

Direct Oil-Gas-Source Correlation Based on Light Hydrocarbons

—A Case Study of Lishu Depression in the Southern Songliao Basin

Hongjing Zhao^{1,2}, Weilin Sun³, Min Zhang², Zulin Chen², Lin Lin⁴

¹Hubei Cooperative Innovation Center of Unconventional Oil and Gas (Yangtze University), Wuhan Hubei

²School of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan Hubei

³National Research Center of Geoanalysis, Beijing

⁴Research Institute of Exploration and Development, Tuha Oilfield Company, PetroChina, Hami Xinjiang

Email: sunweilin2003@163.com

Received: Jul. 8th, 2016; accepted: Oct. 13th, 2016; published: Dec. 15th, 2016

Copyright © 2016 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Compared with the oil-source correlation, the gas-source correlation has been the difficulty in oil and gas exploration and development. In this paper, thermo-desorption-cold trap technique was used to collect light hydrocarbons absorbed by source rock; thus, direct oil-gas-source correlation based on light hydrocarbon was implemented. Crude oil in the Lishu Depression in the southern Songliao Basin was relatively poor in aromatics, and rich in methylcyclohexane and toluene; especially for Qinjiatun oil samples, they were characterized by higher ratios of $(2\text{-MC}_6 + 3\text{-MC}_6)/n\text{C}_6$, MCC_6/CC_6 , and $(\text{Bz} + \text{CC}_6)/n\text{C}_6$, indicated dual inputs of aquatic organism and higher plant. While the dominant organic matter input of Qinjiatun oil was humic type. Gas samples were rich in alkanes, poor in methylcyclohexane and toluene, and they were characterized by relatively lower ratios of $(2\text{-MC}_6 + 3\text{-MC}_6)/n\text{C}_6$, MCC_6/CC_6 , and $(\text{Bz} + \text{CC}_6)/n\text{C}_6$, indicated sapropel organic matter input. In general, the composition of light hydrocarbons thermo-desorbed from Shahezi Formation samples is more similar to the light hydrocarbons of crude oil, while the composition of light hydrocarbons by thermo-desorbed from Yingcheng Formation samples is more similar to the gas. It further indicates different origins of oil and gas; the dominant source rock of oil is from Shahezi Formation and the dominant source rock of gas is from Yingcheng Formation.

Keywords

Light Hydrocarbon, Direct Oil-Gas-Source Correlation, Thermodesorption-Cold Trap-GC, Lishu Depression

基于轻烃组成的气 - 油 - 源三元直接对比

——以松辽盆地南部梨树断陷为例

赵红静^{1,2}, 孙玮琳³, 张 敏², 陈祖林², 林 霖⁴

¹非常规油气湖北省协同创新中心(长江大学), 湖北 武汉

²长江大学资源与环境学院, 湖北 武汉

³国家地质实验测试中心, 北京

⁴中国石油吐哈油田公司勘探开发研究院, 新疆 哈密

作者简介: 赵红静(1973-), 女, 博士, 教授, 主要从事油气地球化学和环境地球化学; 通信作者: 孙玮琳。

Email: sunweilin2003@163.com

收稿日期: 2016年7月8日; 录用日期: 2016年10月13日; 发布日期: 2016年12月15日

摘 要

气源对比相对油源对比而言, 一直是油气勘探开发研究中的难点。利用热脱附 - 冷阱富集技术直接获得烃源岩吸附轻烃, 从而实现了基于轻烃组成的气 - 油 - 源三元直接对比。松辽盆地南部梨树断陷原油轻烃族组成相对贫芳香烃, 表征其为腐泥型母质来源, 其 $(2-MC_6 + 3-MC_6)/nC_6$ 、 MCC_6/CC_6 和 $(Bz + CC_6)/nC_6$ 均较高, 具有较高的甲基环己烷指数, 尤以秦家屯原油最高; 富含甲苯, 表征了腐殖型母质的贡献, 从而表明原油母质来源为水生生物和陆源植物双重生源, 秦家屯原油则具有较高的腐殖型母源贡献。研究区内天然气轻烃族组成富含链烷烃, $(2-MC_6 + 3-MC_6)/nC_6$ 、 MCC_6/CC_6 和 $(Bz + CC_6)/nC_6$ 均较低, 相对贫甲基环己烷和甲苯, 表征主力烃源岩原油沉积有机质主体为腐泥型。总体上, 沙河子组(K_{1s})烃源岩热脱附轻烃组成与原油更相似, 而营城组(K_{1y})烃源岩热脱附轻烃则与天然气轻烃更相似, 进一步表明了研究区原油与天然气的非同源性, 其中原油主力烃源岩为 K_{1s} , 而天然气主力烃源岩则为 K_{1y} 。

