

三塘湖盆地二叠系干酪根热模拟气体产物的地球化学特征

杜军艳, 程 斌, 廖泽文*

(中国科学院 广州地球化学研究所 有机地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘 要: 针对三塘湖盆地的主力烃源岩二叠系芦草沟组泥质烃源岩开展封闭体系和半开放体系热模拟实验, 前者将干酪根密封在金管中开展实验、后者直接对烃源岩样品进行压机半开放体系热解模拟, 对实验中生成气体的组分和稳定碳同位素进行分析。实验结果显示, 两种热解方法以无机气体生成为主, 包括 CO₂、H₂、H₂S 和 N₂ 等, 其中 CO₂ 含量最丰富, 这与样品干酪根中丰富的氧含量一致。半开放体系模拟实验温度达到 480 °C 时, 气态烃的含量达 40.64%, 其中甲烷含量达到 26.10%, 封闭体系中随着模拟温度升高烃类气体产物的碳同位素呈现先变轻后变重的趋势, 但同位素分馏程度不大, CH₄ 气体的 δ¹³C 值分布在 -40.2‰ ~ -46.6‰ 之间, C₂H₆ 分布在 -34.3‰ ~ -38.0‰ 之间, C₃H₈ 分布在 -33.6‰ ~ -36.0‰ 之间, 而 CO₂ 气体 δ¹³C 值分布在 -32.8‰ ~ -28.8‰ 之间。三塘湖盆地针对气藏的勘探已经有所发现, 但有关气藏的地球化学特征报道较少, 该工作中的模拟实验结果可为三塘湖盆地深入的气藏地球化学勘探提供基础数据。

关键词: 干酪根; 气体特征; 模拟实验; 三塘湖盆地

中图分类号: P597 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2014)05-0510-08

Geochemical characterization of gaseous pyrolysates from a Permian kerogen of Santanghu Basin

DU Jun-yan, CHENG Bin and LIAO Ze-wen*

(State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: This work was carried out to study the geochemical characteristics of gaseous pyrolysates from Permian argillaceous source rocks of Santanghu Basin, from the closed and semi-open systems, respectively. Kerogens prepared from the source rocks were sealed into golden tubes for the closed-pyrolysis, while the source rocks were used directly for the semi-open system. The composition and stable carbon isotope of the gas generated were analyzed. The results show that, for both pyrolysis systems, inorganic gas were the main products including CO₂, H₂, H₂S, N₂. The proportion of CO₂ was the highest due to the abundant oxygen content in the kerogens; for the semi-open system, the relative percentage of gaseous hydrocarbons can be up to 40.64%, and the relative percentage of methane is as high as 26.10% when the temperature reaches 480 °C. With the increasing temperature, the stable carbon isotope ratios of gaseous hydrocarbons from closed system first become lighter and then heavier, with the δ¹³C of CH₄ ranging from -40.2‰ to -46.6‰, C₂H₆ -34.3‰ ~ -38.0‰, C₃H₈ -33.6‰ ~ -36.0‰ and CO₂ -32.8‰ ~ -28.8‰. Gas reservoir has been found in the Santanghu Basin, NW China, but little have been reported on the geochemical characteristics of the gas. Basic data are provided in this work for further petroleum exploration of the Santanghu Basin.

Key words: kerogen; gas characterization; simulation experiments; Santanghu Basin

收稿日期(Received): 2013-08-14; 改回日期(Revised): 2013-11-14; 接受日期(Accepted): 2014-04-09

基金项目: 国家油气重大专项(2011ZX05008-02)

作者简介: 杜军艳(1986-), 女, 博士研究生, 油气地球化学专业。E-mail: dujunyan@gig.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): LIAO Ze-wen, E-mail: liaozw@gig.ac.cn; Tel: +86-20-85290190

0 引言

三塘湖盆地(图 1)位于新疆东北缘,北与蒙古国接壤,南与吐哈盆地毗邻,盆地整体呈 NW-SE 向狭长带状分布,东西长约 500 km,宽 40~70 km,盆地面积约为 2.3 万 km²。大体位于北纬 43°25′~45°00′,东经 91°31′~95°45′。

三塘湖盆地为多期叠加、改造型盆地,盆地现今构造格局包括东北冲断隆起带、中央拗陷带和西南逆冲推覆带 3 个一级构造单元,而中央拗陷带内部又呈现自西向东的汉水泉凹陷、石头梅凸起、条湖凹陷、岔哈泉凸起、马朗凹陷、方方梁凸起、淖毛湖凹陷、苇北凸起和苏鲁克凹陷 9 个二级构造单元^[2],其中中央拗陷带是油气勘探的重点区域,从 1993 年开始大规模石油勘探和油气评价,目前已经发现北小湖油田、牛圈湖油田等多个油田和含油气构造。

