定煤的变质程度和评价沉积岩成岩阶段最好的手段之一。因此，煤岩学已进入广泛寻找油气领域的实际应用阶段。

参 考 文 献

[1]煤炭科学院地质勘探研究所情报室，第七届国际石炭纪地质与地层会议，煤田地质简要情报，1973，7．

[2]煤炭科学院地质勘探研究所情报室，1972年国际煤岩学会会议，煤田地质简要情报，1973，8．

[3]傅家模等，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，1975，2；（Ⅱ）—石油演化的实践模型和石油演化的实践意义，地球化学，1977，2．

[4]中国科学院贵阳地球化学研究所电子顺磁共振实验室，电子顺磁共振法测定煤、沥青、石油和沉积岩分散有机质中自由基含量及其在地质上的意义，地球化学，1975，1．

[5]石渡良志，石油形成理论起源说的最新进展，地质地球化学，1977，3．

[6]Н. В. 洛帕京，温度和地质时代是煤化作用因素，煤田地质情报，1974，3．

[7]М. В. 高里村，煤变质作用的持续时间，煤田地质情报，1974，3．

[8]瓦索耶维奇，采用煤岩学方法进行油气勘探，国外油田地质勘探与开发，1973，3．

[9]Н. Г. Титов, Современное состаяние Науки О Происхождении ископаемых углей, Тр. Всес. совещ по Хим. И Ген. из—во АН, СССР, 1953, СТР. 55—66.

[10]Н. Г. Титов, К Вопросу об условиях образования В Природе Гумусовых углей различных Качеств, ТР. лаб Геол. узлея, АН, СССР. ВЫП. Ⅵ. СТР. 74—82。

[11]罗立志等译著，国外天然气成因的研究及对四川勘探实践的意义，天然气勘探与开发，1978，1。

[12]М. Л. 列文斯汀，顿巴斯煤田煤的变质规律，煤田地质情报，1974，3．

[13]N. J. L. 贝利等，应用石油地球化学寻找石油—以西加拿大盆地为例，石油地质科技情报，1976，2。

从油气形成探讨煤变质的温度

戴金星

（石油勘探开发科学研究院石油地质研究所）

腐植型有机物在成煤作用过程中形成大量的天然气，在其低、中级变质阶段还产生一定数量的石油。腐植型有机物既包括煤层的，也包括分散在煤系与亚烟煤系地层中的。我国含煤地层分布极其广泛，许多煤系地层中发现油气显示，并在四川、陕甘宁、台湾等地找到和三迭系须家河组(香溪群)、石炭二迭系以及上第三系有关的气藏及少量石油[1]。世界上的大气田和天然气储量70～80％来自含煤地层。世界特大气田苏联的乌廉戈伊气田和荷兰的格鲁宁根气田都是与煤系地层有关的气田。六十年代以来，在西西伯利亚盆地北部、欧洲北海南部盆地发现了储量巨大（十七万亿立方米）、气田众多，由煤变质作用生成的天然气，其储量占世界天然气总储量五分之一以上。苏联有大约65％探明的天然气资源均在含煤地层中[2]。美国煤矿每年排放到大气层中的天然气约60亿立方米，含在煤层中的气达8.778万亿立方米，比目前天然气可采储量（7.532万亿立方米）还大[3]。在某些煤种中还见有油的显示；国内外石油勘探证明在腐植型有机物高度集中成煤层的煤系与腐植型有机物主要呈分散状态的亚煤系是主要生气层系，在一定地质条件下，往往形成气田(藏)或油气田(藏)。在成煤作用整个过程中，油、气演化有它固有特征，也就是说某种烃类成分，尤其是受一定温度制约的石

油仅在一定的煤种中出现。既然成煤作用中生成的气油与煤种有共生组合关系，所以可以利用此组合特征，从石油地质学观点出发，特别利用液态烃演变的温度范围，来探讨煤变质作用的温度具有一定的理论和实践意义。

