



川中地区侏罗系烃源岩和原油中三环萜烷分布特征及指示意义

杨岩岩^{1,2}, 唐友军^{1,2}, 洪海涛³, 李美俊⁴, 吴长江³, 张吉振^{1,2}, 卢晓林⁴

1. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100; 2. 长江大学 资源与环境学院, 湖北 武汉 430100; 3. 中国石油西南油田分公司勘探开发研究院, 四川 成都 610041;
4. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室/地球科学学院, 北京 102249

摘要: 借助气相色谱-质谱技术, 通过对川中地区侏罗系大安寨段烃源岩及原油样品的系统地球化学分析, 揭示了生物标志物中三环萜烷系列的分布特征, 并探讨了其对于沉积环境和生物来源的指示意义. 结果表明: 大安寨段烃源岩及原油姥植比 Pr/Ph 中等, C₁₉-C₂₆ 三环萜烷呈现 C₂₁ 优势. C₁₉₊₂₀ 和 C₂₃ 的相对百分含量较低, C₂₄TeT/C₂₆TT 值大于 1, 指示大安寨段沉积时期水体较浅, 生源构成以菌藻生源为主, 兼有丰富的 高等植物生源的混源输入, 形成于弱还原的淡水湖相环境.

关键词: 烃源岩; 三环萜烷; 沉积环境; 大安寨段; 侏罗系; 川中地区

DISTRIBUTION AND INDICATION OF TRICYCLIC TERPANE IN JURASSIC SOURCE ROCKS AND CRUDE OIL IN CENTRAL SICHUAN BASIN

YANG Yan-yan^{1,2}, TANG You-jun^{1,2}, HONG Hai-tao³, LI Mei-jun⁴,
WU Chang-jiang³, ZHANG Ji-zhen^{1,2}, LU Xiao-lin⁴

1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, China;
2. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China;
3. Exploration and Development Research Institute of Southwest Oilfield Branch, PetroChina Co., Ltd., Chengdu 610041, China;
4. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting/ College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

Abstract: The distribution characteristics of tricyclic terpenes in biomarkers and their indicative significance for sedimentary environment and biological sources are discussed through the systematic geochemical analysis of source rocks and crude oil samples from Jurassic Da'anzhai Member in central Sichuan Basin by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The results show that the Pr/Ph ratios of source rocks and crude oil are medium level, with C₁₉-C₂₆ tricyclic terpenes showing the dominance of C₂₁, low relative percentages of C₁₉₊₂₀ and C₂₃ contents, and C₂₄TeT/C₂₆TT value greater than 1, indicating that the water was shallow during the sedimentary period of Da'anzhai Member, and the biogenesis was mainly bacteria and algae, with rich mixed-source input of higher plants, which was formed in the weak reduction environment of freshwater lake facies.

Key words: source rock; tricyclic terpene; sedimentary environment; central sichuan basin; Da'anzhai Member; Jurassic; central Sichuan Basin

收稿日期: 2021-05-31; 修回日期: 2021-09-28. 编辑: 张哲.

基金项目: 国家自然科学基金项目“苯基多环芳烃检测及其石油地球化学意义”(41972148); 国家自然科学基金重点项目“深层油气的来源和演化: 单体化合物和硫碳同位素限定”(41730424).

作者简介: 杨岩岩(1995—), 女, 硕士研究生, 地质工程专业, 通信地址 湖北省武汉市蔡甸区大学路 111 号, E-mail//1346794128@qq.com

通信作者: 唐友军(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要从事油气成藏方面的教学与研究工作, 通信地址 湖北省武汉市蔡甸区大学路 111 号, E-mail//tj@yangtzeu.edu.cn

0 引言

三环萜烷系列化合物普遍存在于原油和烃源岩抽提物中,是饱和烃组分中重要的组成部分^[1-2],其分布特征可提供大量的地质及地球化学信息,包括沉积环境以及有机质输入特征^[3]等.一般情况下湖相陆源沉积物以高含量的C₂₁三环萜烷为特征,而河流/三角洲相及沼泽相烃源岩和原油中,则明显富含C₁₉和C₂₀三环萜烷^[3-4].来自高等植物输入的陆相原油或抽提物中,富含C₁₉和C₂₀长链三环萜烷,缺乏C₂₀以上化合物,而盐湖相或海相烃源岩及其原油中以C₂₃长链三环萜烷占优势,更富集高碳数三环萜烷化合物^[5-8].目前对四川盆地侏罗系大安寨段的烃源岩及原油的研究多集中于三环萜烷的分布特征及影响因素,尚无三环萜烷对沉积环境的指示意义的研究.笔者在对大安寨段烃源岩及原油样品进行常规地球化学分析的基础上,通过与前人研究结果的分析对比,揭示淡水环境烃源岩及原油中C₁₉₊₂₀TT、C₂₁TT、C₂₃TT相对百分含量的分布特征,并主要讨论C₁₉—C₂₃三环萜烷分布对大安寨段沉积环境及母质来源的影响,以为研究区的油气勘探提供依据.