关键词

轻烃, 气 - 油 - 源三元直接对比, 热脱附 - 冷阱 - 气相色谱, 梨树断陷

1. 引言

一个沉积盆地往往具有多套生烃层系, 厘定主力气源岩对于天然气的勘探决策有着重要的指向作用。但是, 天然气组分单一, 可供选择的指标较少, 而且极易受热演化、运移效应、生物降解作用的影响。烃源岩中残留的天然气含量低, 很难与之直接对比。相对而言, 原油和烃源岩之间的联系更直接, 一些大分子化合物在烃源岩和原油中都有不菲的含量, 因此气源对比相对于油源对比难度更大。

目前常用的气源对比方法主要有两种, 一种主要是通过伴生凝析油(或原油)作为中间桥梁, 利用生物标志物等分布特征建立原油与烃源岩关系, 再通过油源关系得到气源关系, 如吐哈盆地台北凹陷天然气的气源对比。该方法只能确定液态烃与烃源岩之间的关系, 并不能直接确定天然气与烃源岩之间的关系。另一种常用的气源对比方法是通过气 - 气对比来确定烃源岩, 也就是说, 在大量天然气分析资料的基础上, 总结出不同类型天然气地球化学特征的判识指标, 然后根据该地区的天然气性质确定天然气成因类型, 最后根据烃源岩的发育特点和有机质类型来解决气源问题。该方法广泛地用于我国的气源对比研究。

但该方法也存在较大的局限性,即只能用于大套烃源岩的对比,对复杂生排烃条件,如在同一地区存在几套性质、热演化程度相近的烃源岩则适用程度低。随着天然气分析测试技术的进步,一些新的气源对比方法被提出,如 K-Ar 关系法[1]、氩同位素组合法[2]、苯和甲苯的同位素对比法[3][4]。Hosgermez, H. 等[5]对天然气进行模拟,然后再与各烃源岩进行匹配,以判断主力气源岩。上述对比方法都是推论法,并没有实现直接对比。推论法也是间接对比法,并不能让人十分信服,很多地化学家开始尝试直接对比法。Boreham, C. J. [6]利用新戊烷的碳、氢同位素成功地进行了无降解、中等程度降解、严重降解的天然气对比,并进而推论可利用具有该空间位阻结构(如 2,2 二甲基)的化合物进行直接气源岩对比。相对于气态烃易逸散而言,轻烃分子在烃源岩中残留量稍高;并且,轻烃化合物也会有一部分溶解在原油和天然气中;因此,轻烃可成为沟通气-油-源三元的直接桥梁。在研究吐哈盆地气源对比时,笔者尝试用烃源岩 450℃热模拟所获取轻烃来代表烃源岩轻烃,从而直接进行以轻烃为媒介的气-油-源三元对比[7]。该方法实现了三元直接对比,但热模拟法一方面是对烃源岩进行了再加工,难以保证模拟产出轻烃组成与烃源岩产气时的轻烃组成一致,而且热模拟耗时长,难以实现快速对比。相对而言,岩石热脱附-冷阱-轻烃气相色谱可快速实现对未经改变的烃源岩中轻烃组成的测定,从而有望实现基于轻烃组成的气-油-源三元快速直接对比。

2. 地质背景

松辽盆地南部梨树断陷区位于盆地东南隆起区南部,是一个在晚侏罗世-白垩纪发育形成的下断上拗、西断东超的大型箕状拗陷,面积 3100 km² (图 1) [8];天然气资源丰富,资源量约为 0.14 × 10¹² m³,油气资源当量比为 1:3.5 [9]。与松辽盆地中部、北部地区相比,松南地区是一个天然气资源的相对富集区。其中央断陷区的沙河子组(K₁s)、营城组(K₁y)烃源岩干酪根以 II₁型为主,斜坡带以 II₁-II₂型为主[10][11]。烃源岩总体热演化程度较高,如 K₁y 在靠近桑树台洼陷带附近埋深较大,热演化程度高;但由洼陷带向盆地周缘的斜坡区,烃源岩热演化程度逐步降低,至盆地东北部的双龙凹陷,其热演化程度仅处于低熟-成熟阶段[11]。

3. 样品与试验条件

天然气和原油样品均直接取自生产井井口,天然气样品罐装运输至实验室,直接进行气相色谱分析。原油样品进行全油气相色谱,获得其轻烃组成。

取块状烃源岩洗净后,用锤子砸成若干小块,立即装入 SEG 样品室,升温至 280℃,使烃源岩中的轻烃组分从烃源岩中脱附出来,但并不会因温度过高发生裂解反应而产生组成变化;热脱附得到的轻烃进入液氮冷阱富集,收集轻烃组分,进行气相色谱分析,得到轻烃组成。由于样品非均质性及保存度等原因,并不是所有样品均能得到完整的轻烃系列,研究中能够得到完整轻烃系列组成的烃源岩样品见表 1。从表 1 中可知样品总有机碳质量分数(w(TOC))较高,均高于 0.57%,热演化程度处于成熟-高成熟阶段。

