

# 运用 TTI 法恢复地层原始沉积厚度

——以华北晋西、中原地区为例

仇福康

(同济大学, 上海 200092)

岩石中有机质的成熟度是它在埋藏史中热演化效应的累积, 这种累积效应可用时间-温度指数(TTI值)或镜煤反射率( $R^o$ )表示。在取得某地区研究层的 TTI(或  $R^o$ )值及埋藏史后, 就可反演出其最大埋深, 恢复地层原始沉积厚度。此法的精度取决于地温、厚度及 TTI 或  $R^o$  等参数, 当研究区地质历史上发生多次升降和沉降时, 必须进行深度校正和时间-温度的热校正。

关键词 有机质的成熟度 埋藏史 深度和热效校正

作者简介 仇福康 男 53岁 副教授 海洋地质

## 1 基本原理

现代石油成因研究表明, 岩石有机质热演化过程中温度和时间是主要影响因素, 近似于化学动力学中单分子一级反应。确切地说, 温度与成熟度呈指数关系, 时间与成熟度呈正线性关系。基于上述思路, 由洛帕廷(H. B. Lopatin, 1971)提出、后经韦普莱斯(D. W. -Waples, 1979)完善的根据时间、温度定量计算有机质成熟度的方法, 即时间温度指数(简称 TTI 值), 公式为:

$$\text{TTI 值} = \sum_{i=\min}^{i=\max} (\Delta t_i) (r^{t_i}) \quad (1)$$

式中  $\Delta t_i$  代表  $i$  温度间隔沉积所对应的时间, 以  $10^6$  为单位;  $r^{t_i}$  为某一温度区间的温度效应因子。考虑到每升高  $10^\circ\text{C}$  成熟度提高一倍的关系, 选择  $r=2$ , 这是化学动力学中的一个近似的经验规则, 故式(1)可改写成:

$$\text{TTI 值} = \sum_{i=\min}^{i=\max} (\Delta t_i) (2^{t_i}) \quad (2)$$

由式(2)可以认为, 当某个层位的源岩在埋藏史、地热史已知的情况下, 可计算出在任何一段地史时期或全部地质时期中的 TTI 值, 即由此了解某源岩自古至今的热演化效应; 同样, 在地热史和 TTI 值已知的情况下, 也可以反演出某一时代源岩的埋藏深度, 从而推算出相应的地层厚度, 即恢复地层原始沉积厚度。

韦普莱斯还提供了 TTI 值与镜煤反射率( $R^o$ )的换算表(表1), 根据此表, 可回归出四个不同区间的相关式(列于表1右侧), 用它可以由  $R^o$  换算出 TTI 值, 反之亦然。

表1 时间温度指数(TTI)与镜质体反射率( $R^o$ )相关系数

项目	相 关 数 据												线性回归法求得公式
	$R^o$	0.3	0.4	0.5	0.55	0.6	0.65	0.70	0.77	0.85	0.93	1.00	
I	$R^o$	0.3	0.4	0.5	0.55	0.6	0.65	0.70	0.77	0.85	0.93	1.00	TTI<3, $R^o=0$ TTI, 3-75 $R^o=0.00602 \cdot TTI+0.5309$
	TTI	<1	<1	3	7	10	15	20	30	40	50	75	
II	$R^o$	1.00	1.07	1.15	1.19	1.22	1.26	1.30	1.34	1.39	1.46		$R^o=0.8904 \log$ TTI-0.6645
	TTI	75	92	110	120	130	140	160	180	200	260		
III	$R^o$	1.46	1.50	1.62	1.76	1.87	2.00	2.20	2.50	2.76			$R^o=1.086$ $\log \cdot TTI-1.1348$
	TTI	260	300	370	500	650	900	1000	2700	4000			
IV	$R^o$	2.76	3.00	3.25	3.50	4.0	4.50	5.00					$R^o=1.7364 \log$ TTI-3.5607
	TTI	4000	6000	9000	12000	29000	42000	85000					

