

# 内蒙古西部额济纳旗苦水沟地区下石炭统白山组 烃源岩分子化石的特征

唐友军<sup>1</sup>, 陈践发<sup>2</sup>

TANG You-jun<sup>1</sup>, CHEN Jian-fa<sup>2</sup>

1. 油气资源与勘探技术教育部重点实验室/长江大学地球化学系, 湖北 荆州 434023;

2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

1. Key Laboratory of Exploration Technology of Ministry of Education/Department of Geochemistry,  
Changjiang University, Jingzhou 434023, Hubei, China;

2. College of Earth Science, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

**摘要:**采用气相色谱-气相色谱-质谱技术,对额济纳旗苦水沟地区白山组烃源岩分子化石的特征进行了研究,剖析了分子化石蕴含的生源、沉积环境、成熟度等方面的信息及石油地质意义。白山组烃源岩饱和烃气相色谱为“前峰型”的单峰分布,主峰碳以 $C_{18}$ 为主,表明有机质来源以海相有机质为主,Pr/Ph介于0.4~0.6之间,指示强还原的沉积环境。白山组烃源岩具有“长侧链的三环萜烷丰富、伽马蜡烷含量高和 $C_{27}$ 甾烷分布占优势”的分子化石组合特征,高伽马蜡烷含量揭示烃源岩有机相为咸水沉积环境,藿烷/甾烷比值的平均值为1.06,表明细菌和藻类对有机质的贡献处于均势, $C_{27}$ 甾烷丰度较高,说明低等水生生物藻类是生烃母质主要的生源构成。甲基菲指数是衡量高演化有机质热演化的有效分子参数指标,白山组烃源岩甲基菲指数介于0.36~0.67之间,折算的镜质体反射率 $R_o$ 为1.9~2.1,与实测的镜质体反射率相当,说明白山组烃源岩热演化处于过成熟阶段。

**关键词:**额济纳旗;白山组烃源岩;分子化石;甲基菲指数

中图分类号:P534.45; P618.13

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2011)06-0888-07

**Tang Y J, Chen J F. Characteristics of molecular fossils in source rocks of Lower Carboniferous Baishan Formation in Kushiugou area of Ejina Banner, western Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 2011,30(6):888-894**

**Abstract:** Based on gas chromatography and gas chromatography mass spectrometry techniques, the authors studied molecular fossils characteristics of the Baishan Formation source rocks in Kushiugou, Ejina Banner, and analyzed the information and petroleum geological significance indicated by sources of organic matter, sedimentary environment, maturity and some other factors. Gas chromatography peaks of saturated hydrocarbons from Baishan Formation source rocks showed “the former peak” of the single peak distribution and the main peak of carbon composed mainly of  $C_{18}$ . This indicates that the main sources of organic matter were marine organic matter, and Pr/Ph ranged from 0.4 to 0.6, suggesting a strongly reducing sedimentary environment. Molecular fossil assemblages of Baishan Formation source rocks were abundant in tricyclic terpane with long side chains, had high level of gammacerane, and showed dominant distribution of  $C_{27}$  steranes. High content of gammacerane in organic matter suggested that organic facies of source rocks was in a saltwater sedimentary environment. The hopanes/steranes ratio was 1.06 on average, implying that bacteria and algae had almost the same contribution to organic matter. And high level of  $C_{27}$  steranes showed that alga was the main source of hydrocarbon precursors. The methylphenanthrene indexes of Baishan Formation, which were effective molecular parameter indexes for measuring thermal evolution of

收稿日期:2011-03-23; 修订日期:2011-05-03

资助项目:中国地质调查局国土资源大调查项目《西北地区中小盆地群油气资源远景调查》(编号:1212010733506)和湖北省自然科学基金

基金项目(编号:2010CDB04305)

作者简介:唐友军(1975-),男,副教授,从事石油地质教学与研究。E-mail:tangyoujun1975@yahoo.com.cn

organic matter, ranged from 0.36 to 0.67, and their conversions into vitrinite reflectance  $R_c$  ranged 1.9 to 2.1, corresponding well to the actually measured data, indicating that source rocks of Baishan Formation are at the over-mature stage of thermal evolution.

**Key words:** Ejin Banner; hydrocarbon source rocks of Baishan Formation; molecular fossils; methylphenanthrene index

分子化石(molecular fossil)或生物标志化合物(biomarkers)的概念最早由 Eglinton 等提出,意指这些化合物最初来自生物体<sup>[1-2]</sup>。20 世纪 60 年代以来,气相色谱和气相色谱-质谱分析技术的广泛应用,使人们能够从复杂的混合物中分离和鉴别出单个化合物,分子化石因能提供古环境、古生态及其演化方面的信息日益受到重视。分子化石作为一种独立的且与硬体化石相互补充的化学纪录保存于沉积岩石中,由于在成岩作用及后生作用过程中其碳骨架的稳定性和复杂的“指纹”特征,被广泛用于石油地球化学研究,从这些指纹中获得的油-岩对比结果有助于人们了解原油的成因及其从源岩到油藏的运移过程<sup>[1-3]</sup>。

