

东濮凹陷煤系有机质地化特征及生烃演化模式

许化政

(石油工业部中原油田勘探开发研究院)

本文通过对煤系有机质各项资料的分析和研究,系统地阐述了煤系有机质的组成和地化特征,同时通过热模拟实验对煤系有机质的成烃机理也进行了研究。通过研究,作者认为,煤系有机质与生油岩有机质无论是成因上或是原始组成上均有显著差别,同时作者把煤系有机质演化过程划分为未成熟(褐煤以前)、成熟(长焰煤—焦煤)、过成熟(瘦煤—无烟煤)三个阶段。

东濮凹陷天然气资源丰富,同时石炭—二叠纪煤系地层分布广泛,现已探明的五个天然气藏中,煤成气储量占气藏总储量的60%左右。因此开展煤系有机质的地化特征、生气机理、演化机制和时空分布等的研究,将具有重要意义。

一、煤系有机质组成及地化特征

按照有机物的赋存方式,含煤地层中的有机质可分为集中的(煤)和分散的两种类型。由于这两种有机质的物质来源、沉积环境大致相同,在煤化过程中形成煤成气的机理、演化阶段和化学动力学条件也基本一致。

从1982年开始,我们在凹陷范围内采集了大量与石炭—二叠煤系有关的样品,分别进行了有机碳、氯仿抽提、族份分离、热解色谱、芳烃光谱、干酪根元素、煤岩组份和室内模拟生气等分析实验。在上述分析获得大量实际资料的基础上,对含煤地层原始有机质组成、地化特征、生气机理、演化机制和生油气能力进行了综合研究。

(一) 有机质丰度高, 生油能力低

含煤盆地的煤成气远景主要取于含碳物质的数量、原始有机质组成和煤化作用程度。由表1看出,石炭二叠系有机碳含量普遍较高,煤平均为69.8%,炭质泥岩13.14%,暗色泥岩2.62%,不乏生气物质基础。从氯仿抽提物含量看,不同煤阶变化较大,煤从103—17400ppm,炭质泥岩从44—4509ppm,暗色泥岩从79—668ppm。氯仿抽提物含量较高的样品主要取自凹陷北部范县—卫城一带($R^{\circ} = 0.82$),随着变质程度的增高,含量递减。说明煤系原始有机质向液态烃的转化以 $R^{\circ} = 0.82\%$ 左右最为有利。变质程度继续增高,则发生液态抽提物向气态烃的转化。由此推断,本区石炭二叠系有机质向液态烃的转化即生油期主要发生在燕山运动以前,燕山期后新生代沉积过程中,有机质的转化以生成气态烃为主。

表1 石炭二叠系有机质丰度和烃转化系数表

地 层	岩 性	有机碳 (%) ($\frac{\text{值范围}}{\text{平均值}}$)	氯仿 "A" (%)	"A" / C (mg/g)	烃/C (mg/g)
沙河街组	暗色泥岩	1.2	0.14	117	64.4
山 西 组	暗色泥岩	0.61—4.86	0.0079—0.0668	11.9	2.6
		2.36	0.0211		
	炭质泥岩	7.45—23.88		21 (气肥煤)	4.2
		16.60			
	煤	43.54—99.02	1.45—1.74	21 (气肥煤)	4.2
		71.31	1.55 (气肥煤)		
太 原 组	暗色泥岩	0.96—5.20	0.0044—0.1024	15.2	3.3
		2.62	0.0257		
	炭质泥岩	6.12—19.17	0.0113—0.4509	24	5.2
		9.68	0.2311		
	煤	50.83—77.47		24	5.2
		67.52			
本 溪 组	暗色泥岩	1.62—3.97	0.0091—0.0152	12	2.6
		2.89	0.0394		
	煤	61.37—79.59		12	2.6
		70.00			

尽管煤系具很高的氯仿沥青“A”含量,但转化系数(“A”/C、烃/C)都很低。与下第三系生油岩相比,煤系地层每克有机碳生成液态抽提物的能力,只为成熟度相当的生油岩的1/5—1/10。龙古1井气肥煤液态抽提物含量虽高(1.45—1.74%),但转化系数仍低(21毫克/克),而且与煤层对烃类和沥青质的高吸附能力有关。从生油观点看,这是不利的。T.G.鲍威尔(1978)、麦考利夫(1979)、胡德和卡斯塔塔(1974)、杜兰德(1977)、拉德凯(1980)等在研究了世界一些地区陆相地层的生烃能力后认为,只有当有机质的吸附能力被克服时,烃类才可能运移。实验观察到的门限值大约相当于每克有机碳20—30毫克烃。他们实测了世界一些地区石炭二叠系煤的产烃能力,每克有机碳的产烃率经常低于10毫克,很少超过20毫克,由此认为石炭二叠系的煤不是生油层^[1]。东濮凹陷石炭二叠系煤和暗色泥岩每克有机碳的生烃能力只有2.6—5.2毫克,与生油岩的最低标准(20毫克烃/克有机碳)相差甚远,不能成为生油层。

