

DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2021.159

准噶尔盆地南缘侏罗系煤生烃热模拟实验研究

李二庭^{1,2}, 马万云^{1,2}, 李际^{1,2}, 马新星³, 潘长春⁴, 曾立飞⁴, 王明^{1,2}

(1. 新疆砾岩油藏实验室, 新疆克拉玛依 834000; 2. 中国石油新疆油田分公司实验检测研究院, 新疆克拉玛依 834000;
3. 新疆宇澄热力股份有限公司, 新疆克拉玛依 834000; 4. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640)

摘要: 采用黄金管-高压釜热模拟体系, 开展准噶尔盆地南缘地区侏罗系八道湾组和西山窑组煤的生油和生气演化特征研究, 对区域油气资源评价和油气资源研究具有重要意义。煤热模拟实验结果表明, 准噶尔盆地南缘八道湾组煤生油潜力明显高于西山窑组煤, 其生油高峰在 R_o (镜质体反射率) = 1.07%, 最大生油产率的分布范围为 60.13 ~ 83.27 mg/g, 具有一定的排油能力; 西山窑组煤生油高峰在 R_o = 0.96%, 最大生油产率分布范围为 27.14 ~ 62.14 mg/g, 部分样品具有一定的排油能力。八道湾组煤和西山窑组煤生气能力接近且均较好, 生气窗长。 R_o 为 0.90% 时, 煤开始生气; R_o 在 1.07% ~ 1.65% 时, 煤进入快速生湿阶段, 煤裂解气产量是最大产气量的 50% 左右; R_o 达 1.65% 后, 煤进入干酪根裂解生气阶段; R_o 在 3.60% 时, 煤生气基本结束, 最大生气产率分布范围为 92.23 ~ 141.26 mg/g。南缘西段艾卡构造带八道湾组煤层厚度为 10 ~ 20 m, R_o 在 1.0% 左右, 处于煤生油高峰, 生油量在 57.10 ~ 81.19 mg/g, 且煤具有有机碳含量高的特点, 认为该区煤具有形成带气顶的油藏的潜力。准噶尔盆地南缘中段霍玛吐背斜带和昌吉-乌鲁木齐地区侏罗系煤层厚度大, 最厚达 60 m, 烃源岩 R_o 在 1.3% ~ 2.0% 之间, 处于煤大量生干气阶段, 生气量为 60.21 ~ 104.27 mg/g, 认为准噶尔盆地南缘中段煤具有形成凝析气藏和干气藏的条件。

关键词: 煤; 天然气; 热模拟; 准噶尔盆地; 液态烃; 碳同位素

中图分类号: P618.1; TE122.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8527(2022)05-1313-11

Thermal Simulation Experiment for Hydrocarbon Generation: A Case Study of Jurassic Coal from the Southern Margin of Junggar Basin

LI Erting^{1,2}, MA Wanyun^{1,2}, LI Ji^{1,2}, MA Xinxing³, PAN Changchun⁴, ZENG Lifei⁴, WANG Ming^{1,2}

(1. Xinjiang Laboratory of Petroleum Reserve in Conglomerate, Karamay, Xinjiang 834000, China;

2. Research Institute of Experiment and Testing, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China;

3. Xinjiang Yucheng Heating Power Company Limited, Karamay, Xinjiang 834000, China; 4. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

Abstract: Gold tube-autoclave thermal simulation system was used to study the generation and evolution of oil and gas from the coal (Badaowan and Xishanyao formations) in the southern margin of Junggar Basin. It is of great significance for the oil-gas resource evaluation and source study in the southern basinal margin. Thermal simulation experiment of coal shows that the oil generation potential of the Badaowan Formation coal is significantly higher than that of the Xishanyao Formation coal. The maximum oil yield of Badaowan and Xishanyao Formation coal is 60.13 - 83.27 mg/g (R_o (vitrinite reflectance) = 1.07%) and 27.14 - 62.14 mg/g (R_o =

收稿日期: 2021-06-09; 改回日期: 2022-04-10; 责任编辑: 潘令枝。

基金项目: 国家油气重大专项(编号: 2016ZX05041-005-003)资助。

作者简介: 李二庭, 男, 博士, 高级工程师, 1988 年出生, 有机地球化学专业, 主要从事油气地球化学研究工作。

Email: lierting@petrochina.com.cn。

引用格式: 李二庭, 马万云, 李际, 等. 准噶尔盆地南缘侏罗系煤生烃热模拟实验研究 [J]. 现代地质, 2022, 36(5): 1313-1323. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2021.159.

LI Erting, MA Wanyun, LI Ji, et al. Thermal Simulation Experiment for Hydrocarbon Generation: A Case Study of Jurassic Coal from the Southern Margin of Junggar Basin [J]. Geoscience, 2022, 36(5): 1313-1323. DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2021.159.

0.96%), respectively. The gaseous hydrocarbon yields of Badaowan and Xishanyao Formation coal are similar, both having high gas generation potential and wide gas generation window. At $R_o = 0.90\%$, coal starts to crack into gas. At $R_o = 1.07\% - 1.65\%$, coal is in the rapid moisture generation stage, and the gas yield is about 50% of the maximum gas yield. At $R_o > 1.65\%$, coal is in the stage of kerogen crack into dry gas. At $R_o = 3.60\%$, gas generation by coal is basically over, and the maximum gas yield of 92.23 - 141.26 mg/g. The thickness of Badaowan Formation coal seam in the Aika structural belt in the western part of the southern margin is 10 - 20 m, and $R_o = \sim 1.0\%$. The local coal is at the peak of oil generation, with the oil yield being 57.10 - 81.19 mg/g. Moreover, the organic carbon content of coal is high. Therefore, we considered that the local coal has potential to form oil reservoirs with gas caps. Jurassic coal seams in the Huomatu anticline and Changji-Urumqi area in the middle section of the southern margin are thick (up to 60 m), with its $R_o = 1.3\% - 2.0\%$. The local coal is in the dry gas generation stage, with gas yield of 60.21 - 104.27 mg/g. Based on the above analysis, we suggested that the coal in the middle section of the southern basinal margin has potential to form condensate gas reservoirs and dry gas reservoirs.

Key words: coal; natural gas; thermal simulation; Junggar Basin; liquid hydrocarbon; carbon isotope

0 引言

准噶尔盆地南缘位于盆地南部北天山山前坳陷带,由西向东,依次为四棵树凹陷、霍玛吐背斜带和阜康断裂带,北面与沙湾凹陷、莫南凸起和阜康凹陷相接^[1]。自油气勘探以来,南缘陆续发现了独山子、齐古、卡因迪克、呼图壁、玛河等中小型油气田,累计探明石油地质储量 $2\ 719.5 \times 10^4$ t、天然气地质储量 329.6×10^8 m³,探明率相对较低,总体探明程度不足10%。前人虽然已经从构造演化、储层发育、盖层分布、保存条件等油气成藏条件及生储盖层组合^[2-6],生排烃期与圈闭形成期的时空匹配等方面进行了大量的研究,形成了很多成果认识,但对于南缘天然气资源潜力问题仍需要进一步探索。特别是2019年南缘西段四棵树凹陷高探1井的重大发现,获得日产油1 213 m³,日产气 32×10^4 m³,南缘冲断带霍玛吐背斜带东段发现呼探1井凝析气藏,获得日产气 61×10^4 m³,日产凝析油87.1 m³的高产,南缘下组合勘探的连续突破显示了南缘丰富的油气资源^[7-8]。

