位:  $^{\circ}C$ )

$T_2 - T_1$ : 相邻层段实测地温差值 (单位:  $^{\circ}C$ )

$R_{02} - R_{01}$ : 相邻层段实测 $R_0$ 差值 (单位: %)

就各井所求的 $K$ 值求取平均值 $K$ 。

$$\bar{K} = \frac{K_1 + K_2 + K_3 + \dots + K_n}{n}$$

按以上方法对上古生界煤系地层的 $\bar{K}$ 值进行试算，结果是24℃。

2. 选择基础温度 $T_0$ 与相应镜煤反射率 $R_{0min}$

地史中 $R_0$ 与温度之间的实际关系已无法求得，然而可利用 $R_0$ 的温度指数特征与现今地温联系，可取其 $R_0$ 与相应温度的最小值为基础值。经筛选以盆地埋藏较深变质较浅的任4井为基准井，以井深2574米、 $R_0$ 值为0.745%，井温76℃为基础值。即： $T_0 = 76℃$ ， $R_{0min} = 0.745\%$ 。

3. 求视古地温值

在求得 $\bar{K}$ 和确定了 $T_0$ 与 $R_{0min}$ 之后，可以按盆地中各井所测 $R_0$ 值求得对应的温度。这种由 $R_0$ 推算而来的温度简称为视古地温。

$$T_n = T_0 + (R_0 - R_{0min}) \bar{K} \quad (1)$$

$$= 76 + (R_0 - 0.745) 24$$

$T_n$ ：视古地温（单位：℃）

$R_0$ ：实测镜煤反射率值（单位：%）

4. 求视古地温梯度

地温梯度是指地层深度每增加100米时地温的增加值。求得视古地温 $T_n$ 后，可按下式求得地温梯度 $G$ 。

$$G = \frac{T_n}{H_n} \times 100 \quad (2)$$

$G$ ：地温梯度（单位℃/100米）

$T_n$ ：用 $R_0$ 换算的地温值（单位：℃）

$H_n$ ：测定 $R_0$ 值处井深（单位：米）

因 $T_n$ 、 $H_n$ 不同于地史中的古地温与埋深故称视古地温和视埋深， $G$ 称视古地温梯度。按上方法对盆地不同地区沉积层序齐全的井可进行 $T_n$ 与 $G$ 计算。

### 三、视古地温梯度与莫霍面的数学关系

在特定的地质条件下，视古地温梯度的变化与莫霍面埋深的关系密切。把视地温梯度等值线图与莫霍面埋深图（见图4）相比较，不难看出二者相似的变化趋势。莫霍面较深的西部地区视古地温梯度仅为2.6~2.8℃/100米，而莫霍面较浅的南部视古地温梯度可达3.4~3.6℃/100米。在剖面图（图见6）上也反应出同一变化规律。