轻烃气相色谱条件与原油和天然气的相同。气相色谱采用 HP6890 气相色谱仪,载气为氦气,流速为 1 mL/min;色谱柱为 HP-5MS 50 m × 250 μm × 0.25 μm;进样口温度为 230℃,分流比为 100:1;升温程序为初温 35℃,以 0.5℃/min 的速率升至 60℃,然后再以 2℃/min 的速率升至 200℃,最后以 6℃/min 的速率升至 230℃,并保持 40 min;检测方式为 FID (氢火焰检测器)。

4. 结果与讨论

4.1. 烃源岩热脱附气轻烃组成

由于气态烃极易逸散,因此轻烃的热脱附-冷阱-气相色谱图中未能见到显著的低碳数气态烃。但呈现完整的 C₆ 以上轻烃组成(图 2),而且低碳数的正戊烷含量较高,且富有明显的高碳数轻烃系列化合

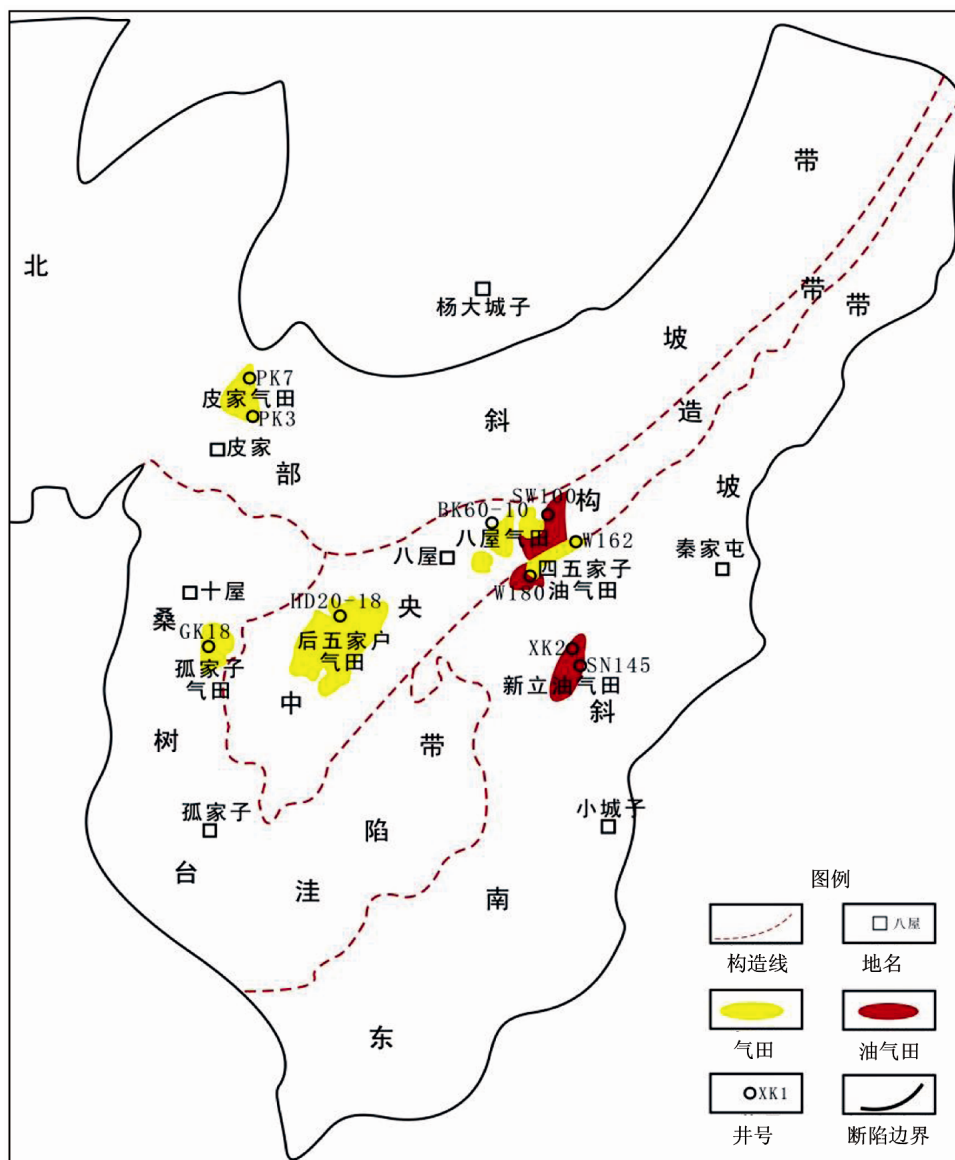
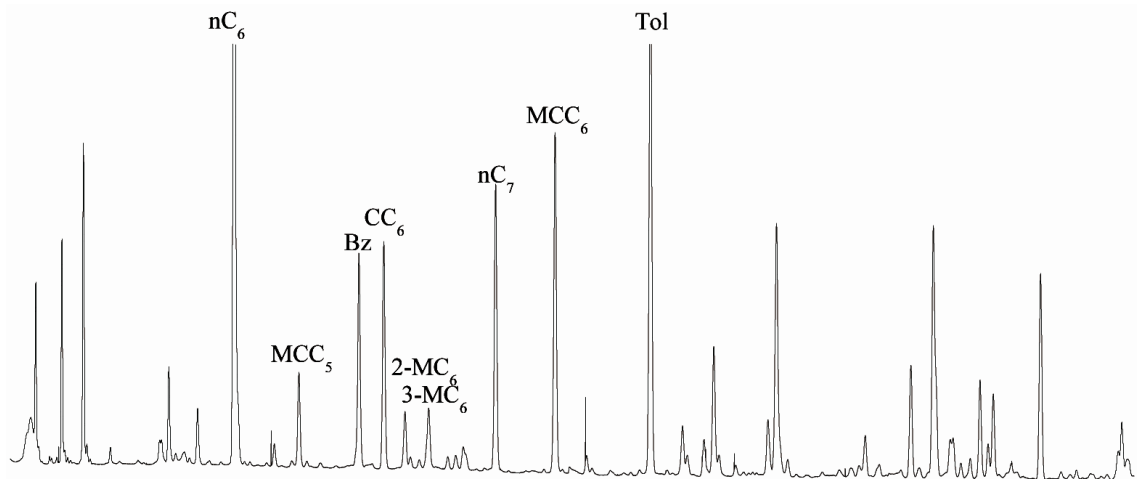


