

热力作用对烃源岩中重排藿烷类化合物形成的作用

张敏^{1,2}, 李谨^{2,3}, 陈菊林^{1,2}

1.长江大学油气资源与勘查技术教育部重点实验室,武汉 430100

2.长江大学资源与环境学院,武汉 430100

3.中国石油勘探开发研究院廊坊分院,河北廊坊 065007

摘要 通过对87个采自鄂尔多斯盆地煤系烃源岩和松辽盆地湖相烃源岩样品进行的地球化学分析结果显示,热力作用对烃源岩重排藿烷组成特征的影响强烈。随成熟度的变化,来自两套沉积体系的烃源岩中重排藿烷相对丰度的分布相似,随成熟度增大 $17\alpha(\text{H})$ -重排藿烷和 $18\alpha(\text{H})$ -新藿烷相对丰度均先增大后减小,并在 $R_o:0.80\% \sim 0.90\%$ (生油窗)时达峰值。不同沉积环境的烃源岩中重排藿烷的成熟度与绝对浓度的变化规律一致。在 $R_o:0.50\% \sim 0.70\%$ (未熟—低熟)阶段,重排藿烷绝对浓度较大;在 $R_o:0.70\% \sim 0.80\%$ (成熟)阶段,重排藿烷的绝对浓度显著降低。不同沉积环境中重排藿烷的参数随成熟度的变化规律揭示:在重排藿烷的形成过程中,热力作用的影响要强于沉积环境和生物来源。

关键词 重排藿烷;形成机理;热力作用;烃源岩

第一作者简介 张敏,男,1962年出生,教授,有机地球化学与石油地质学,E-mail: zmjpu@163.com

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

0 引言

重排藿烷化合物在地质体中广泛分布,碳骨架与正常藿烷相同,而甲基侧链碳位有所不同^[1-3]。目前,地质体中发现并检测出了早洗脱重排藿烷($C_{30}\text{E}$)、 $17\alpha(\text{H})$ -重排藿烷、21-甲基-28-降藿烷($C_{29}\text{Nsp}$)和 $18\alpha(\text{H})$ -新藿烷^[4]。前人对重排藿烷的组成、分布和形成机理进行了大量的研究工作^[4-10]。研究认为,热力作用是影响重排藿烷形成和分布的重要因素。通过计算藿烷类化合物的生成热,推断 $17\alpha(\text{H})$ -重排藿烷的热稳定性大于 $18\alpha(\text{H})$ -新藿烷^[11]。在沉积体系相似条件下,重排藿烷参数可作为有效的成熟度指标^[8-9,12-13]。

鄂尔多斯盆地和松辽盆地烃源岩中存在丰富的重排藿烷,前人分别从母质来源和沉积环境等方面对两个盆地中重排藿烷的形成和分布进行了研究^[14-18]。热力作用是影响烃源岩中重排藿烷形成的重要因素,但现有文献中鲜有较为系统的报道。本文通过对鄂尔多斯和松辽盆地烃源岩的研究,探讨了热力作用对不同沉积环境的烃源岩中重排藿烷组成和分布的影响;揭示了地质体中重排藿烷相关参数随热演化程度变化特征,为深入研究地质体中重排藿烷的成因机理提供新途径。

1 样品与实验

本文选取87个烃源岩样品。松辽盆地样品共56个,分布于白垩系和三叠系,主要为灰黑色泥岩和深灰色泥岩,发育滨浅湖、半深湖—深湖沉积体系^[19],Pr/Ph在0.6~2.4之间。鄂尔多斯盆地样品共31个,分布于石炭系和二叠系,主要为煤岩、炭质泥岩和泥岩,发育冲积扇、三角洲、沼泽、潮坪等沉积体系^[20],沉积环境的范围较广,烃源岩Pr/Ph在0.7~5.3之间。

对烃源岩样品进行了全岩显微组分镜下鉴定、 R_o 测定、氯仿沥青“A”抽提、族组分分离与定量以及饱和烃与芳烃的GC-MS分析与定量。样品实验的GC-MS分析条件和化合物定量分析方法参见文献^[21-22]。

2 结果与讨论

2.1 重排藿烷类化合物分布特征

$C_{30}\text{E}$ 和 $C_{29}\text{Nsp}$ 只在部分样品中有所检出,而 $17\alpha(\text{H})$ -重排藿烷和 $18\alpha(\text{H})$ -新藿烷在所有的源岩样品中均被检测。如图1所示,在鄂尔多斯盆地苏27井烃源岩样品中检出了 $C_{30}\text{E}$ 、 $C_{29}\text{Nsp}$ 、 $17\alpha(\text{H})$ -重排藿烷和 $18\alpha(\text{H})$ -新藿烷。如表1所示,低—异常高丰度的 $17\alpha(\text{H})$ -重排藿烷在鄂尔多斯和松辽盆地烃

