

# 滇西腾冲盆地中晚更新世泥炭 向软褐煤的转化特征及异常煤化作用

秦勇

金奎励

(中国矿业大学地质系)

(中国矿业大学北京研究生部)

**提要** 腾冲盆地中更新世褐煤形成于距今约60万年,晚更新世泥炭形成于距今7500—10000年之间,其中部分已转变成成为软褐煤。该地褐煤的成煤时代之新和煤化速度之快是罕见的,实属异常煤化作用现象。为此,作者从煤岩学和有机地球化学角度研究了这一典型实例。研究表明,在该盆地从泥炭向褐煤转化的早期煤化过程之中,样品的显微光学性质、化学成分和化学结构的演化极富规律性。根据这些演化特征,作者将腾冲盆地从泥炭到软褐煤的早期煤化过程划分成三个阶段:即软泥炭、硬泥炭和软褐煤阶段。该地异常煤化现象是由异常的煤化作用因素引起的,除了由地史中剧烈火山活动带来的异常地热流之外,强烈频繁的地震构造运动也是该地煤化作用异常的一个重要原因。由此作者提出了“异常煤化作用”的概念。

**主题词** 中晚更新世 泥炭 软褐煤 早期煤化作用 异常煤化作用

**第一作者简介** 秦勇 男 32岁 讲师 煤岩学及煤的地球化学

在泥炭向褐煤转化的早期煤化作用方面,前人已做了大量的工作 (Teichmüller, 1968, 1969, Koch, 1969; Ting, 1977; Stout, 1987; Orem, 1987)。尽管在这方面的工  
作已取得了很大的进展,但对以下两方面的问题一直无统一而明确的认识:(1)早期煤化作用阶段(特别是由泥炭向褐煤过渡的阶段)的可分性和再分性;(2)这些阶段的划分指标或识别标志。鉴于此,作者从岩石学和有机地球化学角度对滇西腾冲盆地样品进行了研究,重点在泥炭向褐煤转化作用的特征及机理等方面进行了探讨。

## 地质背景

腾冲盆地为一轴向近似SN向的狭长山间盆地,面积约35km<sup>2</sup>。盆地基底为燕山期花岗岩,四周被第四纪火山岩所围绕。盆地盖层为第四纪松散或半固结沉积物及火山熔岩,它们构成了腾冲盆地的含火山岩陆源碎屑型含(泥炭)煤建造,形成于距今一百万年至一万年之间(梁卓成,1985;其它未发表的资料)。

含(泥炭)煤建造可划分为上下两个大的旋回,每一旋回均从底部的火山岩及粗碎屑岩起始,经中部的细碎屑岩和硅藻土沉积至上部的含泥炭褐煤沉积。其中下旋回含褐煤一层,仅发育于盆地南区,埋深约170余米,形成于60万年B.P.左右,上旋回中的泥炭层基本全区发育,埋深0—30余米左右,根据<sup>14</sup>C和铀系法则定结果<sup>①</sup>,可知它们形成于7.5—1.0万年B.P.之间,其中部分已转变成软褐煤。

<sup>①</sup> 铀系法年龄数据由中科院地质所夏明和张承惠测定,<sup>14</sup>C数据由中科院贵阳地化所魏克勤等测定。

腾冲地区地处欧亚大陆板块与印度板块的过渡地段 (黄汲清等, 1984; 李春昱等, 1983), 该区的地热异常显著, 第四纪火山活动剧烈, 地震构造运动频繁<sup>①</sup>。这些特异的地质特征与本区所处的特殊大地构造部位密切相关, 并由此而引起了第四纪泥炭向褐煤转化的异常煤化现象。