Figure 1. Distribution of oil and gas field and samples
 图 1. 油气田与样品分布图

Table 1. Basic information of source rock samples for thermo desorption-cold trap-GC analysis
 表 1. 热脱附 - 冷阱 - 轻烃气相色谱烃源岩样品基本信息

井号	深度/m	层位	岩性	w (TOC)/%	R _o /%
HS2	1850.50	K _{1y}	深灰色泥岩	0.57	0.96
HS2	2350.00	K _{1s}	灰黑色泥岩	0.81	1.24
SN52	2871.30	K _{1y}	灰黑色泥岩	0.76	1.27
SN52	3207.90	K _{1s}	灰黑色泥岩	1.04	1.44
SN203	2037.50	K _{1y}	泥岩	2.82	0.83

注: R_o为镜质体反射率。



注: MCC₅为甲基环戊烷; Bz为苯; CC₆为环己烷; MCC₆为甲基环己烷; 2-MC₆为2-甲基己烷; 3-MC₆为3-甲基己烷; nC₆为正己烷; nC₇为正庚烷; Tol为甲苯。

Figure 2. Gas chromatograph of light hydrocarbons collected by thermo-desorption-cold trap from 2871.3 m of source rock in Well SN52

图 2. SN52 井 2871.3 m 样品热脱附 - 冷阱 - 轻烃气相色谱图

物,表明所取得的轻烃化合物在 C₆-C₇ 范围内并未出现明显的逸散效应,能够代表烃源岩轻烃组成,可用于气-源直接对比。

4.2. 轻烃族组成

原油和天然气的族组成往往与其生烃母质、热演化程度有关,在轻烃化合物中链烷烃(含正构烷烃和支链烷烃)、环烷烃和芳香烃的相对组成也可以表征轻烃的母质类型和来源。图 3 和图 4 为研究区原油、天然气和烃源岩热脱附轻烃的 C₆ 和 C₇ 轻烃化合物族组成,从图中可看出,无论是 C₆ 还是 C₇,原油、天然气和烃源岩热脱附轻烃均相对贫芳烃、富链烷烃,与其腐泥型母质来源相符合,而且天然气样品明显较原油样品富含链烷烃而贫环烷烃,可能与其热演化程度有关。C₆ 轻烃族组成中,SN52 井 K_{1y}、K_{1s}、HS2 井 K_{1y} 烃源岩热脱附轻烃与天然气轻烃组成相似,尤其是 SN52 井 K_{1s} 吸附气具有最高的链烷烃组成。一方面说明 K_{1y} 和 K_{1s} 烃源岩可能均对研究区的天然气有贡献,另一方面则说明了侵入岩浆对烃源岩在研究区内生成天然气的的影响可能较大。而原油的轻烃组成则与 K_{1s} 烃源岩热脱附轻烃相似,表征了 K_{1s} 烃源岩对原油的贡献。C₇ 轻烃族组成中,SN52 井吸附气具有所有样品中最高的芳香烃含量,可能与其高温烘烤作用有关。原油的轻烃族组成依然是与 K_{1s} 烃源岩热脱附轻烃相似;天然气轻烃组成则与 HS2 井 K_{1y} 烃源岩热脱附轻烃相似,再次说明了 K_{1y} 烃源岩的贡献。