1 地质背景和样品实验

四川盆地是中国西南部重要的含油气盆地,在寒武纪、奥陶纪、志留纪等时期经历了多期复杂的构造运动,形成了四面造山带的构造格局^[9].盆地东北和西北分别以大巴山褶皱带和龙门山褶皱带为界,东南和西南分别以大娄山褶皱带和大相岭褶皱带为界^[10](图1).本研究的对象为川中侏罗系大安寨段,主要分布在盆地中部.川中地区自晚三叠世开始进入陆相沉积阶段,经历了印支运动早晚幕,龙门山、大巴山相继抬升,娄山与江南古陆连为一体,进入“环形凹陷”演化阶段^[11-13].中侏罗世早期四川盆地南部因燕山运动早幕抬升运动的影响,在大安寨段沉积之后,至沙溪庙组沉积前,四川盆地经历了大安寨段、凉高山组两次较大规模的湖盆沉降抬升活动,盆周隆起,构成西南高、东北低的古构造格局,凹陷中心由大安寨时期的仪陇—平昌—达县一带移至达县地区^[14-16].晚侏罗世晚期,龙门山进一步抬升,四川盆地物源供应充分^[17].

研究样品采自川中油气区取样井的大安寨段烃源岩.将采集的烃源岩样品进行预处理,先进行粉碎处

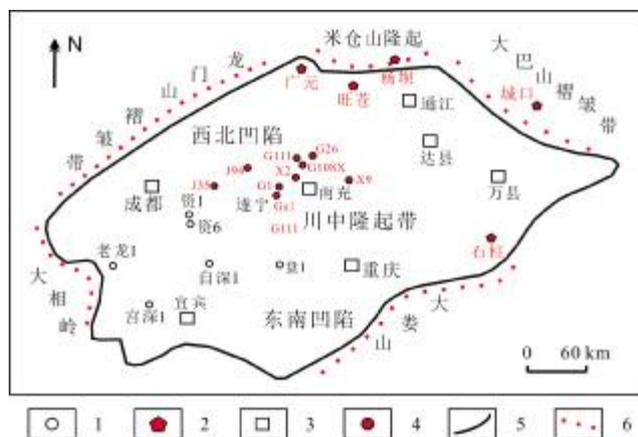


图1 四川盆地及采样井位分布图

(据文献[9-10]修编)

Fig. 1 Distribution of sampling wells in Sichuan Basin

(Modified from References [9-10])

1—钻井(borehole); 2—剖面(section); 3—地名(place name); 4—取样井(sampling well); 5—盆地边界(basin boundary); 6—构造带(tectonic zone)

理,再将粉末样品放入烤箱进行烘干.首先对烃源岩样品进行有机碳、镜质体反射率分析,获取样品基础信息;然后基于传统的索氏提取法提取72 h,获取氯仿沥青“A”;然后再把烃源岩的氯仿沥青“A”和原油样品进行柱层析分离,对饱和烃和芳烃进行气相色谱-质谱分析.气相色谱分析试验过程依据中国石油天然气行业标准 GB/T13610—2014,采用美国安捷伦公司生产的7890A 色谱仪进行,该仪器配备热导检测器和火焰离子化检测器(FID).烘箱温度设定为以4 °C/min的速率从40 °C升高到300 °C,然后在300 °C下保持20 min.使用带有50 m × 0.25 mm 熔融石英毛细管柱的GC-MS(气相色谱质谱)分析仪,气相色谱仪直接连接到离子源(电子能量电离电压70 eV,发射电流100 mA,界面温度250 °C)^[18-19].

2 结果与讨论

2.1 烃源岩与原油地球化学特征

大安寨段沉积相带具有明显的环带状分布特征,湖盆中心发育暗色泥页岩为主的烃源岩,向外围随着湖水变浅,烃源岩厚度逐渐减薄,生油条件也逐渐变差,大安寨段烃源岩分布范围广^[20-22].烃源岩样品TOC分布范围为1%~2%,生烃潜量(S₁+S₂)分布范围为2 × 10⁻³~10 × 10⁻³,为中等—好烃源岩. HI 分布于150 × 10⁻³~

300×10^{-3} , 指示有机质类型为 II 型到 III 型, 以 II 型为主。正构烷烃分布特征呈单峰态均势分布, 碳数分布介于 nC_{12} — nC_{35} , 主峰碳为 C_{18} — C_{24} , 轻重比 C_{21}/C_{22} 值均大于 1.0, 指示有机质来源为湖相低等水生生物及高等植物贡献。 R_o 介于 0.5%~1.5%, T_{max} 分布范围为 440~480 °C, 正构烷烃无明显奇偶优势, 指示烃源岩处于成熟阶段。 烃源岩 Pr/Ph 值分布于 1.2~2.0, 呈较明显的姥鲛烷优势, 指示其沉积于偏氧化的环境(图 2)。

