

吐鲁番 - 哈密盆地煤成油研究

程克明 *

(石油勘探开发科学研究院, 北京 100083)

张朝富

(吐鲁番 - 哈密石油勘探开发研究大队, 吐鲁番 838000)

摘 要

吐鲁番 - 哈密盆地是典型的煤成油盆地, 主要源岩为中、下侏罗统煤系, 煤成油的主要贡献者是基质镜质体及木栓质体。原油主要地球化学特征是富含链烷烃 (70%—80%)、高姥/植比 (6—8)、富重碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}$ 为 -26‰ 至 -23‰ PDB) 和 C_{20} 甾烷占绝对优势, 煤的生烃过程具多阶性, 早生早排是煤成油的基本特征。

关键词 木栓质体、基质镜质体、煤成油、内在水、煤的孔隙分布

所谓煤成油 (oil from coal) 系指煤及煤系泥岩内集中和分散的陆源有机物质中, 其富氢组分 (壳质组、基质镜质体等), 在弱氧化及弱还原条件下, 在煤化作用的同时所生成的液态烃类。其轻烃馏份, 在煤化作用早期 ($R^0 < 0.7\%$) 特定的地质条件下 (即具有一定的储集和封盖条件), 随煤中还存在大量的 (10%—25%) 中等以上孔隙 (孔隙直径 12—300 Å) 和大量的内在水, 轻质油从煤中排出而聚集成工业性的油气藏。

70 年代以来, 在澳大利亚的 Gippsland、印度尼西亚的 Mahakam 三角洲、加拿大 Scotia 和 Mackenzie 盆地及北海 Moli 盆地 (英国) 等都发现了一批中新世代与煤系有关的重要油气田。

中国吐鲁番 - 哈密盆地经油气源对比证实: 其主要源岩为中、下侏罗统煤及煤系泥岩。煤中基质镜质体 (占镜质组 20%—70%) 和壳质组是本区煤成油的主要生烃组分。尤其是本区煤的壳质组中木栓质体平均含量达 4%, 这是一种早期生烃物质, 其生烃历程 R^0 仅为 0.35% 即开始生烃, R^0 达 0.65% 时生烃业已结束。而且主要生成链烷烃^[1], 该组分对吐鲁番 - 哈密盆地煤成油作出了重要贡献。

1 吐鲁番 - 哈密盆地原油具典型的煤成油特征

1.1 煤成油具有显著的姥鲛烷优势

姥鲛烷是一种指相标志化合物, 由叶绿素的侧链植醇在成岩过程中演化而来。植醇在弱

1993-05-26 收稿, 1993-11-15 收修改稿。

* 参加此项工作的还有苏爱国、赵长毅、钟宁宁、何忠华等。

氧化条件下生成植酸,脱羧后生成姥鲛烷。煤及煤系泥岩中姥鲛烷含量十分丰富,煤成油中姥鲛烷也十分富集。如吐鲁番-哈密盆地一般湖相泥岩姥鲛烷比植烷其值小于 1(简称姥/植 < 1), 煤的姥/植 = 6—10, 原油的姥/植 = 6。澳大利亚 Gippsland 煤成油田陆地部分姥/植 = 4.7, 海上部分 4.07—8.81。印度尼西亚 Mahakarn 三角洲, 东、西爪哇和南、北苏门答腊煤成原油姥/植比一般高达 10—14(图 1)。