## 2 原始沉积厚度恢复方法和步骤

在地质历史中,华北地块经历了加里东期、印支—燕山期和喜山期三次较大的地壳升降或褶皱断裂活动,晋西和中原地区三叠系(T)、下奥陶统峰峰组( $O_1f$ )和亮甲山组( $O_1l$ )顶部均遭到不同程度的剥蚀,尤其T、 $O_1f$ 残存零星。为了对晋西、中原地区奥陶系及石炭—二叠系含油气远景作出评价,研究其在漫长的地质时期中沉降埋藏历史及建立相应的构造热演化模型,恢复剥蚀厚度,重建地层的原始沉积状况具有十分重要的意义。下面就此作为实例加以论述。

首先,根据野外实测剖面或钻井-测井剖面及有关地温资料,编制地质模型图,即时间-埋深-温度关系图。

具体作法为:在以纵坐标为深度、横坐标为时间的方格纸上,选择适当比例尺,再确定所要计算的某层位的底或顶面(如下二叠统山西组  $P_{1s}$  底)开始沉积的时间和埋深(两者均为零);再依次确定出随后各地质时期的时间和深度(由各地质时期厚度资料而得),并联结成时间-埋深关系折线;其它层位(如下奥陶统冶里组  $O_{1y}$ ,下马沟组  $O_{1x}$  底等)依次类推,即可得出一张不同研究层位的时间-埋深关系图;在此基础上,根据地温资料(地表年平均温度、地温梯度),以  $10^{\circ}C$  为一温度间隔,编制温度剖面,最后编制成时间-埋深-温度关系图,即地质模型(图 1、2)。

其次,分别计算各研究层( $P_{1s}$ 、 $O_{1x}$ 、 $O_{1y}$  底等)不同时间间隔的 TTI 值。

计算时,规定  $100 \sim 110^{\circ}C$  间隔为基数,指数  $n=0$ ,当温度每升高  $10^{\circ}C$ ,  $n$  递加 1,反之,即每降低  $10^{\circ}C$ ,  $n$  递减 1。如  $110 \sim 120^{\circ}C$  区间,  $n$  值为 1,  $90 \sim 100^{\circ}C$  区间,  $n$  值为 -1,其余区间指数值类推。

根据地质模型图上某个研究层每经历一个温度间隔(即增加  $10^{\circ}C$ )所需的时间,按公式(2)算出各区间的 TTI 值,最后计算不同区间累加的 TTI 值。计算区间和累计的 TTI 值的数据如表 2、3。