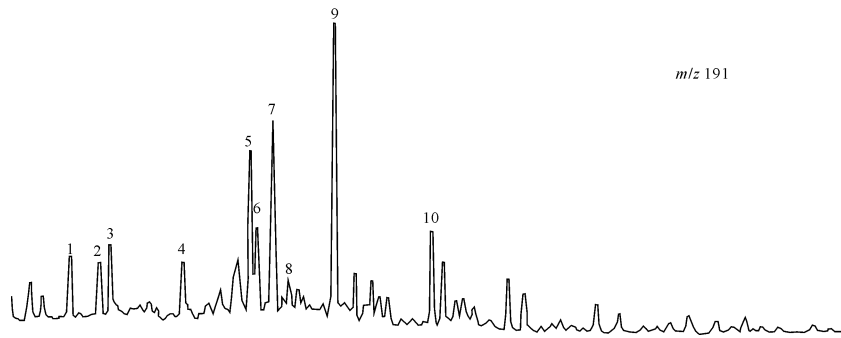


图1 鄂尔多斯盆地苏27井烃源岩样品中重排藿烷分布(m/z 191)

Fig.1 Distribution of rearranged hopanes of source rocks in Well Su27 from the Ordos Basin

注:1. $C_{27}18\alpha(H)$, $21\beta(H)$ -22, 29, 30-三降新藿烷(Ts); 2. C_{30} 早洗脱重排藿烷($C_{30}E$); 3. $C_{27}17\alpha(H)$, $21\beta(H)$ -22, 29, 30-三降藿烷(T_m); 4. $C_{29}17\alpha(H)$ -重排藿烷($C_{29}dia$); 5. $17\alpha(H)$, $21\beta(H)$ -30-降藿烷($C_{29}H$); 6. $C_{29}18\alpha(H)$, $21\beta(H)$ -30-降新藿烷($C_{29}Ts$); 7. $C_{30}17\alpha(H)$ -重排藿烷($C_{30}dia$); 8. $C_{29}21$ -甲基-28-降藿烷($C_{29}Nsp$); 9. $17\alpha(H)$, $21\beta(H)$ -藿烷($C_{30}H$); 10. $C_{31}22S17\alpha(H)$, $21\beta(H)$ -升藿烷22S($C_{31}\alpha\beta 22S$)

源岩中均有分布(据张文正等^[6]的丰度划分标准)。

研究区烃源岩样品成熟度跨度大(R_o : 0.40% ~ 1.80%)。由表1可以看出,松辽盆地湖相烃源岩中在 R_o : 0.54% ~ 1.70%阶段对应低丰度的 $17\alpha(H)$ -重排藿烷分布; R_o : 0.67% ~ 1.03%阶段对应高丰度的 $17\alpha(H)$ -重排藿烷分布; R_o : 0.82% ~ 0.84%阶段对应异常高丰度 $17\alpha(H)$ -重排藿烷分布。鄂尔多斯盆地煤系烃源岩中 R_o : 0.66% ~ 1.63%阶段对应低丰度的 $17\alpha(H)$ -重排藿烷分布, R_o : 0.82% ~ 1.13%阶段对应高丰度的 $17\alpha(H)$ -重排藿烷分布, R_o : 0.84% ~ 0.87%阶段对应异常高丰度的 $17\alpha(H)$ -重排藿烷分布。研究区不同沉积体系的烃源岩中 $17\alpha(H)$ -重排藿烷分布模式相似,即低熟-高熟阶段均有 $17\alpha(H)$ -重排藿烷发育,在成熟阶段分布有高丰度 $17\alpha(H)$ -重排藿烷,而异常高丰度的 $17\alpha(H)$ -重排藿烷集中分布在 R_o 为0.80% ~ 0.90%的生油高峰阶段。

研究区不同沉积有机相的烃源岩中,同一系列重排藿烷母质来源相同,同时受到相似的热力作用影响。因此同一类重排藿烷各系列之间的化合物表现

表1 松辽盆地和鄂尔多斯盆地烃源岩中
 $17\alpha(H)$ -重排藿烷分布特征

Table 1 Distribution of $17\alpha(H)$ -diahopane of source rocks from the Ordos Basin and Songliao Basin

盆地	低丰度 $C_{30}dia$	高丰度 $C_{30}dia$	异常高 $C_{30}dia$
	$/C_{30}H < 0.2$	$/C_{30}H = 0.2 \sim 1.0$	$/C_{30}H > 1.0$
松辽盆地	0.05~0.19(44)	0.21~0.73(10)	1.10~2.01(2)
R_o 分布范围	0.54%~1.70%	0.67%~1.03%	0.82%~0.84%
鄂尔多斯盆地	0.05~0.19(23)	0.26~0.97(5)	1.10~1.67(3)
R_o 分布范围	0.66%~1.63%	0.82%~1.13%	0.84%~0.87%