准噶尔盆地南缘发育二叠系、中下侏罗系、白垩系吐谷鲁群和古近系安集海河组四套烃源岩。其中,中、下侏罗统烃源岩主要为一套以河流、湖泊和沼泽相为主的含煤碎屑岩建造,是准噶尔盆地南缘主力烃源岩系。侏罗系发育暗色泥岩、煤和碳质泥岩,以Ⅱ₂型和Ⅲ型为主,是该区域最为重要的烃源岩^[9-10]。高探1井原油 Pr/Ph 为

3.77, Pr/nC₁₇和 Ph/nC₁₈分别为0.25和0.07,全油碳同位素为-26.82‰,天然气甲烷和乙烷碳同位素分别为-40.49‰和-29.14‰,油气主要来自高成熟的侏罗系烃源岩^[8],天然气可能具有二叠系贡献^[11],呼探1井原油 Pr/Ph 为1.17, Pr/nC₁₇和 Ph/nC₁₈分别为0.38和0.34,全油碳同位素为-28.67‰,天然气甲烷和乙烷碳同位素分别为-31.53‰和-24.37‰,油气主要来自高成熟的侏罗系烃源岩,原油重烃部分可能有二叠系贡献。

南缘煤主要发育在侏罗系八道湾组和侏罗系西山窑组,厚度在5~60 m之间,有机碳含量分布范围为40.6%~91.9%,平均为63.9%,热解烃潜力分布范围为11~327 mg/g,平均为134 mg/g。前人提出煤成油的概念使得煤系烃源岩的生油备受关注^[12]。包建平^[13]通过对比原油中生物标志物的组成特征,提出了柴达木盆地牛东地区的原油具有典型的煤成油特征。杨鹏程等^[14]采用热模拟实验证实了西湖凹陷平北地区平湖组煤具有较高的生油能力,煤成油在研究区广泛存在。那么,准噶尔盆地南缘地区侏罗系煤生烃能力如何?王屿涛等^[15]根据准噶尔盆地中下侏罗统泥岩和煤的地球化学特征认为南缘侏罗系油藏主要与泥质烃源岩有关。姚素平等^[16]采用富集角质体和基质镜质体的煤样进行热模拟实验,认为煤具有一定的生油能力。郑建京等^[17]对准噶尔盆地阜东地区侏罗系煤系烃源岩演化过程地球化学特征进行了较为全面的研究,认为 R_o (镜质体反射率)在1.40%

~1.70%是干酪根大量排烃阶段。李吉君等^[18]采用化学动力学方法,对准噶尔盆地南缘西山窑组煤模拟了其生气过程,认为其主要生气期为燕山运动期。朱明等^[19]对准噶尔盆地南缘侏罗系烃源岩进行了热模拟实验,认为煤生烃潜力高于炭质泥岩。总体而言,前人对准噶尔盆地南缘地区不同层位侏罗系煤生烃能力、是否具有大规模生油或生气能力,以及不同演化阶段生烃组成如何变化的研究较少。本次研究选取准噶尔盆地南缘地区不同层位低成熟煤样品,采用黄金管-高压釜热模拟体系,详细开展了煤生油和生气产率及碳同位素演化特征研究,对南缘油气资源评价和油气源分析具有重要意义。

1 实验样品与分析方法

1.1 样品分析

在准噶尔盆地南缘西段四棵树凹陷到东段阜康地区选取侏罗系八道湾组(J_1b)和西山窑组(J_2x)共9个煤样进行黄金管-高压釜热模拟实验,煤样基本地球化学参数见表1。选取的煤样镜质体反射率 R_o 分布范围为0.39%~0.76%, T_{max} 值分布范围为424~453℃,整体处于低熟-成熟演化阶段,氢指数HI分布范围为141~210 mg/g,主要为II₂型有机质类型,具有较好的生烃潜力。

表1 准噶尔盆地南缘侏罗系煤样基本地球化学参数

Table 1 Geochemical parameters of Jurassic coal from the southern margin of Junggar Basin

样号	层位	地区	岩性	TOC/%	HI/(mg/g)	$T_{max}/^{\circ}C$	R_o /%
JC1	J_1b	四棵树凹陷	煤	62.39	171	428	0.39
JC2	J_1b	四棵树凹陷	煤	62.21	155	424	0.42
JC3	J_1b	阜康地区	煤	73.23	194	440	0.76
JC4	J_1b	阜康地区	煤	70.81	190	448	0.74
JC5	J_1b	阜康地区	煤	80.28	187	453	0.72
JC6	J_2x	石河子地区	煤	73.33	141	432	0.58
JC7	J_2x	昌吉地区	煤	65.89	203	424	0.49
JC8	J_2x	昌吉地区	煤	63.60	210	425	0.50
JC9	J_2x	乌鲁木齐地区	煤	69.61	156	439	0.68

注: J_1b 为侏罗系八道湾组, J_2x 为侏罗系西山窑组。

1.2 黄金管-高压釜热模拟实验条件

生烃实验采用黄金管-高压釜热模拟体系^[20],高压釜热模拟实验条件:煤样在10 h内从室温升至250℃,然后分别以2℃/h和20℃/h升温至600℃,在324℃时取出第一个样品,然后每间隔12℃取出高压釜,快速冷却,模拟压力保持在50 MPa。

1.3 热模拟气态烃定量及碳同位素分析

热模拟后,金管中的气体在特制的玻璃真空装置中被刺破收集。该装置与Agilent HP6890N型色谱仪器相连,通过自动控制程序,可将气态产物吸入色谱仪进行分析,定量方法见文献^[21]。

气态烃碳同位素采用Delta V Advantage同位素质谱仪分析,色谱柱为CP-Pora PLOT Q石英柱(30 m × 0.32 mm × 20 μm)。色谱柱初始温度38℃,恒温5 min,以8℃/min升至180℃,恒温15 min,载气为氦气,载气流速为2 mL/min。

1.4 热模拟液态烃定量分析

将金管剪成碎块装入小瓶中,加入3 mL正戊烷浸泡,采用微型进样针加入0.008~0.014 mg的标准样品溶液(氘代正二十二烷和氘代正二十四烷),用超声波超声均匀,取上清液进色谱分析。采用Agilent HP6890型色谱仪,HP-5色谱柱(30 m × 0.32 mm × 0.25 μm)。升温程序:起始温度50℃,恒温5 min;然后以2℃/min升温至150℃,再以4℃/min升温至290℃,最后恒温15 min。色谱分析完成后,将 C_6 - C_{14} 之间的烃类组分的峰面积合并,通过内标定量法计算得到轻烃含量。然后将剩余样品溶液过滤,分离出正戊烷溶液和固体残渣,固体残渣用二氯甲烷:甲醇(体积比93:7)混合溶剂进行索氏抽提72 h,将抽提物与正戊烷溶液合并,常温下挥发得到沥青A产物并进行定量分析,轻烃+沥青A含量即为生油量。

2 煤样热模拟实验结果

2.1 煤样热模拟温度与成熟度关系

镜质体反射率(R_o)是应用最为广泛的烃源岩成熟度参数。其中, $Eazy\% R_o$ 常用于计算热模拟样品成熟度的方法^[22],但该方法计算的成熟度值与实际地质样品成熟度有出入,且在高演化阶段误差更加明显。相关研究针对这种情况建立了在2℃/h升温速率热模拟条件下,热模拟温度与成熟度的对应关系^[23]。本次研究通过对120个热模拟固体残渣磨片,测定 R_o ,每个温度点煤样残渣随机测定50个测点,取平均值为实测 R_o 数据,并基于前人的研究经验及公式,建立了温度与成熟度 R_o 关系: $R_o = 0.2766e^{0.00487T} - 0.68$,相关系数 $R^2 = 0.9796$,线性关系较好(图1),能够较好地应用于煤系烃源岩热模拟过程成熟度表征。