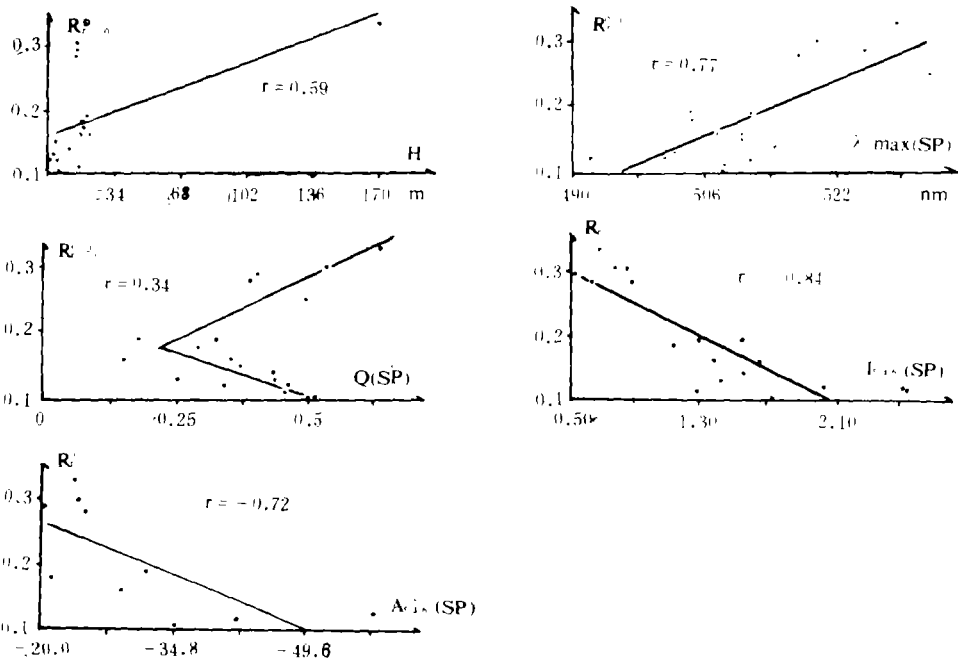
### 煤化作用特征

研究表明, 腾冲盆地从泥炭向褐煤转化过程中, 物理化学性质的演变极富规律, 同时各物理化学参数互为相关, 某一物理性质上的变化往往是多种化学变化的综合反映。

#### 物理性质

主要表现为从盆地边缘向盆地中心及随埋深的加大, 样品宏观和微观上压实程度的明显增强, 具光泽的“镜煤”线理的出现, 充分分解腐木质体油浸随机反射率  $R_r^0\%$  和小孢粉体紫外荧光波谱最大波峰处波长  $\lambda_{max}$  的增高、红绿商  $Q$  随  $R_r^0\%$  的先减小后增大的规律性变化, 显微组分荧光强度  $I$  的减小及荧光强度变化  $A_I$  的规律性降低 (图 1)。

应该注意的是,  $Q$  在  $R_r^0=0.18-0.22\%$  区间处的转折及  $\lambda_{max}$ 、 $I$  和  $A_I$  在  $R_r^0=0.26$  前后变化速度的明显不同反映了样品中有机质地球化学特征 (下述) 的相对突变, 是煤化作用阶



$I_{546} (sp)$  和  $A_{546} (sp)$  分别代表在蓝光激发条件下波长 546nm 处小孢子体的荧光强度和辐射 15 分钟时的荧光强度变化,  $H$  为样品埋藏深度。

图 1 荧光显微镜光度术参数与反射率的相关关系图

Fig.1 Correlation between the parameters of the flourescence microphotometry and the reflectance

<sup>①</sup>北京大学地质地理系腾冲地热组, 1974, 云南省腾冲地区地热资源考察报告, 内部资料。

段性的外在表现。此外,当  $R_r^0 < 0.16\%$  时,小孢粉体的荧光强度通常也大于同一样品中木质结构体 A 的相对荧光强度;当  $R_r^0 > 0.16\%$  时,则反之。这种现象表明,即使在埋藏泥炭阶段也同样存在着有机质演化的阶段性,这与 M.Teichmüller (1969) 观察到的现象相一致。

### 化学成分及化学结构

煤质分析表明:随煤化程度加深,样品中 H/C 原子比降低,而发热量与挥发分之比  $Q_{Dr}^0/V^0$  (张伟才, 1984) 和芳碳率 fa 值 (Gerstein, 1982) 升高。