注:0.05~0.19(44), 0.05为最小值, 0.19为最大值, 44为样品数

出较好的相关性,如 C_{30} 重排藿烷/ C_{30} 藿烷与 C_{29} 重排藿烷/ C_{29} 藿烷(如图2a)。不同类型重排藿烷系列化合物之间的相关性差异迥然,与 $17\alpha(H)$ -重排藿烷的相关性顺序分别为, $C_{30}E > C_{29}Nsp > 18\alpha(H)$ -新藿烷。总体上高丰度的 $18\alpha(H)$ -新藿烷、 $C_{30}E$ 和 $C_{29}Nsp$ 与高丰度的 $17\alpha(H)$ -重排藿烷相对应(图2)。表明不同高丰度重排藿烷系列化合物均在成熟阶段形成,其形成具有一定的联系。

2.2 重排藿烷类化合物组成与成熟度关系

不同沉积体系的烃源岩中 C_{30} 重排藿烷和 $18\alpha(H)$ -新藿烷(Ts)的绝对浓度与 R_o (%)的关系,如图3a和图3d所示。由图可知, C_{30} 重排藿烷绝对浓度变化范围在松辽湖相烃源岩和鄂尔多斯煤系烃源岩中分别为0~3.0 $\mu g/mg_{\text{饱和烃}}$ 和0~4.8 $\mu g/mg_{\text{饱和烃}}$ 。虽然沉积体系不同,但两者重排藿烷的绝对浓度却相差无几。

沉积体系的差异性使研究区烃源岩重排藿烷的相对丰度也随之有所差异。沉积有机相对 $18\alpha(H)$ -新藿烷相对丰度的影响明显(图3e/f),即湖相烃源岩明显较煤系烃源岩更有利于形成高丰度的 $18\alpha(H)$ -新藿烷。沉积有机相对 $17\alpha(H)$ -重排藿烷相对丰度的影响较小,两个盆地中 C_{30} 重排藿烷/ C_{30} 藿烷和 C_{29} 重排藿烷/ C_{29} 藿烷比值分布范围相似(如图3b/c)。

如图3b/c所示,不同沉积体系的烃源岩中 $17\alpha(H)$ -重排藿烷相对丰度均随成熟度的增加先增大后减小,在 R_o 约0.80%~0.90%(生油高峰期)达到峰值。与此同时, $17\alpha(H)$ -重排藿烷绝对浓度与 R_o 的关系则与相对丰度不同。如图3a所示,在 R_o 约0.70%~0.90%时, $17\alpha(H)$ -重排藿烷绝对浓度快速减小。在

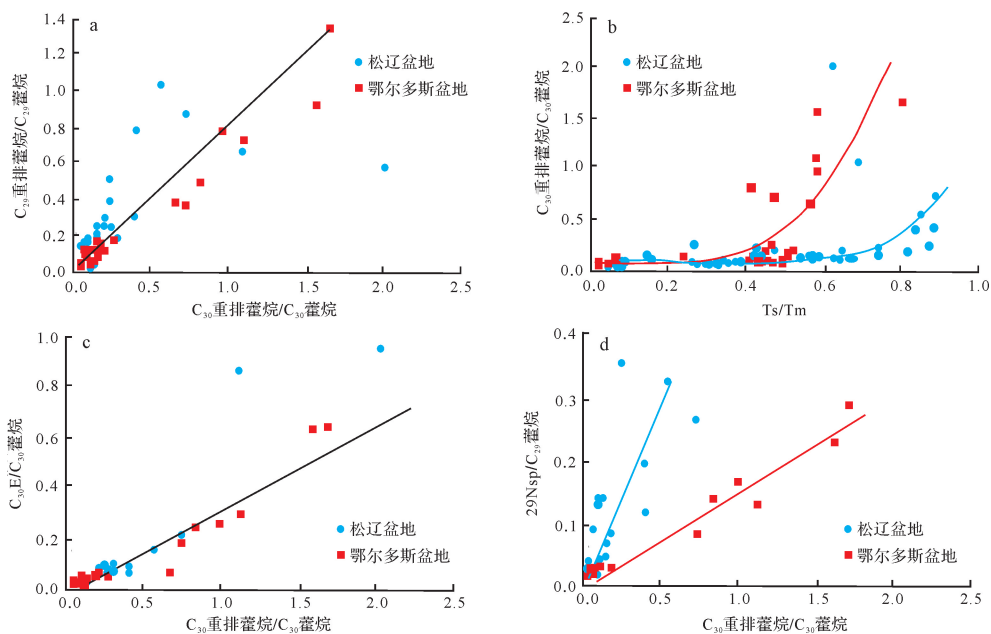


图2 松辽盆地和鄂尔多斯盆地烃源岩中重排藿烷类化合物内组成关系

Fig.2 The relationship between different series of rearranged hopanes in hydrocarbon source rocks