(二) 以沥青质为主的族组份

从表2所测煤系地层氯仿沥青“A”族组份结果可看出下列特点:

1. 饱和烃含量低。煤层饱和烃含量变化在1.65—8.24%之间,平均4.05%;暗色

泥岩5.06—13.94%之间，平均9.62%。

2.芳烃含量相对较高。煤芳烃含量4.94—20.39%，平均15.59%；暗色泥岩4.39—22.19%，平均12.01%，饱和烃/芳香烃 <1 。

3.非烃含量在7.85—25.81%之间，与沙三段生油岩非烃含量大致近似。

4.沥青质含量高。煤在46.67—85.80%之间，平均58.91%；暗色泥岩在50.97—71.95%之间，平均60.48%，沥青质/非烃 >2.5 。

表2 石炭二叠系煤和暗色泥岩与下第三系生油岩族组成对比表

族组份		饱和烃 (%)	芳香烃 (%)	非烃 (%)	沥青质 (%)	饱和烃/ 芳香烃	沥青质/ 非烃	非烃+沥青质 /总烃
石炭二叠系	煤	4.05	15.59	21.43	58.91	0.26	2.75	4.09
	暗色泥岩	9.62	12.01	18.23	60.48	0.53	3.32	3.64
下第三系生油岩		>45	10—17	<30	<10	>4	<0.3	<1

从以上特点看出，煤与暗色泥岩一样，其氯仿沥青“A”组成皆以沥青质含量高为特点。对于沥青质的化学结构，目前研究的不清楚，根据光谱和结构族组成分析资料，是一种以缩合芳核为主的含杂原子较多的高分子化合物。外观为脆性固体粉末，在石油中以胶体溶液形式存在，分子量在1000—6000之间，是可溶有机质中结构最复杂，分子量最大的一部分物质。溶解能力低，运移性能差，很难从泥岩或煤层中释放出来，形成工业性油藏的机率很低。沥青质对热不稳定、加热到300℃以上，就分解为焦炭和气体，在地热演变过程中，是生成甲烷气体的重要来源之一。

(三) 富含高缩合芳烃化合物

从煤系有机质的红外光谱图上可看出下列特征(图1)：

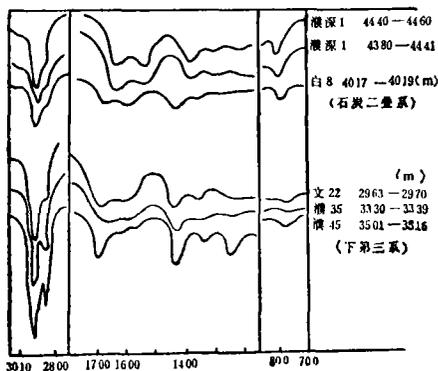


图1 东濮凹陷不同母质类型红外吸收对比图

1.740—880 cm^{-1} 之间的C—H变形振动吸收峰较强，且见有从740 cm^{-1} 到860 cm^{-1} 吸收峰的强烈递减。另外，在3030—3050 cm^{-1} 之间的肩峰，即芳核=CH吸收十分显著，说明芳香结构缩合程度高，取代程度低。

2.反映苯环上共轭C=C体系的1600 cm^{-1} 有较强的吸收，说明具多核结构的芳香族占比重较大。

3.反映长链烷烃结构的720 cm^{-1} 基本没有吸收显示。

4.与—CH₃、—CH₂烃基有关的2920 cm^{-1} 、1460 cm^{-1} 、1380 cm^{-1} 吸收峰相对较弱。

上述特点说明烷基支链短，取代程度低，富芳香结构且缩合程度高是煤系有机质的基本特征。

表3 煤系与下第三系生油岩沥青红外吸收强度对照表

井 号	层 位	岩 性	深 度 (m)	2920cm ⁻¹ /	1460cm ⁻¹ /	1380cm ⁻¹ /	1700cm ⁻¹ /	806cm ⁻¹ /	2920cm ⁻¹ /
				1600cm ⁻¹	1600cm ⁻¹	1600cm ⁻¹	1600cm ⁻¹	2920cm ⁻¹	759cm ⁻¹
濮45	E ₃ ⁴	深灰色 泥 岩	3501— 3516	7.5	2.98	0.8	2.75	/	10.0
濮深1	C—P	灰 色 泥 岩	4380— 4441	1.3	0.58	0.26	1.39	0.25	2.06
濮深1	C—P	灰 色 泥 岩	4440— 4460	2.5	0.70	0.26	1.14	0.18	3.04
白8	C—P	灰黑色 炭质 泥 岩	4017— 4019	1.56	0.64	0.30	0.94	0.20	2.75