有机组分系统分析表明:煤化程度增高,纤维素含量 (Insol.%) 递减,总腐殖酸含量 ( $H_{zm}\%$ ) 和黄腐酸转化率〔黄腐酸 (wt%) / 黑棕腐酸 (wt%)〕  $H_{my}/H_{mb}$  递增。

岩石热解色谱分析 (鄂立言, 1986) 表明:  $R_r^0$  增大,最高峰温  $T_{max}$  稳定且迅速地增高,而裂解烃产率  $S_2$ 、游离烃产率  $S_1$  却呈递减的趋势,并且由此而引起  $S_2/S_1$  规律性增高 (表 1)。

岩石热解气相色谱 (Py-GC) 分析表明:随  $R_r^0$  增高,裂解烃中甲烷与乙、丙、丁烷之和的比值  $CH_4/nC_{2-4}$ ,双环芳烃的产率和游离烃中的芳烃/杂原子化合物比值具加大的趋势。而裂解烃中碳优势指数 CPI 及单环芳烃产率却具减小的趋势 (表 2)。但应指出,此处的 CPI 与抽提物的 CPI 在计算方法上有所不同 (Caffee, 1981)。

傅立叶转换红外吸收光谱 (FTIR) 研究表明:随样品的  $R_r^0$  加大,代表饱和烃中  $CH_3$ 、 $CH_2$  和杂原子基因的相对吸收强度变小,而代表芳烃结构类型中 CH 面外振动和

表 1 岩石热解分析成果表

Table 1 Results of the Rock Eval analysis

样品	$R_r^0$	$T_{max}$ ( $^{\circ}C$ )	$S_1$ (mg/gCorg)	$S_2$ (mg/gCorg)	$S_2/S_1$
表 1					
115	0.12	386	73.1	176.6	2.4
1114	0.13	397	33.5	107.0	3.2
1168	0.12	396	61.4	134.4	2.2
1314	0.16	396	63.3	96.6	1.5
1-5 (1)	0.19	408	26.7	86.4	3.2
1-5 (2)	0.28	412	27.4	109.7	3.1
1-15	0.29	416	21.8	116.3	5.3
1-15-1	0.33	425	8.6	53.2	6.2
(煤化树皮)	0.33	420	7.7	71.2	9.2

表 3 顺磁共振分析成果表

Table 3 Results of ESR analysis

样号	$R_r^0$ (%)	$N_g$ ( $10^{17}$ spins / g)	g
115	0.13	2.77	2.0035
14	0.12	4.16	2.0025
1168	0.16	2.60	2.0028
1314	0.19	4.19	2.0027
1-5 (1)	0.28	5.89	2.0026
1-5 (2)	0.29	0.29	2.0026
1-15	0.33	0.33	2.0027

表 2 热解气相色谱煤化参数解析表

Table 2 Some parameters and data from the pyrolysis-gas chromatography with reflectance ( $R_r$ )

样号	$R_r^0$ (%)	$T_{max}$ ( $^{\circ}C$ )	$S_2$ 产物 (300~500 $^{\circ}C$ )				$S_2$ 产物			$S_1$ 产物 (<300 $^{\circ}C$ )		
			$CH_4/nC_{2-4}$	CPI	单环芳烃	双环芳烃	三环芳烃	单环芳/双环芳	芳烃	杂原子化合物	芳/杂	
115	0.15	397	0.01	1.22	82.22	1.46	1.15	41.95	67.28	23.97	2.81	
1114	0.12	396	0.02	1.13	95.34	1.55	1.12	61.51	64.57	26.59	2.43	
1-5	0.29	412	0.49	1.15	89.63	2.29	0.06	39.14	69.18	22.11	3.13	
1-15	0.33	425	1.07	0.91	69.60	9.75	0.67	7.14	/	/	/	

C=C 伸缩振动的吸收峰相对强度增大, 同时光谱中  $1500-1510^{-1}$  区间的吸收峰从显著变至消失, 使得光谱具有了典型褐煤的特征 (窦迁焕等, 1984); 在比值结构参数上则表现为甲基/亚甲基值增高。