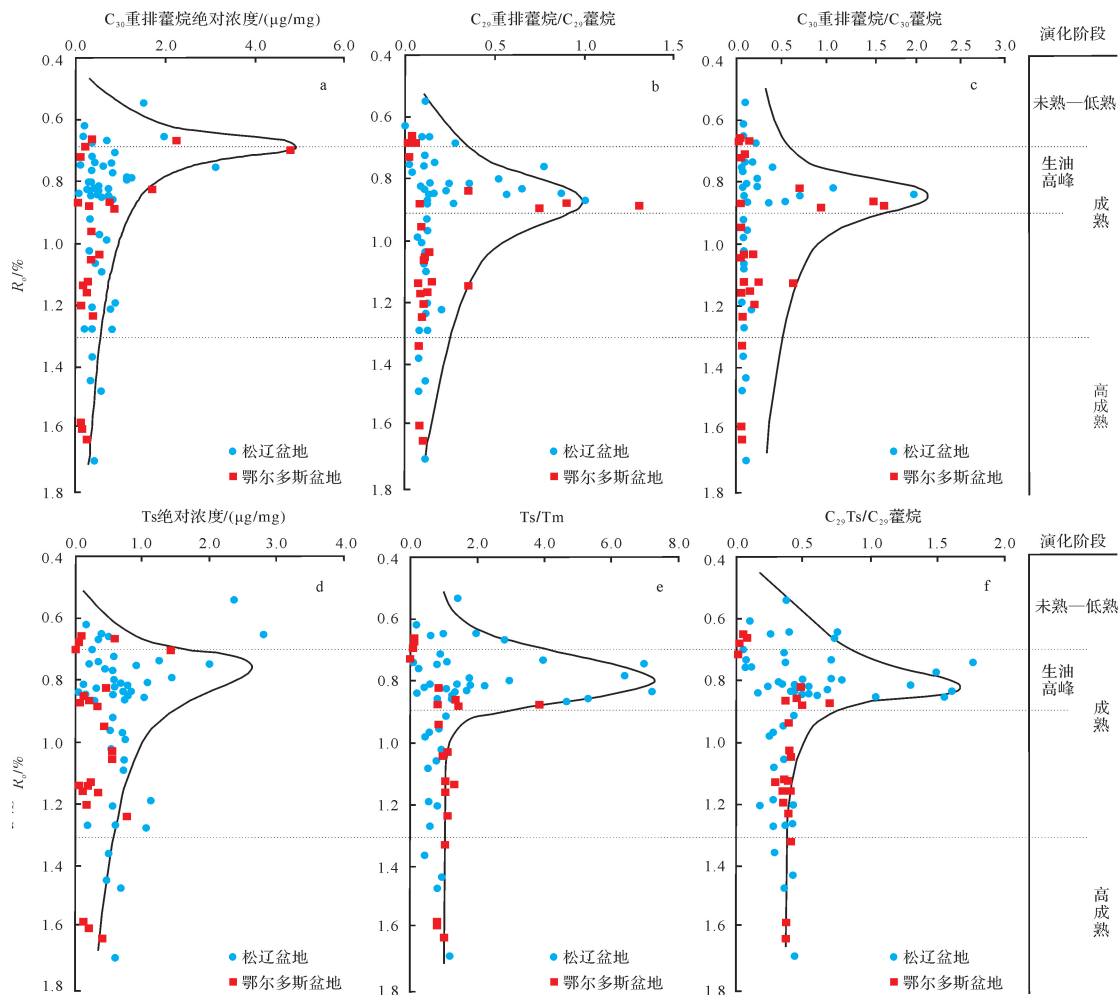


图3 烃源岩中重排藿烷类化合物组成与 R_o (%) 关系

Fig.3 Relationships between the composition of rearranged hopanes and R_o (%)

在成熟阶段,由于 $17\alpha(\text{H})$ -重排藿烷热稳定性大于 $17\alpha(\text{H})$ -藿烷, $17\alpha(\text{H})$ -重排藿烷相对丰度逐渐增大。虽然 $18\alpha(\text{H})$ -新藿烷在两个盆地中相对丰度发育不同,但其相对丰度在热力作用影响下的变化趋势一致(图 3e/f)。受热演化程度的影响, $18\alpha(\text{H})$ -新藿烷与 $17\alpha(\text{H})$ -重排藿烷相对丰度有一定的相似性和差异性。相似性:在不同沉积体系的烃源岩中, $18\alpha(\text{H})$ -新藿烷和 $17\alpha(\text{H})$ -重排藿烷相对丰度均在生油高峰期出现高值。差异性: $18\alpha(\text{H})$ -新藿烷与 $17\alpha(\text{H})$ -重排藿烷的正态分布模式有所差异,虽然研究区两套沉积体系中烃源岩样品 Pr/Ph 的差异性明显,但两个盆地烃源岩中高丰度重排藿烷均在相同的热演化阶段分布。表明了地质体中重排藿烷受热力学作用的影响,大于其受环境与生源的影响。

随后笔者采用控制单一变量的方法,对渤海湾盆地 PL-1 井生油岩开展热模拟实验与产物分析工作,以期深入探讨热力作用对烃源岩中重排藿烷形成的作用。饶有兴趣的是,热模拟试验得出的结论与地质体中观察的现象相辅相成。即随着模拟实验温度变化,整体上热模拟残余油中藿烷、 $17\alpha(\text{H})$ -重排藿烷和 $18\alpha(\text{H})$ -新藿烷的绝对浓度有较大的差异(图 4);相对原样在 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,残余油中不同藿烷系列化合物的绝对浓度均明显增加,可能此阶段主要是藿烷前身物形成重排藿烷类化合物;在 $250\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,各化合物的绝对浓度在排出油中相对较高,即在此阶段烃源岩存在形成高丰度重排藿烷的物质基础。