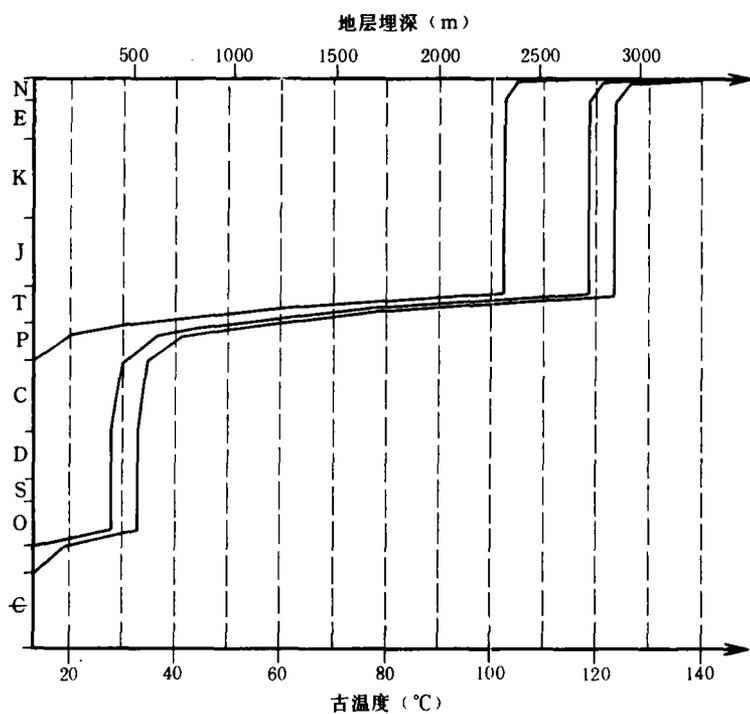


图 1 晋西 P<sub>1s</sub>、O<sub>1x</sub>、O<sub>1y</sub> 底部时间-埋深-温度关系图

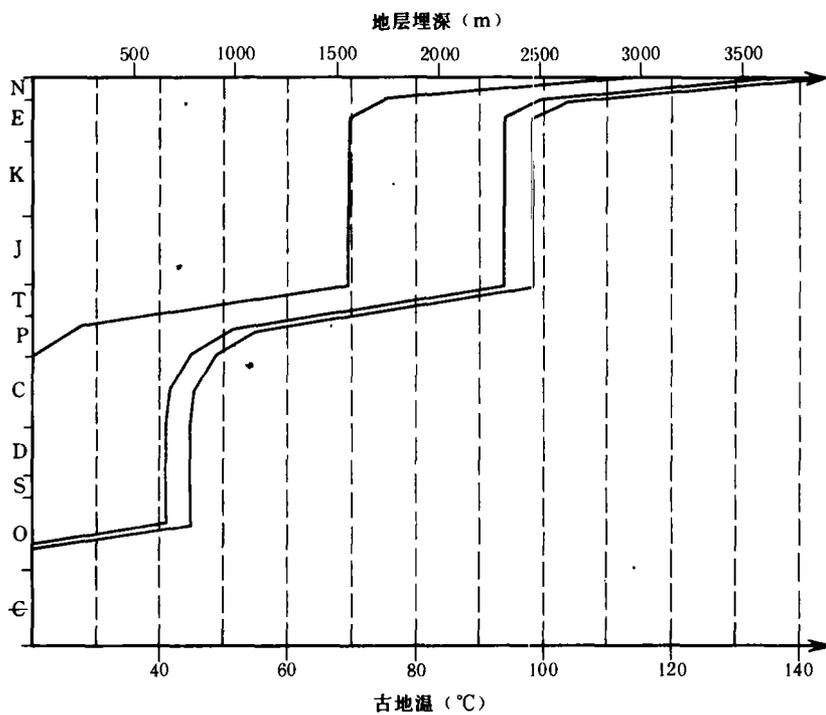


图 2 中原濮城东 P<sub>1s</sub>、O<sub>1x</sub>、O<sub>1y</sub> 底时间-埋深-温度关系图

表2 根据晋西地质模型计算 TTI 值一览表

温度区间(℃)	温度因子	层 位 及 项 目								
		P <sub>1s</sub> 底			O <sub>1x</sub> 底			O <sub>1y</sub> 底		
		Δt	区间 TTI	累计 TTI	Δt	区间 TTI	累计 TTI	Δt	区间 TTI	累计 TTI
20~30	2 <sup>-3</sup>	11	0.04	TTI <sub>P</sub> 0.05	12	0.05	TTI <sub>O<sub>2</sub></sub> 0.05	15	0.06	TTI <sub>O<sub>1+2</sub></sub> 0.09
					98	0.30	TTI <sub>O<sub>3-D</sub></sub>			
					76	0.30				
30~40	2 <sup>-7</sup>	1	0.01	TTI <sub>M<sub>2</sub></sub> 153.13	29	0.23	TTI <sub>C-T</sub> 10.33	4	0.03	TTI <sub>O<sub>2-P</sub></sub> 0.77
		5	0.04		98	0.77		95	0.74	
40~50	2 <sup>-6</sup>	6	0.09	TTI <sub>R</sub> 66	8	0.13	TTI <sub>C-T</sub> 10.33	15	0.23	TTI <sub>C-T</sub> 27.14
50~60	2 <sup>-5</sup>	6	0.19		5	0.16		5	0.16	
60~70	2 <sup>-4</sup>	5	0.31		6	0.38		6	0.38	
70~80	2 <sup>-3</sup>	4	0.5		5	0.63		7	0.88	
80~90	2 <sup>-2</sup>	4	1		3	0.75		5	1.25	
90~100	2 <sup>-1</sup>	4	2		2.5	1.25		5	2.5	
100~110	2 <sup>0</sup>	149	149		2.5	2.5		5	5	
		64	64							
110~120	2 <sup>1</sup>	1	2	2	4	TTI <sub>J-K</sub> 296	5	10	TTI <sub>J-K</sub> 592	
				148	296					
120~130	2 <sup>2</sup>			56	112	TTI <sub>R</sub> 152	1.5	6	TTI <sub>N</sub> 264	
				9	36		148	592		
130~140	2 <sup>3</sup>			64	256	64	256			
				0.5	4	1	8			
				219.18			458.76			884

以晋西早二叠世山西组底(P<sub>1s</sub>)埋藏为例,在其地质模型图上,取地表年平均温度为13.5℃,(古)地温梯度为3.8℃/100m。计算三叠系地层原始真厚度的步骤为:

- 2.1 由图1先求得P<sub>1s</sub>底在二叠世埋藏过程中所经历各区间温度和时间,然后按公式(2)计算出其二叠世的TTI值(为0.05),用TTI<sub>P</sub>表示;