电子顺磁共振 (ESR) 波谱分析表明: 随样品  $R_f^0$  的增高, 与样品受热历史有关的自由基浓度  $N_g$  值 (Rrecosky, 1982) 稳定规律且迅速地增大, 而与 O、S 等杂原子含量有关的  $g$  值则有减小的趋势 (表 3)。

### 早期煤化作用阶段的划分

前已述及, 腾冲系列样品中的物理化学性质具两次相对突变, 据此将早期煤化过程划分为软泥炭、硬泥炭和软褐煤三个煤化阶段 (表 4)。同时, 经相关分析和筛选对比, 将  $R_f^0$ 、 $\lambda_{\max}$  和  $T_{\max}$  作为主要的煤化参数。此外, 荧光参数  $Q$  及  $A_{546}^{15, 50}$  也是极有意义和值得进一步深入研究的辅助煤化参数。不仅如此, 三阶段的宏观物理性质也具显著的差异性。

表 4 泥炭软褐煤煤化阶段划分方案

Table 4 Subdivision scheme of the stage of the early coalification from peat to soft brown coal in Tengchong Basin

煤化阶段	主要煤化参数			辅助煤化参数		宏观煤岩标志
	$R_f^0\%$	$T_{\max}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\lambda_{\text{sp max}}$	$A_{546}^{15\text{sp}}$	$Q$	
软泥炭	0.16—0.18	400	↓增大	Ca—30	↓减小 转折	疏松, 易初割, 草本植物残体清晰可辨, 富水。
硬泥炭						暗淡, 固结, 不易切割, 但手指能将其捻成粉末或碎屑, 碎屑不具棱角, 草本杆物体仅依稀可辨。
软褐煤	0.22	410	515		↓增大	暗淡到沥青光泽, 时有“镜煤”线理出现, 较致密坚硬, 仅锤击才能使其粉碎, 碎屑的棱角分明, 基本见不到草本植物残体。
暗褐煤	0.357	?	?	0?	正变化?	

### 异常煤化作用特征及其机理

经与希腊 Drama 盆地 Phillippi 第四纪泥炭剖面 (M. Teichmüller, 1969) 及滇西龙陵县镇安盆地第三纪上新世软褐煤剖面<sup>①</sup>煤化特征进行对比, 总结出腾冲盆地由泥炭向软褐煤转化的如下异常特征。

1. 软泥炭阶段为真正的生物化学煤化作用阶段 (Teichmüller, 1982), 诸特征与正常情况 (phillippi 剖面) 无异。如木质结构体 A 与小孢粉体之荧光强度的倒转 (前已述及); 纤维素的分解 (主要是菌解, 显微镜下可见大量的球菌) 使木质素相对富集 (Teichmülle, 1969), 从而导致了  $C'$  的增高等等。

<sup>①</sup>秦勇, 1986, 滇西腾冲盆地中晚更新世泥炭和软褐煤的岩石学及异常煤化作用研究, 中国矿业学院硕士论文。

2.硬泥炭阶段的分解作用、合成作用、凝胶化作用及压实作用早于 phillippi 剖面，且作用程度要强烈一些，具体表现为在埋藏要浅得多的深度上这些作用就已经开始，使得宏观物理性质、微观物质性质（如纤维含量、凝胶体组分含量、组分排列的密实程度等）及化学性质（如 fa、C<sup>o</sup>）均有一较明显的转变。

3.软褐煤阶段与正常情况的差异更大。在此阶段，腾冲盆地样品在宏观煤岩物理性质、微观煤岩特征及有机质化学结构等方面的变化速率均大（快）于镇安样品，达到的煤化程度超前于镇安样品。若考虑到这两剖面之成煤时代（晚更新世中期与上新世）上的巨大差异，则诸煤化特征演变速率上的差别就会更大。

**煤岩学标志** 腾冲样品（ZK1孔14—170m，R<sub>T</sub><sup>o</sup>0.28—0.33%）普遍可见具沥青光泽的“镜煤”线理，镇安样品仅在埋深250m的样品（R<sub>T</sub><sup>o</sup> = 0.31%）中才有见及。这表明腾冲样品已经历了显著的地球化学凝胶化作用（Teichmüller, 1982）。腾冲样品的孢子体及腐植组的荧光强度弱于镇安相同煤化程度的样品，孢粉体的UV波谱特征相似，但Q稍低。