一、成煤作用地球化学及形成油气的理论概述

生油气层和生气层的有机物质相—成因类型往往是不同的：腐泥型有机物既能生油，亦能生气，而腐植型有机物在成煤过程中主要生成气。煤通常是由腐植型为主的有机物（就腐植煤而言，因腐泥煤较少见）和无机物组成的复杂混合物。腐植型有机物特征是富含芳烃结构的油母质和C^{13}同位素，氢组分含量小于6%，最低为1%左右，O/C比值高，这决定了成煤作用中以形成天然气为主，而仅在某些阶段伴生少量液态烃。煤有机物的基本结构单元如图1，在成煤作用的初期主要是带有许多侧链和官能团，如羧基（-COOH）、羟基（-OH）、甲氧基（$-OCH_3$）、醚基（-O）和羰基（=C=O）等的缩合芳香核体系，亦即芳香族稠环或缩合稠核芳香系统[4][5][6][7]。煤中碳元素主要集中在稠环里，稠环因有坚固的键，故具有较大的稳定性。侧链和官能团分子间及其与稠环之间的结合力与稠环相比相对较弱，热稳定性较小。当植物残体被埋藏覆盖后，随着地壳不断下沉，上覆岩层不断增加，地温和压力不断升高，这是由大气圈→水圈→岩石圈地球化学环境变更的过程，是成煤作用由低阶段向高阶段发展，伴随的是有机物或煤的物理结构与化学特征的递变过程。成煤作用中煤（特别是其中凝胶化物质）的地球化学演变特征主要由于温度不断升高，煤骨架结构的芳香程度逐渐提高，芳香族物质逐渐缩合成较大的聚合体，分子排列渐趋定向化，由于各类官能团与脂肪族成分逐渐脱落，煤稠环上侧链不断趋向减少，碳含量逐渐增加，氢、氧则减少(图2)。脱落的诸类官能团和脂肪族成分，除一部分碳元素转入并集中加强煤的稠环中，大部分则分解而又组合形成CH_4及其同系物（包括液态烃）、CO_2、H_2O等挥发性产物，这就是成煤作用中形成油气的地球化学基础。

