

含铀矿物对烃源岩生烃影响的热模拟研究

李斌¹, 孟自芳², 夏斌³, 宋岩¹, 李相博²

(1. 中国石油勘探开发研究院 石油地质实验研究中心, 北京 100083; 2. 中国科学院 地质与地球物理研究所 兰州油气中心, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国科学院 广州地球化学研究所 边缘海重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 采用密闭容器加水的热模拟方法, 从生烃组成特征、生烃量等方面, 探讨了含铀矿物对烃源岩热解生烃过程的影响。热模拟实验结果表明, 在暗色泥岩和煤岩样品中加入含铀矿物后, 气态烃和液态烃的生烃量都有比较明显的增加, 其中煤岩的气态烃产量平均增加值为 34%, 而泥岩样品平均增加值也达到了 30% 以上。液态烃产率分析表明, 含铀矿物也促进了泥岩和煤岩的液态烃产率。从泥岩氯仿沥青 'A' 族组成分析发现, 加入催化剂后泥岩的饱和烃和芳烃在高温阶段具有规律性的明显增大的趋势, 反映出非烃和沥青质甚至不溶有机质向相对稳定的饱和烃转化以及芳烃随演化程度增加的高聚合作用。综合以上分析, 认为放射性铀对油气生成具有积极的意义。

关键词: 含铀矿物; 热模拟; 生烃; 烃源岩

中图分类号: P579; TE122.1⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2008)01-0052-07

Hydrocarbon-generating thermal simulation of uranium-bearing minerals

LI Bin¹, MENG Zi-fang², XIA Bin³, SONG Yan¹ and LI Xiang-bo²

(1. Research Institute and Central Laboratory of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China;
2. Lanzhou Oil and Gas Center of Beijing Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Based on the thermal simulation method of closed container with water, the authors studied experimentally characteristics of hydrocarbon-generation composition and volume, and probed into the effect of uranium-bearing minerals on the hydrocarbon process. It is suggested that the volumes of gaseous and liquid hydrocarbon obviously increase after the addition of uranium-bearing minerals as catalyzer to mudstone and coal samples. The gaseous hydrocarbon yield of the coal samples increases by 34% on average, and mudstone samples by 30% or more. The liquid hydrocarbon productivity shows that the uranium-bearing minerals promote the liquid hydrocarbon yield of mudstone and coal samples. It is found that the regular increase of saturated hydrocarbon and arene is obvious during the high temperature stage with uranium-bearing minerals as catalyzer, as is shown by analyzing the composition of chloroform asphalt 'A' of mudstone. The authors have reached the conclusion that the high polymerization is increased with the evolution of arene and the non-hydrocarbon and asphalt, and even the insoluble matters can be transformed into saturated hydrocarbon. A comprehensive study shows that the radioactive uranium plays an active role in hydrocarbon generation.

Key words: uranium-bearing mineral; thermal simulation; hydrocarbon generation; source rock

鄂尔多斯盆地是我国第二大盆地,也是我国石油、天然气、铀矿等多种矿产资源广泛分布的一个聚宝盆(关士聪等,1981;戴金星,1981;王双明等,1999;狄永强,2002;席胜利等,2003)。目前我国在鄂尔多斯盆地石油天然气勘探开发取得重要进展的同时,也在多处发现了相当规模的层间氧化带砂岩型铀矿,这标志着我国地浸砂岩型铀矿勘查工作取得了重大突破(朱西养等,2003)。油-气-煤-铀同盆共存是沉积环境中有机质演化和铀等金属元素迁移、聚集的地球化学过程和相互作用的结果。铀矿的形成对有机质生烃过程的影响以及有机和无机相互作用的机理,是目前国内外科学界关注的问题(Rouzaud *et al.*, 1980; Landais *et al.*, 1980; Curiale *et al.*, 1983; Mossman *et al.*, 1993; 尹金双等, 2005),而目前对于这一方面展开的研究尚属薄弱环节,究其原因有 3 个方面:①从传统的研究现状来看,很少有人将煤、油、气和铀纳入一个整体的系统进行研究(Lovley *et al.*, 1991; Landais, 1996; Charles, 1996; Wood, 1996);②长期以来,石油生成机理的研究主要以热催化阶段为核心(李术元等, 2002; 汪学军, 2003; 付丽, 2003; 高岗等, 2004),由于地质条件下催化作用的复杂性,其研究难度较大,至今仍存在若干争议;③由于铀矿属于稀有的国有资

源,并且具有一定的放射性,考虑到许多不可确定的因素,该领域的研究一直很难取得突破(Read *et al.*, 1998; Richard *et al.*, 1999)。

鉴于以上研究现状,结合盆地的实际地质情况,本文设计了在煤和泥岩中加入含铀矿物的生烃热模拟研究,采用密闭容器加水热模拟方法(张厚福等, 1999; 高岗等, 2003)从生烃组成特征、生烃量等方面,探讨了岩石中含铀矿物质对烃源岩热解生烃过程的影响,为进一步剖析无机和有机相互作用的机理提供科学依据。

