

苏北东台坳陷下第三系生油岩 的时—温指数的探讨

费 富 安

(江苏石油勘探指挥部)

近十多年来,国内外石油地质工作者都十分重视油气成熟度的研究,认为干酪根转变成石油的过程中,或石油裂解生成甲烷的过程中,时间和温度都是重要因素。苏联学者H.B.劳普汀在1969年和1971年曾提出^{[2][3]}时间—温度指数(即TTI值)以反映沉积物中有机物的成熟度,普遍受到国内外的重视。

本文对东台坳陷的金湖、高邮、溱潼三个凹陷各层段的TTI值作过计算,并重点讨论了阜宁组二、四二个主要生油层的成熟度、生油时间和深度,以及形成圈闭的有利时间。

一、方法简介

在沉积物中有机物的热降解,也和多数化学反应一样,时间和温度是主要因素。其反应速度取决于温度,以及有机物在该温度的时间长短。时间和温度对化学反应速度的影响可互相补偿。即对有机物的成熟来说:时间短、温度高的热效应可与时间长、温度低的热效应相当,二者都可使有机质达到同样成熟度^[3]。根据煤化作用所观察到的经验规律:温度每升高10°C,其反应速度就增加一倍。这种温度、时间的综合效应,作用于有机物的降解率是累加的,因此可反映有机物的成熟度。这种反映有机物成熟度的参数,H.B.劳普汀称其为时间—温度指数,即TTI值。

时间—温度指数计算步骤如下:(1)画出各沉积层的“地质复原模式”图;(2)根据地温梯度算出各层埋深的地温;(3)以10°C为间隔划分成等温间隔;(4)算出各温度间隔内的时间(ΔT)以及温度系数 γ 值;(5)算出各间隔的相应成熟效应即 ΔTTI 值(即该层的沉积时间乘以温度系数 γ 值);(6)用公式 $TTI = \sum_{n=\min}^{n=\max} (\Delta T_n) (\gamma^n)$ 算出总的TTI值,其中 γ^n 即为 γ 系数^[4]。

二、东台坳陷油气源岩和TTI值的计算

苏北东台坳陷是在印支—燕山期形成的中—新生代断陷盆地,金湖、高邮、溱潼是其中的三个次一级凹陷。经勘探证实新生代沉积厚约6000—7000米,由下而上分为泰州组、阜宁组、戴南组、三垛组和盐城组。其中生油层总厚达1400米左右,以阜宁组二、四段的黑色泥岩为最好,是目前公认的主力生油层。已在泰州组、阜一段、阜二段、阜

三段、戴一段、戴二段、垛一段和盐一段获得工业油气流和油气显示，并圈定了真武等二十多个油气田。作者根据这三个凹陷的情况，选取了深凹部位的钻井及地震资料进行了TTI值的计算（表1）。

东台坳陷各层组厚度表

表 1

层位	金 湖		高 邮		溱 潼	
	单层厚度 (米)	累计厚度 (米)	单层厚度 (米)	累计厚度 (米)	单层厚度 (米)	累计厚度 (米)
Q	78	78	190	190	201	201
Ny ²	424	502	410	600	660	861
Ny ¹	251	753	625	1225	726	1587
Es ²	567	1320	1141	2366	592	2179
Es ¹	320	1640	894	3260	358	2537
Ed ²	290	1930	480	3740	252	2789
Ed ¹	242	2172	555	4295	234	3023
Ef ⁴	261	2433	600	4895	450	3473
Ef ³	180	2613	380	5275	320	3793
Ef ²	216	2829	414	5689	370	4163
Ef ¹	700	3529	900	6589	800	4963
Et	265	3797	500	7089	400	5363

计算时采用的地温梯度为：金湖凹陷平均地温梯度为4.0°C/100米、高邮凹陷平均地温梯度为3.6°C/100米、溱潼凹陷平均地温梯度为3.8°C/100米^[1]，具体计算如下：