额济纳旗地处银根-额济纳旗盆地(简称银-额盆地),勘探程度低,工区内早期的油气勘探以中生界(白垩系)为目的层,对盆地内中生界的石油地质条件、地质规律和油气勘探前景有了较明确的认识<sup>[4-8]</sup>,但对研究区古生界的石油地质条件的研究很少涉及。2007 年启动的中国地质调查局国土资源大调查项目《西北地区中小盆地群油气资源远景调查》,对区内石炭系-二叠系油气地质条件和资源潜力进行了初步评价,取得了一些新认识<sup>[9-11]</sup>。卢进才等<sup>[10]</sup>初步总结了区内石炭系-二叠系油气地质条件,指出广泛发育的浅海陆棚相泥页岩具有较好的生烃条件,发育滨岸相砂砾岩、台地斜坡相生物碎屑灰岩、火山碎屑岩(或火山角砾岩)、火山熔岩、风化壳等多种类型的储集层,广泛分布的白垩系为良好的区域盖层,显示区内石炭系-二叠系具有良好的油气资源前景。陈践发等<sup>[11]</sup>采用多项有机质丰度、类型和成熟度指标定量或定性分析了额济纳旗及邻区石炭系-二叠系烃源岩的生烃潜力,证实额济纳旗及邻区的石炭系-二叠系发育了浅海陆棚相以泥页岩为主的烃源岩,发育阿木山组、埋汗哈达组和哈尔苏海组 3 套烃源岩。但是较系统地剖析烃源岩中分子化石的特征及其地质意义的文献尚无报道,本文以额济纳旗苦水沟地区下石炭统白山组烃源岩为研究对象,剖析了分子化石的组合特征,并试图阐释其在有机质生源、沉积环境、成熟度等方面的指示意义。

## 1 地质背景

研究区构造位置位于天山-兴安华力西造山系的北山-蒙古-吉林造山带<sup>[10,12-13]</sup>,研究区构造与沉积演化经历了太古宙-古元古代结晶基底形成阶段和前南华纪沉积变质基底形成阶段。沉积盖层发育经历了南华纪-早中泥盆世洋陆演化阶段、晚泥盆世-二叠纪后造山伸展阶段和三叠纪之后的陆内造山演化阶段,形成了古生代与中生代的叠合盆地。晚泥盆世-二叠纪后造山伸展阶段沉积了巨厚的火山岩+碎屑岩+碳酸盐岩建造,尤其是石炭系-二叠系,以浅海陆棚相和碳酸盐台地相沉积为主,有利于烃源岩的发育<sup>[10]</sup>。

白山组年代地层为石炭纪大塘统,相当于北山地区的白山组、红柳园组和东部的好比如组,以浅海相碎屑岩-火山岩沉积为特征,下部以灰褐色中厚层状泥质石英细砂岩夹粉砂岩为主,中部为深灰色薄层状含泥质硅质岩夹砾岩,上部为中性至酸性火山碎屑岩夹熔岩及钙质砂砾岩、灰岩,产丰富的珊瑚、腕足类化石。

## 2 样品与实验分析

样品采于额济纳旗马鬃山苏木西北 70km 苦水沟剖面,剖面位置参见文献<sup>[14]</sup>。剖面长 4.50km,层位是下石炭统白山组上段,剖面总体为一向西倾伏的背斜,未见底,与上覆二叠系平行不整合接触。主体岩性为深灰色、灰黑色泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、细砂岩夹灰色硅质灰岩薄层,自下向上砂岩逐渐增多,顶部出现含砾砂岩、砂砾岩夹层,构成一个水体由深变浅的沉积旋回。共采集 101 件样品,其中 23 件做了饱和烃色谱、饱和烃色谱-质谱、芳烃色谱-质谱分析。

称取岩样 200g,粉碎为粒径小于 0.09mm 的粉末,装入滤纸筒中包扎好,置于脂肪抽提器中,加入不超过 2/3 容积的氯仿,在 75~82℃的水浴中连续抽提 72h,获得氯仿沥青“A”。

氯仿沥青“A”的沥青质用正己烷沉淀后,将其可溶物通过硅胶氧化铝层析柱,依次用正己烷、二氯甲

烷、无水乙醇冲洗,分离出饱和烃、芳香烃和非烃。

饱和烃色谱分析:仪器为美国惠普公司 6890 色谱仪。色谱柱为 HP-5ms 石英弹性毛细柱(30m×0.25mm×0.25μm);温度程序从 100℃升温到 300℃,升温速率为 4℃/min,载气为氮气(流速 1mL/min),进样器温度 300℃,FID 检测器温度 300℃,分流比 30:1。

饱和烃、芳烃色谱质谱分析:仪器为美国惠普公司 5890 台式质谱仪。色谱柱为 HP-5ms 石英弹性毛细柱(30m×0.25mm×0.25μm);升温程序为 50℃恒温 2min,从 50℃至 100℃的升温速率为 20℃/min,100℃至 310℃的升温速率为 3℃/min,310℃恒温