就R<sub>T</sub><sup>o</sup>来说，腾冲样品一是梯度高，二是超前，达到了镇安样品（埋深>230m）所不具有的0.33%，且埋深（<170m）却要小得多。

**有机质的地球化学特征** 腾冲样品的C<sup>r</sup>、H/C及黄腐酸转化率都要略低一些；γ<sup>r</sup>二者相当；但fa明显高一些。两剖面上相同煤化程度样品的Ng值相当，但考虑到埋深及成煤时代上之差异，则腾冲样品就要高得多了。腾冲样品的芳构化程度较高，具体表现为腾冲样品的fa、E<sub>1375</sub>/E<sub>2920</sub>较高，(E<sub>2920</sub>+E<sub>2860</sub>)/E<sub>3030</sub>、E<sub>720</sub>较低，及E<sub>750</sub>的递增和E<sub>875</sub>的递减等等。样品的化学结构上的非均一性也较大，如E<sub>1790</sub>变化无规律等等，这应归因于时间因素（相对骤变）的影响。

由上述物理、化学及成煤时代上的显著差异可知，腾冲盆地泥炭软褐煤的煤化程度和速度远远超前于正常情况，早期煤化阶段异常煤化作用存在这一事实确凿无疑。

筛选分析表明，腾冲盆地的煤化异常是地史中该区出现过较高的古地温所致。趋势面分析表明，盆地花岗岩基底中的NE向断裂控制了异常地温中心的展布方向，而NE向与NW向两组断

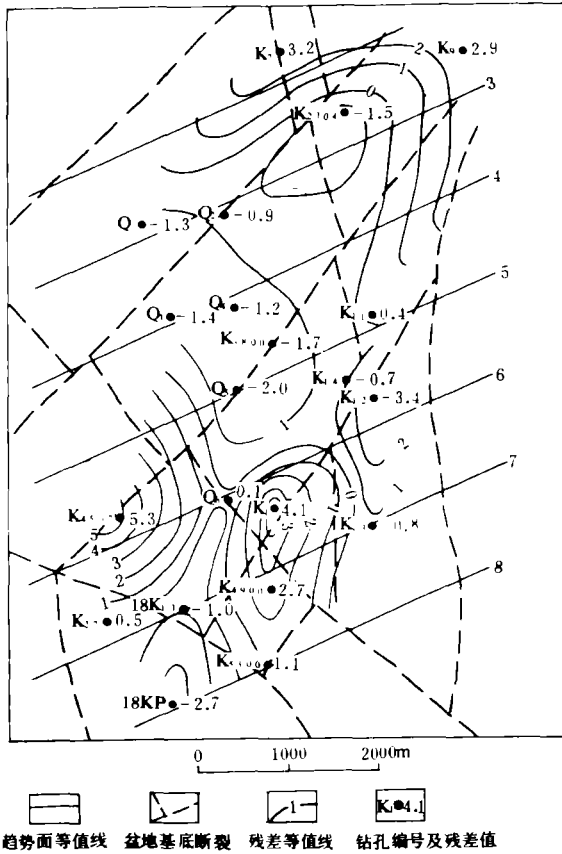


图2 腾冲盆地埋深100米段地温梯度趋势面及残差等值线图

Fig.2 Isogram of the trend surface and its residual values of the paleogeothermal gradient within the burial depth of 100m in Tengchong Basin