第一步：恢复地质剖面的沉积史和构造史，即将表1中各层的厚度累加作为埋藏深度，用埋藏深度对地质年代来作图，绘制成埋藏史剖面图（图1、2、3）。

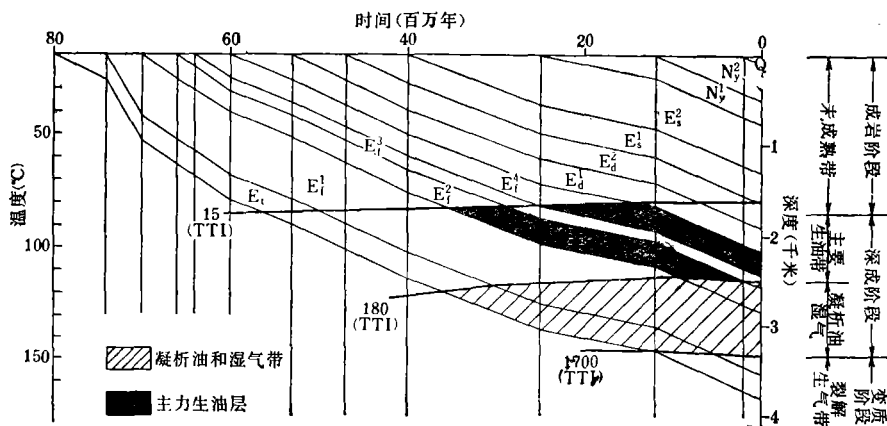


图 1 金湖凹陷第三系埋藏史剖面 and 时—温指数等值线图（东70井）

第二步：根据平均地温梯度，算出各凹陷每层埋深的地温。再以10°C为间隔，在剖面图上绘出等温线，考虑到东台坳陷的具体地质情况，本文选用70—80°C作为基准温度间隔，并将它的n值定为0，低于70—80°C的每一温度间隔的指数n值为负，高于70—80°C的指数为正，其他相应温度间隔的n值见表2。