近几年来,三塘湖盆地的油气勘探取得了一系列的成果:2005 年 9 月在牛 101 井首次发现工业产量的天然气资源,同年 11 月在马 8 井获高产气流;2007 年,牛东地区连打出 5 口百吨井,三塘湖原油日产量突破 1000 t;2008 年 11 月分别在马 207 井三叠系、马 208 井二叠系获得日产 17.4 m³和 13.4 m³的商业油气流。三塘湖盆地最新计算的油气资源量为石油 7.5×10⁸ t、天然气 1500×10⁸ m³,但是石油探明率为 26.6%,天然气探明率为 3.9%^[3],预示着三

塘湖盆地巨大的油气勘探潜力。

目前的油气勘探成果显示,三塘湖盆地具有工业价值的烃源岩为上三叠统和中下侏罗统煤系烃源岩、二叠系芦草沟组湖相烃源岩和下二叠统和石炭系湖相烃源岩^[4]。其中二叠系芦草沟组烃源岩是勘探重点,属于源内成藏^[4-5],马 1 井、马 6 井、马 7 井和马 500P 井分别在芦草沟组获得工业油流。现今芦草沟组仅分布在三塘湖盆地马朗凹陷和条湖凹陷南缘,马朗凹陷芦草沟组分布范围广,厚度达 400 m 以上,而条湖凹陷芦草沟组厚度约 300 m。芦草沟组在岩性上以泥岩和白云质泥岩为主,夹有凝灰岩和火山岩,形成于咸水-半咸水的湖泊中,富含藻类母质,是该盆地主要的生油层和储油层^[1]。芦草沟组烃源岩具中等到高含量的有机质丰度,以 I 型干酪根为主,热演化程度普遍不高,是三塘湖盆地的主要烃源岩^[1,6]。

气体组分的组成变化和同位素组成是判别天然气类型、确定气藏成因的有效指标。目前对于三塘湖盆地天然气地球化学特征研究较少,并且主要是针对盆地内马朗凹陷煤层气的研究,气体的烃类含量高(>90%),以甲烷为主,非烃气体以氮气和二氧化碳为主,天然气的干燥系数(C₁/∑C₁₋₅)均大于 0.9,表现出干气特征。非烃组成表现出氮气含量较高、二氧化碳含量低的特点^[7]。本工作拟对三塘湖盆地跃进沟剖面的芦草沟组灰质泥岩烃源岩进行封闭体系和半开放体系的热模拟实验,对比讨论其气体产物的地球化学特征,从而得出三塘湖盆地芦草沟

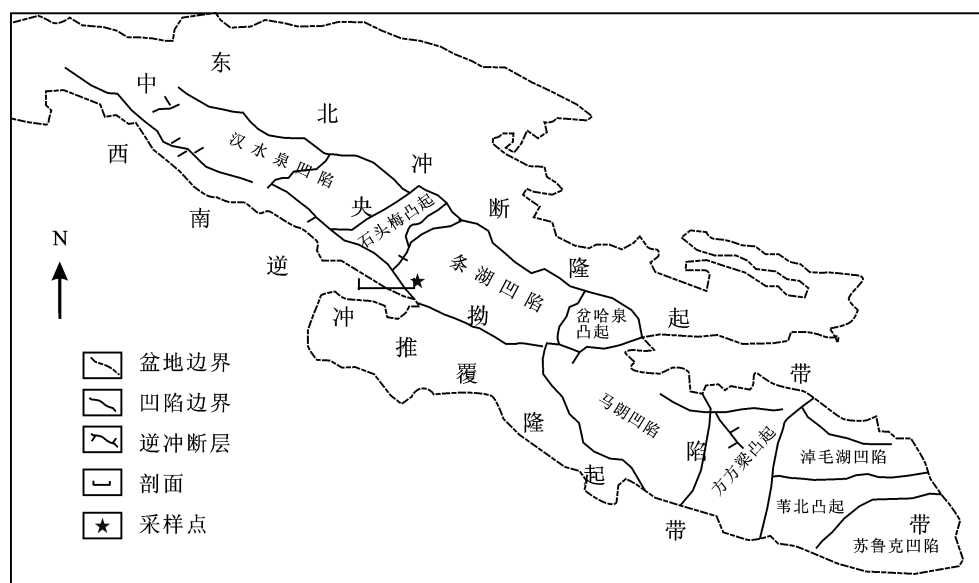


图 1 三塘湖盆地位置图及采样点(据刘延莉等^[1])

Fig.1 The location of the Santanghu Basin and the sample point

组烃源岩生气特征,期望能对三塘湖盆地天然气研究提供一些基础数据。

1 样品与实验

1.1 样品

样品采自新疆三塘湖盆地跃进沟剖面二叠系芦草沟组(P₂l)露头灰质泥岩,呈灰黑色,不污手,表面受到轻度风化。样品成熟度 R^o 为 0.52%, TOC 含量达到 10.67%,镜下观察样品中的无定形体含量高,干酪根类型为 I 型。样品具体有机地球化学特征如表 1 所示。