- 2.2 用同样的方法可计算出P<sub>1s</sub>底在新生代所获得的TTI值(为66),用TTI<sub>R</sub>表示;
- 2.3 以P<sub>1s</sub>实测的镜煤反射率数据(R<sup>o</sup>=1.8%<sup>①</sup>)对照表(1)查出其从二叠世至今的总TTI值(为566),用TTI<sub>Σ</sub>表示;

① 长庆石油勘探局实测

2.4  $P_{1s}$  底在中生代应获得  $TTI_{M_z}$  值,可用下式求得:

$$TTI_{M_z} = TTI_s - (TTI_P + TTI_R) = 566 - (0.05 + 66) = 499.95$$

表 3 根据中原地质模型计算 TTI 值一览表

温度区间(°C)	温度因子	层 位 及 项 目								
		$P_{1s}$ 底			$O_{1x}$ 底			$O_{1y}$ 底		
		$\Delta t$	区间 TTI	累计 TTI	$\Delta t$	区间 TTI	累计 TTI	$\Delta t$	区间 TTI	累计 TTI
20~30	$2^{-8}$	30	0.12	TTI <sub>P</sub> 0.18	10	0.04	TTI <sub>O<sub>1</sub></sub> 0.12	33	0.13	TTI <sub>O<sub>1+2</sub></sub> 0.27
30~40	$2^{-7}$	8	0.06		10	0.08		10	0.08	
		3	0.02	TTI <sub>M<sub>z</sub></sub> 10.47	98	1.53	TTI <sub>O<sub>3-D</sub></sub> 1.53	4	0.06	
40~50	$2^{-6}$	11	0.17		10.47	96	1.5	TTI <sub>O<sub>3-P</sub></sub> 1.53	98	1.53
				81					1.27	
50~60	$2^{-5}$	11	0.34	TTI <sub>R</sub> 14.94	14	0.44	TTI <sub>C-T</sub> 9.19	25	0.78	TTI <sub>J-K</sub> 74
60~70	$2^{-4}$	159	9.94		12	0.75		11	0.69	
		27	1.69	12	1.5	12	1.5			
70~80	$2^{-3}$	18	2.25	TTI <sub>R</sub> 14.94	12	3	TTI <sub>R</sub> 81	12	3	TTI <sub>R</sub> 103.1
80~90	$2^{-2}$	8	2		4	2		8	4	
90~100	$2^{-1}$	8	4	TTI <sub>R</sub> 14.94	148	14	TTI <sub>J-K</sub> 74	148	74	TTI <sub>R</sub> 103.1
100~110	$2^0$	3	3		41	20.5	TTI <sub>R</sub> 81	33	16.5	
				8.5	8.5	13		13		
110~120	$2^1$	1	2	TTI <sub>R</sub> 14.94	8.5	17	TTI <sub>R</sub> 81	8	16	TTI <sub>R</sub> 103.1
120~130	$2^2$				5.25	21		8	32	
130~140	$2^3$			TTI <sub>R</sub> 14.94	1.75	14	TTI <sub>R</sub> 81	2.8	22.4	TTI <sub>R</sub> 103.1
140~150	$2^4$								0.2	
				25.59			165.84			189.14