表3选择了东濮凹陷濮45井下第三系腐殖-腐泥型生油岩和石炭一二叠煤系样品进行红外吸收强度对比，可以看出二者差别明显。

(四) 生烃潜力大，以成气为主

表4 石炭二叠系煤和炭泥热解数据表

井 号	深 度 (m)	C (%)	Tmax (℃)	R [*] (%)	S ₁ mg/g	S ₂ mg/g	S ₃ mg/g	S ₁ +S ₂ mg/g	Ip s ₁ /s ₁ +s ₂	S ₂ /S ₃	I _H	I.
龙古1	1440	53.45	448	0.79	7.81	154.37	2.64	162.18	0.05	58.47	289	4.9
范古3	2738— 2739	61.37	445	0.80	2.21	136.36	1.61	138.57	0.02	84.70	222	2.6
卫古1	3519	68.84	443	0.79	0.5	154.81	3.67	155.31	0.003	42.183	224	5
"	3575	69.17	450	0.8—1	3.25	50.96	3.58	54.21	0.06	14.235	265	18
"	3621	77.47	451	1—1.2	1.56	140.48	5.20	142.04	0.011	27.984	181	6
"	3645	56.58	456	0.8—1	0.63	91.17	4.65	91.8	0.007	19.607	161	8
濮深1	4541— 4542	68.53	477	1.35	1.02	75.96	1.05	76.98	0.01	72.34	111	1.5
"	4514— 4515	61.74	476	1.35	0.45	72.34	1.58	72.79	0.01	45.78	117	2.5
"		50.83	464		1.81	58.10	1.84	51.91	0.03	31.58	114	3.6
"	4427— 4428	73.03	475	1.29	1.55	73.11	1.07	74.66	0.02	68.32	98	1.4
"	4424— 4425	67.14	472		1.33	79.26	1.68	80.59	0.02	47.18	118	2.5
长1	3087— 3089	67.07	>600	3.40	0.56	5.52	4.13	6.08	0.09	1.34	7.2	5.3
龙古1	3100 炭质泥岩	4.214	465	1.27	0.83	6.68	0.29	7.51	0.11	23.03	159	6.9

从表4看出，除演化程度较高的长1井煤样外，处于低演变阶段（肥气—焦煤）的其它样品 $S_1 + S_2$ 含量都很高，最大达162.18（kg/t煤），氢指数 I_H 最大达289， C_P / C_{OT} 也较高（4—13）。但其 S_1 含量皆很小，最大只有7.81， $S_1 / S_1 + S_2$ 均小于生岩油的最低标准0.1，表明其向石油转化的能力很差。

对于煤系地层来说，其氯仿沥青A含量和 $S_1 + S_2$ 值常常高于一般生油岩，但这不等于它们具有好的生油条件，因为其氯仿沥青A中的非烃部分和 S_2 并不是石油，向烃类的转化还有一个过程。以濮深1井煤系煤样为例，在高变质阶段（ $R^\circ = 1.29 - 1.40$ ）仍有较高的氯仿沥青和 S_2 组成， S_2 达58.10—79.26毫克/克。大量的 S_2 由于其本身化学结构的特殊性，并且已进入气煤（ $R^\circ > 0.82$ ）以后的演化过程，是煤成气的主要物质基础。从表4看出，随着 R° 和 T_{max} 的变大变高， S_2 逐渐变小，至长1井（ $R^\circ = 3.40$ ）只有5.52，即反映了这种生气过程。

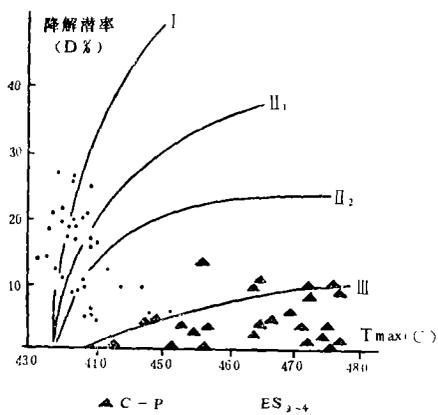


图2 降解潜率-最高峰温关系图

图2是根据热解资料绘制的降解潜率-最高峰温关系图。由图2看出，石炭—二叠系有机质具有沿着Ⅲ型干酪根演化线方向演化的特征，与第三系生油岩相比， T_{max} 明显偏高（453—477℃），降解潜率低（2.9—13.46%），向石油转化的能力差，而在较高的变质条件下，可以生成一定量的干气。