4.3. 轻烃单体烃化合物相对组成

一般认为芳香烃和环烷烃来源于陆源物质,而支链烷烃则来源于水生生物,不同的陆源生物中芳烃和环烷烃含量不同,且与成熟度有关。因此,可利用芳香烃、环烷烃和支链烷烃、正构烷烃的相对含量进行油气源对比。图 5 中原油轻烃明显与天然气轻烃不同,原油样品有较高的(2-MC₆ + 3-MC₆)/nC₆、MCC₆/CC₆和(Bz + CC₆)/nC₆,且与 SN203 井 K_{1s} 烃源岩热脱附轻烃有一定的相似性,再次表征 K_{1s} 烃源岩的贡献。而天然气的上述 3 个比值均较低,说明天然气相对于原油贫高分子化合物和环烷烃、芳香烃,烃源岩热脱附轻烃组成与天然气轻烃相似,除 SN203 井 K_{1s} 烃源岩吸附气外,其余皆落在天然气区,尤其 K_{1y} 烃源岩与天然气相似度高,表征了 K_{1y} 和 K_{1s} 烃源岩对天然气的贡献,但以 K_{1y} 为主。

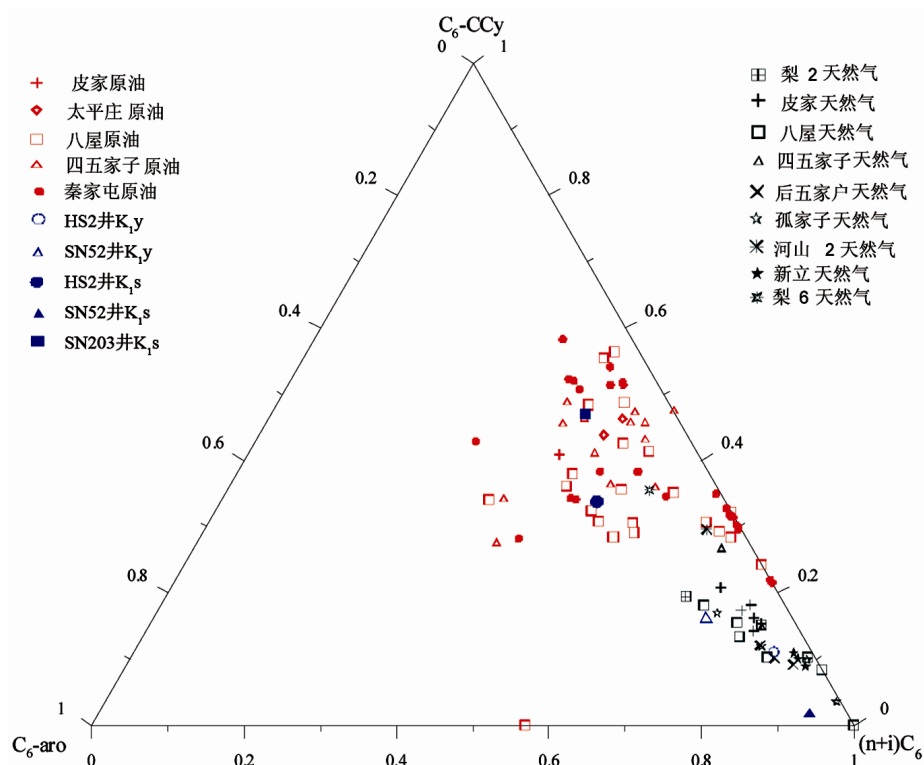


Figure 3. The bulk composition of C₆ light hydrocarbons from oil, gas and source rock
图 3. 原油、天然气和烃源岩 C₆ 轻烃族组成

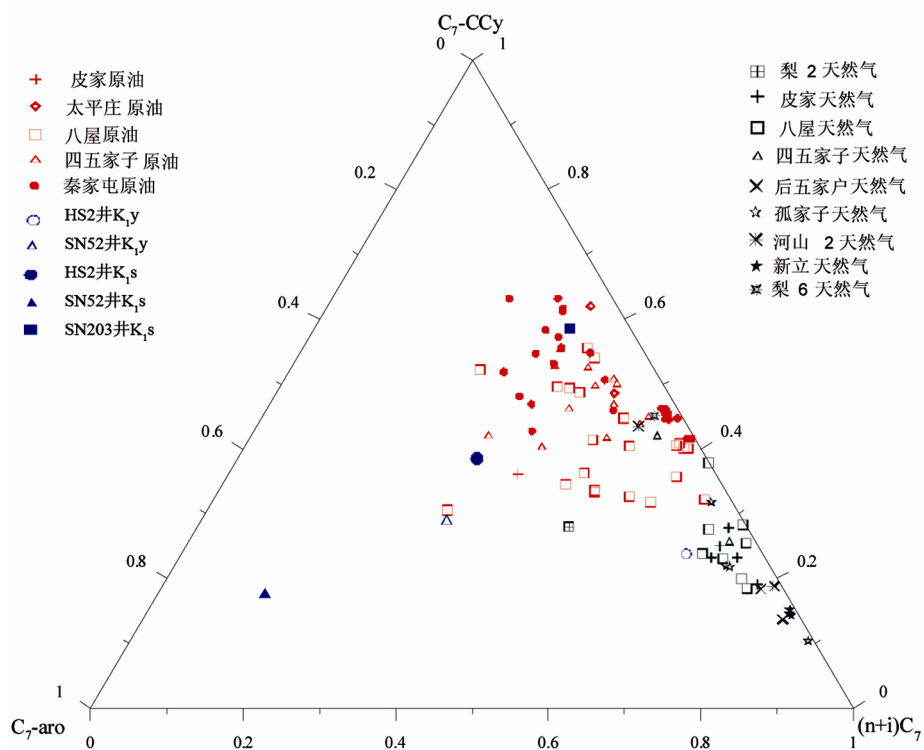


Figure 4. The bulk composition of C₇ light hydrocarbons of oil, gas and source rock
图 4. 原油、天然气和烃源岩 C₇ 轻烃族组成