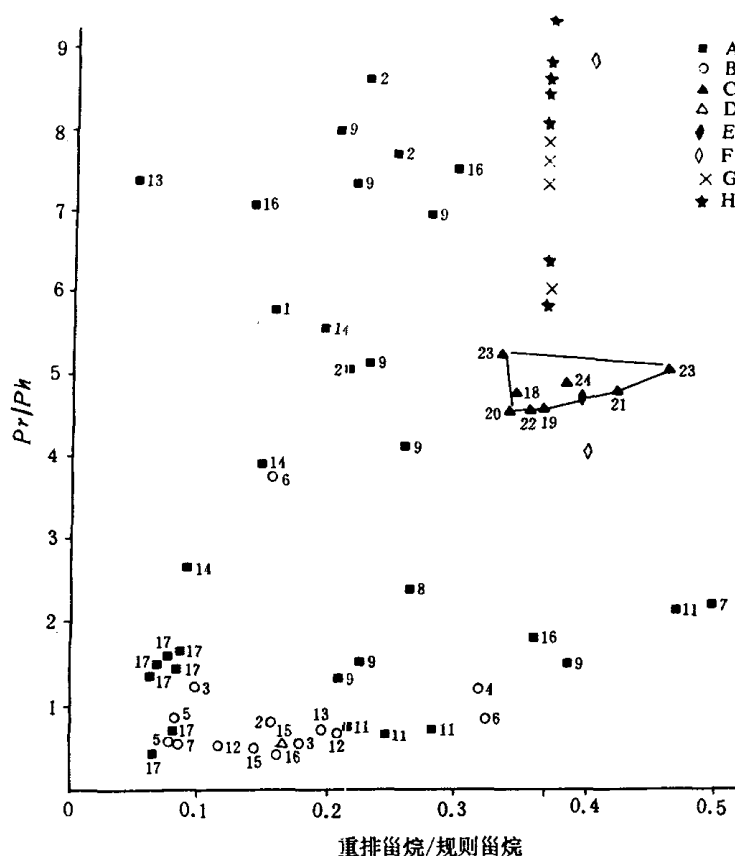


图 1 吐鲁番-哈密盆地源岩及原油 $Pr/Ph \sim$ 重排甾烷/规则甾烷关系图

A——煤, B——泥岩, C——油, D——灰岩, E(陆), F(海)——澳大利亚 Gippsland 盆地(煤), G——印度尼西亚 Cuba 盆地油样, H——印度尼西亚西北爪哇盆地油样。1——吐参 1 井(J_{1s}), 2——吐参 1 井(J_{1b}), 3——吐参 1 井(T), 4——鄯 1 井(J_{2q}), 5——台参 1 井(J_{2q}), 6——台参 1 井(J_{2s}), 7——台参 1 井(J_{2x}), 8——台参 1 井(J_{1s}), 9——台参 1 井(J_{1b}), 11——依 1 井(J_{1b}), 12——依 1 井(T), 13——托参 1 井(J_{1b}), 14——柯柯亚(J_{2x}), 15——二塘沟(Pr), 16——煤窑沟(J_{1b}), 17——艾维尔沟(J_{1b}), 18——胜 26 井, 19——七克台矿坑, 20——七克台自流井, 21——陵 2 井(J_{2s}), 22——陵 4 井(J_{2s}), 23——陵 4 井(J_{2x}), 24——鄯 4 井

1.2 吐鲁番-哈密盆地原油富重碳同位素

原油 $\delta^{13}C$ 值为 -26‰ — -23‰ , 这是典型煤成油的碳同位素特征(表 1), 天然气亦属典型的煤系成因天然气, 甲烷碳同位素 -39‰ — -41‰ ; 乙烷碳同位素 -26‰ — -27‰ ; 丙烷碳同位素 -25‰ — -26‰ ; 丁烷碳同位素 -23‰ — -24‰ 。

1.3 吐鲁番-哈密盆地原油与煤具有相似的甾烷组成

图 2 是吐鲁番-哈密盆地原油、煤及煤系泥岩中生物标记物甾烷的内分布组成, 一般 C_{27} 胆甾烷属低等水生生物来源, C_{29} 豆甾烷属陆源高等植物来源。吐鲁番-哈密盆地煤及原油中