2.5 由于该区缺失 J-K,故可以直接用上述的  $TTI_{M_z}$  值反演三叠系原始厚度。在反演过程中,可用不同的三叠系厚度导出一组  $P_{1s}$  底埋藏于中生代期间的 TTI 值,即  $TTI_{M_z}$  值;然后用以控制三叠系最大埋深反复进行“逼近”的拟合运算,一直达到满意的接近值(3200m);从而筛出最理想的三叠系厚度值:现存厚度[刘家沟组( $T_{1l}$ )666m+和尚沟组( $T_{1h}$ )782m+二马营组( $T_{2er}$ )456m+延长组( $T_{3y}$ )1092m]加剥蚀厚度(3200m-PT 现存厚度 2330m)等于 2741m。

用同样的方法恢复中原地区三叠系原始沉积厚度,由图 2 得到:  $TTI_P$  为 0.18,  $TTI_R$  为 14.94;  $P_{1s}$  实测  $R^0$  为 0.85,  $TTI_s$  为 40,故:

$$TTI_M = 40 - (0.18 + 14.94) = 24.88$$

经反复拟合运算得出三叠系最大埋深曾为 2030m, 剥蚀厚度为 480m。因此, 中原地区三叠系的原始沉积厚度约为 1480m。

### 3 关于深度和时间-温度热效应的校正

上述用洛-韦法(TTI 值)反演某个时代源岩的原始沉积厚度, 只考虑到研究层位在整个地质历史时期有一次明显的升降运动或只遭受到一次构造运动的剥蚀, 并且在此间断面(地层不整合面)以下的层位(包括研究层位)未遭受剧烈的构造变动——岩层遭水平挤压及强烈的褶皱、错断等, 这样, 研究层位的埋藏史的恢复或编制它的地质模型较容易与实际相接近; 否则, 必须考虑强烈褶皱或断裂给研究层源岩的埋藏条件带来的影响。简言之, 在上述方法中求取 TTI 值只注意到各时期岩层的厚度资料给研究层源岩埋深带来的影响。并未考虑由于地层倾斜(或褶皱、断裂)可使其埋藏史、热演化史在短距离内发生显著的不同, 源岩上翘部分与其下倾部分相比, TTI 值明显变小, 这并不是因为前者比后者遭受更多的剥蚀。由此可见, 运用此法来推算间断面以下层位的剥蚀量或恢复原始沉积厚度最理想的地区是构造变动较小的相对稳定地区, 如鄂尔多斯地区效果较好; 而对于构造变动大的复杂地区则应根据研究层源岩埋藏条件的差异应分块、分带处理, 即区别不同情况作出更符合实际的埋藏史地质模型图, 并取得较多的实测  $R^\circ$  资料, 然后再分别作进一步运算。当然, 后者的误差肯定会更大些。