15.5min;进样器温度 300℃,载气为氦气,流速为 1.04mL/min,扫描范围为 50~550amu。检测方式为多离子扫描。

### 3 样品有机质丰度特征

露头样品受风化作用的影响,生烃潜量和氯仿沥青“A”值极低,已不能作为有机质丰度的评价指标,选取有机碳作为衡量有机质丰度的指标<sup>[10]</sup>。按烃源岩有机质丰度评价标准,TOC>1.0%的样品总计有 13 件,占 12.9%,0.6%<TOC<1.0%的样品总计有 32 件,占 31.7%,总体评价白山组暗色泥岩为中等—好烃源岩(图 1)。

### 4 样品分子化石特征

#### 4.1 正构烷烃

正构烷烃系列分布与组成特征能提供烃源岩有机母质来源和成熟度方面的信息<sup>[1-2,15]</sup>。从苦水沟剖面下石炭统白山组暗色泥岩的饱和烃色谱图可以看出,饱和烃气相色谱峰型为单峰型,以“前峰型”为主,主峰碳以 C<sub>18</sub> 为主(图 2),轻重比主要分布在 2~3 之间,Pr/nC<sub>17</sub>、Ph/nC<sub>18</sub> 散点图上暗示有机质来源以海相有机质为主;正构烷烃有无奇偶优势通常用

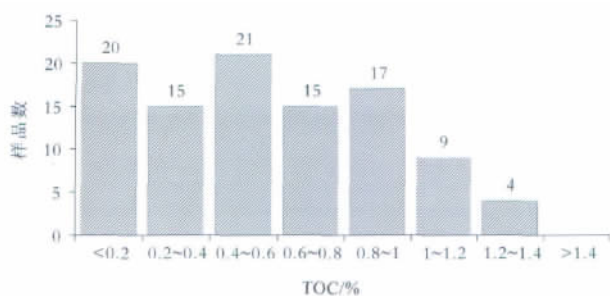


图 1 苦水沟剖面下石炭统白山组暗色泥岩有机碳分布直方图

Fig. 1 TOC histogram of dark mudstone from Lower Carboniferous Baishan Formation

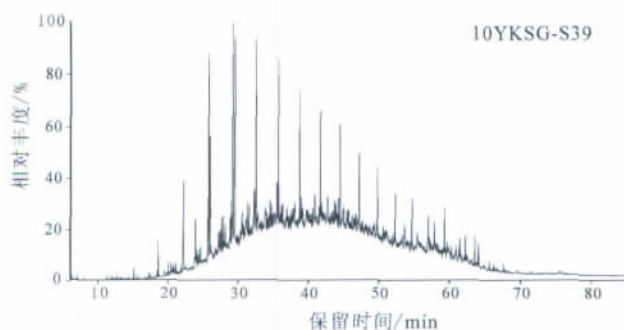
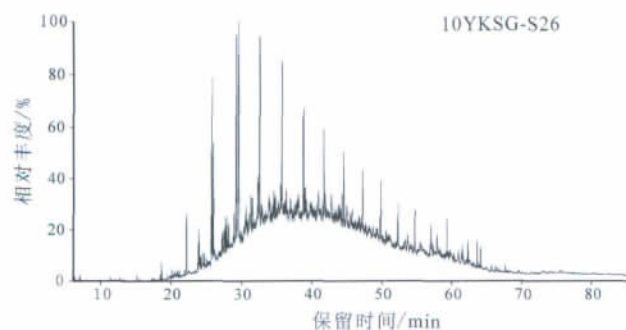
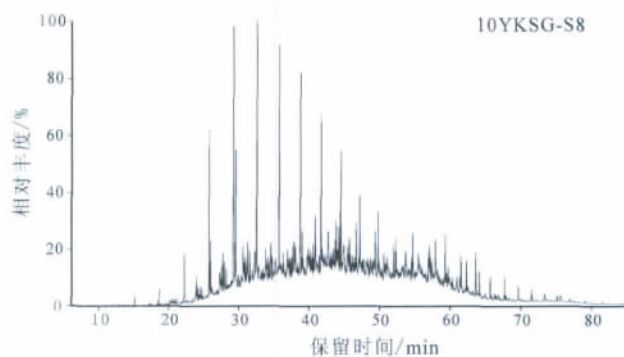
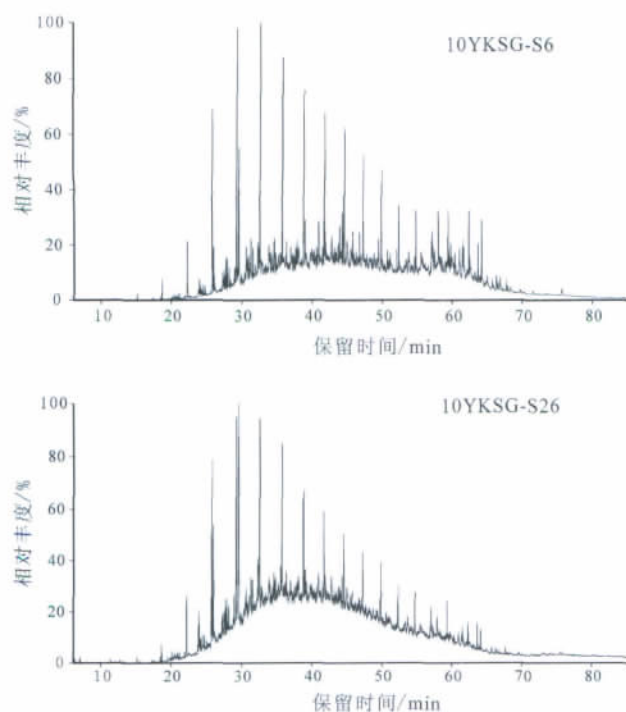