表 1 吐鲁番 - 哈密盆地原油碳同位素值

井 号	层 位	井 深 (m)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰ PDB)
陵 2 井	J _{2s}	2694.4— 2726.8	- 26.34
陵 2 井	J _{2x}	2748.7— 2758.4	- 26.35
陵 4 井	J _{2s}	2206.0— 2227.6	- 23.57
温西 1 井	J _{2s}	2619.3— 2627.1	- 25.93
温西 1 井	J _{2x}	2813.4— 2869.0	- 25.57
温 1 井	J _{2s}	2341.0— 2362.0	- 25.57
温 1 井	J _{2x}	2764.0— 2819.6	- 24.96
哈 2 井	T	2755.0— 2778.0	- 25.84

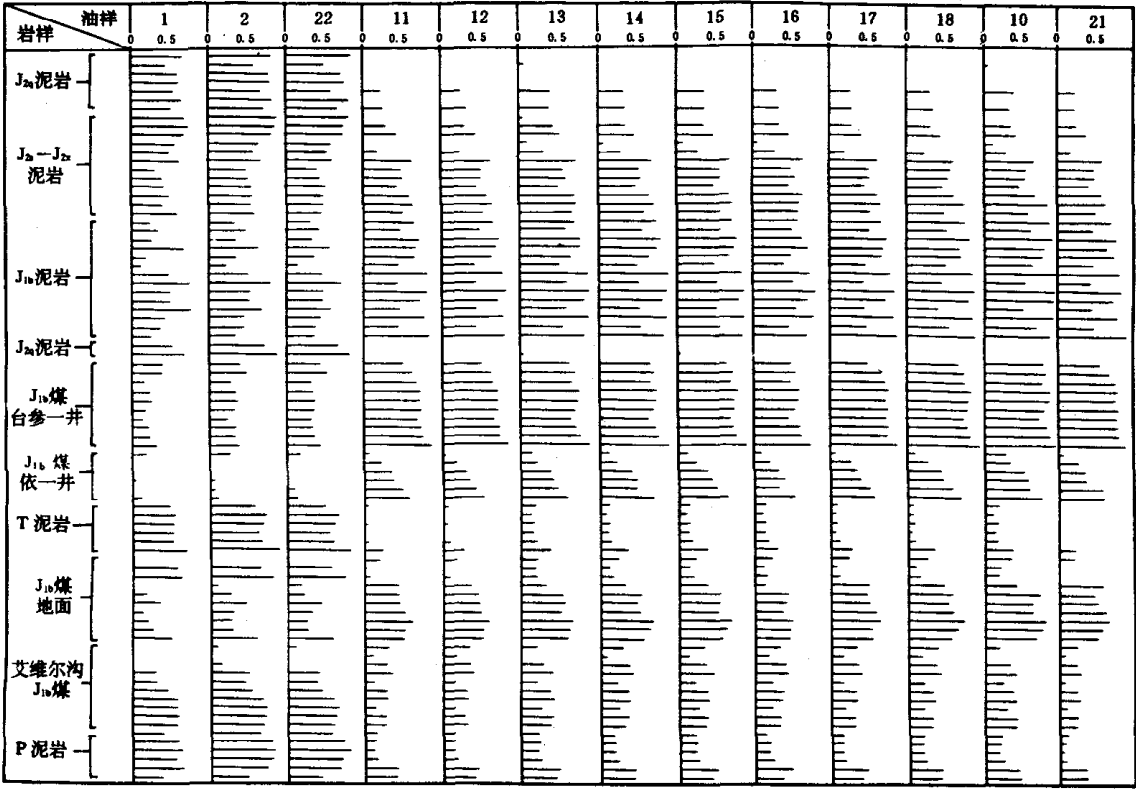


图 2 吐鲁番 - 哈密盆地油 / 岩相关系数图

1, 2 —— 胜金口原油 (J_{2q}), 22 —— 托克逊原油 (T, P₂), 10 —— 18, 21 台北凹陷“弧形带”原油

均表现为以富含 C₂₉ 甾烷为特征 (图 3), 同时也表明两者有一定的亲缘关系。

1.4 生物标记物多因素矩阵相关分析表明吐鲁番 - 哈密盆地原油主要来自中、下侏罗统煤及煤系泥岩

由图 2 可知, 吐鲁番 - 哈密盆地“弧形带”的原油主要与中、下侏罗统西山窑和八道湾煤及煤系泥岩有较好的亲缘关系, 相关系数一般大于 85%。而胜金口及托克逊原油则分别与中侏罗统七克台组和二叠系湖相泥系紧密相关 (图 2)。