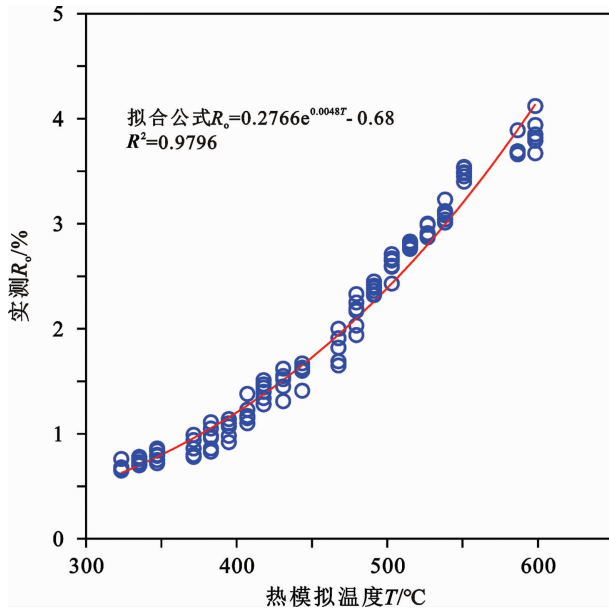


图1 准噶尔盆地南缘侏罗系煤样实测 R_o 与热模拟温度关系曲线图

Fig. 1 Curve of measured R_o and thermal simulation temperature of Jurassic coal from the southern margin of Junggar Basin

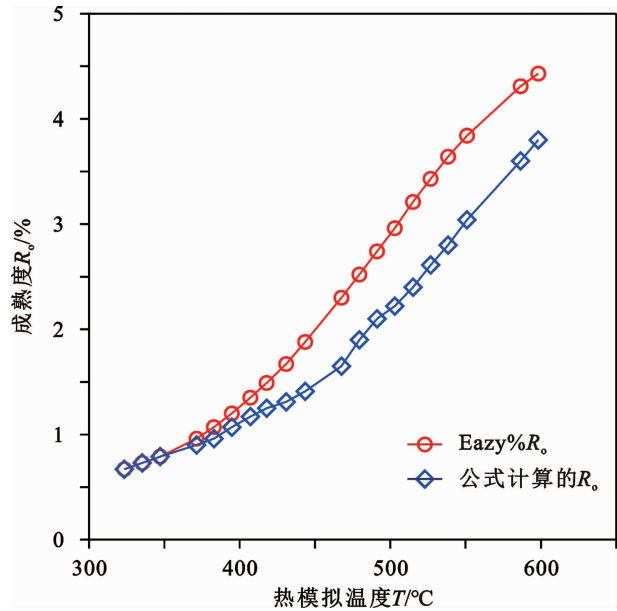


图2 不同温度模拟条件下煤样计算 Eazy% R_o 与公式计算 R_o 对比图

Fig. 2 Comparison of Eazy% R_o and formula calculation R_o of coal under different temperature simulation conditions

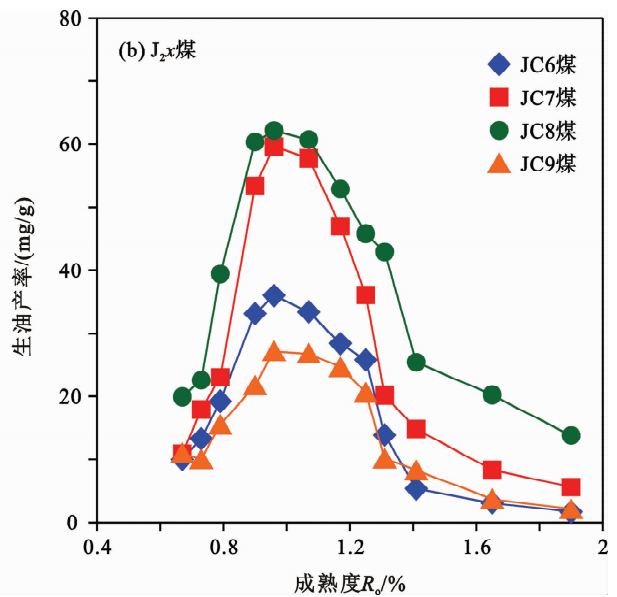
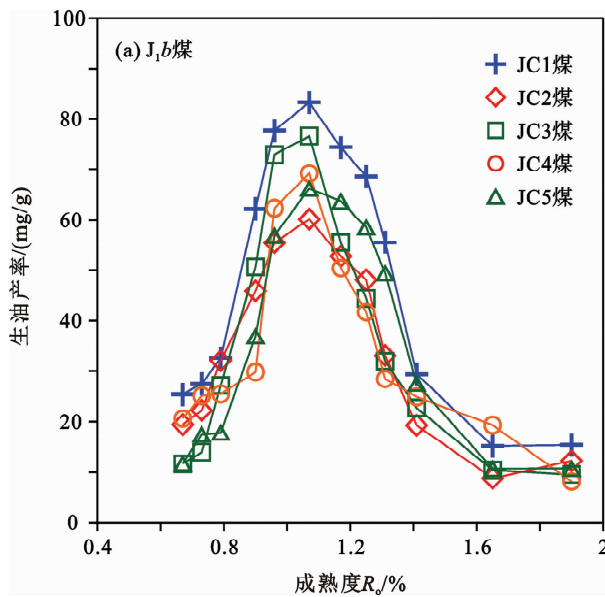


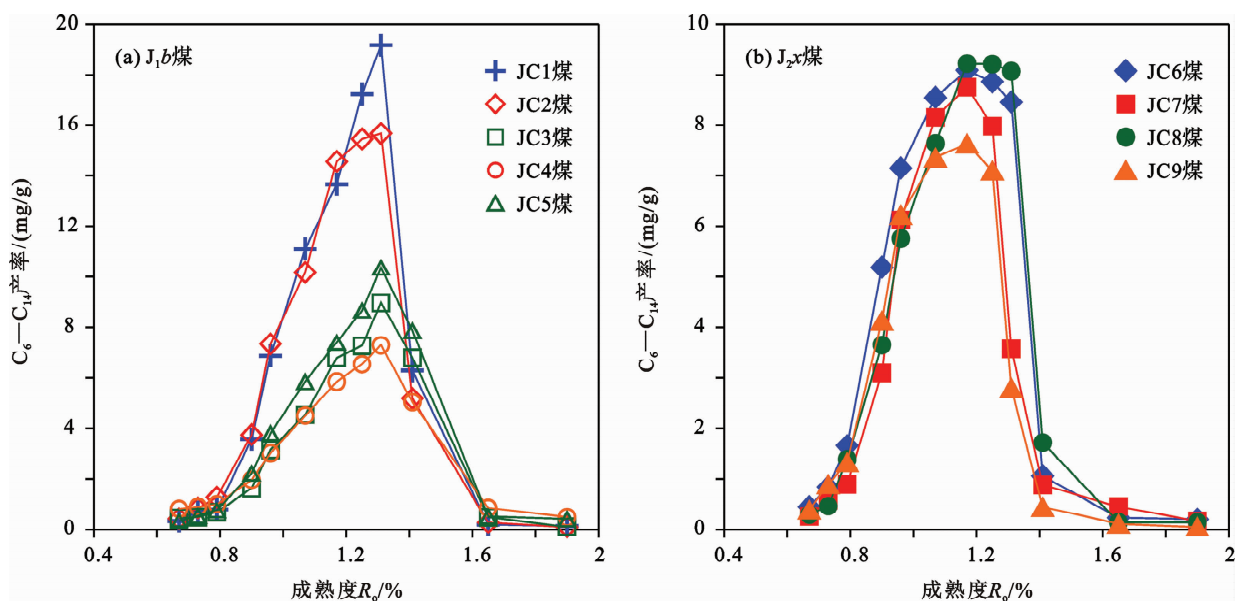
图3 准噶尔盆地南缘侏罗系煤样生油产率 - R_o 关系曲线图

Fig. 3 Relationship between oil yield and R_o of Jurassic coal from the southern margin of Junggar Basin