1 样品和实验

1.1 样品

热模拟实验选用的烃源岩分别是鄂尔多斯盆地北部侏罗系直罗组煤岩和西缘上三叠统延长组 7 段的泥岩。对所采的煤岩和泥岩样品进行了有机地球化学分析(中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气中心分析),其中延长组 7 段泥岩样品的地化参数为:有机碳含量 42.14%,氯仿沥青‘A’含量 0.6757%,总烃含量 $4\ 347.1 \times 10^{-6}$,生烃潜量 23.99 mg/g,氢指数 750.00 mg/g。由此可见,长 7 样品的有机质丰度较高,烃降解能力强,是理想的实验样品。煤岩热解分析结果如表 1 所示。

表 1 煤岩样品地球化学参数特征

Table 1 Characteristics of geochemical parameters of coal samples

样品	$t_{\text{MAX}}/^{\circ}\text{C}$	$S_1/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$S_2/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	$S_3/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$	PI	S_2/S_3	PC/%	TOC/%	$\text{IH}/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}(\text{TOC})$	$\text{IO}/\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}(\text{TOC})$
煤岩	432	1.26	80.56	3.72	0.02	21.65	6.81	73.35	109	5

1.2 实验条件

热模拟实验采用含铀矿物(硝酸铀酰试剂)作为催化剂,用研磨法使之与样品混合,即将样品与催化剂按质量比 10:1 在研钵内充分研磨混合均匀。其中,矿物混合物基本上按照泥岩中的比例来配制。

热模拟实验常采用 3 种升温方式:连续程序升温、不连续程序升温 and 瞬时升温。本文采用不连续程序升温模式。根据有机质演化过程的特点,选取了 6 个温度点(250、320、370、420、500、550 $^{\circ}\text{C}$)。在有机质转化的高峰阶段,温度点较为密集,反之,则稀疏。为与其他研究者的实验对比,各温度点加热时间均为 72 h。

1.3 热压模拟实验步骤

本实验采用的反应釜为大连通产高压釜容器制

造有限公司生产的型号为 TFYXOS 和 FYX1 的高压釜。高压釜釜体、釜盖和测温管材质分别为 1Cr18Ni9Ti 和 Cr17Ni12Mo2 的合金。在每次装样品前,都依次用去离子水、甲醇和氯仿反复冲洗样品舱,然后将样品舱放入马弗炉内 600 $^{\circ}\text{C}$ 的温度加热 12 h,这样可以避免样品被污染。装样后加入适量的去离子水,以接近实际地质条件。用氮气置换 3 次,再用氮气置换 3 次,最后一次将样品舱内充满氮气(1 个大气压),进行焊封后放入高压釜内加热。以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 程序升温至设定温度后恒温 72 h。温度由数字温控仪控制,误差为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。加热时间结束后关闭电源,待高压釜自然冷却至室温,利用排饱和食盐水集气的方法定量收集热解气态产物。液态烃的萃取是依次用去离子水、甲醇和氯仿反复冲洗样品舱,把

样品冲洗出来,将其在室温下干燥后用氯仿索氏抽提器抽提 72 h 得到氯仿沥青 'A' 并定量分析,再用甲醇抽提得到 '甲醇抽提物' 并定量分析。

1.4 仪器测试

气态产物用 HP5890 II 色谱仪进行气相色谱分析。色谱条件:MS 分子筛(φ 3 mm \times 2.4 m)柱、GDX-50X(φ 3 mm \times 4 m)柱,柱温:从始温 30.0 $^{\circ}$ C (3.7 min)以 70 $^{\circ}$ C/min 的速率升到 160 $^{\circ}$ C,载气:Ar 99.999% 柱前压 200 kPa,进样口温度 120 $^{\circ}$ C 检测器温度 180 $^{\circ}$ C 检测器:TCD、FID,进样量 10 mL。

$\delta^{13}\text{C}$ 分析在 Delta-plus-XP 同位素质谱仪上完成。色谱条件:采用 Al_2O_3 色谱柱,进口分流比 1:1;进样口温度 50 $^{\circ}$ C 流量 10 mL/min,恒流,升温程序:始温 30 $^{\circ}$ C (5 min),15 $^{\circ}$ C/min 升温速率升至 200 $^{\circ}$ C (3 min),碳同位素组成相对于 PDB 标准误差为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

2 结果和讨论

2.1 热解气态产物组成特征

从表 2 和图 1 的分析来看:① 含铀物质的加入显著增加了有机质热解的气态烃的生烃量,对于煤岩来说,其气态烃量的增加值在 250 $^{\circ}$ C 时为 62%,320 $^{\circ}$ C 时为 40%,370 $^{\circ}$ C 时为 33%,420 $^{\circ}$ C 时为 10%,500 $^{\circ}$ C 时为 20%,550 $^{\circ}$ C 时为 40%,平均增加值为 34%,而对于泥岩样品来说,平均增加值也达到了