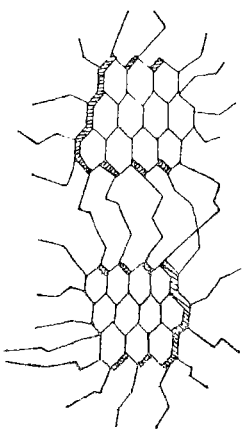


图1　煤的基本结构单元

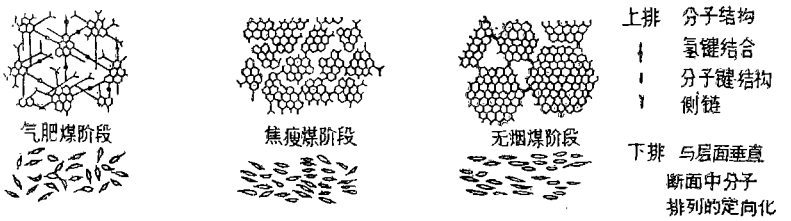


图2　煤化过程中镜质体分子结构的变化（据M. R. 泰希缪勒加以补充）

从褐煤转变为沥青煤成煤过程中主要产物可用以下化学反应式大概表示[8]：

$$C_{57}H_{56}O_{10} \longrightarrow C_{54}H_{42}O_5 + CO_2 + 2CH_4 + 3H_2O$$

褐煤　　沥青煤　　甲烷

从烟煤转变为无烟煤过程中，主要产物可用以下化学反应式大概表示[9]：

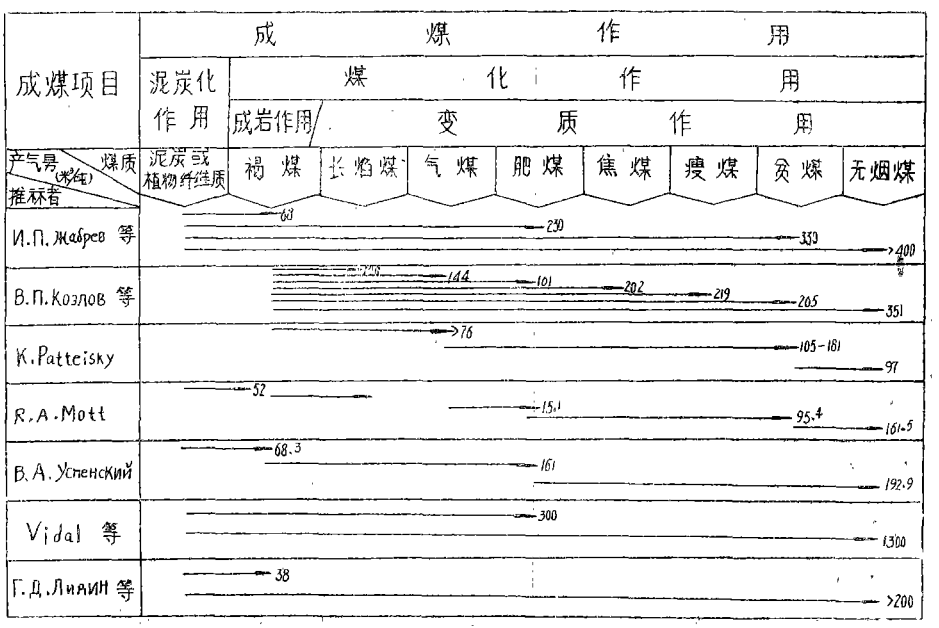
$$C_{15}H_{14}O \longrightarrow C_{13}H_4 + 2CH_4 + H_2O$$

烟 煤　　无烟煤　甲烷

成煤作用每个阶段形成的天然气(主要指甲烷)数量是不同的。确定成煤作用各阶段形成的天然气数量，对于含煤盆地的含油气评价和初步估计采煤中是否采取预防瓦斯突出的安全措施有一定意义。国外许多人对成煤作用各阶段产生天然气值进行模拟研究，现把所获有关数据综合列入表1。为表示成煤作用至某阶段产生天然气的总量与相应可能储存地层中的最大数量，需知以下几个参数。煤气发生率：从植物纤维素至如今某煤种成煤作用中每吨煤形成的天然气总量。视煤气发生率：自褐煤（因为褐煤之前成煤过程中虽也能形成天然气，但由于该时期内几乎无盖层或盖层较薄，并未或刚开始成岩，没有可靠的盖层，所形成气体大部分丧失殆尽，损耗系数达0.8[10]，故在此忽略不计）至如今某煤种成煤作用中每吨煤形成的天然气数量。从表1可见，煤气发生率除Vidal等提出的无烟煤阶段数量较大外，其它的基本上差异不太悬殊。造成差异的原因可能是由于各样品虽是同煤种，但并非取于一地，因其原始成煤物质、有机显微组分不可能相同，故产气量不一[11][12]；另外各自的分析方法也不同。基于以上原因，特别是第一个原因，在综合分析表1数值后，初步拟出煤气发生率（Rg）、视煤气发生率（Ra）相应的区间参数（表2）。采用区间参数较为妥当，因为煤种也是根据一些指标的区间值确定的。

应用煤气发生率和视煤气发生率，便可对含煤盆地或矿区煤系成煤作用中形成天然气总量和其蕴藏在地层中的最大量进行估算：

表1



煤气发生率和视煤气发生率数据表　　表2

项目 \ 煤种	褐煤	长焰煤	气煤	肥煤	焦煤	瘦煤	贫煤	无烟煤
煤气发生率（Rg）（米³/吨）	38—68	138—168	182—212	199—230	240—270	257—287	295—330	346—422
视煤气发生率（Ra）		100—130	144—174	161—192	202—232	219—249	257—262	306—374

$$Q = Rg\,(Q_C^{I} + Q_C^{II}) \qquad (1)$$

当仅计算煤层所形成天然气总量时，用公式（1—1）：

$$Q^{I} = Rg\,Q_C^{I} \qquad (1—1)$$

式中，Q_C^{I}为煤的储量；Q_C^{II}为煤系中分散腐植型有机炭总量（Q为煤系中形成天然气总量）。如应用（1—1）公式可以对我国煤层生成天然气总量进行计算。