裂的交汇处构成了强大热流上导的通道,并由此造成了局部的“高温”异常。腾冲盆地中样品煤化程度最高的ZK1孔正处于这“高温”异常的中心部位附近(图2)。

由区域地质特征(黄汲清等,1984)和盆区地下热水中存在 $\text{CO}_2$ 、F、B、S等岩浆期后挥发成分<sup>①</sup>可知,新构造运动造成的浅部岩浆体之冷凝释放热是异常地温的强大热源。由范嗣昆(1982)、梁卓成(1985)、云南地矿局地热队及自送样品的K-Ar、 $^{14}\text{C}$ 和铀系法数据知道,在腾冲盆地及其周围在距今0.55、0.39、0.08—0.12百万年以及距今0.007—0.04百万年均具有剧烈的火山喷发活动,而腾冲泥炭堆积于距今60万年及7.5—0.1万年,即剧烈火山活动带来的热力对泥炭褐煤层的作用与成煤期同时发生或滞后于成煤期。 $E_{749}$ 、 $E_{875}$ (Shih等,1971)、Ng的演变规律及盆地周缘和钻孔中存在的水热蚀变(高岭土化,碳酸盐化,绿泥石化,绢云母化和硅化)现象从古温标上表明了成煤期中及成煤期后的地史中曾有过较高的异常古地温场的存在。

以上分析表明,腾冲盆地样品物化性质的显著演化及化学结构上的不均一性正是强大地热流所引起的相对迅速的地球化学煤化作用之结果。

腾冲盆地软褐煤(特别是浅部样品)的一个重要物理特征即是宏观和微观上的相对高度压实。考察腾冲盆地及区域地质史,则上覆地层的静压力、构造运动造成的侧向或层间滑动等应力及等四纪冰川作用等因素均可排除,因此只能注目于其它因素了。

前已述及,本区处于两个板块拼合的过渡地带,新构造运动剧烈,不但地热异常显著,而且地震构造运动也十分频繁强烈。据北京大学地质系及腾冲县地震办公室统计,自1502年到1974年,腾冲地区5级以上地震有71次,最大震级6.5级;从1965年到1981年发生于龙川江到大盈江之产(腾冲盆地位于此带内)3—7级地震765次,尤其重要的是,自1512年到1976年腾冲盆地共发生5级以上地震7次,震中全部位于样品“压实”程度和煤化程度最高的盆地南区。如果结合本区新构造运动史,考虑到公元1500年以前到成煤期之间这段漫长地史时期内可能发生过的地震构造运动,则数目就更加可观。

苏联学者特罗菲穆克(1983)根据某些事实及实验结果认为,地震波对原始有机质转化成石油或煤起了催化作用,地震构造作用造成的岩石矿物颗粒的交变弹性变形作用使有机质的不溶部分中碳含量增高,氢含量降低含氧官能基和脂肪基丧失,芳香结绝的比例增大,从而导致了有机质的成熟演化程度增高。地震波产生的能量用于煤及石油的生成反应上,只要20—30℃的温度和很小的压力条件,反应就能够进行。这种地质上的瞬时作用使地质体中有机质的转化过程加快了好几倍。

因此,可推测腾冲盆地的异常煤化作用与盆区及周缘晚更新世以来强烈经常的地震构造运动有着密切的关系。一方面其产生的冲击波频繁地压缩泥炭褐煤层,使得浅部样品即具有了正常情况下在较深部位才能达到的压实程度;另一方面也可能促使了有机质的化学结构在低于常规所需温度的情况下向更高的演化程度发展,即促进了煤化作用的进行。

基于以上的事实及分析,笔者提出了“异常煤化作用”的概念。通过以上叙述可以知道,完整的“异常煤化作用”概念包括以下两个方面:(1)煤化程度和煤化速度异常;(2)煤化作用因素异常。具体到腾冲盆地来说,就是在强大的异常地热流之上又叠加了强烈频繁的地震构造运动。

<sup>①</sup>资料来源于云南省地矿局第二水文地质工程地质大队。

本论文写作过程中曾得到曹作华同志, 韩德馨教授、任德贻副教授、毛鹤龄高工、郭子光老师、佟伟教授、张爱云教授及龙金茂工程师和杨伟同志的帮助, 对此作者表示衷心的感谢。