2.3 地质体中高丰度重排藿烷类化合物的形成机理

综上所述,热力作用是烃源岩中重排藿烷类化合

物绝对浓度和相对丰度的主控因素。因此,可以从其绝对浓度和相对丰度之间的变化与关联,来进一步探讨烃源岩中高丰度重排藿烷的形成机理。烃源岩中重排藿烷绝对浓度在 R_0 为 $0.50\% \sim 0.70\%$ (低成熟)阶段逐渐增大到峰值。低熟—成熟阶段是形成重排藿烷的主要阶段(前身物转化),其含量主要与重排藿烷前身物有关。重排藿烷前身物的转化路径如图 5 所示: $18\alpha(\text{H})$ -新藿烷和 $17\alpha(\text{H})$ -重排藿烷分别由 17α 甲基-降-13(18)-藿烯($g \rightarrow e$)和 18α 甲基-21(17)-藿烯($h \rightarrow f$)经氧化还原和黏土矿物催化作用形成^[23]。

烃源岩中已生成的藿烷和重排藿烷在成熟阶段均会发生热裂解作用,由于重排藿烷类化合物比藿烷具有更高的热稳定性,规则藿烷较重排藿烷类化合物具有更快的热降解速率,因此在此阶段内易形成高丰度重排藿烷类化合物;此外,有学者指出在成熟阶段热存在稳定性较差的 $17\alpha(\text{H})$ -藿烷向热稳定性较高的 $18\alpha(\text{H})$ -新藿烷转化($c \rightarrow e$)^[12-13,24],由此笔者认为在成熟阶段也存在 $17\alpha(\text{H})$ -藿烷向 $17\alpha(\text{H})$ -重排藿烷转化($c \rightarrow f$)。此阶段规则藿烷向重排藿烷的转化(甲基重排作用),使规则藿烷绝对含量降低重排藿烷增加。在一定条件下, 18α 甲基-21(17)-藿烯(h)与 17α 甲基-降-13(18)-藿烯(g)亦能相互转化^[23],所以地质体中 $17\alpha(\text{H})$ -重排藿烷常与 $18\alpha(\text{H})$ -新藿烷的丰度也具有一定的正相关性。由此我们可知不同系列的高丰度重排藿烷均于成熟阶段(必要条件)形成。

综上所述,笔者认为重排藿烷类化合物的浓度随

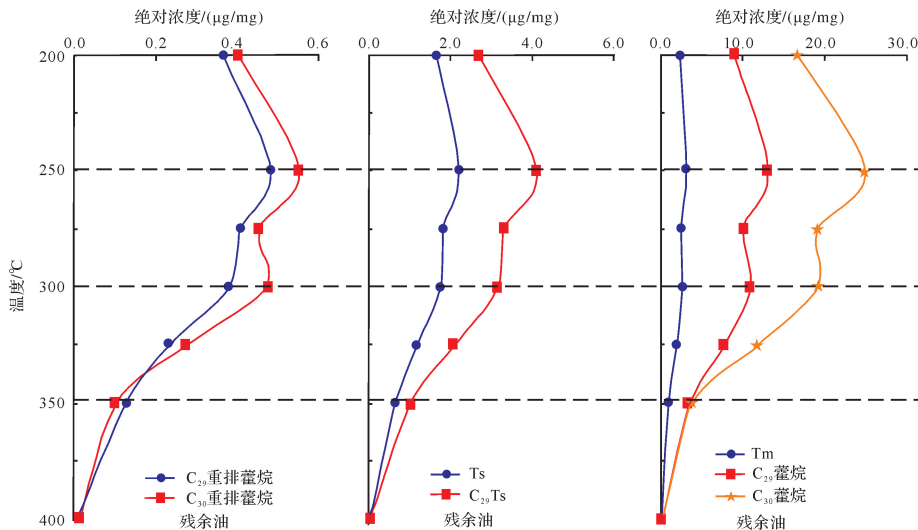


图 4 烃源岩热模拟实验残余油中 $17\alpha(\text{H})$ -藿烷、 $17\alpha(\text{H})$ -重排藿烷和 $18\alpha(\text{H})$ -新藿烷绝对浓度随温度变化关系