某含煤盆地或矿区煤系在成煤作用中形成可能蕴藏在地层中天然气最大量Q_S可用公式（2）计算：

$$Q_S = [Ra + (38\sim62)K](Q_C^{I} + Q_C^{I}) \qquad (2)$$

当仅计算某煤层生成可能蕴藏在地层中天然气最大总量Q_S^{I}时，用（2—1）公式计算：

$$Q_S^{I} = [Ra + (38\sim68)K]Q_C^{II} \qquad (2—1)$$

式中，K为泥炭转化为褐煤气保存系数，K一般为0.2。

二、我国含煤地层在成煤作用中生成油气的演化和组合特征

综合分析我国煤系中发现的大量油、气显示，可能得出成煤作用中油、气演化的一些规律。现从低至高煤种为序，对其油、气显示概述如下：

褐煤：海拉尔盆地扎赉诺尔群等煤系中普遍有过生油、气过程，故在煤系中的鲕状火山珍珠岩及松脂岩、鲕状火山矽质岩、碧玉岩、粗面安山岩、安山岩、凝灰岩和流纹岩等火山岩里常有硬沥青和地沥青，并于扎赉诺尔滨静矿灵东井的煤系砂岩中多处见有油浸砂岩或稠油，又在新巴尔虎右旗巴达图之南的贝1井发现以甲烷为主的天然气。云南省杨林、昆明、文山和越州等盆地中的上第三系都发育有褐煤，在前三个盆煤系地层中都发现了天然气。如杨林盆地有四口井喷气，无阻流量为3553～16300米³/日。在越州盆地的井下有油花泛出，等等。

长焰煤：铜川市下石节煤矿石窑沟区，在开采侏罗系长焰煤打眼放炮时有大量天然气和石油涌出，日产原油最高达100余立方米。台湾山子脚油田油气显示与中新统煤系有关，构造顶部有气苗，并在二德煤矿第五号坑道发现油苗，原油从煤系的一层砂岩中渗出，石油储量一万吨[13]。

气煤：镇江伏牛山煤矿龙潭煤系从1969～1979年间继续发现油、气显示，有时还有油流。湖北兴山县、山东金乡等井田内也有油、气显示。四川盆地川中与川西石油勘探发现须家河组（香溪群）煤系具有广泛的油、气显示。在这一带陆续获得工业气井。从既考虑到地理

分布的均一性，又注意煤系纵向代表性的气井烃类组分特征(表3)中可见：各井的天然气中，甲烷含量85～90%，重烃总含量一般为10～15%，并在天然气中含有相当的凝析油与轻质油量。

四川盆地川中、川西北须家河组(香溪群)天然气组分表　　表3

井号	层位	天然气组分（%）								
		甲烷	乙烷	丙烷	丁烷	戊烷	二氧化碳	氢	氮	重烃总量
桂 52	香六	91.68	4.52	1.63	0.54		0.65		0.70	6.69
角 43	香五	87.99	5.48	2.92	0.96	0.51	0.70		0.05	9.87
大 参		85.40	9.59	2.66	1.06	0.09	0.35	0.01	0.72	13.40
遂 10	香四	73.72	15.48	7.17	1.97	0.52	0.50		0.70	25.14
花 3		89.35	5.46	2.41	1.12	0.62	0.15			9.61
广 19	香2-4	90.24	6.12	1.78	0.46	0.23	0.50		0.50	8.59
送 7	香三	86.16	7.10	2.99	0.87	0.38	1.1		0.55	11.34
通 6	香	89.15	7.31	1.99	0.52		0.25		0.57	9.82
遂 8		87.24	8.38	2.43	0.67	0.25	0.30		0.51	11.73
女 106		91.27	5.38	1.29	1.18		0.08	0.09	0.47	7.85
角 23		93.14	3.22	1.85	0.39	0.12	0.30		0.52	5.48
蓬 33	二	85.93	6.69	3.09	1.19	0.68	0.65		1.58	11.65
送 5		88.44	6.68	2.51	0.71	0.30	0.30		0.86	10.20
中 2	须	90.80	5.81	1.53	0.64		0.62	0.11	0.68	7.98
中 11		83.26	9.45	4.19	1.87	0.20	0.05	0.04	0.69	15.71
中 18	二	88.34	6.48	2.05	0.95	0.28	0.76	0.04	0.90	9.76