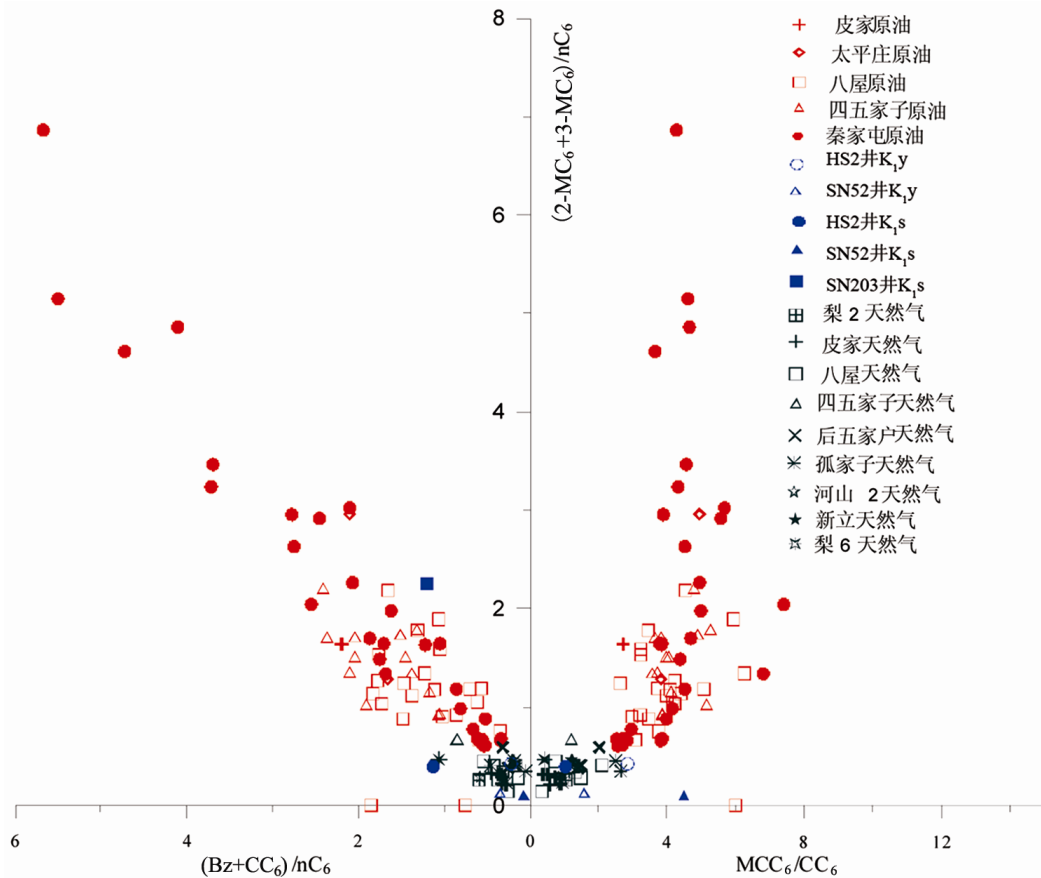


Figure 5. The relative composition of Bz, CC₆, MCC₆, 2-MC₆, 3-MC₆ and nC₆ in light hydrocarbons of oil, gas, source rock

图 5. 原油、天然气和烃源岩轻烃中 Bz、CC₆、MCC₆、2-MC₆、3-MC₆ 和 nC₆ 的相对组成

nC₇、MCC₆ 和二甲基环戊烷(DMCC₅)的相对含量经常被用来判断原油或天然气的母质类型，腐殖型的往往具有高 MCC₆，腐泥型则相反[12]。图 6 中研究区的石油轻烃组成，其 MCC₆ 含量明显较天然气高，可能表征了母质类型的差异，尤其是秦家屯原油轻烃，明显含有较高的甲基环己烷，可能表征该原油亦有腐殖型母质的贡献。由图 6 可看出，HS2 井 K_{1y} 烃源岩样品的 nC₇、MCC₆ 和 DMCC₅ 相对组成与后五家户天然气样品相似，落点在一起，暗示了 K_{1y} 烃源岩对后五家户天然气的贡献。值得注意的是，3 个 K_{1s} 烃源岩的热脱附轻烃组成都相对富含 MCC₆，表征了 K_{1s} 烃源岩中一定量的陆源高等植物贡献。