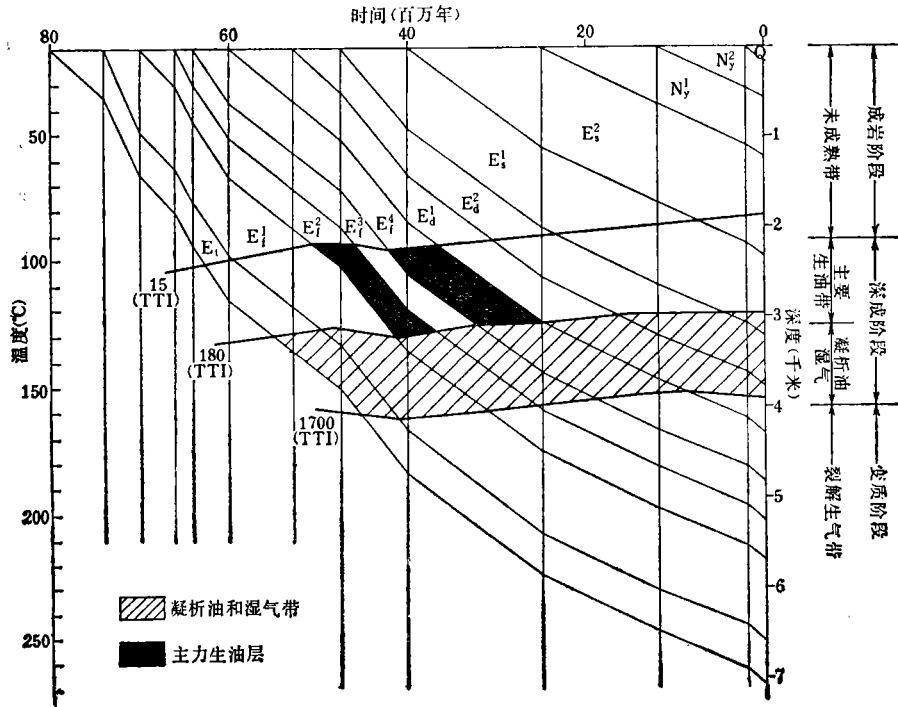


图2 高邮凹陷第三系埋藏史剖面与时-温指数等值线图（凡川地区）

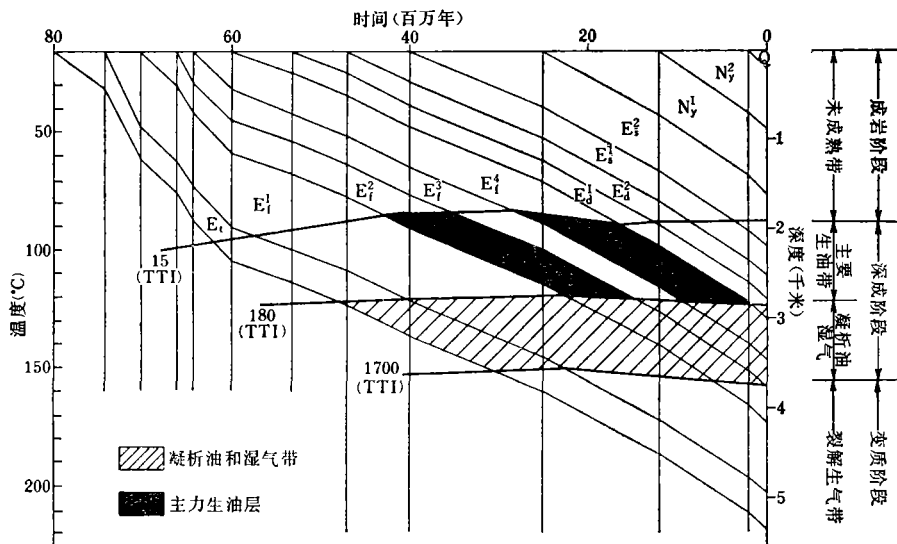


图3 溱潼凹陷第三系埋藏史剖面与时-温指数等值线图（储家楼）

第三步：从图1、2、3算出每个温度间隔内沉积物沉积所需的时间（以百万年为单位），即算出 ΔT 。

第四步：用公式 $\Delta TTI_i = (\Delta T_i) \cdot (\gamma_i)^n$ 算出每个温度间隔内的成熟效应，由于有机物的成熟效应是累积的，因此将各个间隔的成熟效应（ ΔTTI 值）累加起来，即得总的TTI值。

三、基准温度间隔的选择和油气形成阶段TTI门限值的确定

1. 选择基准温度间隔的依据

计算时首先遇到的是对基准温度间隔的选择，从公式 $TTI = \sum_{n=\min}^{n=\max} (\Delta T_n) \cdot (\gamma^n)$ 可看出，温度每升高或降低 $10^\circ C$ ，反应速度就增加或降低一倍，即乘2或除以2，因温度是以 $10^\circ C$ 为间隔来划分的，所以任选某一温度间隔作为基准时，即将该间隔的温度系数 γ 值作为1（ $n=0$ ），那末反应速度就是基准速度的 2^n 倍或 2^{-n} 倍，因 $\gamma = \gamma^n$ ，（ $\gamma = 2$ ），所以温度对反应速度的影响，就在指数 n 值上反映出来。由于 n 值的大小直接影响所求的TTI值，因此选择符合当地实际的基准温度间隔就成为计算的关键，本文选用 $70\sim 80^\circ C$ 的温度间隔作为基准，其依据如下：