气肥煤、肥煤：以气煤与气肥煤为主阶段的北票煤田，在钻孔喷出天然气中除丁烷以前组分的烷烃外，较多情况下有异戊烷及正戊烷，少量样品还有微量更重烷烃，并在某些地段煤层底板围岩或煤层中发现星散状石油沥青或油滴。我国南方的龙潭煤系，处于气煤—气肥煤阶段的煤产地，普遍有油气显示：在安庆、广德独山燕子岭煤矿的砂岩中见液体原油；苏南句容东昌街青山煤矿有沥青一层，厚3—4厘米；句容茅山、宜兴湖汶、张渚、宁国灰山、宣城水东、高淳等地煤系的砂岩具有油味；镇江之南的小力山、东风煤矿一些煤田钻孔中见砂岩裂隙、孔隙含油。在东风煤矿井内一处龙潭组顶板大隆组底页岩裂隙内流出原油2.6吨，这些石油是通过一个正断层从龙潭组砂岩中运移来的；浙江长兴煤山龙潭组主要为气肥煤和肥煤，其中发现油气显示至少有14层，油、气显示集中在煤层发育地段，说明与成煤作用有密切关系。浙江第五地质大队1971年对千井湾煤矿一层7.37米储层进行试油结果：气占98.4%，水为1.47%，油仅占0.04%，这种以气为主、油为辅的关系是成煤作用中形成油、气的一个特点。

焦煤：贵州水城汪家寨煤矿上二迭统汪家寨组和龙潭组皆为含煤地层，据说1972～1973年曾于汪家寨组顶第一层煤顶板飞仙关组泥质灰岩中发现色浅、浓度不大的石油。又据说，天府矿务局三汇一矿平洞穿乐平煤系K_2煤层时遇断层发生大量瓦斯突出，突出煤多达一万吨。四川石油管理局对中梁山煤矿调查，在茅口灰岩巷道中七年内共排出天然气4700万立方米，1958年在280米水平巷道乐平组10号煤层发生瓦斯突出，喷气11.6万立方米，带出煤

600吨。

瘦煤、贫煤、无烟煤：这三种煤中未发现油显示，但普遍发现气显示，在一些煤矿还发生过大的瓦斯突出。四川盆地的石油勘探与采煤实践说明，乐平组普遍有气显示与瓦斯突出。如南桐煤矿直属一井一次突出天然气350万立方米、煤5000吨。川东、川南、川西南气区的主要气层为茅口灰岩，甲烷含量在95%以上，是由乐平组在成煤过程中生成的天然气运移来的[1][8]。

辽宁煤炭研究所对我国一些煤田煤层的气体组分作了较系统的气相色谱分析（煤样均取自甲烷带巷道），其中获得烃类（C_1—C_8）组分资料见表4。从表4不难看出煤层里烃类以甲烷占绝对优势；不同煤种的气态重烃含量不同：气煤、肥煤、焦煤中含量较大，即约占5～18%，属于湿气，而无烟煤中含量大大减少，仅为1.4～2.6%左右，属于干气。值得注意的是无烟煤、瘦煤中液态重烃（C_5—C_8）一般数量级小，而焦煤、气肥煤中其数量级大得多，尤其是气煤、气肥煤中则很大。这一特征与上述煤种与油气共生关系吻合。