表 2 热解气态烃产量数据表 mL/g

Table 2 Results of thermal hydrocarbon gas generation

温度/ $^{\circ}$ C	250	320	370	420	500	550
煤岩	13.33	16.67	41.67	95.00	160.00	198.33
煤岩加铀	21.67	23.33	54.33	104.00	192.00	282.67
泥岩	17.67	20.00	23.33	19.00	20.00	20.00
泥岩加铀	22.67	25.67	28.67	33.33	40.00	35.67

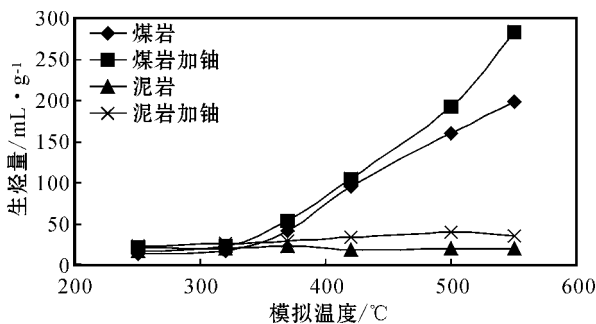


图 1 热模拟实验产烃率变化图

Fig. 1 Hydrocarbon-generation curves of thermal simulation

30% 以上。② 岩石加入催化剂与原岩的生烃量随温度变化的趋势是相同的,煤岩样品气态烃生烃量随温度的增加而增加,而泥岩样品气态烃生烃量随温度的增加略有增大。

热模拟气态产物主要由烃类和非烃类组成。烃类以甲烷为主,乙烷、丙烷、丁烷、戊烷等含量依次降低,这与天然气的组成变化较接近。但模拟气体中有一定量的烯烃,这主要与实验反应时间有限、反应体系不同于地下烃源岩所处的半开放体系以及油气运移条件等有关。大量的非烃气体包括 CO_2 、 H_2 、 N_2 、 CO 等。根据热模拟结果,结合岩石样品用量与有机碳含量可计算总气体的产率。非烃中 H_2 含量较高,并且随温度升高而增加。在高温加水反应体系中, H_2 可能来源于体系中自由基反应中的水和烃、烷烃直接脱氢、链烷烃的环化和芳构化。

2.1.1 非烃气体组成及演化

由图 2 可见,从非烃组成中,一般泥岩样品的 CO_2 产量高于煤岩样品, CO 和甲烷的产量低于煤岩样品,低温阶段泥岩的总烃产量高于煤岩样品,高温阶段煤岩样品的总烃产量高于泥岩。加入了催化剂后泥岩的 CO_2 产量增加,尤其是在高温阶段($> 300^{\circ}\text{C}$);总烃的产量也有提高。但是,甲烷的产量在温度 370 $^{\circ}$ C 左右达到高峰,超过了原岩的产量,以后就降低了,而原岩的甲烷产量随温度增加不断增高。煤岩的变化比较明显:加入了催化剂的煤岩样品 CO_2 产量高于原岩,甲烷的产量低于原岩。

从图 2 中还可以看出,总烃和甲烷的生成量成正比,泥岩的 CO 和 CO_2 的生成量之间存在负相关的关系。其原因可能与水的放射性分解有关(张厚福等,1999):含铀矿物的放射性元素所产生的大量 α 粒子,将导致水的放射性分解 H_2 ,反应过程为: $\text{H}_2\text{O} + (\alpha \cdot \gamma) \rightarrow \text{H}^* + \text{OH}^*$, $2\text{OH}^* \rightarrow \text{HOOH}$, $2\text{HOOH} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$, $2\text{H}^* \rightarrow \text{H}_2$ (* 表示自由基)。1 个能量为 1MeV 的 α 粒子的能量可以促使 105 个水分子电离。同时,在该反应进行中,还存在如下反应: $2\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$ 。

由此可见,水参与反应,对甲烷的形成起到了至关重要的作用(高岗等,2003),而地下烃源岩一般都含水,表明模拟结果更接近于自然的实际情况。鄂尔多斯盆地含铀砂岩中大量氢气的存在不仅为砂岩型铀矿的成矿作用提供了有利环境,而且对该盆地有机质的成烃作用和油气的形成演化也将有重要贡献。