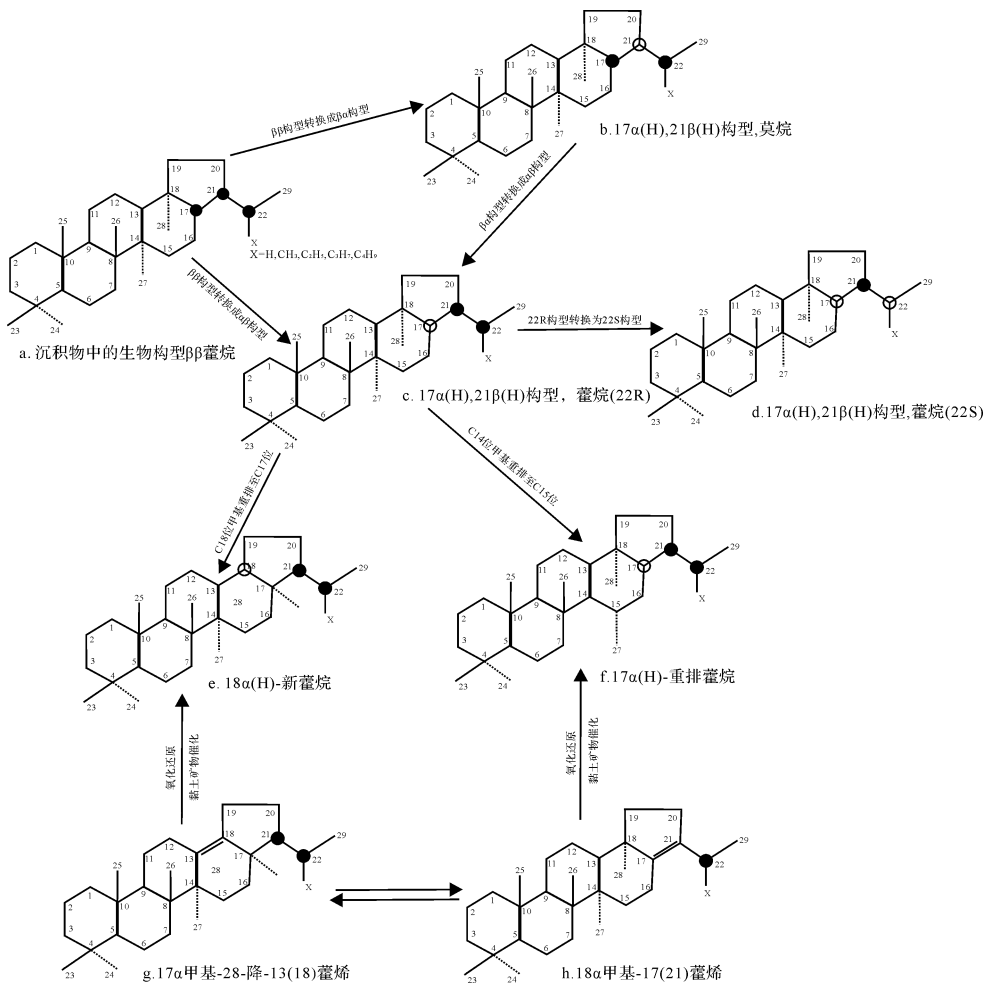


图5 18α(H)-新藿烷和17α(H)-重排藿烷形成机理(据 Moldowan *et al.*, 1991; Farrimond *et al.*, 1996 修改)

Fig.5 Formation mechanism of 18α(H)-neopane and 17α(H)-diahopane (modified from Moldowan *et al.*, 1991; Farrimond *et al.*, 1996)

热演化的变化分两个阶段:重排藿烷的浓度在生油窗之前随成熟度增大而增大;重排藿烷的浓度在生油窗之后随成熟度增大而减小。因此,在油气勘探中重排藿烷的相关成熟度参数应慎用,样品热演化程度需综合多指标进行确定。

3 结论

(1) 研究区湖相烃源岩和煤系烃源岩均检测到 C₃₀E、17α(H)-重排藿烷、C₂₉Nsp 和 18α(H)-新藿烷,且在两套沉积体系的烃源岩中均有高丰度和异常高丰度的重排藿烷分布。烃源岩中同一系列重排藿烷化合物具有较好的正相关;不同系列的高丰度重排藿烷的分布模式也有着较好的对应关系。

(2) 随成熟度的增大,重排藿烷相对丰度均表现出先增大后减小的趋势,在 R_o 为 0.80%~0.90% (生油窗)时达峰值。也就是说,相对丰度较低的重排藿

烷主要分布于未—低成熟和高成熟阶段;相反高—异常高相对丰度的重排藿烷则主要分别于成熟阶段。然而,随成熟度的变化重排藿烷的绝对浓度则表现出不同的变化规律,烃源岩中不同系列重排藿烷绝对浓度变化规律是一致的。重排藿烷主要分布于未—低成熟阶段,在此阶段浓度逐渐增加,在烃源岩成熟阶段重排藿烷化合物发生热裂解作用,导致其绝对浓度快速降低随后趋于平衡。

(3) 来自研究区湖相和煤系两套沉积体系的烃源岩随着成熟度的增加,两个盆地烃源岩中重排藿烷的相对丰度和绝对浓度的变化规律一致。表明相较于沉积环境和生物来源而言,研究区烃源岩中重排藿烷的分布与组成受到热力作用的影响更大。

参考文献 (References)

[1] Farrimond P, Telnæs N. Three series of rearranged hopanes in Toarcian sediments (northern Italy) [J]. *Organic Geochemistry*, 1996,