2 吐鲁番 - 哈密盆地煤成油的主要生烃组分

2.1 中、下侏罗统煤的显微组成特征

吐鲁番 - 哈密盆地中、下侏罗统煤属腐植煤, 其显微组分组成以镜质组为主, 一般占 70%—80%; 壳质组加腐泥组一般在 10% 以上 (壳质组一般为 6%—8%), 隋性组分一般为 10%—20% (图 4)。

值得提出的是本区基质镜质体在镜质组中占有较高比例, 一般可占全煤的 20%—40%, 最高可达 70% (三道岭煤矿)。这种基质镜质体普遍具荧光, 在某些样品中还见有基质镜质体向沥青质体 (煤成油的表征) 过渡的现象。另外在基质镜质体中还有较多的壳屑体, 根据干酪根分类研究, 本区煤中基质镜质体应属 II 型, 是较有利的生油母质。

研究表明, 本区基质镜质体与煤的氢指数有很好线性关系 (图 5), 说明基质镜质体确实在煤成烃中做出了主要贡献。

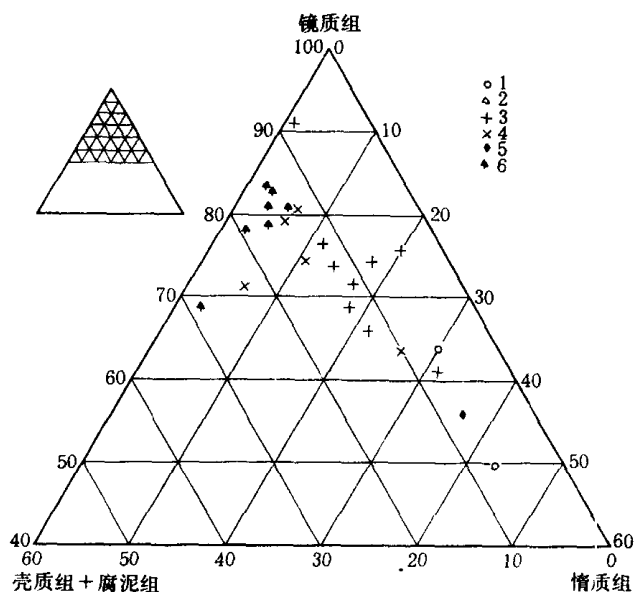


图 4 吐鲁番 - 哈密盆地煤岩显微组成三角图
1——哈参 1 井 (J_{1b}), 2——巴略煤矿 (J_{1x}), 3——台参 1 井 (J_{1b}), 4——伊 1 井 (J_{1b}), 5——托参 1 井 (J_{1b}), 6——托参 1 井 (J_{1b})