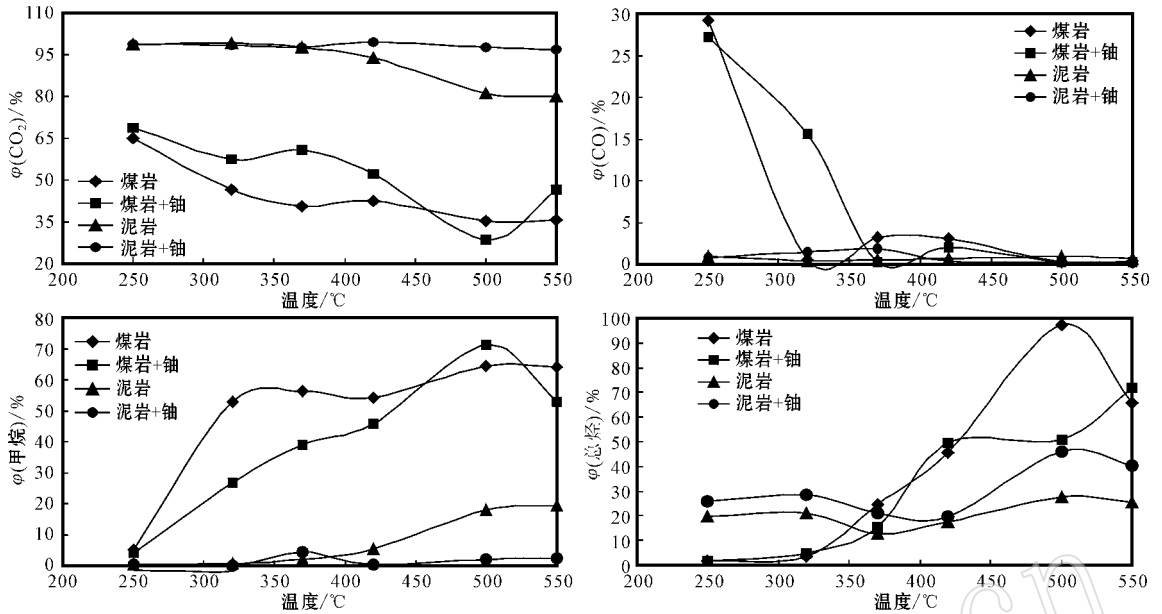


图 2 模拟气态组分和总烃体积分数-温度变化图

Fig. 2 Simulated gaseous components and total hydrocarbon volume versus temperature variation curves

2.1.2 气态烃组成及演化

热模拟的气态烃组成均以甲烷为主,并且随着碳数增加,烃类的总量逐渐降低,符合热裂解的基本特征。从表 3、图 3 可以看出,煤岩加催化剂和原岩的组分类似,表明含铀矿物对煤岩的烃类组分影响不大。但是,泥岩加入了催化剂后变化明显,原岩中

含有较高的异丁烷和正丁烷,但泥岩加入催化剂后却几乎没有丁烷,并且乙烷和丙烷的产量都低于原岩的产量,甲烷的产量却相反,这说明催化剂增加了烃类组分中碳链的断裂,促进了甲烷的生成。

2.2 热解液态烃组成及演化

在热模拟实验中,液态烃产率是指单位原始有

表 3 热解气态组分正丁烷-异丁烷的体积分数-温度数据表

$\varphi_B/\%$

Table 3 Volume fraction and temperature of composition of thermal hydrocarbon-generation (normal butane-isobutane)

温度/°C	异丁烷(煤岩)	正丁烷(煤岩)	异丁烷(煤岩+铀)	正丁烷(煤岩+铀)	异丁烷(泥岩)	正丁烷(泥岩)	异丁烷(泥岩+铀)	正丁烷(泥岩+铀)
320	0.65	1.396	0.65	1.286	0	0	0	0
370	1.52	2.84	1.3	2.7	1.35	2.92	0	0.794
420	0.98	1.55	0.885	1.135	2.36	0.81	0	0

机碳在各模拟温度点生成液态烃的数量,是有机质产烃潜力的重要指标之一(傅家谟等,1990;王兆云等,1995)。从表 4 和图 4 可以看出,煤岩、泥岩加入催化剂后和原岩的液态烃产率变化特征不同。煤岩加入含铀矿物后,产烃率变化较为复杂:在低温阶段(250°C)和高温阶段(500°C)出现生烃高峰(1.33 mg/g·TOC)后,其余温度段皆为产烃率低峰阶段,除了低温阶段和原岩的变化不同外,总体产烃率变化趋势是相同的。泥岩加入催化剂后和原岩产烃率变化趋势基本一致,但从图 4 中看出,泥岩加入含铀矿物后,产烃率整体得到提高,表明含铀矿物增进了泥岩的液态烃生成。随着模拟温度升高,煤岩和泥岩等的产油率经过高峰后都逐渐降低。

2.2.1 泥岩液态烃组成分析

从泥岩和含铀矿物的族组成演化图(图 5)中可以看出,由于含铀矿物的加入,使烃类产物发生了一定的变化:饱和烃的演化形态和原岩相似,只是产率高峰期为 0.7 mg/g·TOC,温度为 420°C,而原岩的产率高峰为 0.24 mg/g·TOC,温度为 500°C,表明催化剂增加了饱和烃的产率,并且提前了产率高峰约 80°C。芳烃的变化趋势与原岩相似,但产率整体高于原岩,不同的是产率最低值比原岩晚约 50°C,表明催化剂增加了芳烃的产率。沥青质在低温阶段达到最高峰(0.69 mg/g·TOC)后开始降低,在生烃高峰过后降为最低(0.05 mg/g·TOC),然后在高温阶段,产率上升,和原岩持续升高不同,在 500°C 后降低,表