C₇ 轻烃中甲苯的含量也常与腐殖型母质输入有关。图 7 为研究区原油、天然气和烃源岩热脱附轻烃的 DMCC₅、Tol + MCC₆ 和 2MC₆ + 3MC₆ 相对组成三角图，可以看出，研究区的原油明显比天然气富含芳香烃和甲基环己烷，表征其陆源有机质输入可能较多；而天然气相对富含链烷烃，可能表明水生生源输入较多。5 个烃源岩样品除 HS2 井 K_{1y} 热脱附轻烃介于原油和天然气之间外，余者芳香烃和环烷烃含量皆较高。烃源岩具有相对较高的甲苯含量可能与残留烃和运移烃之间的组成差异有关。HS2 井 K_{1y} 热脱附轻烃介于原油和天然气之间恰好说明了其烃源岩对天然气的贡献。

值得注意的是，上述轻烃指标均与成熟度有着密不可分的关系，原油与天然气之间的差异一方面可能是母质来源的不同造成的，另一方面可能与其热演化程度相关。受取样条件所限，烃源岩样品可能与实际天然气生成层位有异，因此可能存在成熟度的差异，从而造成轻烃组成的差异。在具体气源研究时还应结合研究区的地质背景和生烃史做具体分析。

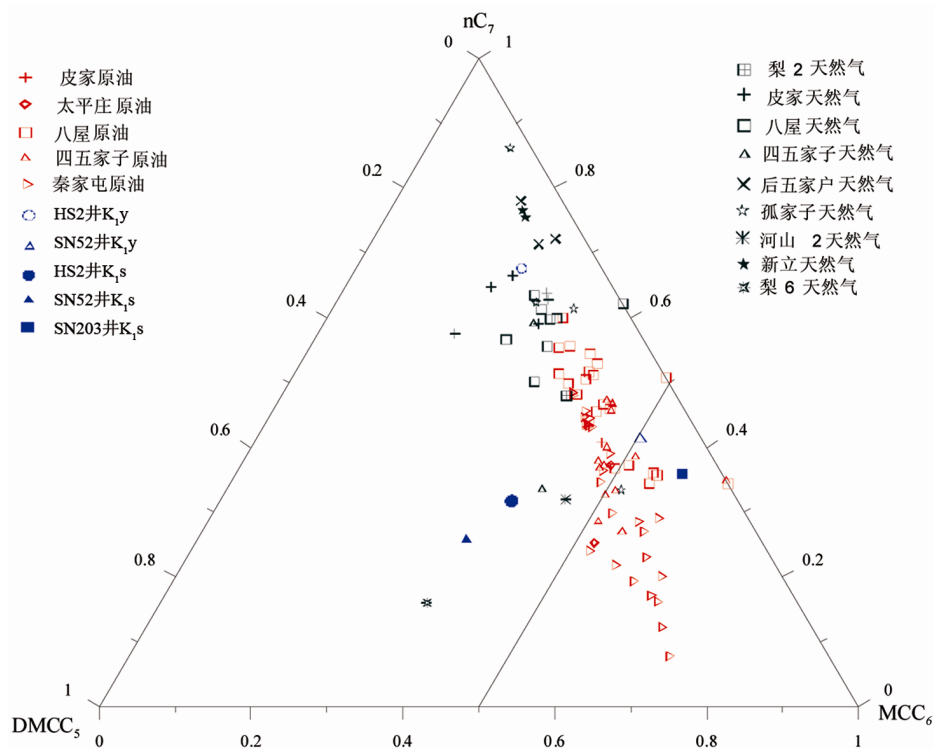


Figure 6. The triangular diagram of MCC_6 , $DMCC_5$, and nC_7 of light hydrocarbons of oil, gas and source rock