1.2 封闭体系热解模拟实验

封闭体系模拟实验用干酪根样品。干酪根制备采用传统的酸处理方式,先将烃源岩样品粉碎至粒径为 0.175 ~ 0.150 mm (80 ~ 100 目),经 HCl/HF 处理,蒸馏水清洗等^[8],制备成粗制干酪根。称取适量粗制干酪根,在氩气保护下封入金管中,样品量随温度点升高逐渐降低,金管放入高压釜中,通过往高压釜中注水,高温下高压水使金管产生柔性变形,从而对样品施压。选择 9 个温度点(表 2),每个温度点放入 2 个平行样。压力 45 MPa,通过往高压釜中注入水的体积量控制。温度的控制通过温控仪设定,由室温升至相应的温度后,恒温 72 h。

表 1 三塘湖样品的基础有机地球化学数据

Table 1 The basic geochemical data of the sample from the Santanghu Basin

样品	R^o (%)	T_{max} (°C)	TOC (%)	S_1 (mg/g)	S_2 (mg/g)	S_3 (mg/g)	I_H (mg/g)	H/C (干酪根原子比)	O/C (干酪根原子比)
三塘湖泥岩	0.52	436	10.67	0.57	53.08	4.84	497	1.354	0.133

注: T_{max} 为产生的 S_2 烃为最大值时对应的温度(°C); TOC 为岩石中有机碳含量(%); S_1 为单位质量岩石中的吸附烃; S_2 为单位质量岩石中有机质热降解烃; S_3 为程序升温至 390 °C 每克岩石所产生的 CO_2 的量(mg); I_H (氢指数)为单位质量总有机碳中可热解的有机化合物的量(mg/g)

表 2 模拟实验不同温度点气体产物组成及含量

Table 2 The composition and the amount of the hydrocarbon gas from different simulated temperatures

实验体系	温度点	样品量	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂
	(°C)	干酪根(mg)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
封闭体系 模拟实验	280	346.70	70.29	17.18	9.66	2.27	0.60
	320	334.16	65.95	15.59	12.10	4.82	1.54
	350	318.02	67.02	17.83	10.59	3.72	0.84
	380	315.32	54.15	22.59	14.76	6.81	1.69
	400	290.44	50.16	24.92	16.18	7.11	1.63
	420	271.21	44.89	27.14	17.80	8.10	2.07
	440	253.90	45.37	29.40	16.63	6.75	1.85
	460	201.67	47.50	29.79	15.58	5.70	1.43
	480	199.19	50.33	29.04	14.66	4.89	1.08
	(°C)	烃源岩(g)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
半开放体系 模拟实验	280	60.93	51.87	7.78	6.20	13.98	20.17
	320	60.05	55.00	8.07	5.20	13.27	18.47
	350	65.48	40.00	12.27	5.80	18.07	23.87
	380	60.26	32.72	13.51	6.69	20.20	26.88
	400	60.21	30.89	13.92	6.83	20.76	27.59
	420	60.56	31.98	13.50	6.88	20.38	27.26
	440	60.28	33.12	13.52	6.58	20.10	26.68
	460	60.34	31.01	14.01	6.74	20.75	27.49
	480	60.26	43.07	12.33	4.99	17.32	22.30

1.3 半开放体系热解模拟实验

半开放体系模拟实验装置是高温高压干体系^[9], 该体系综合考虑温度和上覆地层压力因素对生排烃过程的影响。称取 60 g 左右的烃源岩样品, 在一定压力下压入到圆形磨具中, 样品下面垫约 0.5 cm 厚的石英砂层, 圆形磨具上下都用紫铜环密封。选择 9 个温度点(表 2), 压力 80 MPa, 其中温度的设定通过温控仪控制, 压力的控制通过人工手动控制压力杆, 由室温升至相应的温度后, 恒温 72 h。实验过程中产生的气体用收集瓶收集起来。

1.4 热解气体分析

封闭体系模拟实验气态产物分析过程如下: 将从高压釜中取出的金管表面洗净, 置于固定体积的真空系统中, 在封闭条件下用针刺破, 气态产物从金管中释放出来, 该真空系统与 Agilent 公司生产的 6890N 型气相色谱仪直接相连, 气体通过自动进样系统进入该色谱仪进行成分分析, 升温程序为起始温度 70 °C, 恒温 6 min, 以 15 °C/min 的速率升至 130 °C, 再以 25 °C/min 的速率升至 180 °C, 恒温 2 min。半开放体系模拟实验气态产物用注射器从压机气体收集瓶外的橡胶管中直接吸出, 注入上述真空系统中进行分析。由于半开放体系模拟实验样品量大, 气体产量大, 在气体收集时部分溢出, 没有得到气

体的总体积, 只得到不同组分的相对百分含量, 因此本工作中半开放体系模拟实验的气体产物特征只是作为辅助探讨。

封闭体系气体同位素用 GV 公司生产的气相色谱-同位素比值质谱仪(GVISOPrime GC-IRMS)分析, 起始温度 50 °C, 恒温 3 min, 再以 15 °C/min 的速率升至 230 °C, 恒温 1 min。每个温度点气体同位素值取平行样均值, 平行样误差控制在 0.5‰(VPDB)以内。