（五）H/C原子比低，以生干气为主
由表5看出，石炭二叠系有机质H/C原子比0.53—0.83，O/C原子比0.07—0.12。按蒂索干酪根分类及演化图式，属Ⅲ型

表5 石炭二叠纪煤系与下第三系干酪根元素对比表

井号	层位 (m)	井段 (m)	C%	H%	O%	H/C	O/C	类型
文60	Es ₃	3300—3360	55.19	6.09	5.38	1.32	0.073	II
卫古1	C—P	3518—3529	72.24	4.78	7.43	0.794	0.064	III
"	"	3521—3523	68.43	4.50	7.38	0.789	0.067	"
范古2	"	2581—2590	78.45	5.10	7.52	0.777	0.060	"
"	"	2603—2615	71.23	4.95	8.00	0.834	0.070	"
濮深1	"	4430—4449	54.97	3.39	5.62	0.740	0.064	"
"	"	4440—4460	64.43	3.15	10.09	0.587	0.098	"
"	"	4560—4578	70.44	3.12	9.24	0.529	0.082	"
兰古1	"	2209—2214	86.41	0.30	2.22	0.042	0.025	"
兰古1	"	2637.47—2694.62	66.3	2.03	4.16	0.36	0.05	"

干酪根，处于生气带范围内（图3）。根据哈乌特（Harwood, 1978）对陆殖煤实验室模拟结果，H/C原子比在0.8—1.0范围内时，所生成的气体为湿气型，H/C原子比小于0.8时，为干气型〔2〕。

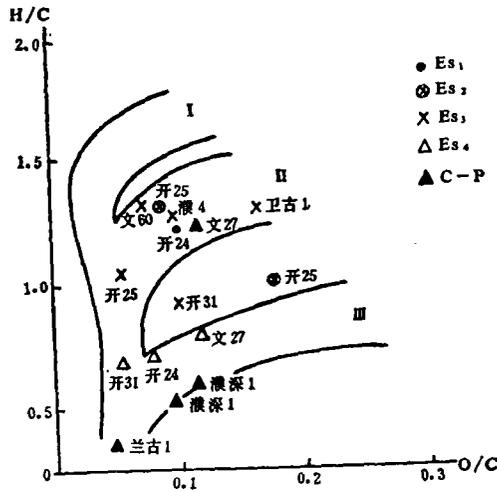


图3 东濮凹陷石炭-二叠系干酪根元素组成

为杂原子官能团，生油气能力最差。稳定组由植物的某些富氢化器官组成，如孢子、角质、树脂和木栓等，其化学结构以氢化芳烃居多，烷基支链较长，是较好的生油母质。下表列举了不同显微组份在相同条件下人工热演化结果。

表6 煤的不同显微组份人工热演化产气实验结果

显微组份	镜质组（抚顺）	丝质组（阜新）	类脂组（树脂组）
产气率（ml/g）	188	43.9	483.0

（据刘德汉等）

由表6看出，煤中类脂组产气量最高，是镜质组的2.5倍，是丝质组的10倍多，因此，显微组份不同的煤，其最终产气率可相差很大。同时，根据众多的刊出模式（道，1977）和实验结果（杜兰德，1983），在不同的热解阶段，不同类型母质的产气量也相差很大。R°为0.55—1.2%的成熟阶段，Ⅲ类干酪根为Ⅱ类干酪根的3倍；R°>1.2的过成熟阶段，Ⅱ类干酪根的生气量比Ⅲ类高3倍。因此，在研究有机质生气性能时，应综合考虑其显微组成和演化程度。

东濮凹陷煤屑和少量煤心样的普通光、偏光和荧光显微观察鉴定结果，一般以镜质组为主，镜质组含量65—100%，惰质组8—30%，个别达100%，壳质组含量则很少，多数在5%以下。马3井壳质组含量的偏高，可能是局部富集现象。由凹陷北部向南部随变质程度增高，镜质组含量减少，而惰质组含量增加，到兰古1井和开33井，惰质组达

对本区16个煤样元素测定结果，除范古2井H/C原子比为0.83外，其他普遍低于0.8，最小为0.042（兰古1井）。因此，该凹陷石炭二叠系母质在煤化过程中应以生成干气为主。