我们试图以上述方法来计算下奥陶统峰峰组( $O_1f$ )和亮甲山组( $O_1l$ )顶部间断面的剥蚀厚度, 经反复核实有关地层、地温资料及图解计算 TTI 值、实测  $R^\circ$  值等发现, 运用此法恢复  $O_1f$  与  $O_1l$  的原始沉积厚度误差太大, 其主要原因为:

3.1 研究层顶部的间断面在地质模型图上处于低温度区间里, 温度因子小于  $10^{-7}$ ; 如果剥蚀厚度达千米, 其恢复了的时间-埋深-温度折线亦只落于  $10^{-4}$  温度因子区间里, 说明由于温度低热演化效应进行得极其缓慢。因此, 研究层顶部剥蚀前后所获得的 TTI 值很小( $<1 \sim 0.1$ ), 此数值与实测  $R^\circ$  换算过来的 TTI 值:  $O_{1x}$  为 2305 ( $R^\circ = 2.45\%$ ),  $O_{1y}$  为 4000 ( $R^\circ = 2.75\%$ ) 相比可以忽略不计, 由此看来, 由  $O_{1x}$ 、 $O_{1y}$  的  $R^\circ$  值通过地质模型图来反演  $O_1f$  与  $O_1l$  顶部剥蚀厚度就不可能达到预期的效果。

3.2 研究层顶部不仅早期由于怀远运动、加里东晚期运动抬升遭受剥蚀, 并且于三叠纪后因受印支、燕山运动影响使覆盖于上的中生界地层再一次抬升且遭受严重剥蚀, 这对研究  $O_1f$ 、 $O_1l$  顶部的埋藏史、热演化史带来更为复杂的因素。多次的区域性的抬升和长时期的遭受剥蚀将近占研究层整个地质历史时期的一半。而此过程本身目前研究得很不够, 即中奥陶纪一晚泥盆纪及三叠纪—白垩纪末是什么样的发展过程? 是一种直线型的抬升过程, 还是单折型(中间曾有一次下降过程然后再抬升)或是多折型(中间曾有二次或多次下降过程)的过程? 很明显, 不同的抬升过程对研究层的热演化史影响颇大。研究者为了计算方便, 往往在拟合运算中采用简便的直线型模式, 因此一般会造成由地质模型图推算出的 TTI 值大大低于由研究层实测得到的  $R^\circ$  换算而得的 TTI 值, 岩区的时代愈老这种差别愈大(表 4)。

表 4 TTI 图解计算值与  $R^\circ$  换算值对照表

TTI 值	晋 西			中 原 (龙 王 庄)	
	$P_{1s}$	$O_{1x}$	$O_{1y}$	$P_{1s}$	$O_{1x}$
图解计算值	219.18	458.76	884	25.59	265.84
$R^\circ$ 换算值( $R^\circ$ )	566(1.8%)	2305(2.45%)	4000(2.75%)	40(0.85%)	1660(2.25%)

3.3 TTI 法所依据的地质模型图其埋深资料取之于各个时代的真厚度,作图时以水平层处置,而实际情况决非如此简单,也就是地层的产状往往是倾斜的,甚至是褶皱加断裂的,这对研究层的埋藏史、热演化史的恢复带来极大的影响。尤其是印支—燕山期强烈的差异性构造运动影响更甚,例如中原濮阳地区一些探井从  $P_{1s}$  实测到的  $R^\circ$  值就可看出(表 5):

表 5 中原濮阳地区二叠系山西组  $R^\circ$  数据表

井别	龙古 1 井	范古 1 井	范古 2 井	范古 3 井	卫古 1 井	濮深 1 井	长 1 井
$R^\circ$	0.85	0.811~0.829	0.813~0.83	0.80	0.80~1.0	1.5	3.4~3.88