图2为煤样经过不同温度热模拟后的理论计算成熟度 Eazy% R_o 和利用本次研究建立公式计算的成熟度 R_o ，通过对比可以看出，在较低的热模拟温度范围，两者区别较小， $<380\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时，差异小于 0.10%；热模拟温度 $>380\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后，随着热模拟温度升高，Eazy% R_o 与公式计算 R_o 值的差越大，差异最大可达 0.84%。

2.2 煤样生油产率特征

煤样热模拟生油产率包括轻烃 (C_6-C_{14}) 和沥青 A，随着热模拟成熟度的升高，煤样生油产率呈现“快速升高→快速降低→缓慢减低→趋于平稳”的特征(图3)，与前人研究结果一致^[24]。从图3可以看出，不同煤样生油产率明显不同，西山窑组煤样的生油高峰比八道湾组煤样早。侏罗

图4 准噶尔盆地南缘侏罗系煤样 C_6-C_{14} 产率- R_o 关系曲线图Fig. 4 Relationship between $C_6 - C_{14}$ yield and R_o of Jurassic coal from the southern margin of Junggar Basin

系八道湾组(J_1b)煤样在 $R_o = 1.07\%$ 时达到生油高峰, 最大生油产率分布范围为 $60.13 \sim 83.27 \text{ mg/g}$, 侏罗系西山窑组(J_2x)煤样在 $R_o = 0.96\%$ 时达到生油高峰, 最大生油产率分布范围为 $27.14 \sim 62.14 \text{ mg/g}$, 侏罗系八道湾组煤样生油产率明显高于西山窑组煤样。煤样 C_6-C_{14} 轻烃产率随成熟度的演化特征与生油产率一致(图4), 侏罗系八道湾组(J_1b)煤样 C_6-C_{14} 轻烃在 $R_o = 1.31\%$ 时达到高峰, 最大产率分布范围为 $7.29 \sim 19.17 \text{ mg/g}$, 侏罗系西山窑组(J_2x)煤样 C_6-C_{14} 轻烃在 $R_o = 1.17\%$ 时达到高峰, 最大产率分布范围为 $7.63 \sim 9.22 \text{ mg/g}$, 侏罗系八道湾组煤样 C_6-C_{14} 轻烃产率高于西山窑组煤样。轻组分产率峰值 R_o 较生油产率峰值 R_o 要大, 说明 C_6-C_{14} 轻烃的生成较重组分需要更高的裂解温度, C_{14+} 重组分先裂解成 C_6-C_{14} 轻烃。

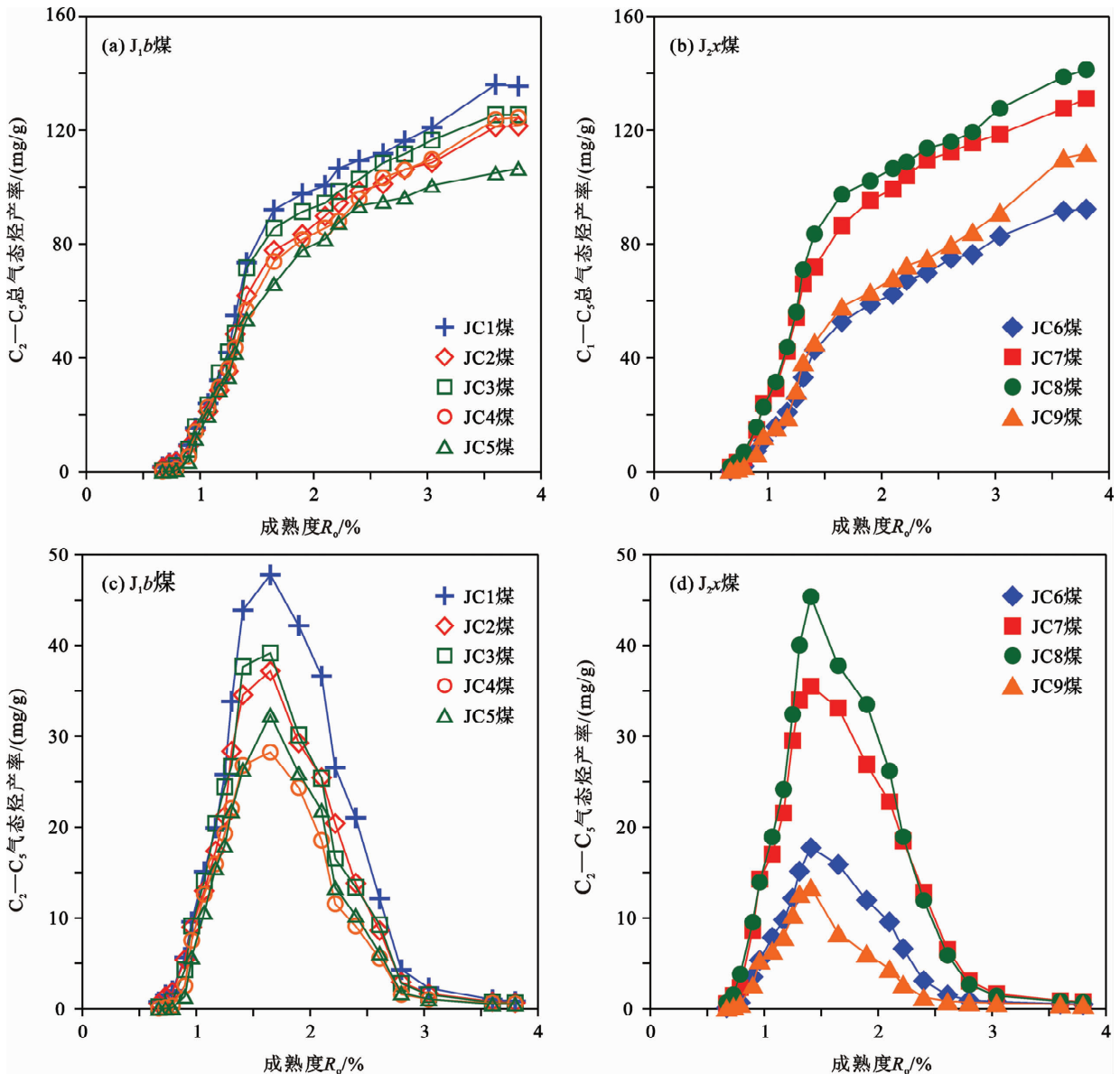
2.3 煤样气态烃产率特征

从准噶尔盆地南缘不同层位煤样的热模拟累计气态烃产率(图5)可以看出, 侏罗系八道湾组(J_1b)煤样和西山窑组(J_2x)煤样的累计总气态烃(C_1-C_5)产率接近, 八道湾组煤样最大生气产率范围为 $121.41 \sim 135.39 \text{ mg/g}$, 西山窑组煤样最大生气产率分布范围为 $92.23 \sim 141.26 \text{ mg/g}$, 生气周期长, 在 $R_o = 3.60\%$ 依然有大量气体产生。煤样生气产率呈现“初始生气→快速生气→缓慢生气→生气结束”的特征。在 $R_o = 0.96\%$ 时, 为煤