图 2 苦水沟剖面下石炭统白山组典型样品饱和烃色谱

Fig. 2 Chromatogram of typical samples from Kushuigou cross section of Lower Carboniferous Baishan Formation

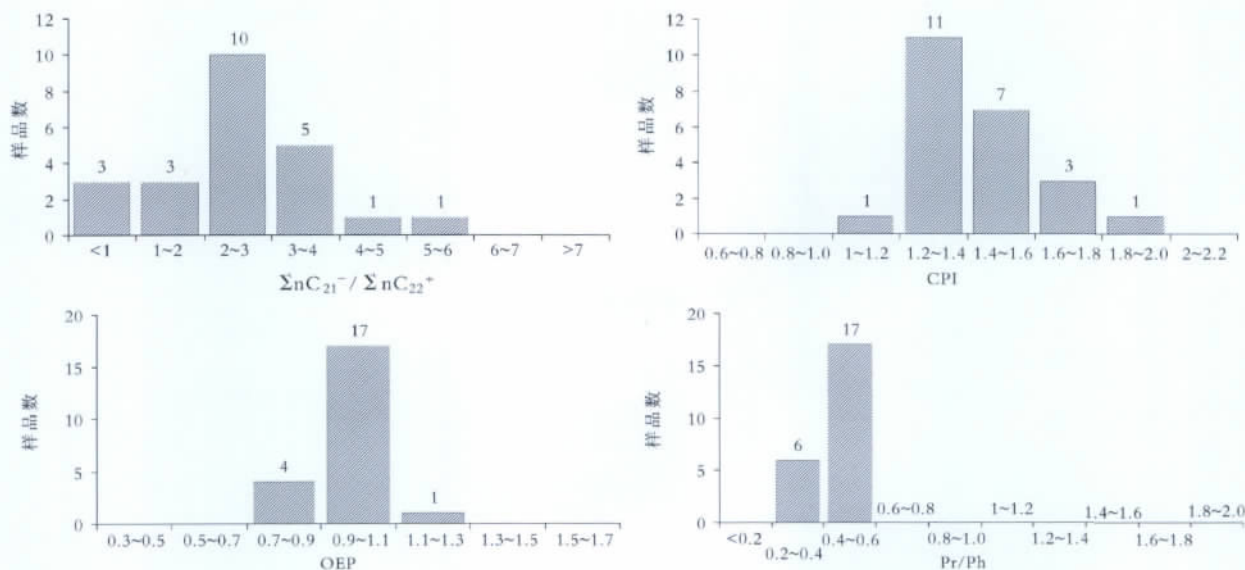


图 3 苦水沟剖面下石炭统白山组烃源岩饱和和烃色谱参数

Fig. 3 Saturated hydrocarbons chromatographic parameters of source rocks from Kushiugou cross section of Lower Carboniferous Baishan Formation

CPI 值(称碳优势指数)或 OEP 值(称奇偶优势)来表征,碳优势指数 CPI 值主要介于 1.2~1.4 之间,指示高碳数的正构烷烃有弱的奇碳数优势,奇偶优势 OEP 值主要介于 0.9~1.1 之间,说明中间碳数的正构烷烃无奇偶优势,间接表征烃源岩已成熟;Pr/Ph 主要介于 0.4~0.6 之间,植烷优势明显,指示强还原的沉积环境<sup>[1]</sup>(图 3、图 4)。

#### 4.2 长侧链三环萜烷和四环萜烷

长侧链三环萜烷的生源为菌体藻类生源,四环萜烷系由五环的藿烷类三环萜烷降解形成的<sup>[1-2]</sup>。苦水沟剖面白山组烃源岩长侧链三环萜烷丰富,碳数组成为  $C_{19} \sim C_{30}$ ,  $C_{23}$  三环萜烷丰度最高,  $C_{24}$  四环萜烷丰度与  $C_{26}$  三环萜烷丰度相当,暗示有机质来源以细菌类为主(图 5、图 6)。