（六）富含镜质组显微组份

根据煤岩学和煤化学的研究，腐殖煤的有机显微组成可划分为镜质组、丝质组和稳定组。镜质组是高等植物在还原条件下经凝胶化作用而形成的凝胶化物质，其化学组成以芳香结构为主，支链多而短（主要是甲基类和含杂原子官能团），是煤成气的主要物质基础。丝质组是在氧化条件下经丝碳化作用形成的丝碳化物质，在化学结构上亦以芳香碳为主，支链主要

100%，证明镜质组在热演化过程中，随着 CH_4 气体的析出、向惰质组转化的过程(表7)。

表7 石炭一二叠系煤岩片鉴定结果表

井号	深度(m)	矿样	R^o (%)	镜质组(%)	壳质组(%)	惰质组(%)
龙古1	1446.5—1447.5	煤	0.79	93.67		6.33
	1438.5—1439.5	煤	0.79	85	<5	10
白8	3998—3991	炭质泥岩		70		30
	4017—4019	炭质泥岩	1.23	100		
马3	3468—3488	煤		67.2	24.8	8.0
开33	3875	煤	2—3	5		>95
马16	3740.5	煤	7.20	65		35
兰古1	2946	煤	7.2	5		>95

总之，无论在原始组成或是成因上，煤与生油岩都显著不同。煤中的富氢部分——煤干酪根将续照Ⅲ型干酪根的演化途经成为重要的生气原料，煤本身也将进一步热解，在石墨化的过程中不断放出以甲烷为主的气体，是重要的气源层。

二、煤系有机质成烃机理及演化模式

含煤盆地中成煤物质沉积后，在上覆地层压力、温度等作用下，发生一系列生物化学降解、合成和热化学作用，析出大量挥发性物质。因此，查明各演化阶段产物的组成、性质、数量等演化规律，是含煤盆地煤成气(油)资源评价和辨别的依据。

(一) 煤系有机质成烃机制

前已述及，煤系中煤和暗色泥岩有机质与生油岩有机质具有完全不同的分子结构。生油岩有机质是带有较多链状结构和环烷状结构的化合物，由于原子间的键能结合力较低，在相对较低的温度下即可通过脱氧、脱氢或分子断裂形式形成液态烃和气态烃。而煤系有机质的基本结构单元，则主要是带有侧链和官能团，如羧基(-COOH)、羟基(-OH)、甲氧基(-OCH₃)的缩合芳香核体系。煤中的碳元素主要集中在芳香族稠环中，稠环有牢固的键能结合力和较高的热稳定性，而侧链和官能团之间及其与稠环之间的结合力相对较弱，热稳定性较差，因此煤化作用过程，主要表现为丧失官能团和烃的侧链数不断减少(产物为 CO_2 、 H_2O 、 CH_4 及其同系物)，并伴随桥键的断裂而发生芳香核的进一步缩合，使碳元素在芳香结构系统中更加浓缩和集中。煤化学结构的演化过程由下列指标得到了证实：

1. 红外光谱

(1) 反映羰基、羧基结构的 1700cm^{-1} 吸收峰，在褐煤阶段较强，气煤阶段显示较弱，其后微弱或消失。

(2) 反映脂肪氢、甲基氢含量的 2920cm^{-1} 、 1380cm^{-1} 吸收峰随煤化程度增加而

减少。反映芳香结构的 $700-860\text{cm}^{-1}$ 、 1600cm^{-1} 、 3030cm^{-1} 吸收峰随煤化程度增加而增加。长焰煤的 $3030\text{cm}^{-1}/2920\text{cm}^{-1}$ 为0.04, 然后缓慢增加到肥煤的0.08, 说明这期间的热化学反应主要为烷烃结构的变化。肥煤以后, 芳核之间的缩合反应逐渐增强, 缩聚程度增加, 到焦煤, $3030\text{cm}^{-1}/2920\text{cm}^{-1}$ 上升到0.20, 至贫煤增加到0.37。

2. 芳香度 (fa)

利用煤的x光衍射可以测定出煤中芳香碳与总碳的比例, 称为芳香度, 是表征煤结构的主要参数。褐煤的芳香度为0.72, 至焦煤增加到0.87, 无烟煤为0.97。煤中的芳香碳几乎占了总碳的100%。