根据B.P.蒂索等的干酪根热降解生油理论，将干酪根演化阶段划分为三个连续阶段^[5]，即成岩阶段、深成阶段和变质阶段，并将干酪根划分成三种不同类型（即I型、II型和III型），从定性方面看，即由H/C和O/C原子比的变化来看，I型、II型、III型干酪根的演化趋势相同（图4）。但从定量方面看：这三种干酪根在埋藏时间基本相同条件下，开始生油的门限温度是不同的（即开始进入深成阶段的起点温度是不同的）。从图5可看出II型干酪根在 $60^\circ C$ 时开始进入主要生油带（深成阶段），III型干酪根在 $60\sim 90^\circ C$ 开始进入主要生油带， $100\sim 135^\circ C$ 开始进入裂解生气带，而I型干酪根生油和生气都最迟，于 $100^\circ C$ 始进入主要生油带， $150^\circ C$ 始进入裂解生气带^[5]。

不同温度间隔的温度系数表 表 2

温度间隔 ($^\circ C$)	指数 n	温度系数 γ
⋮	⋮	⋮
50~60	-2	2^{-2}
60~70	-1	2^{-1}
70~80	0	1
80~90	1	2^1
90~100	2	2^2
100~110	3	2^3
⋮	⋮	⋮

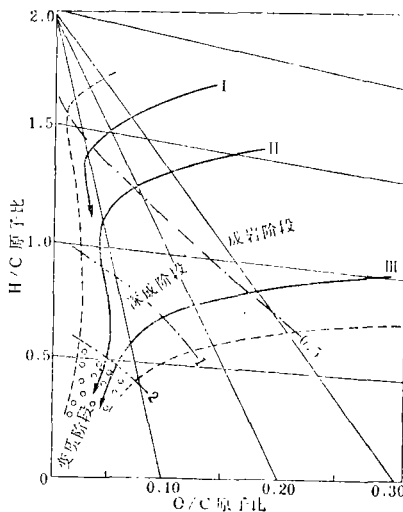


图4.干酪根演化简图
(根B.P.索蒂等, 1978.)

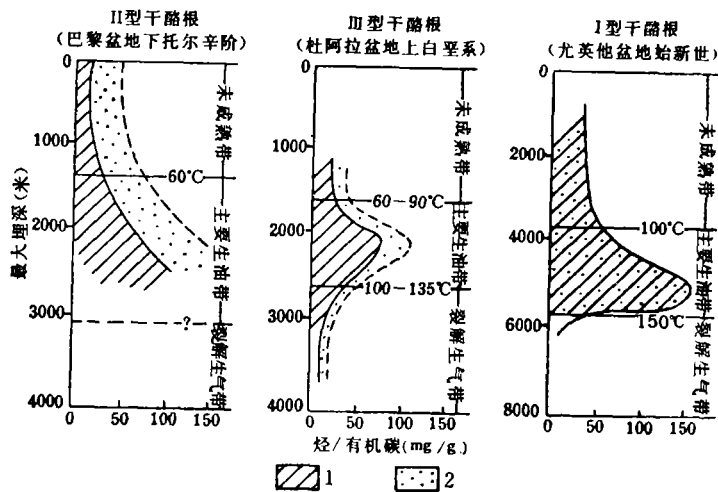


图5 不同类型干酪根埋藏效应与烃类和非烃类形成关系图

(据B.P.蒂索等, 1978)

1. 烃类 2. 非烃类

由上述可见, 干酪根在生油过程中, 只有在进入深成阶段后, 即进入生油门限温度以后, 温度和时间的综合效应才对生油过程(热降解过程)有明显的反映, 但不同类型的干酪根进入主要生油带的温度是不同的, 因此, 在选择基准温度间隔时, 应当考虑生油岩的母质类型及生油岩的成熟程度(即必须考虑该类型生油岩的生油门限温度)。为此, 作者考虑了东台坳陷生油岩的母质类型及生油岩进入深成阶段的起点温度作为本文计算时的基准温度间隔。东台坳陷生油岩的母质类型经元素分析、电镜扫描鉴定和热谱分析, 按层位来分: 其中一半属Ⅲ型干酪根, 另一半为Ⅱ型干酪根¹⁾, 参照上述B.P.蒂索所确定的Ⅲ型和Ⅱ型干酪根开始生油的温度范围为60—90°C取其中值, 将70—80°C为计算的基准温度间隔较为适宜。