大安寨段原油正构烷烃分布完整, 均为单峰态均势型的分布, 碳数分布范围为 nC_{13} — nC_{34} , 多数样品主峰碳为 nC_{23} , 无明显奇偶优势, 指示原油成熟度较高。 姥植比介于 1.1~1.41, 表明其源岩沉积于弱还原环境, 沉积水体具有一定的深度, 母质来源为混源有机质, 既有低等的水生生物, 又存在高等的陆源植物(图 2)。

2.2 烃源岩与原油三环萜烷分布特征及差异性

在饱和烃 m/z 191 质量色谱图中可清晰地检测出 C_{19} — C_{29} 三环萜烷。 完整且丰度较高的 C_{19} — C_{29} 三环萜烷系列一般指示低等生物藻类的贡献, 不完整的 C_{19} — C_{29} 三环萜烷和高含量的四环萜烷系列通常存在于微生物活动强烈的煤系烃源岩及其生成的原油中^[23]。 在大安寨段烃源岩三环萜烷的分布中, 大部分样品三环萜烷系列化合物分布呈现出以 C_{21} 为主峰的近正态分

布, C_{23} 三环萜烷含量较低(图 3)。 川中大安寨段原油样品的低三环萜烷含量、以 C_{21} 为主峰碳的特征, 均指示其原始有机质以淡水湖相输入为主。 C_{24} 四环萜烷的相对含量也与沉积环境相关。 一般而言, 陆源烃源岩和相关的原油中具有相对较高的 C_{24} 四环萜烷, $C_{24}TeT/C_{26}TT$ 值介于 1.33~1.63, 表明大安寨段烃源岩的沉积环境较为稳定。

如图 3 所示, 大安寨段烃源岩样品 C_{19+20} 三环萜烷占优势, 少部分样品 C_{23} 三环萜烷占优势。 C_{24} 四环萜烷也存在两种不同的分布特征: 一部分样品的 $C_{24}TeT/C_{26}TT$ 值介于 1.04~2.08, 四环萜烷的丰度明显高于 C_{26} 三环萜烷, 而其余样品的 $C_{24}TeT/C_{26}T$ 比值小于 1, 表明四环萜烷的丰度较低。 大安寨段原油三环萜烷系列分布特征相近, 大部分样品 C_{19} — C_{29} 三环萜烷呈现 C_{21} 优势, 其他三环萜烷分布完整, $C_{24}TeT/C_{26}TT$ 值介于 1.33~1.63。 值得注意的是, PL10 井大安寨段烃源岩顶底两段的大一亚段、大三亚段以介壳灰岩为主, 大一亚段、大三亚段的中部以黑色泥岩为主, 样品具有更高的 $C_{19}TT$ 和 $C_{20}TT$ 含量, 指示具有更高比例的陆源高等植物母质输入。 川中大安寨段不同地区烃源岩和原油三环萜烷系列分布特征, 表明其形成于水体较浅、还原相对较弱的环境, 指示其母质来源于陆源高等植物