图 6. 原油、天然气、烃源岩轻烃的 MCC_6 、 $DMCC_5$ 和 nC_7 组成三角图

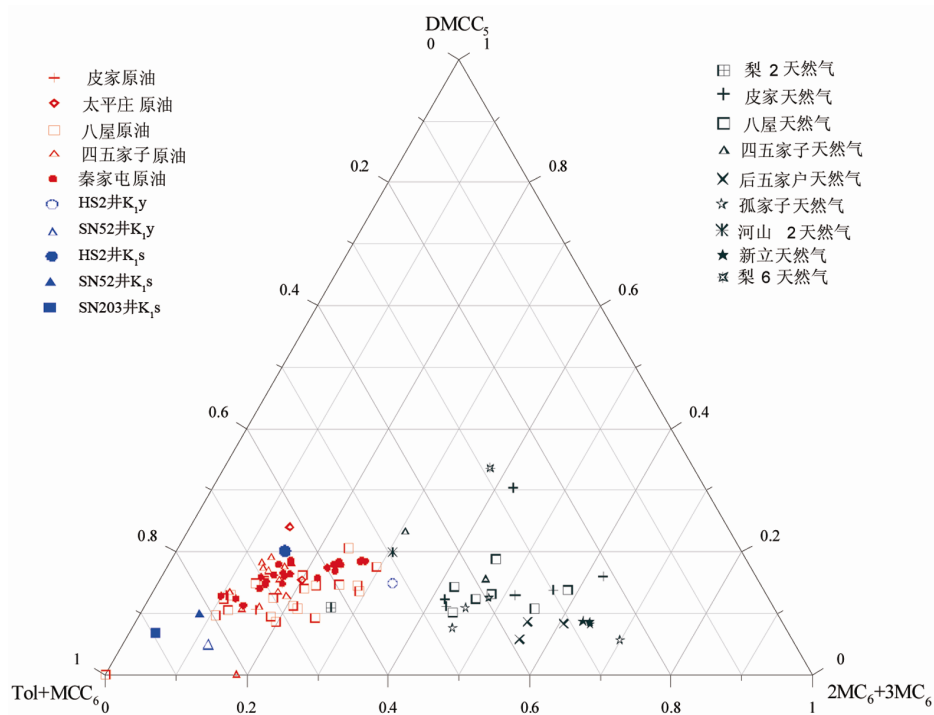


Figure 7. The relative composition of $DMCC_5$, $Tol + MCC_6$ and $2-MC_6 + 3-MC_6$ of light hydrocarbons of oil, gas and source rock

图 7. 原油、天然气、烃源岩轻烃的 $DMCC_5$ 、 $Tol + MCC_6$ 和 $2MC_6 + 3MC_6$ 相对组成

5. 结论

1) 烃源岩热脱附-冷阱-气相色谱能对吸附在烃源岩中的轻烃组分进行直接分析, 所检测的轻烃主要为 C₄ 以上组分, 而且 C₆-C₇ 轻烃组成未见明显逸散, 因此可用于油-气-源三元直接对比。

2) 在轻烃族组成方面, 无论是 C₆ 还是 C₇, 原油、天然气和烃源岩吸附轻烃均相对贫芳烃、富链烷烃, 表征腐泥型母质来源; 原油轻烃族组成与 K_{1s} 烃源岩吸附轻烃相类似, 表征 K_{1s} 烃源岩贡献; 天然气轻烃主体与 K_{1y} 烃源岩吸附轻烃相似, 表征 K_{1y} 贡献。

3) 单体轻烃化合物相对组成上, 原油轻烃(2-MC₆ + 3-MC₆)/nC₆、MCC₆/CC₆ 和(Bz + CC₆)/nC₆ 均较高; 甲基环己烷指数较高, 以秦家屯原油为最; 相对富含代表陆源有机质输入的甲苯和甲基环己烷, 主要与 K_{1s} 烃源岩热脱附烃的组成相似, 表征原油主力烃源岩为 K_{1s}, 秦家屯原油则有较为明显的煤系烃源岩的贡献。天然气轻烃组成则与原油轻烃具有较大的差异, 相对富含正构烷烃和支链烷烃, 总体上与 K_{1y} 烃源岩热脱附烃相似, 表征了以 K_{1y} 为主力贡献烃源岩。

基金项目

国家自然科学基金项目(41302121)。

参考文献 (References)

- [1] 郑建京, 胡慧芳, 刘文汇, 等. K-Ar 关系在天然气气源对比研究中的应用[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(4): 499-502.
- [2] 张殿伟, 刘文汇, 郑建京, 等. 氩同位素用于库车坳陷天然气主力气源岩判识[J]. 地球化学, 2005, 34(4): 405-409.
- [3] 蒋助生, 罗霞, 李志生, 等. 苯、甲苯碳同位素组成作为气源对比新指标的研究[J]. 地球化学, 2000, 29(4): 410-415.
- [4] 李剑, 罗霞, 李志生, 等. 对甲苯碳同位素值作为气源对比指标的新认识[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(3): 177-180.
- [5] Hosgermez, H. and Yalcin, M.N. (2005) Gas-Source Rock Correlation in Thrace Basin, Turkey. *Marine and Petroleum Geology*, **22**, 901-916. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2005.04.002>
- [6] Boreham, C.J. (2008) Carbon and Hydrogen Isotopes of Neo-Pentane for Biodegraded Natural Gas Correlation. *Organic Geochemistry*, **39**, 1483-1486. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2008.06.010>
- [7] 赵红静. 吐哈盆地台北凹陷天然气成因及气源对比[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.
- [8] 罗群, 卢宏, 刘银河, 等. 梨树凹陷断裂特征及对油气的控制[J]. 大庆石油学院学报, 1996, 20(3): 6-10.
- [9] 熊海河. 松辽盆地南部天然气勘探开发现状及展望[J]. 天然气工业, 2000, 20(S): 1-2.
- [10] 李君, 黄志龙, 王海. 烃源岩生烃时效性对油气分布的控制作用——以松辽盆地南部东南隆起区梨树断陷为例[J]. 天然气工业, 2006, 26(9): 14-16.
- [11] 张俊. 松辽盆地南部梨树断陷营城组烃源岩评价[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(6): 45-48.
- [12] 戴金星. 利用轻烃鉴别煤成气和油型气[J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(5): 26-32.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jogt@hanspub.org