- 25(3/4): 165-177.
- [2] Armanios C, Alexander R, Kagi R I. High diahopane and neohopane abundances in a biodegraded crude oil from the barrow sub-basin of Western Australia[J]. *Organic Geochemistry*, 1992, 18(5): 641-645.
- [3] Moldowan J M, Fago F J, Carlson R M K, et al. Rearranged hopanes in sediments and petroleum[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(11): 3333-3353.
- [4] 张敏. 地质体中高丰度重排藿烷类化合物的成因研究现状与展望[J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2013, 35(9): 1-4. [Zhang Min. Research and prospects of genesis of high abundant rearranged hopanes in geological bodies[J]. *Journal of Oil and Gas Technology (Journal of Jiangnan Petroleum Institute)*, 2013, 35(9): 1-4.]
- [5] Zhu Y M, Hao F, Zou H Y, et al. Jurassic Oils in the central Sichuan Basin, southwest China: unusual biomarker distribution and possible origin[J]. *Organic Geochemistry*, 2007, 38(11): 1884-1896.
- [6] 张文正, 杨华, 候林慧, 等. 鄂尔多斯盆地延长组不同烃源岩 17α (H)-重排藿烷的分布及其地质意义[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2009, 39(10): 1438-1445. [Zhang Wenzheng, Yang Hua, Hou Linhui, et al. Distribution and geological significance of 17α (H)-diahopanes from different hydrocarbon source rocks of Yan-chang Formation in Ordos Basin [J]. *Science China (Ser. D): Earth Sciences*, 2009, 39(10): 1438-1445.]
- [7] 肖中尧, 黄光辉, 卢玉红, 等. 库车坳陷却勒1井原油的重排藿烷系列及油源对比[J]. 石油勘探与开发, 2004, 31(2): 35-37. [Xiao Zhongyao, Huang Guanghui, Lu Yuhong, et al. Rearranged hopanes in oils from the Quele 1 Well, Tarim Basin, and the significance for oil correlation [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2004, 31(2): 35-37.]
- [8] 王春江, 傅家谟, 盛国英, 等. 18α (H)-新藿烷及 17α (H)-重排藿烷类化合物的地球化学属性与应用[J]. 科学通报, 2000, 45(13): 1366-1372. [Wang Chunjiang, Fu Jiamou, Sheng Guoying, et al. Geochemical characteristics and applications of 18α (H)-neohopanes and 17α (H)-diahopanes [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(13): 1366-1372.]
- [9] Li M J, Wang T G, Liu J, et al. Biomarker 17α (H)-diahopane: a geochemical tool to study the petroleum system of a Tertiary Lacustrine Basin, Northern South China Sea [J]. *Applied Geochemistry*, 2009, 24(1): 172-183.
- [10] 黄海平, 卢松年, 袁佩兰. 古代沉积物中新检出的重排藿烷及其在油气勘探上的意义[J]. 天然气地球科学, 1994, 5(3): 23-28. [Huang Haiping, Lu Songnian, Yuan Peilan. Newly detected rearranged hopanes in ancient sediments and its significance on oil and gas exploration [J]. *Natural Gas Geoscience*, 1994, 5(3): 23-28.]
- [11] Kolaczowska E, Slougui N E, Watt D S, et al. Thermodynamic stability of various alkylated, dealkylated and rearranged 17α - and 17β -hopane isomers using molecular mechanics calculations [J]. *Organic Geochemistry*, 1990, 16(4/5/6): 1033-1038.
- [12] 孙丽娜, 张中宁, 吴远东, 等. 生物标志化合物热成熟度参数演化规律及意义: 以Ⅲ型烃源岩 HTHP 生排烃热模拟液态烃产物为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(4): 573-580. [Sun Lina, Zhang Zhongning, Wu Yuandong, et al. Evolution patterns and their significances of biomarker maturity parameters: A case study on liquid hydrocarbons from type III source rock under HTHP hydrous pyrolysis [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(4): 573-580.]
- [13] Farrimond P, Taylor A, Telnæss N. Biomarker maturity parameters: the role of generation and thermal degradation [J]. *Organic Geochemistry*, 1998, 29(5/6/7): 1181-1197.
- [14] 段志强, 张敏. 鄂尔多斯盆地不同沉积环境中煤系烃源岩重排藿烷的组成特征及其意义[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(15): 27-32, 43. [Duan Zhiqiang, Zhang Min. Composition characteristics and significance of rearranged hopanes in coal-bearing source rocks in different sedimentary in North Ordos Basin [J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(15): 27-32, 43.]
- [15] 李红磊, 张敏, 姜连, 等. 利用芳烃参数研究煤系烃源岩中重排藿烷成因[J]. 沉积学报, 2016, 34(1): 191-199. [Li Honglei, Zhang Min, Jiang Lian, et al. Application of aromatics on genesis of rearranged hopanes in coal-bearing source rocks [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(1): 191-199.]
- [16] Liu H Y, Zhang M, Li X. Genesis study of high abundant 17α (H)-diahopanes in Lower Cretaceous lacustrine source rocks of the Lishu fault depression, Songliao Basin, Northeast China [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2014, 33(2): 201-206.
- [17] Jiang L, Zhang M. Geochemical characteristics and significances of rearranged hopanes in hydrocarbon source rocks, Songliao Basin, NE China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 131: 138-149.
- [18] 程熊, 陈小慧, 张敏. 鄂尔多斯盆地东北部上古生界煤系烃源岩 17α (H)-重排藿烷类的分布及成因探讨[J]. 沉积学报, 2014, 32(4): 790-796. [Cheng Xiong, Chen Xiaohui, Zhang Min. Origin of 17α (H)-Rearranged hopanes in Upper Palaeozoic coal bearing source rocks in Northeast Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(4): 790-796.]
- [19] 张敏, 李洪波, 陈小慧, 等. 松辽盆地梨树断陷油气生成 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2014: 2-9. [Zhang Min, Li Hongbo, Chen Xiaohui, et al. Oil and gas generation of Lishu Fault Depression in Songliao Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014: 2-9.]
- [20] 郭小军. 鄂尔多斯盆地石炭—二叠纪聚煤规律与煤层气勘探有利区优选 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2010. [Guo Xiaojun. Coal accumulation and target optimization for exploration of CBM in Permo-Carboniferous, Ordos Basin [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.]
- [21] 陈菊林, 张敏. 原油热模拟实验中重排藿烷类变化特征及其意义[J]. 现代地质, 2016, 30(4): 871-879. [Chen Julin, Zhang Min. Rearranged hopanes compositions in pyrolysis experiment of crude oil and geochemical significance [J]. *Geoscience*, 2016, 30(4): 871-879.]