我国一些煤田煤层的天然气组分表　　表4

名　称	煤系名称	煤层	煤种	分析样品（个）数	平均气体组分（体积%）						
					CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_2^0—C_8^0	C_2^0—C_4^0	C_5^0—C_8^0
焦作煤田李封矿、朱村矿、田门矿	山西组	大煤为主	无烟煤	10	48.26400	1.31855	0.00845	0.00133	1.39742	1.32833	0.06909
白沙煤田红卫煤矿、新生煤矿	龙潭煤系	VI煤层	无烟煤	11	51.11800	2.41372	0.02548	0.00519	2.46509	2.44439	0.00207
松藻煤矿	龙潭煤系	K_3层为主	无烟煤	8	68.80825	2.59993	0.01157	0.00121	2.63244	2.61271	0.01973
南桐煤矿直属一井、直属二井	龙潭煤系	六号层为主	瘦煤	13	55.85076	7.19476	0.41986	0.00766	7.63251	7.62228	0.01023
中梁山煤矿南井、北井	龙潭煤系	K_1层为主	焦煤	14	45.66400	3.98510	0.72966	0.08246	4.87471	4.79722	0.07749
天府煤矿南井	龙潭煤系	大连子层	焦煤	16	35.38437	14.72383	3.14863	0.10100	18.05131	17.97346	0.07785
鸡西煤矿滴道一井、四井、大通沟一井	鸡西组	28层24层为主	焦煤	9	42.91888	17.05770	1.60491	0.07548	18.84493	18.73809	0.10684
北票煤矿冠山一、二井、台吉井三宝矿	北票台煤组	4、8、9、10层为主	气煤、气肥煤为主	94	47.84472	7.91351	2.52881	0.76571	11.87550	11.20803	0.66747

通过镜煤反射率研究，可以把生成原油的热演化过程与成煤作用的变质过程联系起来。近几年来大庆油田科学研究设计院对松辽盆地的主要生油岩之一下白垩统青山口组二、三段黑色泥岩烃类演化过程、地温、镜煤反射率进行综合研究（图3），确定了成油门限深度和温度为1330米和66—70°C，在此成油门限深度的镜煤反射率为0.5%，即处于老褐煤阶段。以成油门限深度为界，烃类演化，特别是成分发生很大的变化。浅于门限深度正烷烃呈明显的奇偶优势，饱和烃/芳烃比值较小，与正构烷烃含量相比，异戊间二烯烃（植烷和姥鲛烷）含量较高，总的来说只能形成干气；深于门限深度，烃类大量产生，饱和烃/芳烃比值明显增高。与正构烷烃含量相比，异戊间二烯型烃相对减少，轻烃比重烃相对明显增加，正构烷烃奇偶优势消失，OEP值趋近于1。当深度达到1900米时，地温约98°C，镜煤反射

率为1.0%，相当长焰煤向气煤过渡，总烃（以液态烃为主）形成达到最大值。当深度达到2100米，地温约108°C，镜煤反射率为1.3%，即处肥煤阶段，石油的成熟相（阶段）结束。大于2100米进入凝析油化阶段。石油的分布下限深度为2850米，地温为146°C，镜煤反射率为2.0%，相当于焦煤向瘦煤过渡。超过2850米深度，将引起烃类高温裂解，只可能出现甲烷气体，一般没有液体烃存在，如肇深1井于井深2860—2870米测试产干气就是例证。