2. 油气形成阶段时-温指数门限值的确定

(1) 用实测资料确定时-温指数

根据实测有关地化分析资料可确定东台坳陷的金湖、高邮、溱潼三凹陷的开始生油温度和开始进入裂解生气带的温度^[1]。再由选定的基准温度间隔, 推算出相应的TTI值(详见表3)。

另从主要生油带的下限温度来看, 高邮凹陷的下限温度为115-120°C^[1], 溱潼凹陷为136°C^[1], 取其二凹陷的平均温度125°C, 相应的TTI值高邮凹陷为181、溱潼凹陷为184。

(2) 根据康南公式用计算法确定时-温指数

1) 郭迪孝、费富安等, 苏北高邮凹陷下第三系生油量计算报告, 1980, 12。

用康南公式计算出东台拗陷内金湖、高邮、溱潼三凹陷阜宁组二、四段二主力生油层的开始生油的温度⁽¹⁾，再按这些温度算出相应的开始生油的TTI值（详见表4）。

东台拗陷油气生成的温度和时—温指数表 表 3

凹陷名称	开始生油温度(°C)	开始生油TTI值	开始裂解生气温度(°C)	开始裂解生气TTI值	
金湖	86.6	20.5	150—160	?	?
高邮	93.8	15	150—160	1397—2933	2165(平均)
溱潼	90.6	15	150—160	1031—1799	1415(平均)

东台拗陷主力生油层开始生油的温度和指数表 表 4

层位 凹陷	E _f ² 开始生油		E _f ⁴ 开始生油	
	温度(°C)	TTI值	温度(°C)	TTI值
金湖	88.26	22	89.96	21
高邮	88.26	11	89.96	11
溱潼	88.26	20	89.96	20

(3) 根据实测镜煤反射率(R_o)确定时—温指数

据有关实验指出,不同类型干酪根进入不同油气生成阶段的R_o值大致接近,对Ⅱ型和Ⅲ型干酪根来说,R_o小于0.6%为成岩阶段,即生油岩处于不成熟阶段,R_o等于或大于0.6%为进入生油阶段,而0.6%<R_o<1.3%为深成阶段(前期)即为主要生油带,也即油窗范围,其中R_o约等于0.9%时为生油高峰,R_o在1.3—2.0%范围内为深成阶段(后期),生成凝析油和湿气,R_o>2%则进入变质阶段即裂解生气带^[6]。今将东台拗陷样品的实测R_o值¹⁾和深度列于表6中。

由表6可看出:三凹陷生油带深度范围内的样品实测R_o值与B.P.蒂索提出的R_o值基本相符,实测R_o值都小于2%。另从高邮凹陷生油带深度范围内较系统采集的样品实测R_o值来看,开始生油的深度亦在2200米左右,而开始进入裂解生气带的深度在4200米左右,由此推算出的TTI值亦介于15和2165之间。

综上所述,东台拗陷油气形成阶段的TTI值可归纳如下(见表7):

1)地质部石油地质中心实验室测定。

不同类型干酪根主要油气形成阶段与R_o值关系表 表 5

镜煤反射率 (%)	干酪根类型		
	I	II	III
0	未成熟带	未成熟带	未成熟带
0.5		石油	石油
1.0	石油		石油
1.5		凝析油和湿气带	
2.0		干气带	
2.5			

(据B.P.蒂索等, 1978)

东台坳陷不同深度镜煤反射率表

表 6

金湖凹陷(D70, D53, S138)		高邮凹陷(S128, S136)		溱潼凹陷(S124, S140)	
深度(米)	Ro(%)	深度(米)	Ro(%)	深度(米)	Ro(%)
2144	0.78	2334	0.63	2501	0.97
2154	0.57	2385	0.68	2504	0.42
2446	0.77	2502	0.77	2613	0.94
2522	1.26	2504	0.75	2641	0.52
		2674	0.75	2697	0.94
		2707	0.82	2883	0.79
		3143	0.94	3090	0.79
		3374	1.06	3244	1.03
		3529	0.94	3347	1.15
		3555	0.99		
		3671	1.04		
		3710	1.03		
		3775	1.12		
		3874	1.14		
		3944	1.16		