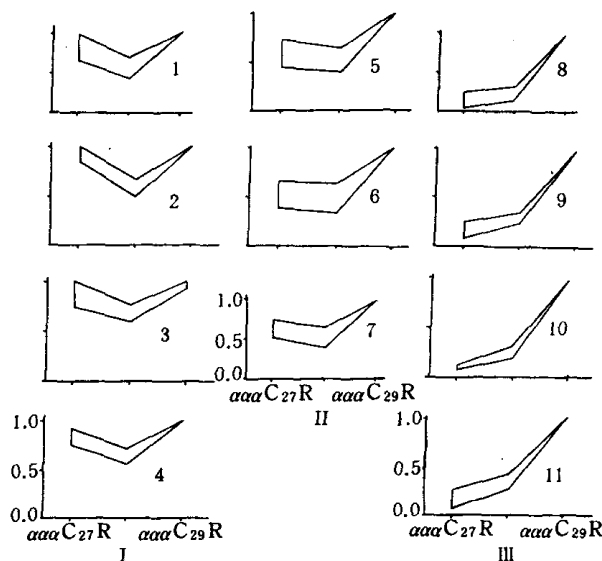


图 3 吐鲁番 - 哈密盆地各层系泥岩、煤及原油甾烷内分布组成特征

I. 对称“V”字型分布, II. 不对称“V”字型分布, III. 反“L”型分布。
1——台参 1 井 (J_{2x}) 泥岩, 2——伊 1 井 (T) 泥岩, 3——哈参 1 井 (T) 泥岩, 4——二堂沟 (P_2) 泥岩、托参 1 井原油、胜 101 井原油和胜 2b 井原油, 5——伊 1 井 (J_{1b}) 煤, 6——艾维尔沟 (J_{1b}) 煤, 7——台参 1 井 (J_{2x} — J_{2x}) 泥岩, 8——台参 1 井 (J_{1b}) 泥岩, 9——台参 1 井 (J_{2b}) 煤, 10——伊 1 井 (J_{1b}) 煤, 11——柯克亚 (J_{1b}) 煤及弧形带原油

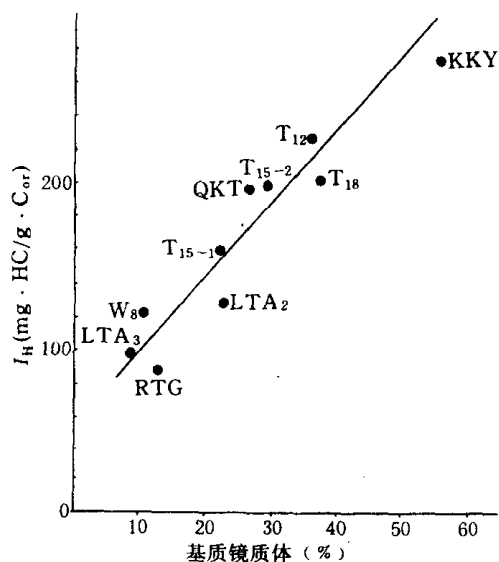


图 5 氢指数与基质镜质体含量相关图

关于基质镜质体的成因问题,除了来源于高等植物木质纤维组织的强烈的凝胶化产物外,低等生物及其他类脂化合物通过细菌降解等途径也参与了基质镜质体的形成. Casagrande^[2]对Florida泥炭中氨基酸的研究后,提出微生物至少提供了泥炭中有机物的5%—10%. 本区原油及煤中均检测出大量细菌生源的倍丰萜补身烷系列和长链三萜烷($>C_{30}$ 藿烷)的事实,也从另一个侧面证明本区煤的凝胶化过程中的确存在细菌的参与和对高等植物的改造作用.

本区煤岩另一重要特征是壳质组内富含木栓质体. 吐鲁番-哈密盆地侏罗系煤的壳质组平均6%—8%,其中木栓质体平均可达4%. 因此,人们十分关注木栓质体在煤成烃中的作用及其意义.

木栓质体起源于高等植物的木栓组织,主要存在于树皮中,但植物的根皮、果实以及愈伤组织部位也产生木栓组织. 木栓质体是煤中十分富氢的稳定组分之一,是一种早期生烃物质,由于木栓质体的化学结构所显示的低聚合度和多链状烃的特点,决定了它在源岩演化初期,在较低的热力条件下即可发生热化学蚀变,生成和释放出以链状结构为主的液态烃. 吐鲁番-哈密盆地中、下侏罗统煤岩的有机地学化学研究表明,煤中可溶有机物含量及饱和烃均与其木栓质体含量呈良好线性关系,即随着煤岩中木栓质体含量增高,煤岩中可溶有机物含量及饱和烃均随之增高. 说明本区煤的显微组分中,木栓质体也是成烃主要贡献成分之一. 本区与侏罗煤系具直接成因联系的原油中富含链烷烃(70%—80%)的事实,也从另一个侧面辅证了木栓质体对该区煤成烃的贡献.