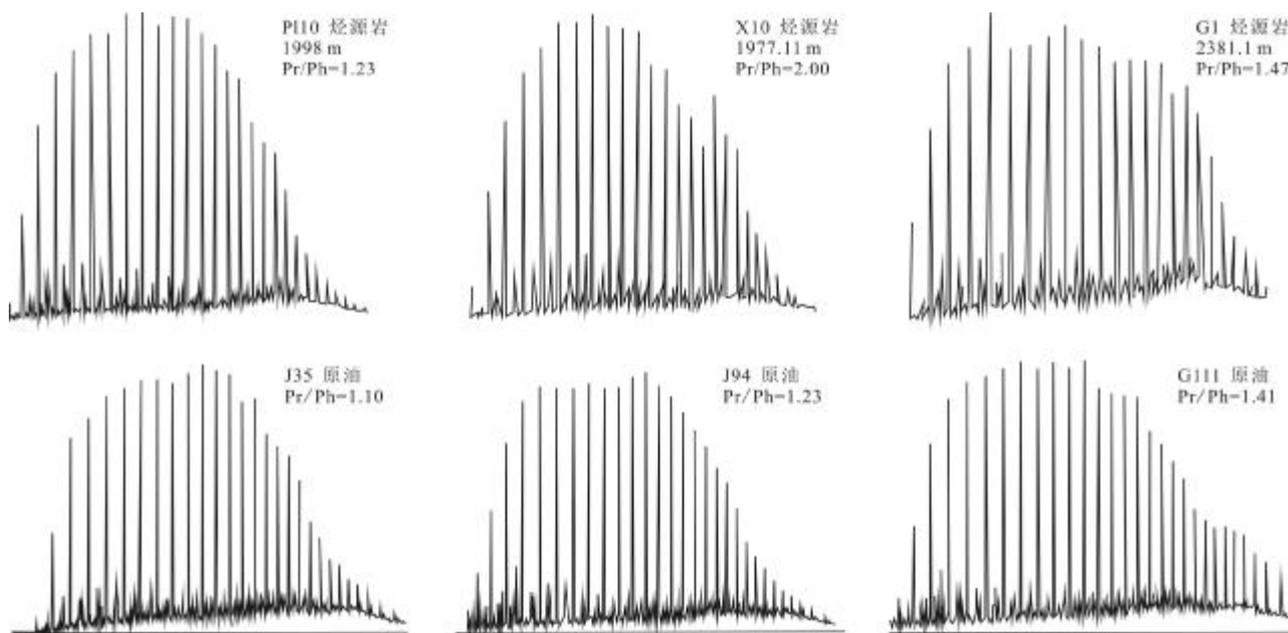
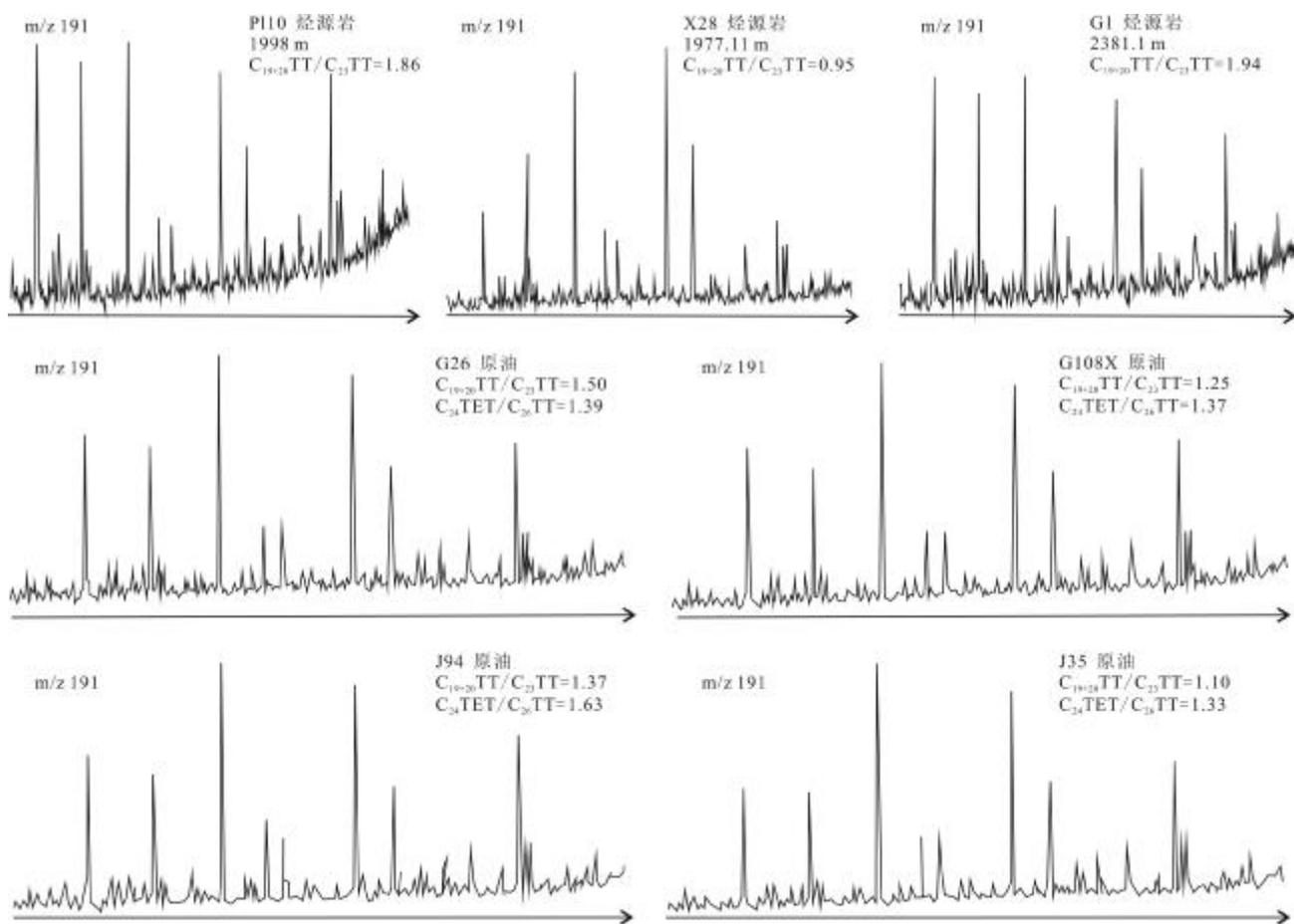