2 结果与讨论

2.1 封闭体系模拟实验气体产物组成及其演化特征

气态产物包括 CH₄、C₂H₆、C₃H₈、C₄H₁₀、C₅H₁₂ 等烃类化合物和 H₂、CO₂、H₂S 等无机气体(图 2)。

气体组分中无机气体含量比较高, CO₂ 含量在气体组分中最高, 其生成主要发生在低温阶段。H₂S 气体生成量较高, H₂ 在高成熟阶段(模拟温度为 440 ~ 480 °C)含量不断增长, 与干酪根缩聚反应程度的增加一致。

有机气体中甲烷含量最高, 随着温度的升高, 所有气体产率也不断增加。模拟实验 350 °C 开始, 进入生油窗阶段, 气体产率迅速增加, 此时检测到的主要气体总产气量为 14.81 mL/g。当温度大于 420 °C 以后, C₁ 气体的生成率大于 C₂-C₅ 气体的生成率, 这是由于此时已经生成的一些长链化合物开始裂解成

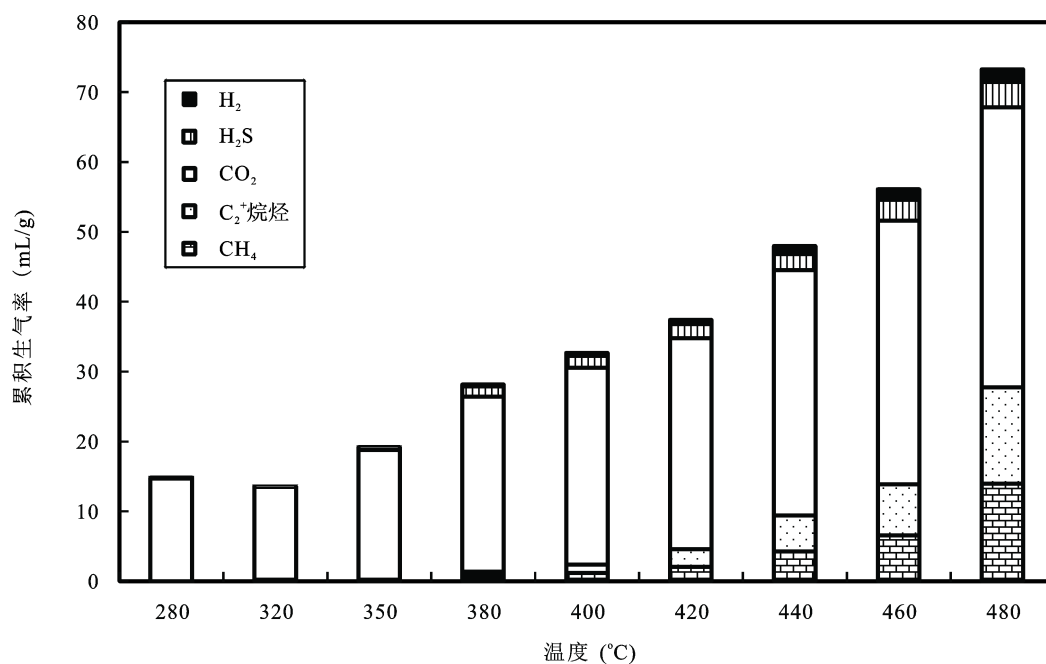


图 2 不同温度点热解气体产物的产率变化

Fig.2 Variation of gas-generation amount with increasing simulated temperatures

小分子化合物, 进入成熟阶段。温度达到 460 °C 后, 开始进入湿气-凝析油阶段, 此时气体产率迅速升高。在温度为 480 °C 时, CH₄ 生成率为 13.97 mL/g 干酪根, 占气体含量的 20%。

对封闭体系 C₁ 气体、C₂ 气体、C₃ 气体以及 CO₂ 气体的碳同位素值进行分析, 结果如图 3 所示。由于有机气体的同位素分馏效应, 呈现出碳数越高, 同位素越重的趋势。其中 CH₄ 的 δ¹³C 值分布在 -40.2‰ ~ -46.6‰ 之间, 表明气体来源于腐泥型干酪根, 这也与样品有机质富含藻类显微组分一致; C₂H₆ δ¹³C 值分布在 -34.3‰ ~ -38.0‰ 之间; C₃H₈ δ¹³C 值分布在 -33.6‰ ~ -36.0‰ 之间; CO₂ 气体 δ¹³C 值分布在 -32.8‰ ~ -8.8‰ 之间。δ¹³C₁ 与 δ¹³C₂ 差值小于 8‰。实验结果表明有机气体的 δ¹³C 值都存在一个先变轻再变重的过程, 转折温度点在 420 °C 左右, 结合上文分析, 也就是在岩石样品生烃率开始迅速增加的