然而,吐鲁番-哈密盆地侏罗煤系中除了基质镜质体和木栓质体对煤成烃具明显贡献之外,孢子体和角质体等稳定组分的成烃贡献亦不可忽视.

3 煤成油的多阶段性和早期性

煤中树脂体、木栓质体、孢子体、角质体、壳屑体和藻类体是富氢类脂组分,也是公认的煤中最具生烃潜力的有机显微组分. 由于这些显微组分化学成分和结构组成各异,因而每种组分都有各自的主要生烃阶段和历程. 煤在煤化生烃过程中,由于各演化阶段有不同的主要成烃贡献者(表2),如树脂体和木栓质体. 当镜质体反射率($R^0\%$)仅0.35%时就开始生烃,主要生烃阶段为 $R^0 = 0.35\%—0.65\%$,之后生烃业已结束,而孢子体、角质体及藻类体才开始大量生烃,从而导致煤成油的多阶段性.

表2 煤中常见显微组分生烃演化范围

组 分	开始生烃 ($R^0\%$)	主要生烃历程 ($R^0\%$)	生烃潜力	资料来源
树脂体	0.35	0.40—0.70	好	王铁冠等, 1990; 赵师庆等, 1990; Snowdon 等, 1982
木栓质体	0.35	0.35—0.60	好	Khorasani, G. K., 1991
镜质组	0.45	0.5—1.0	一般	Cook, A. C., 1986; Powell, T. G. 等, 1991
孢子体	0.55	0.7—0.9	好	钟宁宁等, 1981; Cook, A. C., 1986
角质体	0.50	0.7—0.9	好	Brooks, B., 1970; Cook, A. C., 1986
藻类体	0.70 0.60	0.75—0.95 0.80—1.1	极好	Cook, A. C., 1986 Tissot B. 等, 1978
壳质体	取决于来源组分的性质			

4 煤成油具有早期生烃和早期排烃特点

无论是有机地球化学家、煤岩学家以及石油地质学家都不否认煤能生烃,尤其是对煤的显微组分壳质组(孢子、花粉、树脂体、木栓质体、角质体、蜡等)一致公认其具有较大生烃潜力。研究业已证明,在煤演化的全过程中,几乎都能找到对成烃有明显贡献的有机显微组分,事实上,并非各个含煤盆地各煤阶都能找到具有工业规模的油气聚集。这不仅涉及一个聚煤盆地与聚油的地质构造条件,同时还涉及一个带根本性的问题——煤成烃的排驱机制。

为了说明上述问题,还得从煤化过程谈起。煤化过程煤的化学反应可归纳为 4 个步骤: (1)脱水作用; (2)脱羧作用; (3)脱烷基作用; (4)缩聚作用等。此外,还有明显的物理变化,如各煤阶煤中水的排出和不同孔径的孔隙变化等。

4.1 脱水及孔隙度变化

在低煤阶时非键合水的排出,这个问题已由煤化学家进行了广泛的研究^[3,4]。随煤化程度提高,水分排出的变化并不均衡,大约在 R^0 为 0.7% 以前,煤的脱水非常迅速, $R^0 > 0.7\%$ 以后,水分排出变得十分缓慢,煤中水分的含量几无明显变化。

吐鲁番 - 哈密盆地煤中含全水分(包括内在水分和润湿在颗粒表面及大毛细孔中的水)和内在水分(指吸附或凝聚在煤粒内部的毛细孔中水),在各煤阶的变化也进一步证实了前人的结论。值得注意的是,煤中水分排出的变化与孔隙度的变化有紧密的内在联系,即随着煤阶增高,煤中水的大量排出,而煤的孔隙度也正在急剧减少。在 R^0 为 0.7% 以前,吐鲁番 - 哈密盆地中、下侏罗统煤中孔隙度高达 20%—30%,当 $R^0 > 0.7\%$ 以后,孔隙度降至小于 10%,当 R^0 达 1.8% 时,孔隙度仅为 1%。上述变化规律揭示煤化过程实际也存在压实排液和生烃增压过程,同时揭示了煤成烃(尤其是液态烃)的排出最有利阶段应是早期($R^0 < 0.7\%$ 前即褐煤阶段——长褐煤阶段)。