样初始生气阶段, 八道湾组煤样总气态烃产率分布范围为 $11.63 \sim 15.82 \text{ mg/g}$, 占总生气量的 $10.9\% \sim 12.6\%$; 西山窑组煤样总气态烃产率分布范围为 $10.80 \sim 24.04 \text{ mg/g}$, 占总生气量的 $11.1\% \sim 18.3\%$, 说明部分西山窑组煤样较八道湾组煤样生气早。在 $R_o = 0.96\% \sim 1.65\%$ 为煤样快速生气阶段, 八道湾组煤样总气态烃产率分布范围为 $65.97 \sim 92.04 \text{ mg/g}$, 占总生气量的 $59.4\% \sim 68.2\%$, 西山窑组煤样总气态烃产率分布范围为 $52.63 \sim 97.40 \text{ mg/g}$, 占总生气量的 $51.8\% \sim 69.0\%$; 在 $R_o = 1.65\% \sim 3.04\%$ 为煤样缓慢生气阶段, 八道湾组煤样总气态烃产率分布范围为 $100.52 \sim 120.92 \text{ mg/g}$, 占总生气量的 $88.2\% \sim 94.4\%$, 西山窑组煤样总气态烃产率分布范围为 $82.68 \sim 127.61 \text{ mg/g}$, 占总生气量的 $81.4\% \sim 90.5\%$; 在 $R_o > 3.60\%$ 为煤样生气结束阶段, 累计产气量基本不变。

准噶尔盆地南缘侏罗系八道湾组(J_1b)煤样 C_2-C_5 气态烃产率在 $R_o = 1.65\%$ 时达到最大, 分布范围为 $28.24 \sim 47.76 \text{ mg/g}$, 西山窑组(J_2x)煤样 C_2-C_5 气态烃产率在 $R_o = 1.41\%$ 时达到最大, 分布范围为 $13.34 \sim 45.36 \text{ mg/g}$ 。

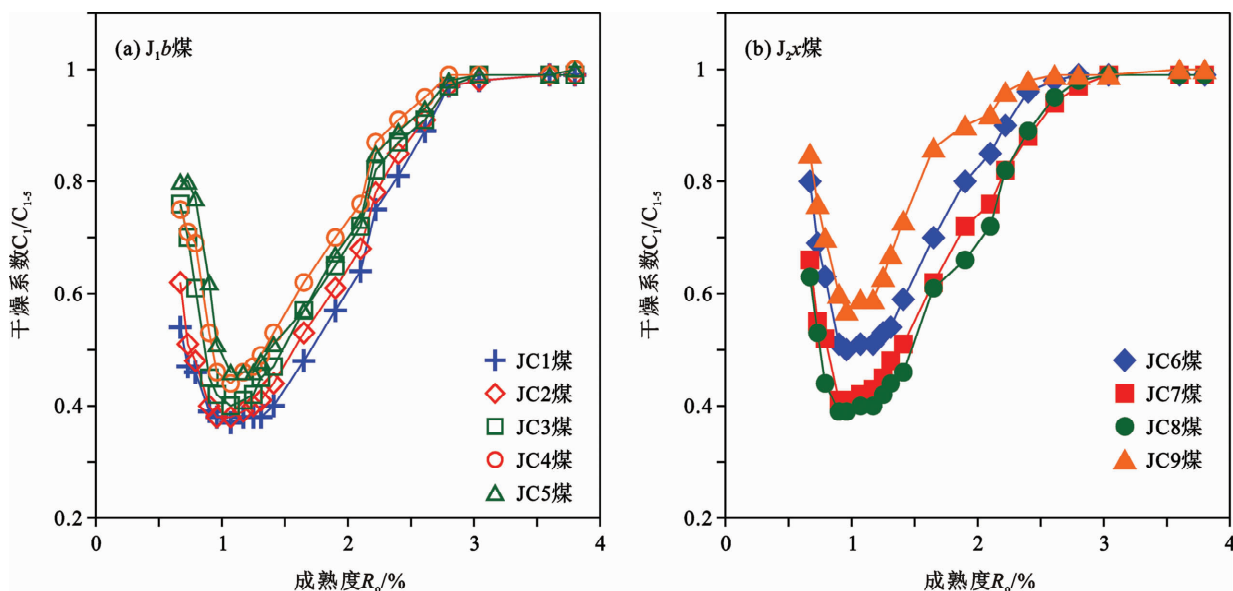
从准噶尔盆地南缘不同层位煤样热解气干燥系数(C_1/C_{1-5})随成熟度变化特征(图6)中可以看出, 八道湾组(J_1b)煤样和西山窑组(J_2x)煤样生气干燥系数随成熟度增大变化特征一致, 呈现先

图5 准噶尔盆地南缘侏罗系煤样生气产率- R_o 关系曲线图Fig. 5 Relationship between the gas yield and R_o of Jurassic coal from the southern margin of Junggar Basin

降低后增加的趋势, 在 $R_o = 0.96\%$ 时裂解气干燥系数达到最低。在相同热模拟条件下, 西山窑组煤样裂解气干燥系数高于八道湾组煤样裂解气, 如 $R_o = 1.41\%$ 时, 八道湾组煤样裂解气干燥系数为 $0.40 \sim 0.53$, 西山窑组煤样裂解气干燥系数为 $0.46 \sim 0.73$; $R_o = 2.10\%$ 时, 八道湾组煤样裂解气干燥系数为 $0.64 \sim 0.76$, 西山窑组煤样裂解气干燥系数为 $0.72 \sim 0.92$ 。煤裂解气在 $R_o > 2.61\%$ 阶段进入干气阶段, 但由于模拟实验为封闭体系, 煤生成的原油未排出, 天然气为一个累积的过程, 实际上应该在更低的成熟度阶段已进入干气阶段。

2.4 煤样生气碳同位素特征

准噶尔盆地南缘西山窑组煤样热解气碳同位素分布特征见图7, 从图中可以看出, 甲烷、乙烷和丙烷碳同位素随着热解温度升高而逐渐变重, 呈两段式分布的特点。以 JC8 煤样热解气碳同位素演化特征为例, 随着成熟度增加, 甲烷碳同位素增加速率呈两段式, 在 $R_o < 0.90\%$ 时, 甲烷碳同位素相对较轻, 随成熟度增加迅速增大, 由 -46.8‰ 快速增高至 -35.0‰ , 变化幅度超 11.8‰ ; $R_o = 0.90\% \sim 3.80\%$, 甲烷碳同位素变化较慢, 由 -35.0‰ 逐渐升高至 -23.7‰ , 变化幅度为 11.3‰ 。随着成熟度增加, 乙烷和丙烷在

图6 准噶尔盆地南缘侏罗系煤样生气干燥系数 - R_o 关系曲线图Fig. 6 Relationship between dryness coefficient of gas and R_o of Jurassic coal from the southern margin of Junggar Basin

$R_o < 1.41\%$ 之前变化极小, 在 $R_o > 1.41\%$ 之后, 乙烷和丙烷碳同位素迅速增大; 在 $R_o = 0.67\% \sim 1.41\%$ 之间, 乙烷碳同位素由 -24.9‰ 增大至 -23.8‰ , 变化幅度仅为 1.1‰ ; 在 $R_o = 1.41\% \sim 2.10\%$ 之间, 乙烷碳同位素由 -23.8‰ 快速增大至 -17.3‰ , 变化幅度为 6.3‰ 。在 $R_o = 0.67\% \sim 1.41\%$ 之间, 丙烷碳同位素由 -24.3‰ 增大至 -22.4‰ , 变化幅度仅为 1.9‰ ; 在 $R_o = 1.41\% \sim 2.10\%$ 之间, 丙烷碳同位素由 -22.4‰ 快速增高至 -9.8‰ , 变化幅度为 12.6‰ 。