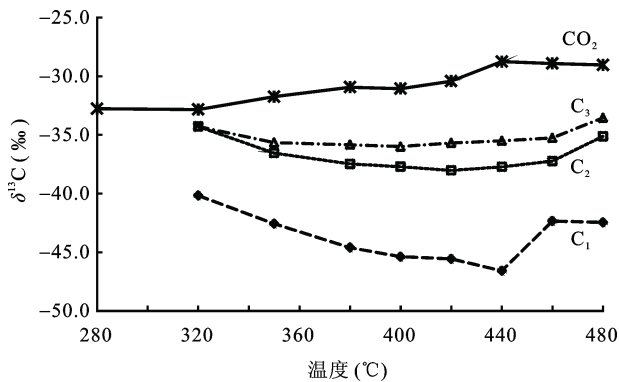


图 3 不同气体同位素值随温度的变化

Fig.3 Variation of gas-isotope with increasing temperatures

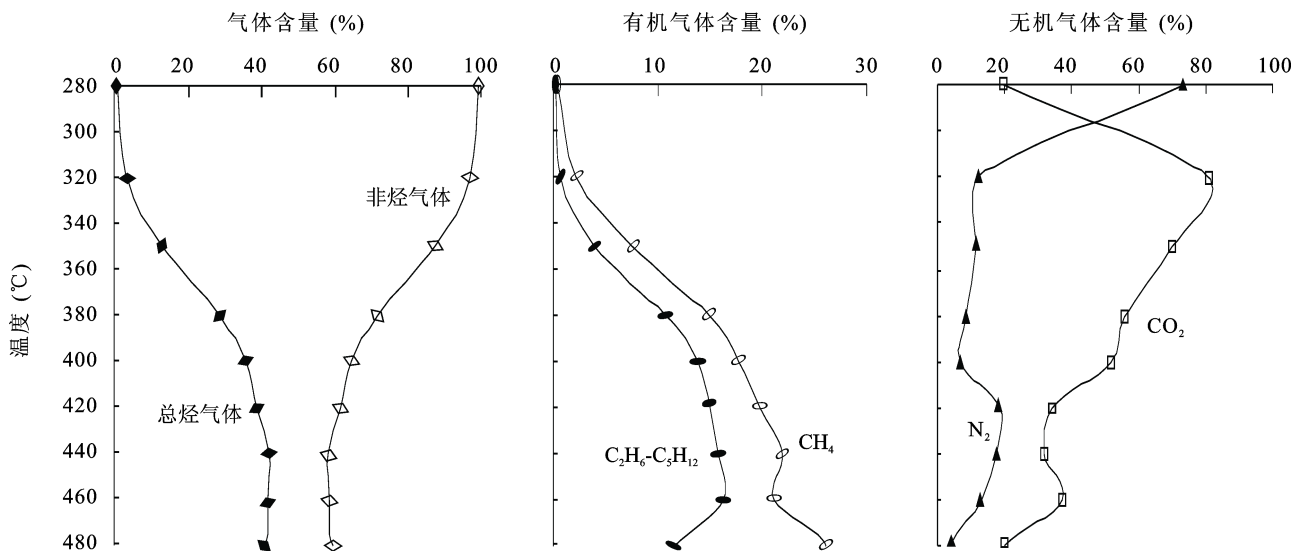


图 4 半开放体系模拟实验产物气体组分含量随温度的变化趋势

Fig.4 Variation of relative percentage of the gas amount from semi-open system with temperature

阶段。出现这一现象的原因, 有学者^[10]认为是由于生成气体的累积效应, 在实验的初始阶段, 有来自以前转化形成的碳被释放, 这些碳相对富 ¹³C。当实验过程中裂解产生的轻同位素碳含量增多并达到稳定状态时, 产物的同位素又逐渐变重。但是熊永强等^[11]在研究纯物质正十八烷的裂解时也出现生成气态烃同位素倒转现象, 并认为出现这一现象的原因是歧化反应同时形成同位素较低和较高的物质, 这些物质的裂解最终导致同位素的非单调变化。

CO₂ 在气体产物中含量最丰富, 同位素值表明其来源于有机质干酪根本身, 这与干酪根中丰富的氧含量相符(干酪根 O/C 原子比为 0.133), 在低熟情况下, 干酪根中氧元素以极性基团存在, 演化初级阶段以 CO₂ 形式释放, 模拟实验中 CO₂ 的生成主要发生在 400 °C 之前, 其同位素较气态烃更重。

2.2 半开放体系模拟实验气体分析

相对于封闭体系, 半开放体系模拟实验是瞬时裂解过程, 产物主要发生初次裂解, 生成气体及时排出, 因此整个实验过程都可以检测到相对不稳定化合物。检测的气态产物包括 CH₄、C₂H₆、C₂H₄、碳数为 C₃-C₅ 的正构和异构组分及相应的烯烃、C₆H₁₄、C₇H₁₆ 等有机气体和 H₂、CO₂、N₂、O₂、CO 等无机气体, 随着模拟实验温度的升高, 不同气体的相对百分含量也在不断变化, 将每个温度点总的烃类气体、总的非烃气体、甲烷及含量丰富的 CO₂、N₂ 等非烃气体含量的变化绘制成折线图, 如图 4 所示。