#### 4.3 五环三萜烷系列

五环三萜烷系列分为藿烷系列与非藿烷系列两大类。藿烷系列化合物主要为原核生物(细菌)生源,非藿烷系列以伽马蜡烷为主,伽马蜡烷是一个异常

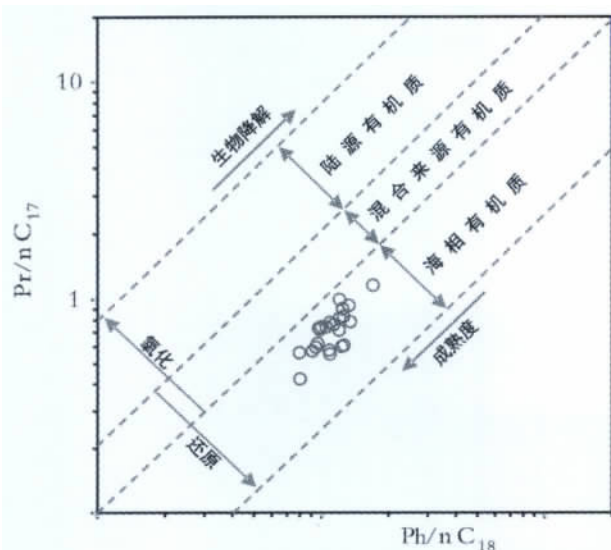
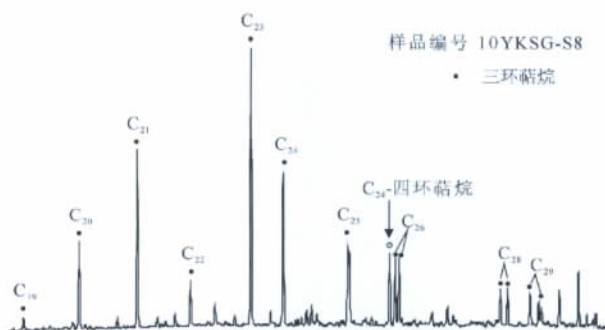
图 4 苦水沟剖面下石炭统白山组烃源岩  $Pr/nC_{17}$  和  $Ph/nC_{18}$  散点图Fig. 4  $Pr/nC_{17}$ - $Ph/nC_{18}$  scattergram of Kushiugou cross section of Lower Carboniferous Baishan Formation

图 5 苦水沟剖面下石炭统白山组典型烃源岩三环萜烷的分布

Fig. 5 Tricyclic terpane distribution of typical source rocks from Kushiugou cross section of Lower Carboniferous Baishan Formation