- [22] 陈菊林,张敏. 烃源岩热模拟实验中重排藿烷类化合物变化特征及其意义[J]. 石油实验地质, 2016, 38(5): 672-678. [Chen Julin, Zhang Min. Features and significance of rearranged hopanes in pyrolyzates of hydrocarbon source rocks[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(5): 672-678.]
- [23] Nytoft H P, Lund K, Corleoné R K, et al. Identification of an early-eluting rearranged hopane series. Synthesis From Hop17(21)-enes and detection of intermediates in sediments[J]. Abstract of Reports-International Congress on Organic Geochemistry, 2007, 23: 1017-1018.
- [24] 陈中红,查明,金强. 典型断陷湖盆 C₂₇三降藿烷参数演化及其控制因素:以东营凹陷古近系为例[J]. 沉积学报, 2010, 28(3): 635-642. [Chen Zhonghong, Zha Ming, Jin Qiang. The evolution and its control on maturation parameters relative to C₂₇ trisnorhopane in the representative faulted lake-basin: A case study from Paleogene System in Dongying sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(3): 635-642.]

Thermal Effect on the Distribution of Rearranged Hopanes in Hydrocarbon Source Rocks

ZHANG Min^{1,2}, LI Jin^{2,3}, CHEN JuLin^{1,2}

1. Key Laboratory of Exploration Technology for Oil & Gas Research (Yangtze University), Ministry of Education, Wuhan 430100, China

2. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China

3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development (Langfang Branch), PetroChina, Langfang, Hebei 065007, China

Abstract: The molecular geochemical characteristics of a total 87 samples of lacustrine and coal measure hydrocarbon source rocks collected from the Songliao Basin and Ordos Basin are systematically analyzed in order to evaluate thermal effect on the distribution characteristics of rearranged hopanes in hydrocarbon source rocks. The results indicate that both lacustrine and coal measure hydrocarbon source rocks contain abundantly four series of rearranged hopanes and their distributions in geological bodies from different depositional environments or parent material sources show similar variation trends. The relatively lower abundant rearranged hopanes are distributed from low mature to high mature stages, whereas the abnormally high or higher abundant rearranged hopanes are mainly presented in mature stage. The linear correlations between the 17 α (H)-diahopane series and other three series of rearranged hopanes including 18 α (H)-neohopane series, the early-eluting rearranged hopane series and 21-methyl-28-nor-hopane series, are diverse clearly. In addition, the variations of relative abundance of rearranged hopanes from the two sets of samples show similar trend. For example, the relative abundances of 17 α (H)-diahopane and 18 α (H)-neohopane display an initial increase and a following decrease with increasing maturity and the highest amounts appear to be distributed in the range of maturity 0.8%-0.9% R_o . On the other hand, the absolute concentrations of rearranged hopanes have consistent variation for the hydrocarbon source rocks derived from different sedimentary environments with increasing maturity. Rearranged hopanes are formed at immature to mature stage corresponding to $R_o = 0.5\% - 0.7\%$. With the source rocks into mature stage ($R_o = 0.7\% - 0.8\%$), the absolute concentration decreases remarkably with the decreasing extent more than 90%. The consistency of variation of relative abundance and absolute concentration of rearranged hopanes in different depositional systems indicate that thermal effect has much more important impact on the distribution and composition of rearranged hopanes compared with sedimentary environments and biological sources.

Key words: rearranged hopanes; genetic mechanism; thermal effect; hydrocarbon source rocks