半开放体系模拟实验气体组成和封闭体系相似, 以无机气体为主。随着温度的升高, 无机气体的相对含量呈逐渐下降趋势。无机气体中 CO_2 和 N_2 含量都比较高, N_2 含量在低—高成熟阶段基本没变化。低温阶段以 CO_2 为主, 与封闭体系模拟实验结果一致, CO_2 的生成主要发生在低温阶段, 含量在 $320\text{ }^\circ\text{C}$ 达到最大值, 说明此温度左右的干酪根主要是发生脱羧作用, $320\text{ }^\circ\text{C}$ 之后 CO_2 的生成含量整体呈下降趋势。 CO 与 O_2 相对含量比较低, 在模拟实验温度阶段变化不大。

有机气体以甲烷为主, 在 $350\sim 420\text{ }^\circ\text{C}$ 之间甲烷气体和烃类气体总量的相对含量增加迅速, 实验温度点在 $480\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 气态烃含量占总气体量的

40.64%, 甲烷含量达 26.10%。

2.3 封闭体系与半开放体系模拟实验产物中有机气体对比分析

对封闭体系与半开放体系模拟实验产生的主要烃类气体组分含量进行对比, 两者存在有明显差别。 $\text{C}_1\text{--}\text{C}_5$ 各组分相对于 $\sum\text{C}_{1\text{--}5}$ 的含量分布如图 5 和表 2 所示。

图 5 显示两套模拟实验随着温度升高, 有机气体产物中 $\text{C}_1/\sum\text{C}_{1\text{--}5}$ 值均呈现先降低后升高的趋势, 并且都小于 0.8。封闭体系中 $\text{C}_1/\sum\text{C}_{1\text{--}5}$ 值明显高于半开放体系, 而半开放体系模拟实验中 $\text{C}_4/\sum\text{C}_{1\text{--}5}$ 和 $\text{C}_5/\sum\text{C}_{1\text{--}5}$ 值明显高于封闭体系。这可能与半开放体