图 2 大安寨段烃源岩及原油正构烷烃分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of n-alkanes in source rocks and crude oil of Da'anzhai Member

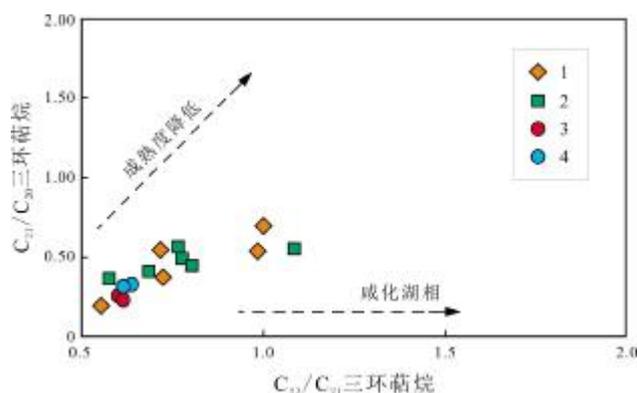
图3 大安寨段烃源岩与原油 C_{19} — C_{26} 三环萜烷分布特征Fig. 3 Distribution characteristics of C_{19} — C_{26} tricyclic terpanes in source rocks and crude oil of Da'anzhai Member

和低等水生生物的双重贡献。

2.3 三环萜烷在指示沉积环境中的应用

为了进一步证实研究结论,将其与前人对淡水湖相烃源岩和原油的研究成果进行对比。三环萜烷对于区分各套烃源岩特征具有明显指示作用,其中 C_{23}/C_{21} 三环萜烷可以反映水体咸化程度的差异,通常水体越咸化, C_{23} 三环萜烷越富集。准噶尔盆地玛湖凹陷^[24]二叠系下乌尔禾组玛东、玛西地区烃源岩和佳木河组夏子街和中拐地区的烃源岩样品指示,乌尔禾组及佳木河组烃源岩 C_{21} 三环萜烷为高峰, C_{23}/C_{21} 三环萜烷与 C_{21}/C_{20} 三环萜烷的相对含量均较低,成熟度相对大安寨段较低,咸化程度较高于大安寨段,总体来说其水体环境为相对淡水的弱还原环境(图4)。

Ph/nC₁₈-Pr/nC₁₇ 交会图(图5)显示,乌尔禾组样品成熟度较高,佳木河组烃源岩 TOC 和热解数据整体更差,处于高熟—过熟的演化阶段,样品总体上分布于过

图4 淡水湖相烃源岩和原油 C_{23}/C_{21} 与 C_{21}/C_{20} 三环萜烷关系图Fig. 4 Relationship between C_{23}/C_{21} and C_{21}/C_{20} tricyclic terpanes in source rocks and crude oil of freshwater lake facies

- 1—玛湖凹陷佳木河组烃源岩(source rock of Jiamuhe fm. in Mahu sag);
- 2—玛湖凹陷乌尔禾组烃源岩(source rock of Wuerhe fm. in Mahu sag);
- 3—公山庙大安寨段油(oil of Da'anzhai mem. in Gongshanmiao oilfield);
- 4—八角场大安寨段油(oil of Da'anzhai mem. in Bajiaochang gas field)

渡环境区域, 指示其母质来自陆源高等植物和低等水生生物的双重贡献. 准噶尔盆地阜康断裂带二叠系芦草沟组^[25]原油的 Pr/nC_{17} 值和 Ph/nC_{18} 值比川中地区侏罗系大安寨段相对较大, 大安寨段成熟度相对较高, 但芦草沟组原油样品整体也分布于过渡环境区域, 表明生烃母质形成于较封闭的湖相还原环境中, 有机质兼有陆源有机质和低等水生生物的贡献.

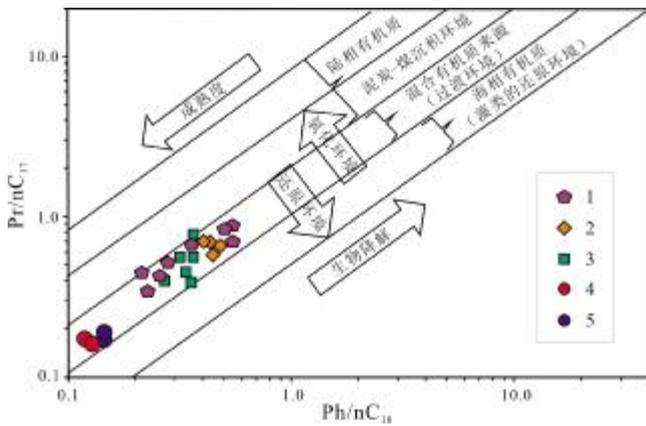


图 5 淡水湖相烃源岩和原油 Ph/nC_{18} - Pr/nC_{17} 交会图
Fig. 5 The Ph/nC_{18} - Pr/nC_{17} crossplot for source rocks and crude oil of freshwater lake facies