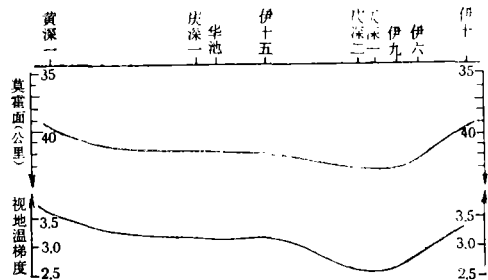


图6 莫霍面南—北剖面与视古地温梯度南—北变化图

把十三口井视古地温梯度与各井所处莫霍面深度值用数学方法进行回归。二者有较好的线型关系（见图7），相关系数为-0.9394。关系式：

$$G = 16.6236 - 0.3256M \quad (3)$$

关系式表明在煤系下伏地层岩性相似（碳酸盐岩为主），地层导热率基本相同，盆地本部没有火成岩侵入的陕甘宁地区，莫霍面是影响地温场变化的最主要因素。

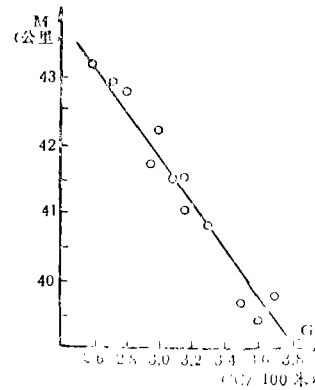


图7 莫霍面与视古地温梯度关系图

### 四、用数学多元回归法求视R<sub>0</sub>值

由前述（1）、（2）、（3）式知道R<sub>0</sub>值是母岩埋藏深度（H<sub>n</sub>）和古地温梯度的函数，而地温梯度在一定程度上由莫霍面值的大小来决定。因此，用莫霍面深度（M）代替古地温梯度（G），以源岩埋深和莫霍面深度推算R<sub>0</sub>值是可行的。

筛选盆地内沉积间断小，地层比较完整的十一口探井资料（见表2），利用已知的R<sub>0</sub>、H<sub>n</sub>和M三组数据，采用数学多元回归法求三者关系式。

表 2

井号	源岩埋深 (H <sub>n</sub> )	R <sub>0</sub>	莫霍面深度 (M)	备注
庆深1	3877	2.754	41.5	H <sub>n</sub> 单位为米 R <sub>0</sub> 单位为% M单位为公里
	3889	3.108	41.5	
天深1	3850	1.901	43.2	
	3831	1.41	43.2	
庆深2	4352	1.97	42.8	
	4433	2.255	42.8	
任4	2554	0.735	42.3	
	2574	0.745	42.3	
任6	2399	0.75	42.3	
	2436	0.74	42.3	
伊6	3009	1.284	41.7	
	3064	1.276	41.7	
伊4	2701	1.256	40.8	
伊9	3289	1.30	42.9	
伊15	3272	2.043	41.5	
伊13	2853	1.268	41.0	
黄深1	3336.5	2.915	39.4	
	3437	3.036	39.4	

首先对数据进行予处理，把源岩和莫霍面的绝对埋深处理为相对埋深。

$$H = H_n - 2100 \text{米} \quad Mi = M - 39 \text{公里}$$

H：予处理后母岩相对埋深

Mi：予处理后莫霍面相对深度

以H和Mi为自变量， $R_0$ 为因变量，上计算机处理，求得多元回归方程为：

$$R_0 = 2.03394 \times 10^{-3}H - 2.99692 \times 10^{-4}Mi - 0.0276269Mi^2 + 0.645291 \quad (4)$$

$$H = \frac{R_0 + 0.0276269Mi^2 - 0.645291}{2.03394 \times 10^{-3} - 2.99692 \times 10^{-4}Mi} \quad (5)$$

(4)式称为陕甘宁盆地上古生界煤系地层视镜煤反射率( $R_0$ )与主要影响因素——埋藏深度( $H_n$ )、莫霍面深度(M)关系式。简称 $R_0$ 、 $H_n$ 、M关系式。

## 五、 $R_0$ 、 $H_n$ 、M关系式在勘探中的应用

陕甘宁盆地发展于长期稳定下沉的大地构造背景之中。自加里东构造运动以来，盆地本部各套地层虽有短暂的沉积间断（或微量的剥蚀），但巨厚的白垩系沉积大大超过了前期剥蚀厚度，现在的埋深基本反映了地史最大埋深；同一套煤系地层在平面上的热演化在时间等同的条件下进行；稳定地台区古今变化并不明显，古地温梯度在地史时期变化亦没有较大出入。在这种特定的条件下，应用 $R_0$ 、 $H_n$ 、M关系式在不同的前提下求视 $R_0$ 和恢复地层厚度是可行的。

### 1. 推算生气（油）岩的视 $R_0$ 值

盆地大面积分布着石炭~二叠系煤系地层，在本部有实测 $R_0$ 值的仅有十余口井，加之分布不均，许多地方缺乏资料。过去评价多采用推论和外演方法，其结论可靠程度较低。现在可利用地震资料在盆地本部未剥蚀区可直接应用关系式求得视 $R_0$ 值。在外围剥蚀区，则利用区域地质资料（钻井、地面）先恢复剥蚀量及煤系地层古埋深，再求视 $R_0$ 值。计算所得 $R_0$ 值可做为未钻探区评价生气（油）母岩热演程度、计算资源量的重要参数。