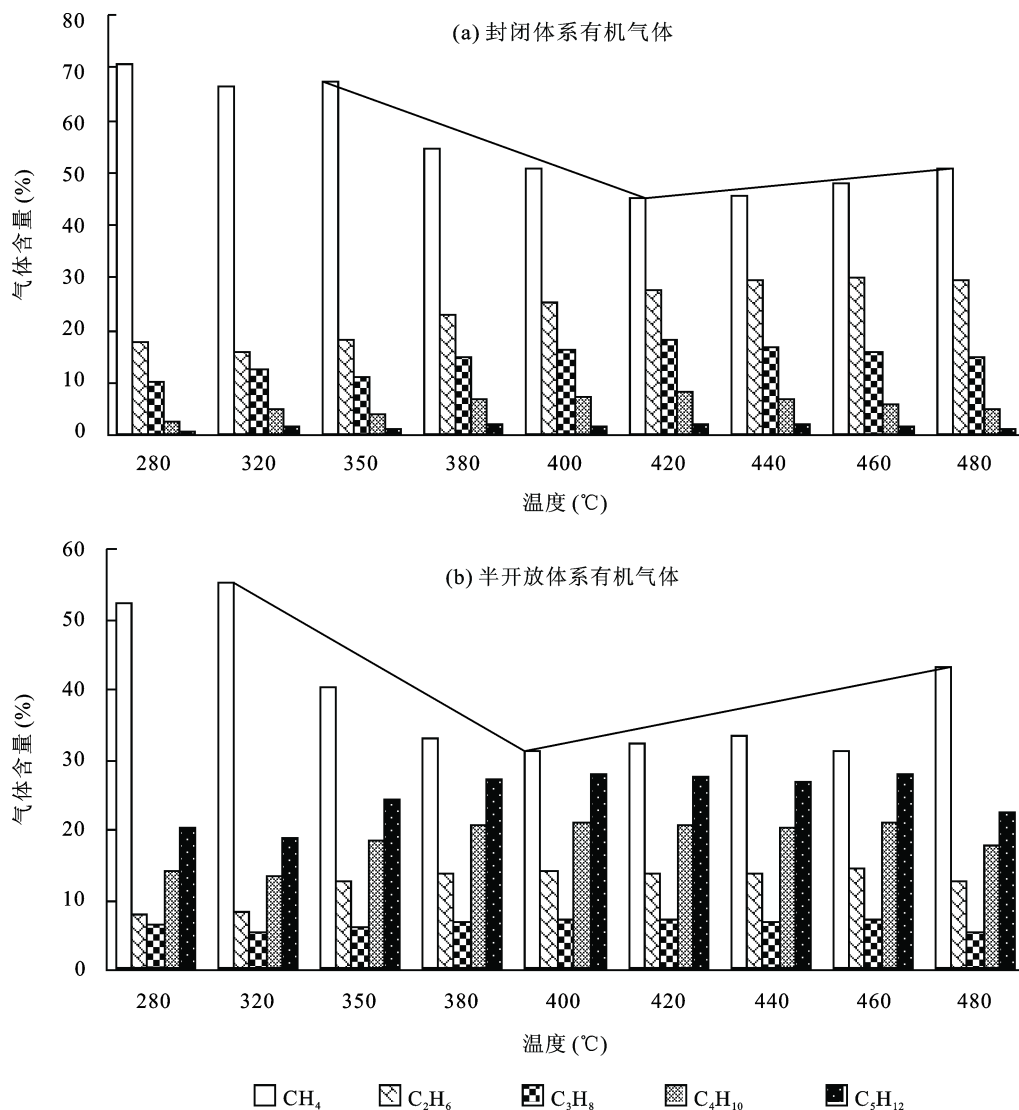


图 5 封闭体系与半开放体系有机气体含量对比

Fig.5 Comparison of relative percentage of the hydrocarbon gas from the simulated experiments

系中主要是初次裂解,产物边生边排,而封闭体系模拟实验更易于发生二次裂解有关。

2.4 地质意义

目前有关三塘湖盆地天然气的报道主要来自与马朗凹陷上三叠统-中下侏罗统煤系烃源岩有关的煤层气^[7],而对于与二叠系烃源岩有关的天然气的研究报道较少。与三塘湖盆地临近的吐哈盆地和准噶尔盆地的天然气资源,二叠系湖相泥岩具有重要贡献^[12-13],其天然气地球化学特征与本工作的研究结果加以对比讨论,也许对三塘湖盆地天然气气藏的深入勘探研究具有启发意义。

吐哈盆地的天然气具有煤层气和油型气形成的混合气特征^[12],二氧化碳含量低于1%,烃类气体干燥系数多小于0.87,呈湿气特征,气体同位素值偏重,甲烷多分布于 -44.8% ~ -39.4% ,乙烷多分布在 -28.8% ~ -26.2% ,与煤层气的贡献有关。准噶尔盆地来源于湖相泥质烃源岩高成熟阶段演化的天然气 $\delta^{13}C_1$ 值多重于 -35.4% , $C_1/\sum C_{1-5}$ 值大于0.95,而来自于演化程度更低阶段的天然气,其 $\delta^{13}C_1$ 值多轻于 -43.7% , $\delta^{13}C_2$ 值多轻于 -30.9% , $C_1/\sum C_{1-5}$ 值分布在0.57~0.86之间^[13],这与本工作中模拟实验产物中烃类气体的特征具有可比性。

三塘湖盆地二叠系烃源岩发育良好,有机质丰度高,烃源岩连续沉积厚度大,在一些成熟度演化相对较高的区域(比如条湖凹陷)可能有该套烃源岩生成的烃类气体聚集,杜宏宇等^[7]也曾经有类似的推测。本工作模拟实验结果可以为针对三塘湖盆地气藏深入研究提供基础的数据。

3 结论

三塘湖盆地跃进沟剖面二叠系芦草沟组灰质泥岩样品通过封闭体系和半开放体系模拟实验所得气体结果显示,气体组分以无机气体为主, CO_2 含量高,与干酪根中丰富的氧含量一致。有机气体含量随温度变化呈规律性变化,半开放体系模拟实验温度达 $480\text{ }^\circ\text{C}$,气态烃的含量达40.64%,甲烷含量26.10%,同时有机气体中甲烷呈现先降低后增加的趋势。封闭体系中随着模拟实验温度升高有机气体碳同素呈现先变轻后变重的趋势, CH_4 气体 $\delta^{13}C$ 值分布在 -40.2% ~ -46.6% 之间, C_2H_6 $\delta^{13}C$ 值分布在 -34.3% ~ -38.0% 之间, C_3H_8 $\delta^{13}C$ 值分布在 -33.6% ~ -36.0%

之间, CO_2 气体 $\delta^{13}C$ 值分布在 -32.8% ~ -28.8% 之间。半开放体系相对于封闭体系气体产物呈现高 $C_4/\sum C_{1-5}$ 、 $C_5/\sum C_{1-5}$ 值与低 $C_1/\sum C_{1-5}$ 值,这与半开放体系模拟实验是边生边排、封闭体系相对而言更易发生二次裂解有关。

中国科学院广州地球化学研究所卢家烂研究员在模拟实验工作中给予了指导;中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室的卢鸿老师在野外采样过程中提供了帮助,在此表示感谢。本工作得到油气专项项目经费支持(编号:2011ZX05008-02)。

参考文献(References):