东台坳陷油气形成TTI值表

表 7

温度系数值 γ	TTI值	油 气 形 成 阶 段
1	<15	↑ 未成熟带 成岩阶段
	15	↓ 开始生油
32	180	↑ 主要生油带
		↓ 深成阶段
256	1700	↑ 凝析油 湿 气 带
	>1700	↓ 裂解生气带 变质阶段

四、TTI值计算结果探讨

按上述油气形成阶段的TTI值, 以及图1、2、3可得出:

1. 同一油气形成阶段可按温度划分不同油气形成期

金湖、高邮、溱潼三凹陷阜宁组二、四段主力生油层, 成熟阶段的温度是在90—150°C之间。其开始生油的温度为80—90°C, 到100—110°C进入生油高峰, 至120—130°C时进入生油后期。因此油气形成阶段的门限温度值可划分如下: 从80—90°C开始到120—130°C为主要生油带; 从120—130°C开始到150—160°C内为凝析油和湿气带下限; 大于160°C进入热裂解生气阶段。

2. 沉积构造史不同, 其生油时间有先有后

东台拗陷各凹陷的沉积构造史不同, 其开始生油时间的先后也不同(表8), 高邮凹陷最早, 其次是溱潼凹陷, 最晚为金湖凹陷。同时从埋藏史剖面图(图1、2、3)上可看出, 高邮凹陷各层的埋藏史线最陡, 溱潼凹陷次之, 金湖凹陷最平缓。曲线的陡、缓反映了沉积、沉降, 埋藏速度和地温升温的快、慢。看来高邮凹陷最快, 溱潼凹陷次之, 金湖凹陷最慢, 因此高邮凹陷最先进入成熟期。

各 凹 陷 生 油 时 间 表

表 8

凹 陷 名 称	成熟阶段时间 (百万年)	E f ⁴ (百万年)			E f ⁴ (百万年)		
		开始生油	生油后期	凝析油气下限	开始生油	生油后期	凝析油气下限
高 邮		45.5	37	25.5	36	19.5	9.0
溱 潼		35.5	15.5	1	16.5	2	?
金 湖		28	2	?	15	?	?

另外从凝析油、湿气带转入裂解生气带的时间先后来看, 成熟开始早的, 结束得也早, 如高邮凹陷最先进入成熟期, 因此它最早结束生油而进入热裂解生气阶段。

3. 沉积构造史不同, 其开始生油深度也不相同

由表9可看出开始生油的深度以高邮凹陷最深, 溱潼凹陷次之, 金湖凹陷最浅。凝析油和湿气下限的深度同样是高邮凹陷最深, 溱潼凹陷次之, 金湖凹陷最浅。同样各主力生油岩的生油下限和凝析油、湿气下限的深度亦有类似情况, 以高邮深度最大, 金湖最浅。这与石油普查勘探的实际情况基本符合。例如在溱潼凹陷苏太111井中4409—4411米的气显示, 经分析甲烷为99.1%、乙烷为0.29%、丙烷为0.019%、异丁烷为0.0046%、

东台拗陷主要生油岩成熟深度表 表 9

拗陷名称	成熟阶段的深度(米)	Ef ³			Ef ⁴		
		开始生油	生油后期	凝湿析油气下限	开始生油	生油后期	凝湿析油气下限
高邮		2150	3150	4050	2200	3100	3900
溱潼		1800	2800	3750	1950	2900	?
金湖		1700	2500	?	1650	?	?