天然气甲烷碳同位素常用于成熟度表征^[25-26]。从图7(a)可以看出, 甲烷碳同位素与源岩成熟度 R_o 值相关性非常好, 且具有两阶段模式特征, 这一特征与刘文汇等^[27]提出的煤型气模式具有相似性。在成熟度 $R_o = 0.90\%$ 之前和之后具有不同的趋势。通过对 $R_o = 0.90\%$ 前后两端变化趋势进行数学回归处理, 得到了天然气甲烷碳同位素值与煤系烃源岩成熟度 R_o 的关系公式: $R_o < 0.90\%$, $\delta^{13}C_1 = 32.477 \ln R_o - 31.174$; $R_o \geq 0.90\%$, $\delta^{13}C_1 = 8.7684 \ln R_o - 35.354$ 。

3 准噶尔盆地南缘煤生烃潜力分析

3.1 煤生烃演化模式

从煤样热模拟实验结果可以看出, 侏罗系八道湾组煤样与西山窑组煤样生烃过程主要分为三个阶段, 具有气窗较长的特点, 从 $R_o = 0.96\%$ 开

始生气, 在 $R_o = 3.6\%$ 生气结束但生烃特征有所差异。

(1) 生油阶段, 煤生油的产率增加很快, 生气量较小, 干燥系数随成熟度增加由大变小, 主要是因为干酪根在早期成熟阶段以生重烃气为主^[28]。在此阶段, 侏罗系八道湾组煤样生油产率相对较高 ($0.67\% < R_o < 1.07\%$), $R_o = 1.07\%$ 时达到生油高峰, 生气量为最大生气量的 $17.2\% \sim 18.7\%$, 裂解气干燥系数达到最低, 在 0.41 左右; 西山窑组煤样生油产率相对较低 ($0.67\% < R_o < 0.96\%$), $R_o = 0.96\%$ 时达到生油高峰, 生气量为最大生气量的 $11.1\% \sim 18.3\%$, 裂解气干燥系数达到最低, 在 0.47 左右。

(2) 油裂解与干酪根裂解共存阶段。在此阶段, 八道湾组煤 R_o 介于 $1.07\% \sim 1.65\%$ 之间, 西山窑组煤 R_o 处于 $0.96\% \sim 1.41\%$ 之间, 煤样进入快速生气阶段和排气阶段, 煤样裂解气产量是最大产气量的 50% 左右。前人的研究^[29]认为液态烃裂解首先是重组分裂解成轻组分, 然后裂解为气态烃, 煤样在达到生油高峰后, 产量逐渐降低, 主要是因为生成的油开始裂解, 轻烃组分大量生成并迅速增加, 随着热演化进行, 轻烃组分开始裂解, 生成气态重组分, 干酪根裂解主要生成甲烷。八道湾组煤样 $C_6 \sim C_{14}$ 轻烃在 $R_o = 1.31\%$ 达到峰值, $C_2 \sim C_5$ 气态烃在 $R_o = 1.65\%$ 达到峰值; 西山窑组煤样 $C_6 \sim C_{14}$ 轻烃在 $R_o = 1.17\%$ 达到峰

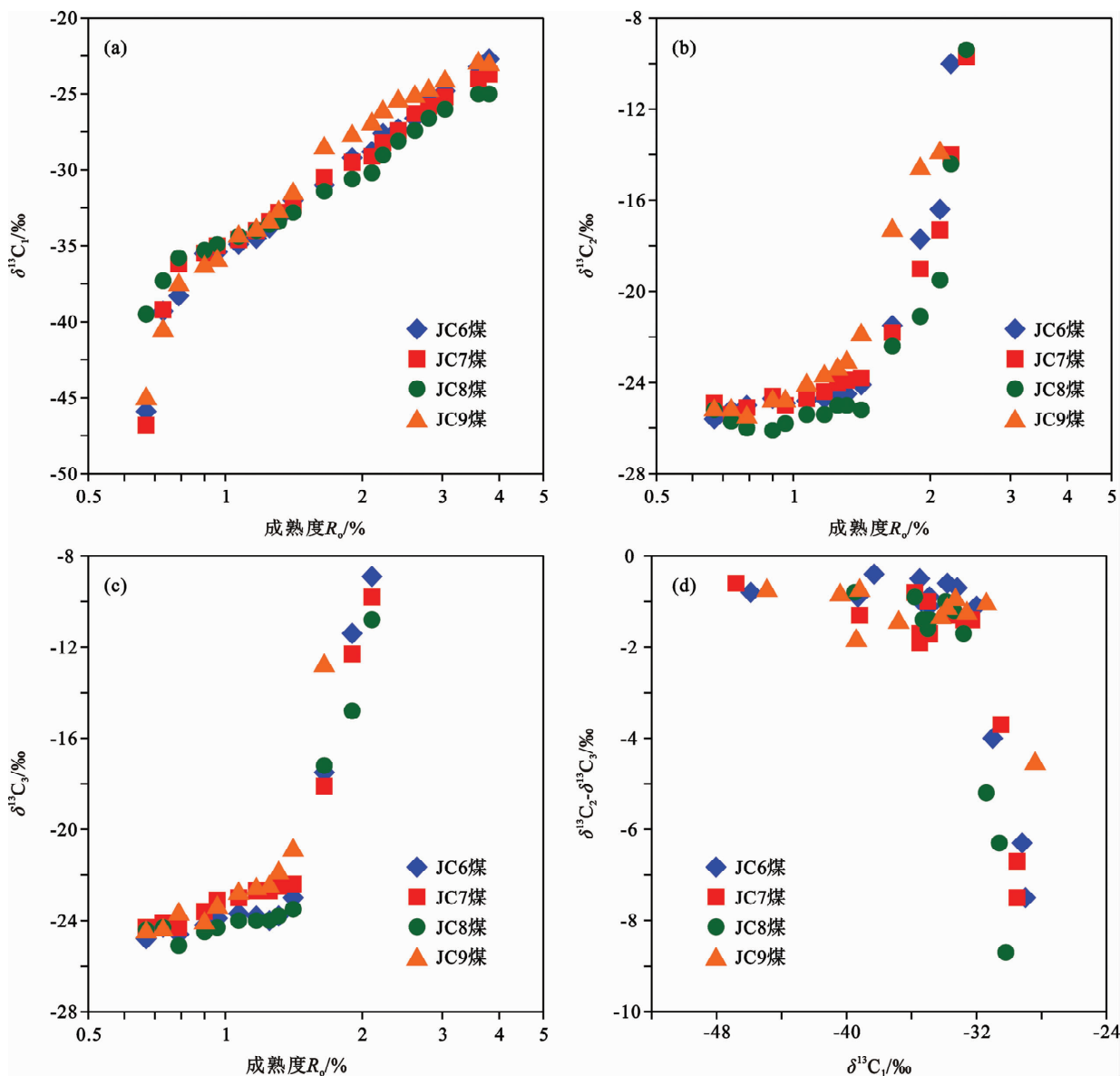


图7 准噶尔盆地南缘侏罗系煤样生气碳同位素 - R_0 关系曲线图

Fig. 7 Relationship between carbon isotopes of gas and R_0 of Jurassic coal from the southern margin of Junggar Basin

值, C_2 — C_5 气态烃在 $R_0 = 1.41\%$ 达到峰值, 煤样生气量已大于最大生油量, 裂解气甲烷碳同位素及干燥系数迅速增加, 而乙烷与丙烷碳同位素基本不变。此阶段, 裂解气来源基本不变, 以干酪根和原油裂解气为主。