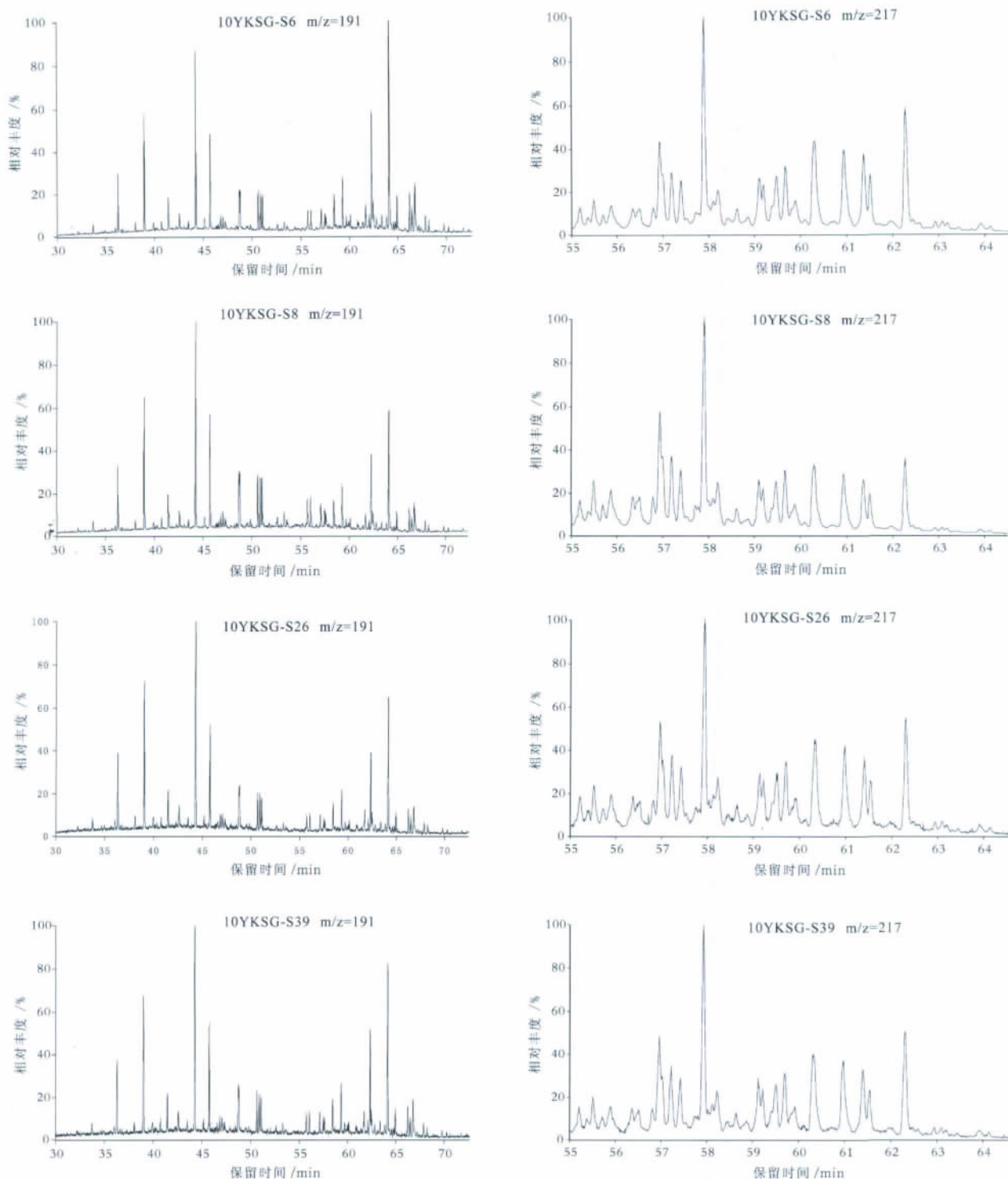


图6 苦水沟剖面下石炭统白山组典型样品藿烷和甾烷的分布  
Fig. 6 Terpane and sterane distribution of typical samples from Kushuigou cross section  
of Lower Carboniferous Baishan Formation

盐度或稳定水体分层的标志<sup>[1-2,16]</sup>。苦水沟剖面白山组烃源岩藿烷系列碳数分布范围为  $C_{27} \sim C_{35}$  (缺

$C_{28}$ ), 以  $17\alpha(H)$ 、 $21\beta(H)$ - $C_{30}$  藿烷为主峰,  $C_{31} \sim C_{35}$  藿烷丰度依次降低(图6、图7)。在非藿烷系列中,

白山组烃源岩检测到较高丰度的伽马蜡烷,伽马蜡烷/ $C_{30}$ 藿烷介于0.23~0.38之间,平均值为0.29(图8)。伽马蜡烷含量变化常与沉积水体的盐度密切相关,只有在盐度较高时才会出现伽马蜡烷含量高的现象,而在一般的淡水沉积中其丰度常很低<sup>[16]</sup>,说明白山组烃源岩有机相为咸水强还原沉积环境。

#### 4.4 甾烷系列

甾烷类的生源意义主要反映真核生物(如藻类、浮游动植物和高等植物)的贡献。甾烷碳数的分布直接受有机质输入的影响,是强有力的物源指示参数<sup>[1-2]</sup>。Huang等<sup>[17]</sup>认为应该用 $C_{27}$ - $C_{28}$ - $C_{29}$ 规则甾烷的相对含量来推断沉积有机质的来源,他们主要依据 $C_{27}$ 甾烷是低等水生生物藻类来源,而 $C_{29}$ 甾烷主要是高等植物来源。苦水沟剖面白山组烃源岩 $C_{27}$ - $C_{29}$ 规则甾烷呈现出 $C_{27}$ 甾烷占优势的V字形分布(图6),即 $C_{27}$ 甾烷丰度较高,显示生烃母质生源构成是低等水生生物藻类来源的有机质特征。

甾烷与藿烷的比值反映真核生物(主要是藻类和高等植物)与原核生物(细菌)对源岩的贡献<sup>[2]</sup>。从图8可以看出,藿烷/甾烷的比值介于0.52~1.48之间,平均值为1.06,表明细菌和藻类对有机质的贡献处于均势或有机质受微生物改造过。

#### 4.5 成熟度特征

分子化石随地层热演化会发生一定的变化,如构型异构化、芳构化等,成为被广泛应用的成熟度指标。甾烷异构化成熟度参数 $Ts/(Ts+Tm)$ 是常用的衡量成熟度的饱和烃分子参数指标,在评价来自同一有机相的相同源岩时, $Ts/(Ts+Tm)$ 为可靠的成熟度指标,适用于未成熟到过成熟阶段<sup>[1-2]</sup>。苦水沟剖面白山组烃源岩甾烷异构化成熟度参数 $C_{29}$ 甾烷 $20S/20S+20R$ 比值介于0.42~0.48之间,平均值为0.45,临近平衡终点值; $Ts/(Ts+Tm)$ 比值介于0.35~0.47之间,平均值为0.41(图9),虽未达到平衡终点值,但不能指示烃源岩为低成熟,这是因为 $Ts/(Ts+Tm)$ 不仅与成熟度有关,还受有机相的控制<sup>[1]</sup>,在表