4.2 煤的孔隙分布与煤阶关系

为了进一步研究煤成烃的排驱问题,还必须从各煤阶煤的孔隙分布入手,揭示其间的内在联系。H. Gan (1977) 利用氮和汞置换的方法研究美国煤的孔隙性与煤化作用的关系时发现,煤中孔隙直径 $> 300\text{\AA}$ 的大孔隙体积随煤化作用增高而降低,其变化趋势与煤中内在水变化规律一致,从腐植褐煤到高挥发分烟煤阶段($R^0 = 0.30\%—0.65\%$),由占总孔隙体积 80% 锐减至 20%; 其后,在中挥发份烟煤阶段,大的孔隙体积略有回升,至低挥发份烟煤阶段又下降。孔隙直径在 12—300 $\text{\AA}$ 的中孔,在高挥发份烟煤阶段前和低挥发份烟煤阶段后均极不发育,只有在中挥发份烟煤阶段比较发育,可占总孔隙体积 30%—50%。唯孔隙直径小于 12 $\text{\AA}$ 的微孔体积是随煤化程度增高一直在增加,由此看来,煤中不同孔隙直径的孔隙体积分布规律也进一步揭示了煤中液态烃的排出,必须在中挥发份烟煤阶段及其以前。因为煤成烃中的复杂的链状结构及沥青分子直径一般均大于 10—30 $\text{\AA}$, 沥青分子直径为 50—100 $\text{\AA}$, 中孔隙都排不出来,只有大孔隙直径方能排出,而中孔隙及微孔隙仅能排出环己烷以上的分子(表 3)。

综上所述,由于煤的孔隙分布随煤阶的变化及其对烃类排驱的可能影响,看来,低煤阶阶段($R^0 < 0.7\%$)应是煤成油释放和排驱最有利时期,煤中早期演化阶段生成液态烃可能是煤成油有效聚集的先决条件之一。后期生成的烃类物质将被越来越发育的微孔隙所吸附,只有到更高的演化阶段热动力使之裂解为更小分子之后才得以释放。吐鲁番 - 哈密盆地中、下侏罗

表 3 石油及某些相关分子的近似有效直径

分 子	有效直径 (Å)	分 子	有效直径 (Å)
He	2.0	CH ₄	3.8
H ₂	2.3	C ₆ H ₆	4.7
Ar	2.9	正链烷	4.8
H ₂ O	3.2	环己烷	5.4
CO ₂	3.3	复杂链结构	10—30
N ₂	3.4	沥青分子	50—100

统西山窑及八道湾煤岩累计最厚达 260 余米,煤的蕴藏量十分丰富,煤中富含具荧光的基质镜质体及木栓质体均具较高生烃潜力,尤其木栓质体具早期生烃的特点,有利的生烃时期与煤的孔隙分布,最有利于烃的释放和排驱时期相一致。联系该区油气生成始于晚侏罗世末及早白垩一世初,其与燕山及喜山时期所形成的构造相匹配。这就是吐鲁番-哈密盆地煤成油气聚集成为工业油气藏的决定性因素。

参 考 文 献

- [1] Khorasani, G. K., Michelsen, J. K., *Org. Geochem*, 1991, 17: 849—863.
- [2] Casagrande, D. J., *Ann. Arbor*, 1971, 32:1.
- [3] Teichmaller, M., Ottenjann, K., *Erdöl Kohle*, 1970, 30: 387—398.
- [4] 杨 起,煤地质学进展,科学出版社,北京,1987, 156—195.