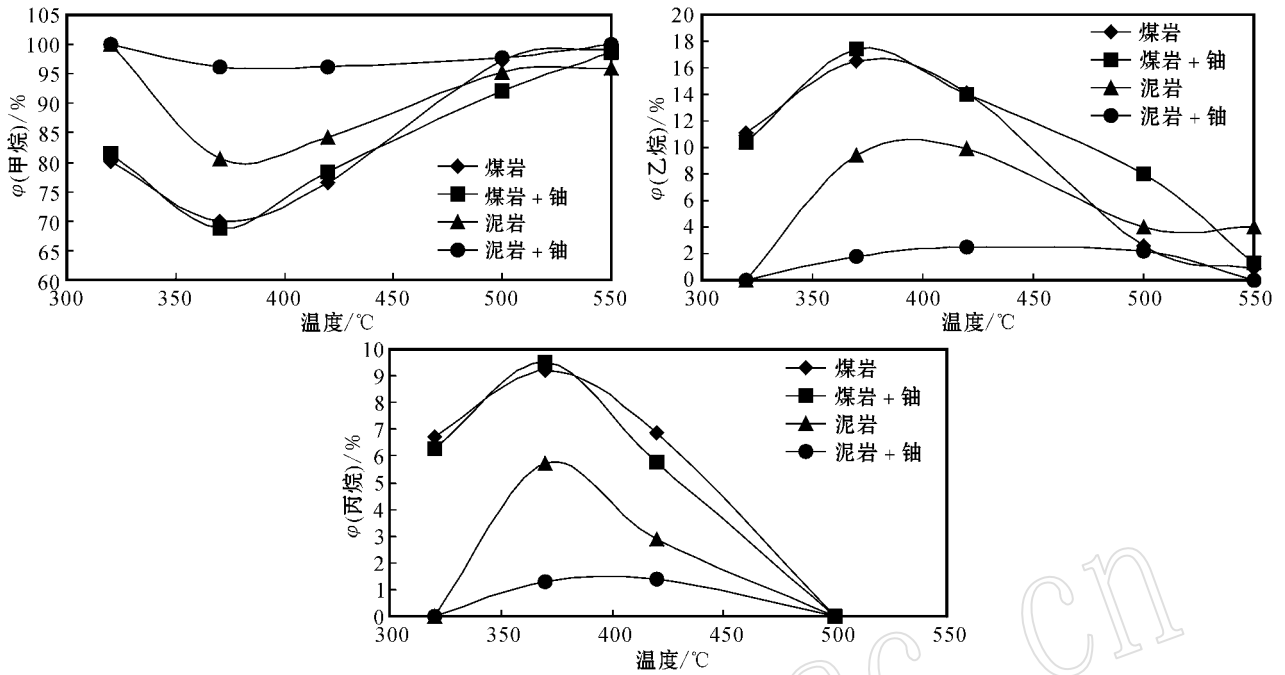


图 3 热解气态组分体积分数-温度变化图

Fig. 3 Curves of volume fraction and temperature of thermal hydrocarbon-generation

表 4 暗色泥岩和煤岩的液态烃产率 mg/g·TOC

Table 4 Productivity of liquid hydrocarbon-generation of mudstone and coal

温度/°C	250	320	370	420	500	550
煤岩	0.59	0.95	0.47	0.39	0.89	0.80
煤岩加铀	1.33	0.69	0.48	0.25	1.33	0.78
泥岩	6.73	40.02	33.67	0.45	0.91	0.66
泥岩加铀	16.01	42.81	48.90	0.62	1.90	1.13

明含铀物质促进了沥青质向饱和烃或芳烃转化。非烃的变化不大,在生烃高峰期,原岩非烃产率达到最高(0.43 mg/g·TOC),之后趋于降低;而加入催化剂后,在低温阶段,非烃产率达到最高(0.32 mg/g·TOC),然后趋于降低,整体产率低于原岩,表明催化剂抑制了非烃的生成。

综合分析发现,延长组泥岩热裂解具有一般烃源岩的地球化学特征,温度在 400°C 以前,为成熟-高成熟作用阶段,热解沥青中以沥青质+非烃为主,随着演化程度进一步增高,沥青质含量明显减小,而烃类含量迅速增加。因为一般认为沥青质是成油、成气的中间产物,随热演化程度的加深,一部分沥青质受热裂解的作用而转化为烃类,其中相当部分为液态烃。在 400°C 以后的演化过程中,泥岩已相当于过成熟阶段,氯仿沥青 'A' 含量降低,这是因为液态烃类大量地裂解成气的缘故。加入催化剂后泥岩的饱和烃和芳烃在高成熟阶段具有规律性的明显增大趋势,反映出非烃和沥青质,甚至不溶有机质向相对稳定的饱和烃转化以及芳烃随演化程度增加的高聚合作用。