3. 元素组成

煤系有机质热演化过程中的脱羧、脱羟、脱羰和甲烷同系物的析出, 使元素组成中O/C、H/C原子比例不断减少。褐煤的O/C原子比为0.23, 到长焰煤急剧减少到0.12, 其后再缓慢减少到瘦煤的0.03。说明有机质的脱氧作用主要发生在低变质的褐煤—长焰煤阶段, 气煤以后, 有机质内的氧原子含量已很少(主要为分子结构内的桥键), 脱附也更加困难。而H/C原子比的变化则主要发生在气煤—焦煤的变质阶段, 由0.89迅速减少到0.68, 正好与有机质的生烃高峰期吻合。

4. 沥青含量

煤的氯仿抽提率最高的为气煤, 达2.44%, 其次是褐煤, 为1.83%。说明褐煤—气煤阶段, 是煤中干酪根向沥青转化的有利时期。气煤—焦煤阶段, 煤中的沥青含量由2.44%迅速减少到0.63%, 证明沥青向油气的转化主要发生在这一时期。以后由焦煤向贫煤演化过程中, 沥青含量由0.63%减少到0.17%, 至无烟煤降低到0.01%以下。

由热解色谱(Rock-Eval)实测资料所获得的各煤阶 $S_1 + S_2$ 生烃潜力值也描述了类似的烃类演化过程。

5. 挥发份含量

一克煤样在 $900\text{C} \pm 10\text{C}$ 的温度下隔绝空气加热7分钟, 所逸出的气体和蒸汽状态产物的百分率, 减去分析煤样的水百分含量, 即为煤的挥发份含量。由褐煤演变到气煤, 挥发份含量由45%急剧减少到25%, 挥发份的成分主要为 CO_2 、 H_2O 、少量为甲烷及其同系物, 说明这期间有机质的热化学反应主要是脱羧、脱羰和脱羟。由气煤—瘦煤, 挥发份由25%减少到10%, 挥发份的成分主要为 CH_4 , 少量 CO_2 , 微量水, 说明这期间有机质的热化学反应主要是芳香核上侧链的断裂或芳核之间的缩合。

(二) 煤系有机质的演化阶段

综合煤系地球化学分析资料和室内模拟实验数据, 可将有机质的演化过程划分为三个阶段:

1. 未成熟阶段

即成煤物质埋藏后的褐煤阶段($R^0 < 0.5\%$)。该阶段煤系埋藏较浅($< 1000\text{m}$), 温度较低($< 70\text{C}$), 压力较小, 促使泥炭向褐煤转化的主要营力是压实作用和微生物的生化作用。演化的结果是使有机质脱水和去羧基, 产生大量 CO_2 , 有机质也在微生物作用下产生大量 H_2 、 H_2 还原 CO_2 而生成 CH_4 。该阶段 CH_4 的产出量取决于适宜微生物生活的环境条件, 但总的来看是 $\text{CH}_4 < \text{CO}_2$, 由于 CO_2 易溶于水, CH_4 可单独产出。

该阶段有机质中挥发份含量在45—63%, O/C原子比在0.23—0.4之间, H/C原子比在0.86—1.2之间。烃类生成物的主要标志特征是:

(1) 甲烷含量高, 一般大于98%, 不含或极少含重烃, 干燥系数(C_1/C_{2+})在数百至数千, 为典型干气。

(2) 富轻碳同位素。 $\delta^{13}C_1$ 在-77—-45‰之间, δD_{CH_4} 在-250—-200‰之间。

2. 成熟阶段

相当于成煤作用的长焰煤—焦煤阶段($0.5 < R^\circ < 1.7$), 促使煤化程度加深和有机质阶解的主要营力是地层温度。在热力作用下, 有机质中各种官能团和链键分别按活化能大小, 依次发生降解、裂解, 转化为具有不同分子结构的烃类。生成物的同位素组成, 也按化学活性的大小发生相应的分馏效应。

在成熟作用的初期, 即低熟阶段($0.5 < R^\circ < 0.8$), 大量干酪根转化为沥青质, 其中易于转化的树脂和蜡可生成少量轻质油。芳核结构上的烷烃支链部分断裂形成少量甲烷和 C_2H_6 以上重烃。此阶段气态烃产量最低, H/C原子比变化不大, 在0.80—0.89间变化不定, 且无一定规律。O/C原子比则由0.23急剧减少到0.09, 产生较多的 CO_2 。