- 1—阜康断裂带芦草沟组油 (oil of Lucaogou fm. in Fukang fault zone);
- 2—玛湖凹陷佳木和组烃源岩 (source rock of Jiamuhe fm. in Mahu sag);
- 3—玛湖凹陷乌尔禾组烃源岩 (source rock of Wuerhe fm. in Mahu sag);
- 4—公山庙大安寨段油 (oil of Da'anzhai mem. in Gongshanmiao oilfield);
- 5—八角场大安寨段油 (oil of Da'anzhai mem. in Bajiaochang gas field)

根据前人研究的辽河盆地、塔里木盆地、非洲乍得 Bonger 盆地、苏丹 Muglad 盆地等不同盆地的淡水湖相烃源岩和原油^[26], 以及阜康断裂带二叠系芦草沟组原油, 发现整体上 C_{19} - C_{23} 三环萜烷大多具有 $C_{21}TT$ 优势, 其相对百分含量较高, 分布范围广, 平均值为 35%, 而 $C_{19+20}TT$ 和 $C_{23}TT$ 的相对百分含量均较低, 分别为 15%~50% 和 20%~40%. 如图 6 所示, 不同盆地的淡水湖相烃源岩及原油样品在 $C_{19+20}TT$ - $C_{21}TT$ - $C_{23}TT$ 三角图中整体上聚在一起, C_{20} - C_{21} - C_{23} 三环萜烷组成特征与大安寨段原油样品分布相似, 进一步证实了前文所述三环萜烷对于川中侏罗系大安寨段的烃源岩及原油样品沉积环境具有很好的指示意义.

综上所述, 应用三环萜烷分布特征指示沉积环境具有一定的现实意义, 川中大安寨段沉积环境偏弱还原, 母质兼有湖相低等水生生物及高等植物输入, 烃源

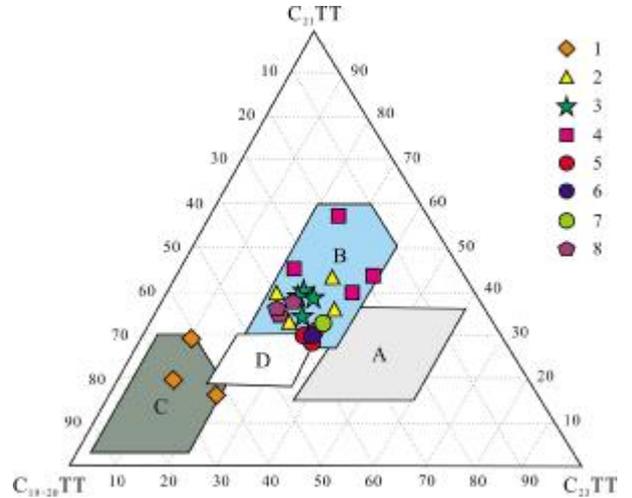


图 6 淡水湖相烃源岩和原油中 $C_{19+20}TT$ 、 $C_{21}TT$ 和 $C_{23}TT$ 的相对百分含量

Fig. 6 Relative percentages of $C_{19+20}TT$, $C_{21}TT$ and $C_{23}TT$ contents in source rocks and crude oil of freshwater lake facies
A—海相/咸水湖相 (marine/saline lake facies); B—淡水-微咸水湖相 (freshwater-brackish water lake facies); C—沼泽相 (swamp facies); D—河流/三角洲相 (fluvial/delta facies); 1—塔里木盆地煤系烃源岩 (coal measure source rock in Tarim Basin); 2—辽河盆地淡水湖相烃源岩 (source rock of freshwater lake facies in Liaohu Basin); 3—Muglad 盆地淡水湖相原油 (crude oil of freshwater lake facies in Muglad Basin); 4—Bonger 盆地淡水湖相烃源岩 (source rock of freshwater lake facies in Bonger Basin); 5—公山庙大安寨段油 (oil of Da'anzhai mem. in Gongshanmiao oilfield); 6—八角场大安寨段油 (oil of Da'anzhai mem. in Bajiaochang gas field); 7—金华大安寨段油 (oil of Da'anzhai mem. in Jinhua); 8—阜康断裂带芦草沟组油 (oil of Lucaogou fm. in Fukang fault zone)

岩及原油中三环萜烷以 C_{21} 为主峰碳, C_{19+20} 和 C_{23} 的相对百分含量较低, 表现出原始有机质以淡水湖相沉积为主.