正丁烷为0.0034%，即属于干气。

4. 圈闭形成时间与生油时间的配置

从苏北区域地质分析，东台拗陷在新生代曾先后有过两次构造运动，即吴堡运动和三垛运动。吴堡运动使阜宁组及其以前层组发育有众多的断层和轻微褶皱，但形成完整的、良好的局部圈闭构造甚少，三垛运动进一步发育和完善了吴堡运动所产生各种类型的圈闭。苏北拗陷局部构造的形成主要是三垛期¹⁾。据分析，形成圈闭的时间是在60—250万年期间。将该时期中的储集层与上述生油时间相比较可看出：其中以高邮拗陷二者配置较好，即一面生油、排油，一面油气被圈闭捕集起来。溱潼拗陷次之，金湖拗陷较差。目前实际勘探结果也证实高邮拗陷内储量和产量最大，并在戴南组和三垛组中获得高产；溱潼拗陷内储量和产量次之，并且三垛组已明显变差，金湖拗陷内储量和产量最少，并且戴南组已变差而三垛组已不产油了。

五、讨 论

1. 如何选择基准温度间隔

煤和石油都是干酪根演化产物，干酪根是一种缩聚物，它在埋藏较浅、低温低压环境下，其性质相对稳定，而当沉积作用和下沉作用增加时，干酪根就受到逐渐增加的温度和压力影响而发生变化^[5]。H.B. 劳普汀和B.P. 蒂索等都认为煤化作用和油化作用是有有机沉积物在达到一定温度后，在以温度起主导作用的条件下所发生的热降解反应，这两种反应既都符合化学动力一级反应规律，都可用阿累纽斯方程式来表示。因而，在研究煤化作用和油化作用时都可用时—温指数，但由于干酪根类型的不同及开始进入热解反应的起点温度不同，所以计算时对基准温度间隔的选择上应有差别，不是一个固定值，应根据干酪根类型及成熟门限温度来选定。

因此，本文根据区内干酪根类型及成熟度和有关地化资料，用康南公式计算的数据，选择70—80°C为基准温度间隔，算出了东台拗陷油气形成各阶段的TTI门限值。它反映了有机物成熟度的温度、时间综合效应，与普查勘探所得结果较为一致。实践证明

1)曹昆云、崔志城，苏北拗陷区新生代局部构造展布规律及其与油气的关系。六物技术通讯，1980年第3期。

明,在计算TTI值时既要考虑盆地的生油母质类型和生油岩的成熟度,又要结合生油岩的具体演化情况来确定其基准温度间隔。假如在一个勘探程度很低的盆地中要计算TTI值,可先与邻近勘探程度较高的同类型盆地进行比较,再确定基准温度间隔才能得出比较客观的结果。

2. TTI值所适用的油气演化阶段

在计算TTI值的过程中,未成熟阶段和进入热裂解生气带的TTI值的数据不是很小,就是很大。说明TTI值有一定的适用温度范围,即从开始生油到液体原油完全破坏(液窗或石油窗)前的温度范围可以适用,一般认为65—150°C^[7],也有人认为60—177°C^[8]。而在成岩阶段和变质阶段都不适用。

3. 影响TTI值精度的其他理化因素

从地质构造来看,TTI值精度取决于复原理藏史资料的可靠程度,一般来说稳定连续沉积的地层,其复原的地质埋藏史较可靠。然而对沉积史复杂的地层来说,这种复原的地质埋藏史可靠性就差,所求出的TTI值就相对较差,因此应首先重视区内的沉积构造史研究。

其次,也应重视地层动力变动的影响^[6]:动力能可转化成摩擦热,导致温度上升。如地层下沉一公里,温度上升约10°C,除有地温梯度因素外,也有摩擦所产生的热能,同样在地层上升过程中,也能产生摩擦所转化的热能,特别在断裂带附近应更为显著。由于热降解生油反应是一个不可逆的化学反应,因此在具体研究集一层组的TTI值时,也应结合具体地质情况考虑这一因素。

生油岩的时—温指数是反映有机质成熟度的另一有效参数,它的方法简单、计算容易,不论勘探程度高低、资料多少均可应用,如能与其它方法相结合,可对生油岩成熟度、储集层油气保存情况以及含油盆地的经济价值作出定量评价,也助于判断出生油岩成熟时间与圈闭形成时间的配置关系。

本文承陈丕济同志审阅,并提供宝贵意见,特此致谢。

(收稿日期 1981年11月23日)

参 考 文 献

[1] 费富安、刘培华,苏北东台拗陷地温与油气的关系,石气与天然气地质,第2卷、第1期,1981年。

[2] Н.В. Лопатин, О Роли Геологического времени в процессах карбонизации каменных углей.