在成熟作用的中期, 即气煤—肥煤阶段($0.8 < R^\circ < 1.2$), 有机质的演化主要是通过树脂、孢子、角质等稳定组份的降解和初期所形成的沥青的转化, 以及芳核结构上烷烃支链的断裂, 形成富含重烃的气体。该阶段相当于生油岩的高峰生油期, 煤成气中以富含重烃为特点, 一般形成湿气或凝析气, 当煤岩组份中稳定组占较高比例时, 可形成煤成油。这一作用期, 煤中可溶物大量减少, 由2.44%下降到0.79%以下; H/C原子比由0.89减少到0.76, 下降较快, 与烃的生成量成正比例关系; O/C原子比由0.12减少到0.05, 与初期成熟阶段相比, 下降速率已缓慢的多; 挥发份由36%下降到20%以下, 挥发份成分中 CH_4 含量大于 CO_2 含量; $3030cm^{-1}/2920cm^{-1}$ 由0.04上升到0.08, 芳香度由0.80上升到0.84, 变化较缓慢, 证明这一期芳核之间的缩合反应不强烈。

在成熟作用的晚期, 即焦煤变质阶段($1.2 < R^\circ < 1.7$), 有机质的生烃作用由以生湿气为主转为以生干气为主。这一期的化学反应主要是通过沥青质和残余液态烃的热裂解, 以及芳核支链的进一步断裂形成含甲烷较多的气体。芳香度变化不大, 由0.84上升到0.87, 但 $3030cm^{-1}/2920cm^{-1}$ 变化较大, 由0.08上升到0.20。从红外光谱图上看, 这主要是由于 $2920cm^{-1}$ (脂肪氢)吸收峰的急剧减少和趋于夷平造成的, 说明分子反应仍以烷烃侧链的断裂占优势。O/C原子比由0.05减少到0.04, 基本保持平衡, 但H/C原子比变化较大, 由0.76减少到0.68, 挥发份减少了5%。

热成熟阶段烃类生成物的标志特征是:

(1) 低成熟阶段煤成气中甲烷含量相对较高(>85%), 至中期含量偏低(<85%) 高成熟阶段再次升高到85%以上。

(2) 热力作用使煤成气中越来越富集重的碳同位素, $\delta^{13}C_1$ 从-37‰升高到-28‰; δD_{CH_4} 从-200‰升高到-154‰。

3. 过成熟阶段

相当于成煤作用的瘦煤—无烟煤阶段($R^\circ > 1.7\%$)。由于有机质芳香结构上的烷

烃支链在成熟阶段已大部消耗，分子反应则由以裂解为主转为以芳香核之间的缩合为主，产生甲烷气体。这一变质阶段煤的芳香度增加很快，由0.87上升到0.97，碳原子几乎全部集中在芳香结构上，芳香氢吸收峰 3030cm^{-1} 明显增强，脂肪氢吸收峰 2920cm^{-1} 已很不明显， $3030\text{cm}^{-1}/2920\text{cm}^{-1}$ 由0.29迅速增加到0.37。由于氧原子在有机质中含量很少，O/C原子比几乎无变化，H/C原子比由0.62下降到0.58，有机质中的氢原子已很少。该阶段烃类生成物的特征是：

- (1) 以含甲烷为主 (>98%)，含极少重烃，不含凝析油。
- (2) 富含重同位素， $\delta^{13}\text{C}_1 > -28\%$ ， $\delta\text{D}_{\text{CH}_4} > -154\%$ 。
- (三) 煤系有机质的生烃模式

综合上述资料和北京石油勘探开发科学研究院地质所关德师同志的模拟实验成果，以及我们所做的龙古1井、开35井的煤和暗色泥岩模拟实验资料，得到如下有关煤系有机质的生烃模式(图4)：