3 结论

1) 四川盆地侏罗系大安寨段烃源岩及相关原油中三环萜烷表现出以 C_{21} 为主峰碳, C_{19+20} 和 C_{23} 的相对百分含量较低, 烃源岩样品较原油样品具有更高的 $C_{19}TT$ 和 $C_{20}TT$ 含量, 指示有更高比例的陆源高等植物母质输入. 正构烷烃系列分布完整且不具明显的奇偶优势, 姥植比较低, 指示了烃源岩及原油形成于氧化-弱还原的淡水环境.

2) 结合前人对淡水湖相的烃源岩和原油的研究成果进行对比发现, 淡水环境下的烃源岩与原油 C_{20} -

C₂₁-C₂₃ 三环萜烷组成特征相似,均呈现出以 C₂₁ 为主峰的近正态分布,低 C₂₃ 三环萜烷含量,有机质输入兼有湖相低等水生生物及高等植物贡献,与三环萜烷在判识沉积环境及有机质来源方面结果一致,表明三环萜烷系列生物标志物具有较好的应用效果,可作为研究区有机质输入类型、沉积环境的有效判识指标。

参考文献(References):

- [1]Anders D E, Robinson W E. Cycloalkane constituents of the bitumen from Green River shale[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1971, 35(7): 661-678.
- [2]Aquino Neto F R, Trendel J M, Restlé A, et al. Occurrence and formation of tricyclic and tetracyclic terpanes in sediments and petroleum[C]//Bjorøy M, Albrecht P, Cornford C, et al. *Advances in Organic Geochemistry 1981*. New York: Wiley, 1983: 659-667.
- [3]Zumberge J E. Prediction of source rock characteristics based on terpane biomarkers in crude oils: A multivariate statistical approach [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1987, 51(6): 1625-1637.
- [4]Peters K E, Walters C C, Moldowan J M. *The biomarker guide: Volume 2, Biomarkers and isotopes in petroleum systems and earth history*[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [5]Tao S Z, Wang C Y, Du J G, et al. Geochemical application of tricyclic and tetracyclic terpanes biomarkers in crude oils of NW China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 67: 460-467.
- [6]Alberdi M, Moldowan J M, Peters K E, et al. Stereoselective biodegradation of tricyclic terpanes in heavy oils from the Bolivar Coastal Fields, Venezuela[J]. *Organic Geochemistry*, 2001, 32(1): 181-191.
- [7]陈竹新,王丽宁,杨光,等.川西南冲断带深层地质构造与潜在油气勘探领域[J].*石油勘探与开发*, 2020, 47(4): 653-667.
Chen Z X, Wang L N, Yang G, et al. Geological structures and potential petroleum exploration areas in the southwestern Sichuan fold-thrust belt, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(4): 653-667.
- [8]刘树根,李智武,孙玮,等.四川含油气叠合盆地基本特征[J].*地质科学*, 2011, 46(1): 233-257.
Liu S G, Li Z W, Sun W, et al. Basic geological features of superimposed basin and hydrocarbon accumulation in Sichuan Basin, China [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2011, 46(1): 233-257.
- [9]刘树根,邓宾,李智武,等.盆山结构与油气分布——以四川盆地为例[J].*岩石学报*, 2011, 27(3): 621-635.
Liu S G, Deng B, Li Z W, et al. The texture of sedimentary basin-orogenic belt system and its influence on oil/gas distribution: A case study from Sichuan basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(3): 621-635.
- [10]李伟,易海永,胡望水,等.四川盆地加里东古隆起构造演化与油气聚集的关系[J].*天然气工业*, 2014, 34(3): 8-15.
Li W, Yi H Y, Hu W S, et al. Tectonic evolution of Caledonian paleohigh in the Sichuan Basin and its relationship with hydrocarbon accumulation[J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(3): 8-15.
- [11]郑民,贾承造,王文广,等.海相叠合盆地构造演化与油裂解气晚期成藏关系[J].*天然气地球科学*, 2015, 26(2): 277-291.
Zheng M, Jia C Z, Wang W G, et al. The relationship between tectonic evolution and oil-cracking gas accumulation in late stage for marine superimposed basins[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2015, 26(2): 277-291.
- [12]孟蕾.四川盆地致密油气形成条件及区划[D].青岛:中国石油大学(华东), 2015.
Meng L. Research on formation conditions and regionalization of tight oil and gas in Sichuan Basin [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015.
- [13]游君君,杨希冰,雷明珠,等.珠江口盆地珠三坳陷不同沉积环境下烃源岩和原油中长链三环萜烷、二环萜烷分布特征及地球化学意义[J].*天然气地球科学*, 2020, 31(7): 904-914.
You J J, Yang X B, Lei M Z, et al. The characteristics and significances of cheilanthane tricyclic terpanes and bicyclic sesquiterpanes in source rocks and oils under different depositional environments in Zhu III Depression, Pearl River Mouth Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(7): 904-914.
- [14]蔡娉婷.四川盆地川中须家河组砂岩成岩作用及成岩流体研究[D].南昌:东华理工大学, 2019.
Cai P T. The research of sandstone diagenesis and diagenetic fluid of the Xujiahe Formation in the central of Sichuan Basin[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2019.
- [15]陈安定,赵俊峰,漆建华,等.三环萜烷、甾烷分布用于南图尔盖盆地油源对比[J].*新疆石油地质*, 2013, 34(5): 602-606.
Chen A D, Zhao J F, Qi J H, et al. Distribution of tricyclic terpane and sterane with application to oil-source correlation in southern Turgay Basin[J].*Xinjiang Petroleum Geology*, 2013, 34(5): 602-606.
- [16]庞正炼,陶士振,张景建,等.四川盆地侏罗系大安寨段致密油多尺度差异化富集及主控因素[J].*天然气地球科学*, 2019, 30(9): 1301-1311.
Pang Z L, Tao S Z, Zhang J J, et al. Differentiation accumulation in multiple scales of tight oil and its main controlling factors of Jurassic Da'anzhai Member in Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(9): 1301-1311.
- [17]邹娟,金涛,李雪松,等.川东地区下侏罗统勘探潜力评价[J].*中国石油勘探*, 2018, 23(4): 30-38.
Zou J, Jin T, Li X S, et al. Evaluation on exploration potentials of Lower Jurassic reservoirs in eastern Sichuan Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2018, 23(4): 30-38.