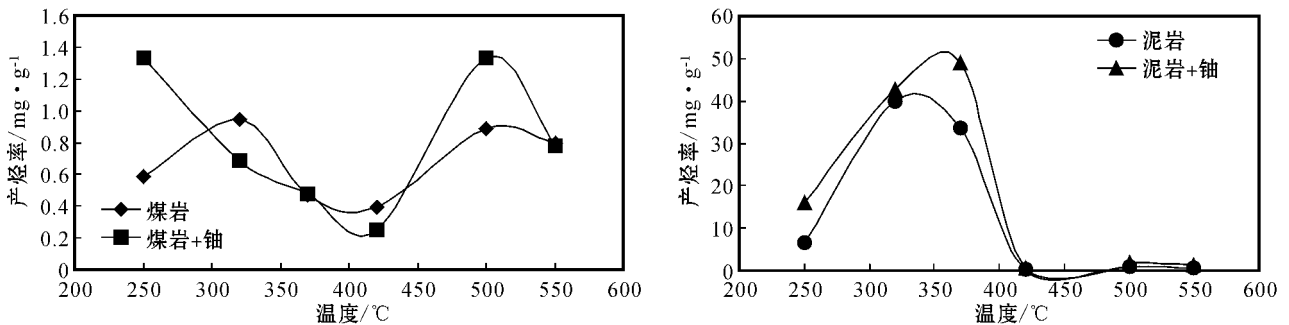


图 4 煤岩和泥岩及其加入含铀矿物的液态烃产率图

Fig. 4 Curves of productivity of liquid hydrocarbon-generation of coal and mudstone with the addition of uranium-bearing minerals

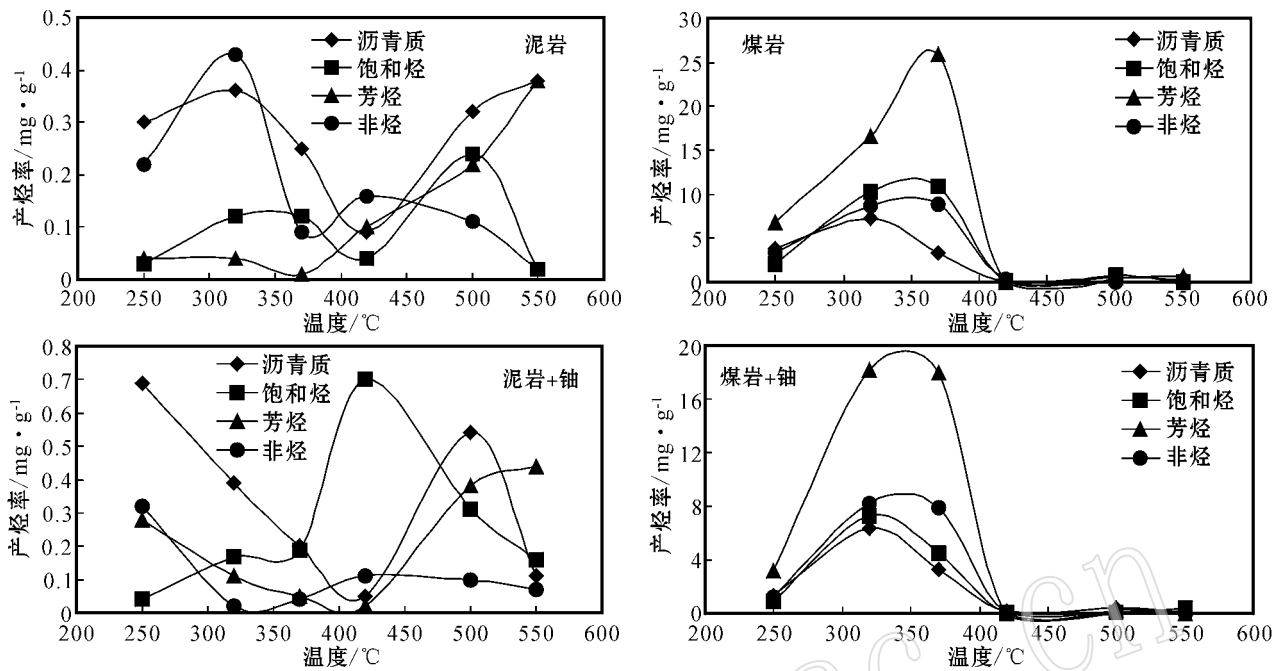


图 5 泥岩和煤岩及其加入含铀矿物不同温度的族组成产率变化

Fig. 5 Curves of hydrocarbon generation at different temperatures of mudstone and coal with the addition of uranium-bearing minerals