(3) 干酪根高成熟裂解阶段。在此阶段, C_2 — C_5 气态烃开始迅速裂解生成甲烷, 乙烷和丙烷碳同位素值迅速增大, 且乙烷与丙烷碳同位素差值迅速变小, 说明丙烷先于乙烷裂解。气态烃总量随成熟度逐渐增大, 增长速率有所降低, 但干酪根裂解气持续时间长, 在 $R_0 = 3.6\%$ 时, 干酪根裂解生气基本结束。

前人的研究^[30-31]显示, 对煤成油贡献最大的显微组分是壳质组。姚素平等^[32]研究发现, 准噶尔盆地煤中的壳质组以角质体含量占绝对优势为特征, 并采用热模拟实验分析认为角质体含量是侏罗系煤可以大量生油的关键, 基质镜质体生烃潜力次之。另外, 通过对准噶尔盆地煤样显微组分定量统计分析显示, 南缘地区侏罗系八道湾组煤样壳质组中角质体和树脂体含量为 24%, 基质镜质体含量为 57% (水磨沟剖面); 而西山窑组煤样壳质组中角质体和树脂体含量为 0~13%, 基质镜质体含量为 11%~40% (四棵树剖面、安 12 和齐 009 井等)。潘安阳等^[33]利用激光微裂解 - 色

谱-质谱技术分析了煤样中镜质体和树脂体产物特征,认为树脂体的长链脂肪烃产率较高,具有高生烃及生油潜力。结合本文实验分析显示,侏罗系八道湾组煤样液态烃产率更高,主要原因可能是其烃源岩中含有更加丰富的角质体和树脂体,而西山窑组煤样中均质镜质体、结构镜质体、团块镜质体含量更高,更偏向于生气^[34],在相同热模拟条件下,其热解气干燥系数更大。

3.2 煤生烃潜力分析

干酪根对烃类组分的吸附是控制烃源岩排烃的最重要因素^[35-36]。Pepper等^[37-38]提出烃源岩留油能力为100 mg/g,生油能力小于100 mg/g的烃源岩是不能排出正常原油,只能排气或排出少量溶解在气相中的凝析油,煤吸附烃类能力较弱,排油门限为40 mg/g^[39]。从煤样热模拟实验可以看出,准噶尔盆地南缘侏罗系八道湾组煤样生油产率相对较高, $R_o = 1.07\%$ 时达到生油高峰,生油率均高于40 mg/g,具有一定的排烃能力;侏罗系西山窑组煤样生油产率相对较低, $R_o = 0.96\%$ 时达到生油高峰,部分样品具有一定的排烃能力。从干酪根生气特征来看,八道湾组煤样最大生气量为106.53~135.39 mg/g,西山窑组煤样最大生气量为92.23~141.26 mg/g,远高于最大生油量,八道湾组和西山窑组煤样均具有非常好的生气潜力。

对准噶尔盆地南缘天然气甲烷碳同位素进行统计分析,并根据上文建立的甲烷碳同位素值与煤系烃源岩成熟度 R_o 的关系公式推算出研究区烃源岩成熟度(表2)。从计算结果来看,准噶尔盆地南缘地区主要气藏天然气成熟度分布范围为0.95%~2.00%,南缘西段霍10井区气藏甲烷的碳同位素相对较轻,分布范围为-35.8‰~-33.5‰,计算煤系烃源岩成熟度 $R_o = 0.95\% \sim 1.24\%$;南缘中段齐古气藏天然气甲烷碳同位素最重,分布范围为-33.5‰~-29.3‰,计算煤系烃源岩成熟度 $R_o = 1.24\% \sim 2.00\%$ 。前人研究显示南缘西段四棵树沉积中心侏罗系烃源岩演化程度相对不高, R_o 在1.3%左右,中段坳陷区侏罗系烃源岩成熟度 R_o 在2.0%左右^[40],上述计算结果与此较为一致,说明本次研究建立的甲烷碳同位素和烃源岩成熟度的关系公式符合南缘实际地质情况。

准噶尔盆地南缘中下侏罗统煤系烃源岩广泛分布。其中,八道湾组煤层厚度在5~60 m,在南缘昌吉-乌鲁木齐地区最厚达60 m,东部阜康地区

表2 准噶尔盆地南缘天然气地球化学特征

Table 2 Geochemical parameters of natural gas in the southern margin of Junggar Basin

气田/藏	干燥系数	相态	$\delta^{13}C_1/\text{‰}$	公式计算 $R_o/\%$
霍10井区气藏	0.88~0.94	油藏	-35.8~-33.5	0.95~1.24
玛河气田	0.90~0.97	凝析气藏	-34.3~-32.5	1.13~1.39
呼图壁气田	0.94~0.96	凝析气藏	-32.8~-30.5	1.33~1.74
齐古气藏	0.96~1.00	干气藏	-33.5~-29.3	1.24~2.00

为10~20 m,富煤带面积约4 000 km²^[41],平均有机碳含量为66.05%,干酪根母质类型以Ⅱ型为主,少量Ⅲ型^[40];西山窑组煤层厚度在2~20 m,最大可达30 m,富煤区位于昌吉-乌鲁木齐地区^[41],平均有机碳含量为55.55%,干酪根母质类型主要为Ⅲ型,少量Ⅱ₂型^[40]。

南缘西部四棵树凹陷八道湾组烃源岩埋深约6 000 m,凹陷沉积中心 R_o 值达到1.3%,凹陷北部艾卡构造带由于在喜马拉雅期发生构造抬升,烃源岩成熟度相对低, R_o 在1.0%左右^[19]。从模拟实验可知,在 $R_o = 1.0\%$ 左右,八道湾组煤样生油量在57.10~81.19 mg/g,艾卡构造带八道湾组煤层厚度10~20 m^[41],且煤样有机碳含量高,基本在50%以上,具有形成带气顶的油藏。

南缘中段霍玛吐背斜带西山窑组煤层厚度大于20 m,分布面积大,昌吉-乌鲁木齐地区煤层厚度为10~20 m,八道湾组煤层在昌吉-乌鲁木齐地区最厚达60 m^[36]。区内侏罗系成熟度在1.3%~2.0%。在 $R_o = 1.3\%$ 左右,煤生成的油已发生裂解,产量急剧下降,地质条件下,烃源岩处于半开放体系,早期生成的原油已排出,烃源岩处于大量生湿气阶段;在 $R_o = 2.0\%$ 左右,处于干酪根高成熟裂解阶段,模拟条件下,煤生成的油已完全裂解,西山窑组煤样生气量为60.21~104.27 mg/g,八道湾组煤样生气量为79.95~98.48 mg/g,具有非常好的潜力。南缘中段烃源岩处于大量生干气阶段,且目前仍在持续生气,具有形成凝析气藏和干气藏的条件,是南缘地区未来天然气重要勘探区域。

4 结论

(1)准噶尔盆地煤样生烃主要分三个阶段:生

油阶段、油裂解与干酪根裂解共存阶段、干酪根高成熟裂解生气阶段,煤样生油高峰 R_o 在0.96%~1.07%之间,具有气窗较长的特点,从 $R_o = 0.96%$ 开始生气,在 $R_o = 3.6%$ 生气结束。

(2)准噶尔盆地南缘西段艾卡构造带八道湾组煤相对较厚, R_o 在1.0%左右,处于煤生油高峰,生油量在57.10~81.19 mg/g,且煤具有有机碳含量高的特点,认为该区煤具有形成带气顶的油藏的潜力。