低的只有 0.8,高的达 3.88,换算成 TTI 值,其差别更大:低的为 33,高的为 10700。究其原因,并不是前者三叠系剥蚀得多或后者三叠系保存得好引起,例如,范古 1 井于 3150m,  $P_{1s}$  的  $R^\circ$  实测值为 0.8%,长 1 井于 3090m,  $P_{1s}$  的  $R^\circ$  实测值为 3.4%,而比长 1 井埋藏更深的濮深 1 井  $P_{1s}$  的  $R^\circ$  值却只有 1.5%(4424m),这明显反映出由于地层倾斜的原因引起研究层埋藏史的差异;濮深 1 井处印支运动初期就很快上倾抬升且长期遭受剥蚀,于燕山晚期才接受早第三纪沉积;而范古 1 井抬得更高或下沉得更晚,故热演化程度更低;相反,长 1 井处印支期时相对下倾深埋,燕山期缓慢抬升,晚期再下沉接受第三系沉积。上述  $P_{1s}$  因构造变动,  $R^\circ$  值在近距离内有这样明显的变化,这对于更老的奥陶系地层来说,它经历的更多次的构造运动必然会引起热演化程度更为复杂的影响,也使得用 TTI 法恢复下古生界地层厚度更困难。

由此可见,运用 TTI 法恢复地层原始沉积厚度除了有足够的地质模型(时间-埋深-温度关系曲线)外,应满足以下两个基本条件:1 研究层顶部的间断面在地质模型图上处于较高温区间里,温度因子  $>10^4$ ,即要求其在最大埋深时具备较明显的热演化效应;2. 研究层所在地区的构造运动比较简单,无强烈的褶皱和挤压,地层产状平缓,沉积后主要只遭一次明显的剥蚀。在基本满足上述条件下,如剥蚀面之下的研究层有明显的倾斜或褶曲,则应根据所在构造部位的地层产状作必要的深度校正——即变真厚度( $H$ )作图为垂直于地面的视厚度( $H/\sin\theta$ ,  $\theta$ ——地层倾角)作地质模型图;如研究层沉积后其抬升过程不是单一而平稳的直线型,而是呈波折状发展的单折型或多折型,则应根据区域地层发育史,特别是沉积后的水进水退层序的研究对间断面的埋藏史作进一步的解释,即所谓时间与温度的“热效校正”。这样,经过校正后得到的地质模型图再来运用 TTI 法恢复地层原始沉积厚度就更接近实际,也就更为可靠了。

(收稿日期:1990年6月14日)

### 参 考 文 献

- 1 Waples DW. Time and Temperature in Petroleum Formation; Application of Lopatms Method to Petroleum Exploration. *Bull AAPG*, 1980, 64(6)
- 2 费安琦、汤显明等. 构造-热演化模型及其在鄂尔多斯地区煤成气研究中的应用. 煤成气地质研究, 北京, 石油工业出版社, 1987
- 3 周兴熙、袁容. 华北盆地南部三叠系分布探讨. 石油实验地质, 1984, 6(2), 87~94
- 4 戴金星等. 鉴别煤成气的指标. 煤成气地质研究, 北京, 石油工业出版社, 1987

## AN APPLICATION OF TTI IN RECONSTRUCTION OF ORIGINAL THICKNESS OF SEDIMENTARY SEQUENCES —A CASE STUDY OF THE WEST SHANXI AND NORTH HENAN AREAS

Qiu Fukang

(Tongji University, Shanghai)

### Abstract

The maturity of organic matter in sedimentary rocks is the accumulating effects of thermal evolution in burial history. Such an accumulated effect could be expressed by time-temperature-index (TTI) or vitrinite reflectance ( $R^o$ ). The greatest burial depth and the original thickness of sedimentary sequences can be obtained by the method of reversion, once the TTI(or  $R^o$ ) and the burial history in certain areas are available. The precision of this method depends on the parameters, such as geothermics and thickness of sedimentary sequences, TTI,  $R^o$ , etc.. If upliftings and sudsidings take place, you should make corrections both on the depth and the thermal effects of time-temperature.