2.2.2 煤岩液态烃组成分析

侏罗系直罗组煤岩热解沥青族组成的变化特征具有明显的规律性：氯仿沥青‘A’含量先增后降，温度于 350°C 时达到最大值；350°C 以后呈现跳跃性的下降。整个热演化过程中，总烃含量始终大于非烃和沥青质。煤岩加入催化剂和原岩的烃类族组分变化趋势非常相似，氯仿‘A’族组成中芳烃 > 饱和烃，非烃 > 沥青质，区别主要在低温阶段 (< 400°C)。从图 5 中明显看到，加入催化剂后，氯仿沥青‘A’含量明显降低，其中非烃和沥青质保持不变，但是饱和烃和芳烃含量明显偏小，表明有一定数量的沥青质和非烃组分，受热力作用裂解，转化为烃类。对应图 1 的分析，此时煤岩加入催化剂后气态烃生成量明显增大，表明催化剂促进了液态烃向气态烃的转化。

3 结论

(1) 热模拟实验的结果表明，在暗色泥岩和煤岩样品中加入含铀矿物后，气态烃和液态烃的生烃量都有比较明显的增加。这说明含铀物质加速了有机质的热解，使煤样气态烃量的平均增加值为 34%，泥岩样品平均增加值也达到了 30% 以上。

(2) 非烃气体的组成表明，含铀矿物促进了 CO₂ 的

生成量，抑制了甲烷的生成。烃类气体的组成表明，含铀矿物对煤岩的烃类气体影响不大，但对泥岩的烃类组成有重要影响，含铀矿物促进了碳链的断裂，使高碳数气态烃向低碳数转化，增大了甲烷的生成量。

(3) 液态烃产率分析表明，含铀矿物促进了泥岩和煤岩的液态烃产率。从泥岩液态烃族组成分析发现，加入催化剂后泥岩的饱和烃和芳烃在高成熟阶段具有规律性的明显增大趋势，反映出非烃和沥青质，甚至不溶有机质向相对稳定的饱和烃转化以及芳烃随演化程度增加的高聚合作用。煤岩加入催化剂后的烃类族组分变化趋势与原岩相似。

综上所述可以推断放射性铀对油气生成具有促进作用，即铀矿的放射性对油气生成具有积极意义。

References

- Charles S.S. 1996. The role of organic matter in the formation of uranium deposit in sedimentary rocks [J]. *Ore Geology Reviews*, (11): 53~69.
- Curiale J.A., Bloch S., Rafalska-Bloch J., et al. 1983. Petroleum-related origin for uraniumiferous organic-rich nodules of Southwestern Oklahoma [J]. *AAPG Bull.*, 67: 588~608.
- Dai Jinxing. 1981. The distribution of oil and gas in ancient China [J]. *Oil and Gas Geology*, 2(3): 292~299 (in Chinese with English abstract).
- Di Yongqiang. 2002. Preliminary discussion on prospecting potential for sandstone-type uranium deposit in Meso-Cenozoic basins, northern