(3)准噶尔盆地南缘中段霍玛吐背斜带和昌吉—乌鲁木齐地区侏罗系煤层厚度大,最厚达60 m,烩源岩 R_o 在1.3%~2.0%之间,处于煤大量生气阶段,生气量为60.21~104.27 mg/g,认为南缘中段是南缘地区未来天然气重要勘探领域。

参考文献:

- [1] 陈建平,邓春萍,王绪龙,等.准噶尔盆地南缘凝析油、蜡质油与稠油的形成机理[J].中国科学:地球科学,2017,47(5):567-585.
- [2] 王屿涛,谷斌,王立宏.准噶尔盆地南缘油气成藏聚集史[J].石油与天然气地质,1998,19(4):291-295.
- [3] 孙自明,何治亮,牟泽辉.准噶尔盆地南缘构造特征及有利勘探方向[J].石油与天然气地质,2004,25(2):216-221.
- [4] 魏东涛,赵应成,阿不力米提,等.准噶尔盆地南缘前陆冲断带油气成藏差异性分析[J].高校地质学报,2010,16(3):339-350.
- [5] 雷德文,张健,陈能贵,等.准噶尔盆地南缘下组合成藏条件与大油气田勘探前景[J].天然气工业,2012,32(2):16-22.
- [6] 陈建平,王绪龙,邓春萍,等.准噶尔盆地南缘油气生成与分布规律——烩源岩地球化学特征与生烩史[J].石油学报,2015,36(7):767-780.
- [7] 李二庭,蒋宜勤,林莉莉,等.高温高压油藏井壁沉淀物成因研究——以准噶尔盆地高探1井为例[J].石油实验地质,2020,42(6):965-971.
- [8] 靳军,王飞宇,任江玲,等.四棵树凹陷高探1井高产油气成因与烩源岩特征[J].新疆石油地质,2019,40(2):145-151.
- [9] 龙华山,王绪龙,向才富,等.准噶尔盆地南缘侏罗系烩源岩评价[J].现代地质,2013,27(5):1070-1080.
- [10] 陈建平,王绪龙,邓春萍,等.准噶尔盆地烩源岩与原油地球化学特征[J].地质学报,2016,90(1):37-67.
- [11] 陈建平,王绪龙,倪云燕,等.准噶尔盆地南缘天然气成因类型与气源[J].石油勘探与开发,2019,46(3):461-473.
- [12] 黄第藩,秦匡宗,王铁冠,等.煤成油的形成和成烩机理[M].北京:石油工业出版社,1995:271.
- [13] 包建平,吴浩,朱翠山,等.柴达木盆地北缘牛东地区煤成油及其地球化学特征[J].地质学报,2018,92(5):1056-1069.
- [14] 杨鹏程,刘峰,沈珊,等.西湖凹陷平北地区平湖组煤系烩源岩生烩潜力研究[J].海洋地质与第四纪地质,2019,40(4):139-147.
- [15] 王屿涛,蒋少斌.准噶尔盆地侏罗系生烩特征及勘探方向[J].新疆石油地质,1995,16(3):222-226.
- [16] 姚素平,魏辉,金奎励,等.准噶尔盆地侏罗纪煤成油研究[J].沉积学报,1997,15(4):78-85.
- [17] 郑建京,温德顺,孟仟祥,等.煤系烩源岩热模拟演化过程的地球化学参数特征——以准噶尔盆地侏罗系煤系烩源岩为例[J].天然气地球科学,2003,14(2):134-139.
- [18] 李吉君,卢双舫,薛海涛,等.准噶尔盆地南缘中下侏罗统煤系烩源岩生气史[J].新疆石油地质,2010,31(4):369-371.
- [19] 朱明,梁则亮,马健,等.准噶尔盆地四棵树凹陷侏罗系有机质生烩差异及油气藏分布规律[J].天然气地球科学,2020,31(4):488-497.
- [20] 何坤,张水昌,米敬奎.原油裂解的动力学和控制因素研究[J].天然气地球科学,2011,22(2):1-8.
- [21] 毛榕,米敬奎,张水昌,等.不同煤系源岩生烩特征的黄金管热模拟实验对比研究[J].天然气地球科学,2012,23(6):1124-1127.
- [22] SWEENEY J J, BURNHAM A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics[J].AAPG Bulletin,1990,74(10):1559-1570.
- [23] 孙萌萌,米敬奎,冯子辉,等.黄金管体系中I型有机质2种模拟方法生烩特征对比[J].天然气地球科学,2015,26(6):1156-1164.
- [24] 朱连丰.银根—额济纳旗盆地主力烩源岩生烩热模拟实验研究[J].石油实验地质,2019,41(5):731-745.
- [25] 李二庭,靳军,王剑,等.准噶尔盆地克拉美丽地区石炭系天然气来源[J].天然气地球科学,2020,31(11):1515-1523.
- [26] 徐永昌,刘文汇,沈平.含油气盆地油气同位素地球化学研究概述[J].沉积学报,2001,19(2):161-168.
- [27] 刘文汇,徐永昌.煤型气碳同位素演化二阶段分馏模式及机理[J].地球化学,1999,28(4):359-366.
- [28] 谢明贤,陈广坡,李娟,等.海拉尔盆地外围凹陷南一段烩源岩生烩动力学研究[J].岩性油气藏,2020,32(3):24-33.
- [29] TANG Xiaoqiang, HUANG Guanghui, ZHANG Min, et al. Compositional characteristics and geochemical significance of n-alkanes in process of crude oil cracking[J].Earth Science Frontiers,2009,16(6):372-378.
- [30] TISSOT B P, WELTER D H. Petroleum Formation and Occurrence[M].Berlin:Springer-Verlag,1978.
- [31] 黄第藩,华阿新,王铁冠,等.煤成油地球化学新进展著译[M].北京:石油工业出版社,1992.
- [32] 姚素平,魏辉,金奎励,等.准噶尔盆地侏罗纪煤成油研究[J].沉积学报,1997,15(4):78-85.
- [33] 潘安阳,张志荣,谢小敏,等.煤样中单体显微组分的激光

微裂解分析 [J]. 煤炭学报, 2018, 43(12): 3471 - 3479.

- [34] 陈祥, 张育民, 程克明, 等. 焉耆盆地侏罗纪煤系源岩显微组分组合与生油潜力 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2005, 30(3): 337 - 342.
- [35] 钱门辉, 蒋启贵, 黎茂稳, 等. 湖相页岩不同赋存状态的可溶有机质定量表征 [J]. 石油实验地质, 2017, 39(2): 278 - 286.
- [36] 蒋启贵, 黎茂稳, 钱门辉, 等. 不同赋存状态页岩油定量表征技术与应用研究 [J]. 石油实验地质, 2016, 38(6): 842 - 849.
- [37] PEPPER A S, DODD T A. Simple kinetic models of petroleum formation, Part II: oil-gas cracking [J]. Marine and Petroleum Geology, 1995, 12: 321 - 340.
- [38] PEPPER A S, CORVI P J. Simple kinetic models of petroleum formation, Part III: modelling an open system [J]. Marine and Petroleum Geology, 1995, 12: 417 - 452.
- [39] SANDVIK E I, YOUNG W A, Curry D J. Expulsion from hydrocarbon sources: the role of organic absorption [J]. Organic Geochemistry, 1992, 19: 77 - 87.
- [40] 马万云, 迪丽达尔·肉孜, 李际, 等. 准噶尔盆地南缘侏罗系烃源岩生烃特征 [J]. 新疆石油地质, 2020, 41(1): 31 - 37.
- [41] 王绪龙, 支东明, 王屿涛, 等. 准噶尔盆地烃源岩与油气地球化学 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2013: 54 - 70.