- [18]李梦茹,唐友军,刘岩,等.江陵凹陷不同地区原油地球化学特征及油源对比[J].天然气地球科学,2018,29(9):1240-1251.
Li M R, Tang Y J, Liu Y, et al. Geochemical characteristics and oil-source correlation in crude oils from different regions of Jiangling Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(9): 1240-1251.
- [19]张吉振,唐友军,洪海涛,等.川中油气区金华地区大安寨段及须五段烃源岩生物标志物特征和生源构成研究[J].长江大学学报(自然科学版),2021,18(5):1673-1409.
Zhang J Z, Tang Y J, Hong H T, et al. Biomarker characteristics and source composition of Da'anzhai and Xu5 Member source rocks in Jinhua area, central Sichuan oil and gas area [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2021, 18(5): 1673-1409.
- [20]杨若飞.四川盆地大安寨段黑色岩系沉积环境、成烃特征及对早侏罗世大洋缺氧事件的陆相响应研究[D].南京:南京大学,2019.
Yang R F. Sedimentary environment and hydrocarbon generation of the blackshales series in the Da'anzhai Member and its terrestrial response to the Early Jurassic oceanic anoxic event in the Sichuan Basin, China[D]. Nanjing: Nanjing University, 2019.
- [21]鲁宁.四川盆地东部三叠-侏罗纪之交沉积环境与陆地古生态变化[D].合肥:中国科学技术大学,2019.
Lu N. Changes in sedimentary environment and terrestrial paleoecology across the Triassic-Jurassic transition in eastern Sichuan Basin[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [22]张宇,杜垚,刘耘,等.四川盆地侏罗系大安寨段湖相页岩油气基本特征及勘探方向[J].中国地质,2022,49(1):51-65.
Zhang Y, Du Y, Liu Y, et al. Basic characteristics and exploration direction of lacustrine shale oil and gas in Da'anzhai Member of Jurassic in Sichuan Basin[J]. Geology in China, 2022, 49(1): 51-65.
- [23]黄思钦.四川盆地陆相烃源岩生物标志化合物特征及应用[D].成都:西南石油大学,2016.
Huang S Q. Characteristics and application of biomarkers in terrestrial source rocks of Sichuan Basin[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016. (in Chinese)
- [24]陈哲龙,柳广弟,卫延召,等.准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系烃源岩三环萜烷分布样式及影响因素[J].石油与天然气地质,2017,38(2):311-322.
Chen Z L, Liu G D, Wei Y Z, et al. Distribution pattern of tricyclic terpanes and its influencing factors in the Permian source rocks from Mahu Depression in the Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(2): 311-322.
- [25]刘海磊,李卉,向辉,等.准噶尔盆地东南缘阜康断裂带及其周缘原油地球化学特征和成因[J].天然气地球科学,2020,31(2):258-267.
Liu H L, Li H, Xiang H, et al. Geochemistry, genesis and distribution of crude oils in the Fukang fault zones and their periphery in Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(2): 258-267.
- [26]肖洪,李美俊,杨哲,等.不同环境烃源岩和原油中C₁₉-C₂₃三环萜烷的分布特征及地球化学意义[J].地球化学,2019,48(2):161-170.
Xiao H, Li M J, Yang Z, et al. Distribution patterns and geochemical implications of C₁₉-C₂₃ tricyclic terpanes in source rocks and crude oils occurring in various depositional environments[J]. Geochimica, 2019, 48(2): 161-170.