收稿日期 1987年1月26日

### 参 考 文 献

- (1) 李春昱, 汤耀庆, 1983, 地质学报, 第 57 卷, 第 1 期, 1—1 页。
- (2) 黄汲青等, 1984, 地质学报, 第 58 卷, 第 1 期, 1—17 页。
- (3) 梁卓成等, 1985, 地球化学, 1985 年, 第 3 期, 227—235 页。
- (4) 张伟才, 1984, 煤炭学报, 1984 年, 第 2 期, 89—99 页。
- (5) 邱立言等编著, 1986, 《生油岩热解快速定量评价》, 科学出版社。
- (6) 特罗非穆克, A.A. 等, 1984, 地质科技动态, 1984 年, 第 12 期, 1—8 页。
- (7) 宴迁焕等, 1984, 地理科学, 第 4 卷, 第 1 期, 12—20 页。
- (8) Catter A.L. *et al.*, 1983, *Fuel*, Vol.62, pp.303—309.
- (9) Gerstein B.C. *et al.*, 1982, *Aromaticity in coal*. In: Robert Press, New York, London, 1982, p.340
- (10) Koch J., 1969, *Geol.Mitt.Jahrgang 9*, s.113—150.
- (11) Orem W.H. *et al.*, 1987, *Int. J. Coal Geol.*, Vol.8, p.33—54.
- (12) Retcofsky H. L., 1981, *Magnetic tesonance studies of coal*. In: Martin L. G., *et al.* (editors), *Coal Science*, Vol.1, pp.43—83, Academic Press, New York, London.
- (13) Shih J. W. *et al.*, 1971, *Fuel*, Vol.51, p.153—155.
- (14) Stout S. A. *et al.*, 1987, *Int. J. Coal Geol.*, Vol.8, p.55—68.
- (15) Teichmuller M., 1968, *Geol.Mitt., Jahrgang 8*, s.65—110.
- (16) Teichmüller M., 1982, *Fundamentals of coal petrology and origin of the petrographic constituents of coal*. In: Stach E. *et al.* (editors), *Stachs Textbook of Coal Petrology*, p.5—294, Gebruder Borntraeget, Berlin, Stuttgart.
- (17) Ting F. J. C., 1977, *Journal of Microscopy*, Vol.109, p.75—83.

# CHARACTERISTICS AND ANOMALOUS COALIFICATION OF THE TRANSFORMATION FROM THE MIDDLE AND LATE PLEISTOCENE PEAT TO SOFT BROWN COAL IN TENGCHONG BASIN

Qin Yong    Jin Kuili

(Geological Department, China University of Mining and Technology)

## Abstract

The Tengchong Basin, located in the Western Yunnan, China, is a long and narrow intermountainous basin and about 35km<sup>2</sup> in area. The middle and late Pleistocene coal (peat) —bearing strata, made up of two terrigenous sedimentary cycles interbedding extrusive rocks, was deposited on the Cretaceous granite base of the basin. Peat of soft brown coal seams occur in the upper section of each cycle. The soft brown coal in the lower cycle was formed about 600,000 B.P. and the peat in the upper about 75,000 to 100,000 B.P., part of which had also been transformed into soft brown coal. Tengchong region lies in the intermediary zone between Euroasia plate and Indian plate, in which there exist the remarkable phenomena of geothermal anomaly, the violent and frequent volcanic activities and the frequent tectonic movements of earthquakes during the Quaternary. These particular geological processes led to the anomalous coalification transforming the Quaternary peat into soft brown coal in Tengchong Basin.