- Ordos basin[J]. Uranium Geology, 18(6): 340~347(in Chinese with English abstract).
- Fu Jiamo, Liu Dehan and Sheng Guoying. 1990. Geochemistry of Coal Hydrocarbon Generation[M]. Beijing: Science Publication, 182~327(in Chinese).
- Fu Li. 2003. Hydrous thermal simulating experiment on hydrocarbon generation of coal in Hailaer basin[J]. Geology-Geochemistry, 31(2): 100~104(in Chinese).
- Gao Gang, Jiang Zhenxue, Zhao Zhe, et al. 2004. Influence of temperature increase velocity to the hydrocarbon formation of source rock by hydrolysis[J]. Natural Gas Geoscience, 15(5): 461~464(in Chinese).
- Gao Gang, Wang Yanbin, Han Dexin, et al. 2003. Comparison of the characteristics of thermally simulative gas from two types of coal[J]. Geology Geochemistry, 30(3): 92~97(in Chinese with English abstract).
- Guan Shicong, Yan Xiugang, Rui Zhenxiong, et al. 1981. The analysis of prospect to Chinese petroleum resources[J]. Oil and Gas Geology, 2(1): 47~74(in Chinese with English abstract).
- Landais P. 1996. Organic geochemistry of sedimentary uranium ore deposit[J]. Ore Geology Reviews, (11): 335~511.
- Landais P and Connan J. 1980. Relation uranium-matiere organique dans deux bassins permienens francais: Lodeve(Herault) et Cerilly-Bourbon-L'Archambault(Allier)[J]. Bull. Cent. Rech. Explor. Prod. Elf-Aquitaine, 4(2): 709~757.
- Li Shuyuan, Lin Shijing, Guo Shaohui, et al. 2002. The influence on thermal hydrocarbon generation of kerogen adding mineral[J]. Journal of the University of Petroleum, China, 26(1): 69~74(in Chinese).
- Lovley D R, Oberlin A, Trichet J, et al. 1991. Microbial reduction of uranium[J]. Nature, (350): 413~416.
- Mossman D J, Bartholomew N and Davis D W. 1993. Hydrothermal alteration of organic matter in uranium ores, Elliot Lake, Canada: Implications for selected organic-rich deposits[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 57: 3 251~3 259.
- Read D, Ross D and Sims R J. 1998. The migration of uranium through clastic sandstone: the role of low molecular weight organics in enhancing radionuclide transport[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 35: 235~248.
- Richard J M, John J L and Bruce D H. 1999. The sorption of thorium (IV) and uranium (VI) to hematite in the presence of natural organic matter[J]. Colloids and Surfaces, 157: 47~62.
- Rouzaud J N, Oberlin A and Trichet J. 1980. Interaction of uranium and organic matter in uraniferous sediments[A]. Douglas A G and Maxwell J R. In Advances in Organic Geochemistry[C]. Oxford: Pergamon Press, 505~516.
- Wang Shuangning and Zhang Yuping. 1999. Study on the formation, evolution and coal-accumulating regularity of the Jurassic Ordos basin[J]. Earth Science Frontiers, (6 Supp.): 147~155(in Chinese with English abstract).
- Wang Xuejun. 2003. A research on the inorganic carbon dioxide from rock by thermal simulation experiments[J]. Advance in Earth Sciences, 18(4): 515~520(in Chinese).
- Wang Zhaoyun, Cheng Kening and Zhang Bosheng. 1995. Characteristics and evolution of gas in thermal simulation with water experiment[J]. Petroleum Exploration and Development, 22(3): 36~40(in Chinese).
- Wood S A. 1996. The role of humic substances in the transport and fixation of metals of economic interest (Au, Pt, Pd, U, V)[J]. Ore Geology Reviews, (11): 1~31.
- Xi Shengli, Liu Xinshe, Fu Jinhua, et al. 2003. The analysis of Mesozoic resources in Ordos basin[A]. Engineering Institute of China, Energy and Mineral Resources of Around Pacific Ocean Council, Petroleum Institute of China. The Prospect of International Exploration of 21 Centuries China[C]. Beijing: Petrochemical Publication, 553~557(in Chinese).
- Yin Jinshuang, Xiang Weidong, Ou Guangxi, et al. 2005. Sandstone-type uranium mineralization with respect to organic matter, microbe, and oil and gas[J]. Uranium Geology, 21(5): 287~297(in Chinese with English abstract).
- Zhang Houfu, Fang Chaoliang, Zhang Zhihuan, et al. 1999. Petroleum Geology[M]. Beijing Oil Industry Publication, 62~63(in Chinese).
- Zhu Xiyang, Wang Yunliang, Wang Zhichang, et al. 2003. Trace element geochemistry of sandstone-type uranium deposits in Dongsheng area[J]. Geology-Geochemistry, 31(2): 39~45(in Chinese).

附中文参考文献

- 戴金星. 1981. 我国古代发现石油和天然气的地理分布[J]. 石油与天然气地质, 2(3): 292~299.
- 狄永强. 2002. 试论鄂尔多斯北部中生代盆地砂岩型铀矿找矿前景[J]. 铀矿地质, 18(6): 340~347.
- 傅家漠, 刘德汉, 盛国英. 1990. 煤成烃地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 182~327.
- 付丽. 2003. 海拉尔盆地乌9井煤含水热模拟生烃实验研究[J]. 地质地球化学, 31(2): 100~104.
- 高岗, 姜振学, 赵喆, 等. 2004. 加水模拟条件下升温速率对烃源岩成烃特征的影响[J]. 天然气地球科学, 15(5): 461~464.
- 高岗, 王延斌, 韩德馨, 等. 2003. 煤的加水热模拟气特征对比[J]. 地球化学, 30(3): 92~97.
- 关士聪, 阎秀刚, 芮振雄, 等. 1981. 对我国石油天然气远景资源的分析[J]. 石油与天然气地质, 2(1): 47~74.
- 李术元, 林世静, 郭绍辉, 等. 2002. 矿物质对干酪根热解生烃过程的影响[J]. 石油大学学报(自然科学版), 26(1): 69~74.
- 王双明, 张玉平. 1999. 鄂尔多斯盆地侏罗纪盆地形成演化和聚煤规律[J]. 地学前缘(增刊): 147~155.
- 王学军. 2003. 沉积岩中无机CO₂热模拟实验研究[J]. 地球科学进展, 18(4): 515~520.
- 王兆云, 程克明, 张柏生. 1995. 加水热模拟实验气态产物特征及演化规律研究[J]. 石油勘探与开发, 22(3): 36~40.
- 席胜利, 刘新社, 付金华, 等. 2003. 鄂尔多斯盆地中生界资源潜力分析[A]. 中国工程院 环太平洋能源与矿产资源理事会, 中国石油学会. 21世纪中国暨国际油气勘探展望[C]. 北京: 中国石化出版社, 553~557.
- 尹金双, 向伟东, 欧光习, 等. 2005. 微生物、有机质、油气与砂岩型铀矿[J]. 铀矿地质, 21(5): 287~297.
- 张厚福, 方朝亮, 张枝焕, 等. 1999. 石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 62~63.
- 朱西养, 汪云亮, 王志畅, 等. 2003. 东胜砂岩型铀矿微量元素地球化学特征初探[J]. 地质地球化学, 31(2): 39~45.