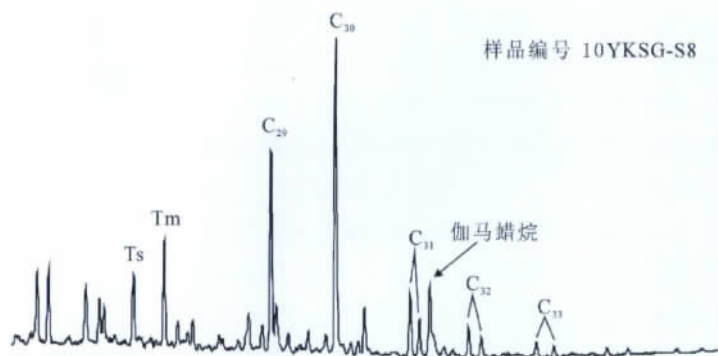


图7 苦水沟剖面下石炭统白山组典型烃源岩五环三萜烷的分布

Fig. 7 Pentacyclic triterpane distribution of typical source rocks from Kushiugou cross section of Lower Carboniferous Baishan Formation

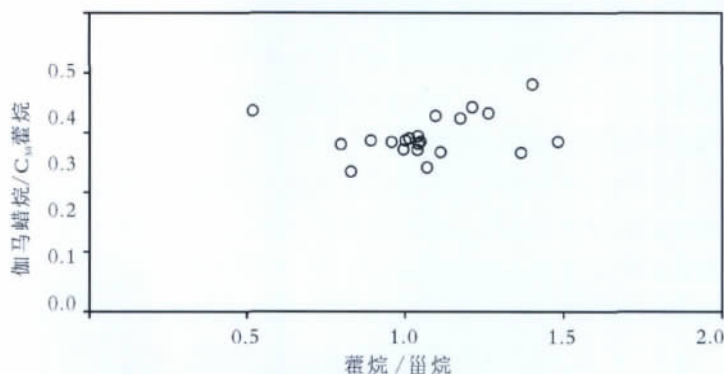


图8 苦水沟剖面下石炭统白山组藿烷/甾烷和伽马蜡烷/ $C_{30}$ 藿烷散点图

Fig. 8 Sterane/Hopane-Gammacerane/ $C_{30}$  hopane scattergram of Kushiugou cross section of Lower Carboniferous Baishan Formation

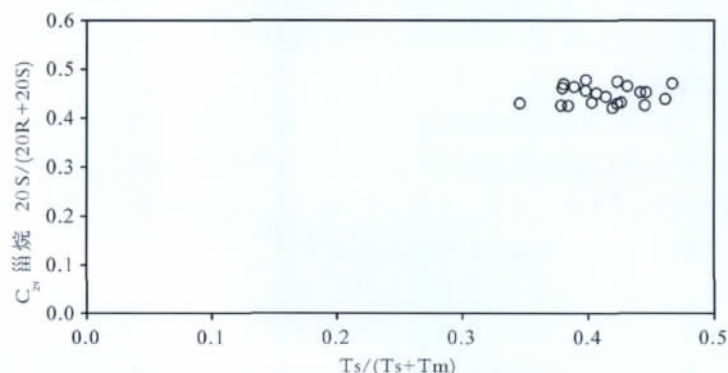


图9 苦水沟剖面下石炭统白山组烃源岩 $Ts/(Ts+Tm)$ 和 $C_{29}$ 甾烷 $20S/20S+20R$ 散点图

Fig. 9  $Ts/(Ts+Tm)$ - $C_{29}$  sterane  $20S/20S+20R$  scattergram of source rocks from Kushiugou cross section of Lower Carboniferous Baishan Formation

征高演化有机质时这些参数有可能失去有效性,但可作为参考指标。

甲基菲指数(MPI)是常用的芳烃成熟度参数。苦

水沟剖面白山组烃源岩甲基菲指数介于 0.36~0.67 之间, 平均值为 0.49, 依据 Radke 等<sup>[18]</sup>建立的 MPI 与镜质体反射率的回归方程, 其折算的镜质体反射率  $R_c$  为 1.9~2.1, 实测的镜质体反射率  $R_o$  为 2.2~2.7, 两者分布大体接近(图 10)。上述特征具有两方面的含义, 一是表征白山组烃源岩热演化处于过成熟阶段, 二是说明在高—过成熟阶段, 甲基菲指数是表征有机质热演化有效的分子参数指标。因此, 在衡量高演化有机质演化程度时, 芳烃的分子成熟度参数比饱和烃的分子成熟度参数有效。

## 5 结 论

通过对额济纳旗苦水沟地区白山组烃源岩分子化石的特征及其所揭示的生源、沉积环境、成熟度等方面的地质意义的剖析, 得出如下几点认识。

(1) 白山组烃源岩饱和烃气相色谱为“前峰型”的单峰分布, 主峰碳以  $C_{18}$  为主,  $Pr/nC_{17}$ 、 $Ph/nC_{18}$  暗示有机质来源以海相有机质为主,  $Pr/Ph$  主要介于 0.4~0.6 之间, 植烷优势明显, 指示强还原的沉积环境。

(2) 白山组烃源岩分子化石组合的典型特征表现为“长侧链的三环萜烷丰富、伽马蜡烷含量高和  $C_{27}$  甾烷分布占优势”, 伽马蜡烷含量高表征烃源岩有机相为咸水沉积环境, 藿烷/甾烷比值的平均值为 1.06, 表明细菌和藻类对有机质的贡献处于均势,  $C_{27}$  甾烷丰度较高, 显示生烃母质生源构成是低等水生生物藻类。