The evidences in both coal petrology and organic geochemistry show that, in the process of the early coalification in the basin, the physical characteristics and the chemical composition and structure of the organic matter evolved in certain regularity. With the burial depth increasing and toward the central part of the basin, the compacted degree of peat or brown coal is strengthened; the random reflectance  $R_r^0$  of eulminites become increasing, ranging from 0.12% of the samples near the ground surface to 0.33% of those at the depth of about 170 meters; the wavelength  $\lambda_{max}$  at the maximum intensity of the fluorescent spectrum under ultraviolet — light irradiation gradually shifts to the longer wavelength, and it should be especially noted that there is a distinct turning point between 0.16%  $R_r^0$  and 0.22%  $R_r^0$ , near which the evolving direction of the red / green quotient  $Q$  of sporinites changes from descending tendency to ascending one with the  $R_r^0$  increasing. As the  $R_r^0$  of eulminites rises, there are the increasing tendencies in the calorific value / humic acid matter ratio, the aromaticity, the fulvic acid / humic acid ratio, the temperature  $T_{max}$  at the maximum rate of generation of cracking compounds, the ratio  $CH_4 / nC_{2-4}$  and the yield of binocycloaromatic hydrocarbon in cracking compounds and the ratio of aromatic hydrocarbon to heteroaromatic compounds in free compounds, the optical densities  $E_{750}$ ,  $E_{800}$ ,  $E_{1600}$  and  $E_{1375} / E_{2920}$  ratio, and the concentration  $N_g$  of the free radicals in the organic matter, but there exist also the decreasing tendency in the H / C atomic ratio, the  $S_1$  implying the yield of free hydrocarbon and the  $S_2$  showing that of cracking compounds, the yield of monocycloaromatic hydrocarbon and the carbon preference index CPI of n — alkane in cracking hydrocarbon as well as  $E_{1375}$ ,  $E_{720}$ ,  $E_{1465}$ ,  $E_{2890}$  and  $E_{1265}$ . Additionally the absorbed peaks with wave number 1500—15110cm<sup>-1</sup> in FTIR spectra change from marking



to almost disappearing with the  $R_r$  rising, and the latter is the typical characteristic of brown coal.

It should be yet pointed out that there is a varying rate of evolution in both geochemical and physical properties. In the burial peat with  $R_r^0$  less than 0.16—0.18% and  $T_{max}$  less than or equal to 400°C, the various geochemical properties developed very slowly and dispersed much. In the soft brown coal with  $R_r^0$  more than 0.22% or so and  $T_{max}$  more than or equal to 410°C, they developed at a relatively greater rate and the dispersion became little. These characteristics display that there are still the distinct substages even in the brief early geochemical coalification from peat to soft brown coal in Tengchong Basin. Basing on these, the authors divide the stage of the early coalification of the basin into three substages, i.e., those of soft peat, hard peat and  $T_{max}$  are used as the principal parameters and the fluorescent parameters  $Q$  and  $A_{345}$ , which are worthy to be further studied, are used as the supplementary those. In addition, there are also the remarkable differences in the macroscopic physical properties amongst the substages.

Through comparing with the Quaternary peat profile in Drama Basin, Greece, and the Pliocene soft brown coal profile in Zhenan Basin, the Western Yunnan, China, the authors generalize the anomalous characteristics of the early coalification in Tengchong Basin: 1) the substage of soft peat is that of normal biogeochemical coalification, in which there is almost no difference between Tengchong Basin and Drama Basin; 2) in the substage of hard peat, there are stronger decomposition, synthetization—condensation polymerization, gelification and compaction in Tengchong Basin than in Drama Basin; 3) in the substage of soft brown coal, there are the greater rate and the higher degree of coalification in Tengchong Basin than in Zhenan Basin. Thus, it can be known that the rate and the degree of the early coalification in Tengchong Basin are much greater than those in the normal cases and the fact that there was anomalous coalification in Tengchong Basin has been undoubted.

The cross places of both NE and NW trend faults in the base, near which the local "high temperature" anomaly occurred, made up the passageways through which the powerful geothermal flows with the highest degree of coalification in the basin lies just in such an anomalous place. There exist some volatile constituents such as  $CO_2$ , F, B and S in the groundwater in the basin, so it could be deduced that the heat given off by the shallow magma bodies be ever the powerful heat source of the anomalous palaeogeothermal field. The anomalous coalification might be also intimately associated with the frequent and violent activities of earthquakes occurred within and around the basin since the late Pleistocene. On the one hand, the impact wave caused by the earthquakes frequently compressed the peat or brown coal seams so that the seams occurred at the lesser depth display the compacted degree that could be reached just at the greater depth in the normal cases, and on the other hand, it might also accelerate the coalification only under the palaeogeothermal temperature much lower than that which would be just needed in the normal coalification. Therefore, the authors suggest the concept "anomalous coalification", which includes the following two aspects: 1) the anomalous rate and degree of coalification; 2) the anomalous factors of coalification. So far as Tengchong Basin goes, the factors are the anomalously powerful palaeo-geothermal flows and the violent and frequent tectonic movements derived from earthquakes.