Вестник Московского университета «Геология»

1969, No: 1, с.95—98.

[3] Н.В. Лопатин, Температура и геологическое время как факторы углефикации.

Известия Академии наук СССР Сер.Геол.,

1971, No. 3, C.95—106.

- [4] Douglas, W. Waples, 1980, Time and temperature in petroleum formation, Application of Lopatin's method to petroleum exploration, AAPG, Bull. Vol. 64, No.6, P.916-926.
- [5] B. P. Tissot and D. H. Welte, 1978, "Petroleum formation and occurrence."
- [6] J. Karweil, 1973, "The determination of paleotemperatures from the optical reflectance of coal particles in sediments."
- [7] 付家谟、史继扬, 石油演化理论与实践—I, 石油演化的机理与石油演化的阶段, 地球化学, 第2期, 1975年。
- [8] S. N. 纳赛尔, 根据生油岩的热成熟作用研究烃类的生成, 石油勘探与开发, 1978年增刊。

DISCUSSION ON TIME-TEMPERATURE INDEX FOR LOWER TERTIARY SOURCE ROCKS OF THE DONGTAI DEPRESSION IN NORTH JIANGSU

Fei Fu'an

(Headquarters for Petroleum Exploration of Jiangsu,)

Abstract

In this paper, the Time-Temperature Index (TTI value) is applied to evaluating the maturity, temperature, time and depth of the main source rocks in the three subdepressions (Jinhu, Gaoyou and Qintong) within the Dongtai Depression of North Jiangsu. It is inferred that in this area, the temperature at which oil began to generate was 80°C-90°C, the corresponding depth was about 2000 m; the temperature at which oil began to crack and generate gas was 150°C—160°C, the corresponding depth was about 4000 m.

In calculating the TTI value, taking the measured maturity as a parameter, the base temperatures were set at 70°C—80°C. The threshold temperature and the corresponding depth for oil-generating calculated from the TTI value are coincident with the measured

values and with those values obtained by applying Connan's formula as well. This shows that it is necessary for us to take into account the type and maturity of the source rock while calculating the TTI value, and to set the base temperature in the light of specific geological condition and geochemical parameter.

The TTI value is applicable to determining the stage of catagenesis in the evolution of kerogen, including the main zone for oil-generation and the zone for condensate and wet gas generation.

In petroleum exploration, by combining the TTI value with other quantitative approaches, we can get a much more reliable quantitative evaluation of a petroliferous basin.

新 书 介 绍

《中国中生代盆地构造和演化》是朱夏教授主编的由科学出版社出版的《石油地质学基础理论丛书》的第一本，即将和读者见面了。

本书主要收集了近年来有关我国中生代盆地地质、地球物理方面的较新研究成果共27篇约27万字，并附图表160余幅。该书基本反映了八十年代初期对我国不同地区，不同性质，不同类型中生代盆地构造和演化的现有认识，它为我国今后盆地总体研究迈开了可喜的一步。

中国中生代盆地有其独特的风格，本书对中国中生代盆地在什么基础上，什么条件下，以什么方式形成、发育的问题上；以及它们和更早世代的盆地在演化历史上有那些继承、发展和改造关系？从新全球构造角度提出了不同的见解。

本书将对中国为数众多，幅员广大，类型各异，结构复杂的盆地的深入探讨；为新一轮油气资源和其他矿产的普查和勘探提供理论线索；同时它必将为今后十年（1980—1990年）大陆盆地演化的研究作出贡献。