- [1] 刘延莉,柳益群.三塘湖盆地二叠纪芦草沟组分布及其意义[J].西北地质,2004,37(2):36-41.
Liu Yan-li, Liu Yi-qun. The distribution and significance of Lucaogou Formation of Permian in Santanhu Basin[J]. Northwest Geol, 2004, 37(2): 36-41 (in Chinese with English abstract).
- [2] 李玮,周鼎武,柳益群,梁积伟.三塘湖盆地二叠纪构造层划分及其构造特点[J].西北大学学报(自然科学版),2005,35(5):617-620.
Li Wei, Zhou Ding-wu, Liu Yi-qun, Liang Ji-wei. The division of Permian tectonic sequence and the feature of residual tectonic in Santanhu Basin[J]. J Northwest Univ (Nat Sc), 2005, 35(5): 617-620 (in Chinese with English abstract).
- [3] 吴晓智,郎凤江,李伯华,齐雪峰,刘得光.三塘湖盆地构造演化与油气聚集[J].地质科学,2011,46(3):808-825.
Wu Xiao-zhi, Lang Feng-jiang, Li Bo-hua, Qi Xue-feng, Liu De-guang. Structure evolution and petroleum accumulation of Santanhu Basin[J]. Chinese J Geol, 2011, 46(3): 808-825 (in Chinese with English abstract).
- [4] 伍新和,王成善,伊海生,魏钦廉.新疆三塘湖盆地烃源岩特征[J].成都理工大学学报(自然科学版),2004,31(5):511-516.
Wu Xin-he, Wang Cheng-shan, Yi Hai-sheng, Wei Qin-lian. Characteristics of hydrocarbon source rock in the Santanhu Basin of Xinjiang[J]. J Chengdu Univ Technol (Sci Technol), 2004, 31(5): 511-516 (in Chinese with English abstract).
- [5] 国建英,钟宁宁,梁浩,李欣,王东良,马卫,崔会英,李瑾.三塘湖盆地中二叠统原油的来源及其分布特征[J].地球化学,2012,41(3):266-277.
Guo Jian-ying, Zhong Ning-ning, Liang Hao, Li Xin, Wang Dong-liang, Ma Wei, Cui Hui-ying, Li Jin. Study on the source and distribution of Middle Permian oils in Santanhu basin[J]. Geochimica, 2012, 41(3): 266-277 (in Chinese with English abstract).
- [6] 冯乔,柳益群,郝建荣.三塘湖盆地芦草沟组烃源岩及其古环境[J].沉积学报,2004,22(3):513-517.

- Feng Qiao, Liu Yi-qun, Hao Jian-rong. The source rock and its Palaeo-environment of Lucaogou Formation of Permian in Santanghu basin[J]. *Acta Sedimentol Sinica*, 2004, 22(3): 513-517 (in Chinese with English abstract).
- [7] 杜宏宇, 王志勇, 金颖, 杨爱生, 任忠跃, 贺永红. 三塘湖盆地天然气成因及成藏分析[J]. *天然气地球化学*, 2006, 17(4): 582-585.
- Du Hong-yu, Wang Zhi-yong, Jin Ying, Yang Ai-sheng, Ren Zhong-yue, He Yong-hong. Study on the origin of natural gas and reservoir formation in Santanghu basin[J]. *Nat Gas Geosci*, 2006, 17(4): 582-585 (in Chinese with English abstract).
- [8] 傅家谟, 秦匡宗. 干酪根地球化学[M]. 广州: 广东科技出版社, 1995: 31-34.
- Fu Jia-mo, Qin Kuang-zong. The Geochemistry of Kerogen[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 1995: 31-34 (in Chinese).
- [9] 傅家谟, 刘德汉, 盛国英. 煤成烃地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1990: 43.
- Fu Jia-mo, Liu De-han, Sheng Guo-ying. Geochemistry of Coal-Generated Hydrocarbons[M]. Beijing: Science Press, 1990: 43 (in Chinese).
- [10] Galimov E M. Isotope organic geochemistry[J]. *Org Geochem*, 2006, 37(10): 1200-1262.
- [11] 熊永强, 张海祖, 耿新华, 耿安松. 正十八烷的裂解及其地球化学意义[J]. *科学通报*, 2004, 49(增刊 I): 72-75.
- Xiong Yong-qing, Zhang Hai-zu, Geng Xin-hua, Geng An-song. The cracking and geochemical significance of *n*-octadecane[J]. *Chinese Sci Bull*, 2004, 49(suppl I): 72-75 (in Chinese).
- [12] 苏传国, 侯读杰, 包建平, 白喜俊, 朱建国. 吐哈盆地天然气成因的再认识[J]. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*, 2008, 30(6): 165-170.
- Su Chuan-guo, Hou Du-jie, Bao Jian-ping, Bai Xi-jun, Zhu Jian-guo. Re-discussion of natural gas genesis in Turpan-Hami Basin[J]. *J Oil Gas Technol (J Jiangnan Pet Inst)*, 2008, 30(6): 165-170 (in Chinese with English abstract).
- [13] 郑建京, 吉利明, 孟仟祥. 准噶尔盆地天然气地球化学特征及聚气条件的讨论[J]. *天然气地球科学*, 2000, 11(4-5): 11-21.
- Zheng Jian-jing, Ji Li-ming, Meng Qian-xiang. Discussion of geochemical characteristics of cases in the Junggar basin[J]. *Nat Gas Geosci*, 2000, 11(4-5): 11-21 (in Chinese with English abstract).