### 2. 用实测 $R_0$ 值计算剥蚀区源岩最大埋深、恢复地层剥蚀量

陕甘宁盆地发展特点是中生代晚期边缘抬升遭受剥蚀（见图1—B、C）。长期以来用区域地质定性的方法推论抬升时间和地层剥蚀证据总嫌不足。利用该式即可得出定量概念并结合盆地区域地质资料可推断地层上升回返时间。为了验证关系式计算结果的可靠性，笔者分别对盆地东、西两缘剥蚀区的最大埋深和剥蚀量进行了试算，计算结果与区域地质资料基本吻合，以下举例说明。

西缘北段地区鸳鸯湖背斜构造核部出露251米的上三叠统。核部所钻的鸳探1井，井深1719米，煤层测定的 $R_0$ 值为0.82%，该井处的莫霍面深为42.5公里。通过计算该层地史最大埋深为2621米。构造翼部与下伏地层平行不整合接触的上三叠统厚为840米。由以上各层厚度可知三叠系以上仍有313米地层。据邻区侏罗系与三叠系平行不整合接触和侏罗系厚度（下侏罗统至中侏罗统厚度为300~400米）资料来看，该处的最大埋深期为中侏罗世末期。从西缘北段大区域白垩系与中侏罗统角度不整合的接触关系来分析，该

处构造应形成于燕山中期，即中侏罗世末地层开始抬升，这一点与计算结果是一致的。

东缘南段的古驿背斜构造核部出露着上二叠统石千峰组，该地层残余厚度为123米。核部的蒲一井所处莫霍面深为39.1公里，在井深592米测得煤层的 $R_0$ 值为1.25%。经计算最大古埋深为2402米。该区地面剖面显示中、下三叠统为平行不整合，其厚度分别为460米和320米。该区以西邻近盆地内部的有较薄上三叠统残留地层。由出露地层的厚度可知，地层在未受抬升剥蚀之前，中三叠统厚为958米，上三叠统厚度为1000—1300米，这说明三叠纪末是最大埋深期，此后该区才进入抬升剥蚀阶段。这一结论与盆地南部上三叠统沉积边界研究和该区构造形成期研究的结论是相同的。

参加该项工作的还有傅金华、彭路平和刘国江同志，王心平同志绘制插图，文中关系式由电算室王伟元同志回归，在研究和成文过程中裴锡古同志给予协助和指导。

（收稿日期：1985年1月22日）

### 参 考 文 献

- 〔1〕宋青春、张振春，地质学基础，人民教育出版社，1978年

# MATHEMATICAL GEOLOGY RESEARCH ON THE THERMAL EVOLUTON OF PALEOZOIC COAL— SERIES OF SHANGANNING BASIN

wang Shaochang      Fu Suotang  
(Research Institute of Changqing Oilfield)

## Abstract

Shanganning Basin is a major Mesozoic inland basin with an area of 230000 Km<sup>2</sup>. There are evident differences in geothermic gradient depending on the burial depth of Moho-discontinuity. Using the relationship between temperature and vitrinite reflectance, it is possible to obtain the apparent palaeo-geothermic gradient which bears an inverse linear relationship to the burial depth of mohorovicic discontinuity. It is revealed that the value of vitrinite reflectance representing the maturity index of the upper palaeozoic source rock depends on the burial depth of mohorovicic discontinuity and that of the source rock itself, and an equation for relating them has been worked out. Using multiple regression analysis for vitrinite reflectance, and the burial depth of mohorovicic discontinuity and the source rock, an empirical equation has been deduced to give the quantitative parameters for evaluating the hydrocarbon source rock of a new area and the erosional magnitude to be restored.