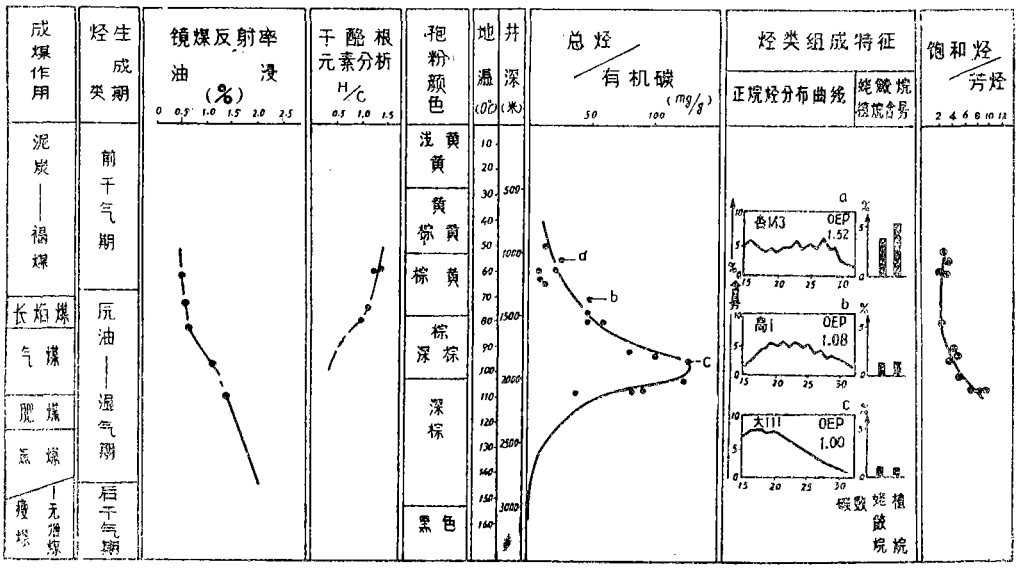


图3　松辽盆地下白垩统青二、三段黑色泥岩演化、油气分布与成煤阶段的关系（据大庆油田科学研究设计院加以修改补充）

综合上述，从露头、采煤过程及油气勘探所发现的油、气显示与煤种系列共生特征，得出以下认识：无论含煤地层或亚含煤地层(包括与之同期异相腐泥型生油层)中，油气之共生与演化同煤种有一定共生组合关系：泥炭、年青褐煤生成干气，石油最早形成在老褐煤阶段一直延续到焦煤阶段，而主要形成期或强烈期在成煤作用的低变质阶段。石油地质学上把石油开始生成与存在阶段称为“液态烃窗”或“液态窗”。由于“液态窗”和老褐煤、长焰煤、气煤、肥煤和焦煤有共生组合关系，因而可以把这些煤种称为“液态窗煤种”。对于腐植型有机物而言，在“液态窗煤种”阶段主要形成湿气，成油作用是附属于成气作用。成煤作用高变质阶段，即贫煤、无烟煤阶段只形成干气。

三、关于煤变质作用温度的讨论

虽然控制煤变质作用有温度、压力、时间、煤中放射性矿物的辐射和含煤地层岩石导热性的差别等因素[14]，而目前大部分人则认为温度是主要的因素。基于本文命题宗旨，在此仅讨论温度因素。

有关煤变质作用温度问题，有两种假说：高温变质和低温变质。高温变质论者主要是从

人工煤化实验基础上得出结论的。早在1930年W.格罗普等曾将泥炭或年青褐煤在1800个大气压下实验，当温度升到320°C时褐煤转变为长焰煤；当温度升高到500°C时则转变为无烟煤[7]；C.A.托波列奇（1970）根据实验数据并结合地质条件的理论研究，得出各煤种转化的最可能温度是：褐煤$\xrightarrow{160—180°C}$长焰煤$\xrightarrow{200—210°C}$气煤$\xrightarrow{250—260°C}$肥煤$\xrightarrow{290—300°C}$焦煤$\xrightarrow{340—360°C}$瘦煤$\xrightarrow{380—400°C}$贫煤$\xrightarrow{420—500°C}$无烟煤[15]。低温变质假说得到近二十年来由于应用地质—地球物理方法研究地热场变化、用围岩矿化推测古地温及用热动力模拟计算煤化温度等资料的支持。A.B.爱德华认为褐煤转变为烟煤只需40～50°C，烟煤转变为无烟煤是120～150°C[4]；杨起等（1979）在研究总结我国煤变质有关资料后，也得出低温变质结论（表5）；武汉地质学院煤田教研室在综合国外古生代一些主要煤田的资料后认为“转变为不同煤化阶段的煤所需要的温度大致为：褐煤40～50°C；长焰煤一般<100°C；炼焦煤（包括气煤、肥煤、焦煤和瘦煤）一般<200°C；无烟煤一般不超过350°C。”[7]