(3) 白山组烃源岩热演化处于过成熟阶段, 甲基菲指数是衡量有机质热演化有效的分子参数指标,  $C_{29}$  甾烷  $20S/20S+20R$  和  $Ts/(Ts+Tm)$  失去了有效性, 不能作为表征高演化有机质的热演化分子参数指标。

致谢: 项目组参加野外工作的同志提供了可靠的基础资料和样品, 长江大学地球化学实验室承担了样品测试工作, 参加研究工作的还有蒋兴超和王冠男同志, 在此一并表示衷心的感谢。

## 参考文献

- [1] Peters K E, Moldowan M. The Biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments[M]. New Jersey: Prentice Hall Inc., 1993.
- [2] 卢双舫, 张敏. 油气地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 201-212.

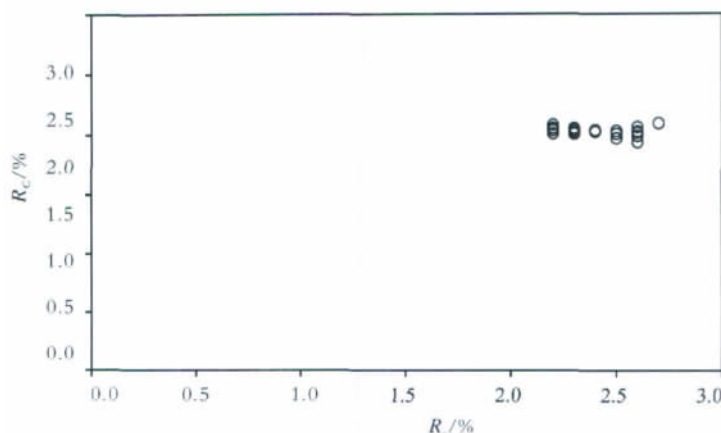


图 10 苦水沟剖面下石炭统白山组烃源岩  $R_o$  和折算  $R_c$  散点图

Fig. 10  $R_o$  (resulting from source rocks) -  $R_c$  (resulting from conversion) scattergram of Lower Carboniferous Baishan Formation

- [3] 张水昌, 梁狄刚, 黎茂稳, 等. 分子化石与塔里木盆地油源对比[J]. 科学通报, 2002, 47(增刊): 16-23.
- [4] 郭彦如, 王新民, 刘文岭, 银根-额济纳旗盆地含油气系统特征与油气勘探前景[J]. 大庆石油地质与开发, 2000, 19(6): 4-8.
- [5] 吴茂炳, 王新民. 银根-额济纳旗盆地油气地质特征及油气勘探方向[J]. 中国石油勘探, 2003, 8(4): 45-49.
- [6] 卫平生, 张虎权, 林卫东, 等. 银根-额济纳旗盆地油气勘探远景[J]. 天然气工业, 2005, 25(3): 7-10.
- [7] 卫平生, 张虎权, 陈启林. 银根-额济纳旗盆地油气地质特征及勘探前景[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006: 150-158.
- [8] 卫平生, 张虎权, 陈启林, 等. 银根-额济纳旗盆地与二连盆地石油地质特征比较分析[J]. 中国石油勘探, 2007, 12(1): 33-37.
- [9] 卢进才, 魏仙样, 李玉宏, 等. 额济纳旗土壤油气地球化学特征及其意义[J]. 新疆石油地质, 2009, 30(1): 6-8.
- [10] 卢进才, 魏仙样, 魏建设, 等. 内蒙古西部额济纳旗及其邻区石炭系—二叠系油气地质条件初探[J]. 地质通报, 2010, 29(2/3): 330-340.
- [11] 陈践发, 卢进才, 石正勇, 等. 内蒙古西部额济纳旗及其邻区石炭系—二叠系烃源岩的发育特征和生烃潜力评价[J]. 地质通报, 2010, 29(2/3): 346-350.
- [12] 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 等. 从全球看中国大地构造[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 11-17.
- [13] 卢进才, 陈践发, 郭建军, 等. 古亚洲与特提斯交汇带盆地群油气资源潜力[J]. 西北地质, 2006, 39(3): 39-46.
- [14] 卢进才, 陈高潮, 魏仙样, 等. 内蒙古西部额济纳旗及邻区石炭系—二叠系沉积建造与生烃条件——石炭系—二叠系油气地质条件研究之一[J]. 地质通报, 2011, 30(6): 811-826.
- [15] 爱德华 A, 博蒙特, 诺曼 H, 等主编. 刘德来, 玉永兴, 薛良清, 译. 油气圈闭勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.
- [16] 张立平, 黄第藩, 廖志勤. 伽马蜡烷—水体分层的地球化学标志[J]. 沉积学报, 1999, 17(1): 136-140.
- [17] Huang W Y, Meinschein W G. Sterols are ecological indicators[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1978, 43: 739-745.
- [18] Radke M, Welte D H, Willsch H. Maturity parameters based on aromatic hydrocarbons[J]. Organic Geochemistry, 1986, 15: 17-34.