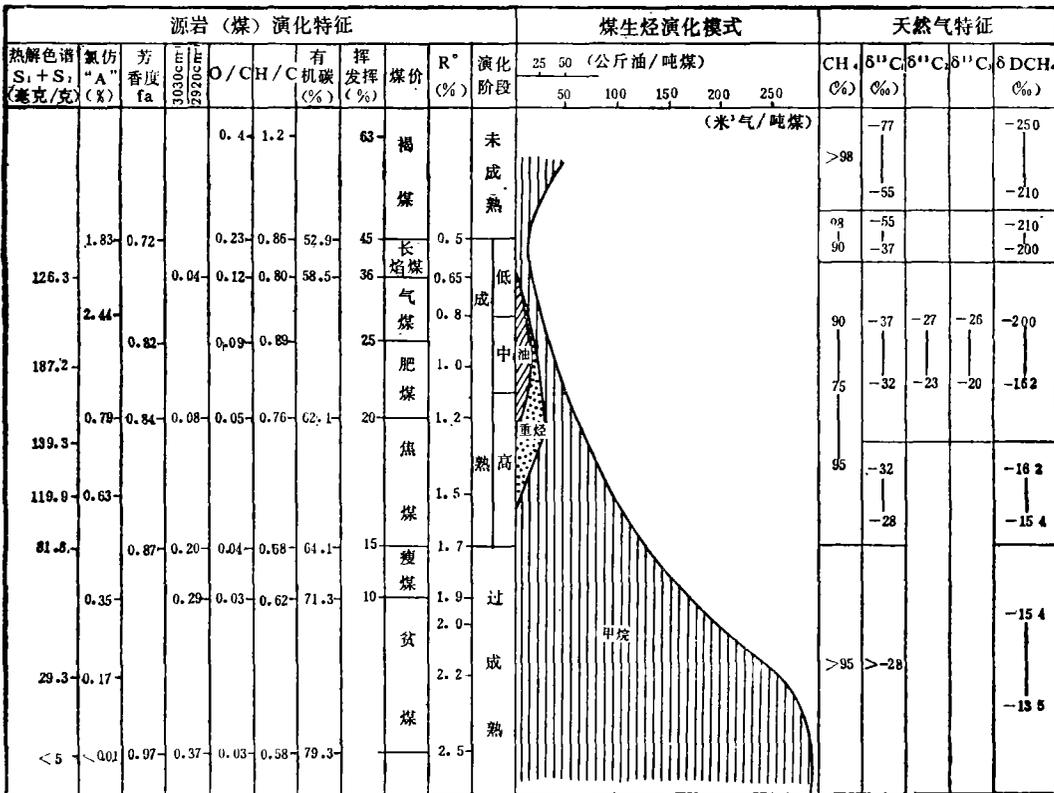


图4 煤系有机质生烃演化模式图

1. 油的生成在热演化的长焰煤—老肥煤阶段 ($0.5 < R^\circ < 1.3$)，高峰生油期为肥煤期，最大生油量 22.5kg/t 煤或 25kg/t 有机碳。长焰煤阶段生成的油为轻质油，含蜡量 $>10\%$ ，主峰碳在 $\text{C}_{10} - \text{C}_{25}$ 之间；高峰生油期(肥煤阶段)生成的轻质油，含蜡量在 $5 - 10\%$ 之间，主峰碳在 $\text{C}_{17} - \text{C}_{19}$ (个别样品主峰碳为 C_{25} 或 C_{27})；高成熟阶段(老肥煤—初焦煤)生成凝析油，含蜡量偏低($<5\%$)，芳烃含量高($>20\%$)，

主峰碳在 C_{11} — C_{13} 之间。

图4中油的生成曲线是根据室内模拟实验资料绘制的,由于煤系有机质对液态烃的吸附能力较强,因此,在实际的地质情况下,煤系生成液态烃的能力比此要低。

2. C_2^+ 气态烃的生成在热演化的长焰煤—焦煤阶段,高峰生成期在初焦煤阶段($1.2 < R^o < 1.4$),最大生气量为 $32.5m^3/t$ 煤或 $33m^3/t$ 有机碳。在焦煤以后的生气阶段($R^o > 1.7$)、煤成气中几乎不含重烃。

3. 甲烷的生成几乎贯穿于成煤物质埋藏后的整个历史中,但煤以贫煤期生成量最高,煤阶生气率达 $59—91m^3/t$ 煤;暗色泥岩以焦煤期生成量最高,煤阶生气率达 $78—82m^3/t$ 有机碳。其次是未成熟的生物化学阶段,据国外资料,生气量为 $38—63m^3/t$ 煤(或有机碳)。

(收稿日期:1986年1月18日)

参 考 文 献

- [1] T.G. 鲍威尔 <陆相有机质生烃概念的发展>—北京国际石油地质会议, 1984年。
 [2] Harwood, R.J., Oil and Gas Generation by Laboratory Pyrolysis of Kerogen, AAPG, Vol. 161, No.12, 1977.

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE ORGANIC MATTER IN COAL MEASURES OF DONGPU DEPRESSION, AND ITS EVOLUTIONARY PATH

Xu Huazheng

(Research Institute for Exploration and Development of Zhongyuan Oil Field, Ministry of Petroleum Industry)

Abstract

Through the analysis and the study of organic matter in coal measures, the geochemical characteristics and the composition of the organic matter are systematically expounded in this paper. Under thermal simulation experiments, the mechanism of the hydrocarbon generation of the organic matter in coal measures is also studied. It is suggested that the organic matter of coal measures differs significantly from that of oil source rocks both in origin and in original composition. The evolutionary processes of the organic matter of coal measures are divided into three stages, i.e. immature stage (prior to brown coal); mature stage (from flame coal to coking coal); overmature stage (lean coal-anthracite).