低温变质各煤种形成温度对比　　表5

生成温度°C 作者 / 煤种	J.B. Caldwell (1966)	M. & R. Teichmuller (1968)	M.Л. Левенштейн (1969)	М.В. Голицын (1970)	Г.А. Иванов (1975)	杨起等 (1979)	戴金星 (1980)
褐煤		<100	40～50	50	50		66～93
长焰煤	80	100～150	70～90	<100			95～98
气煤			100～120	130	120	70～80 100～120	
肥煤	120		120～140	150		130±	108～145
焦煤				200		120±	146～163
瘦煤	155		150～180	>200	150～180		
贫煤			170～200				
半无烟煤	>170		190～350				
无烟煤						155～250	

在研究我国煤种与气油共生组合特征及石油热演化过程的联系后，特别是在综合分析油和煤种共生规律、成油门限温度与镜煤反射率的关系（表6）、石油自然裂解温度特征等基础上，可以确定“液态窗煤种”生成温度在66～163°C之内，即从褐煤转化为长焰煤大约为66～93°C；焦煤向瘦煤转化温度大约146—163°C（详见表5）。从石油地质学观点分析得出煤种与相应温度值同国内外其他资料比较是相似的（表5），都说明了煤的低温变质（仍然不能排除接触高温变质存在，但其作用与影响范围有限）。

我国东部主要盆地白垩—第三系生油层形成“液态烃窗”温度值与有关镜煤反射率数据　　表6

作者 / 构造位置 / 成油阶段 / 生油层 / 温度	大庆油田科学研究设计院（1978）	梁复华等（1979）	汪本善等[16]（1980）	张曼秋[17]（1979）	江继纲（1979）	贾凤英（1979）
	松辽盆地	岐口凹陷		东营凹陷	潜江凹陷	泌阳凹陷
	青二、三段	沙河街组	沙一段中部	沙三段中部	潜四段	核桃园组
成油上限温度	66—70°C（0.5%）*	85.5°C（约0.5%）	85—90°C（0.58%）	93°C	90°C	75°C
凝析油门限温度	108°C（1.3%）	145°C（1.3%）		122°C	129°C	约120°C
成油下限温度	146°C（2.0%）	163°C（1.9%）		约150°C	150°C	

* 括号内为镜煤反射率值，下同。

参考文献

[1]戴金星：成煤作用中形成的天然气和石油，石油勘探与开发，1979，3.

[2]Жабрев，И.П. и др.，Генезис Газа И Прогноз Газоносности，Геология Нефти и Газа，No.9，1—8.

[3] Deul，M. et al.，1975，Coal Beds：A Source oF Natural Gas，Oil and Gas Joural，V.73，No.24，47—49.

[4]北京地质学院煤田教研室：煤田地质学，78—90，中国工业出版社，1962。

[5]上海化工学院：煤化学和煤焦油化学，33—40，上海人民出版社，1976。

[6]斯米尔诺夫，P.H：煤化学及煤岩学新进展，1—20，科学出版社，1961。

[7]武汉地质学院煤田教研室：煤田地质学（上册），36、42—45、88—98，地质出版社，1979。

[8]罗志立等，国外天然气成因的研究及对四川勘探实践的意义，石油勘探与开发，1978.5，15—28。

[9]阿格罗斯金，A.A.（赵德普译），煤的化工学，16—17，煤炭工业出版社，1956

[10] Багринцева，К.И. и др.，1968，Роль Угленосных Толщ В Процессах Генерации Природного Газа，Геология Нефти и Газа，No.6，7—11.

[11] Коздов，В. П. и др.，1961，Масштабы Газообразования В Осадочных Толщах，Советская Геология，No.7，19—33.

[12]Кушнирук，В.А. 1978，Газоносность Угленосной Толщи Львовско-Волынского Угольного Бассейка，59—63，Наукова Думка.

[13]戴金星：我国台湾油气地质梗概，石油勘探与开发，1980，1。

[14]赵隆业，煤田地质勘探译文集I，1—44，煤炭工业出版社，1979。

[15]尚冠雄等，煤田地质与勘探，20—21，煤炭工业出版社，1976。

[16]汪本善等，渤海湾盆地黄骅坳陷石油演化特征及人工模拟研究，石油学报，1980，1，43—51。

[17]张曼秋，洛阳坳陷下第三系陆相沉积石油生成，石油勘探与开发，1979，6，1—12。