

doi: 10.13745/j.esf.2016.05.016

活动大陆构造边缘碳沥青形成与金属成矿探讨:以柴北缘滩涧山地区滩涧山群为例

张旭^{1,2}, 刘成林^{1,2,3,*}, 徐韵³, 马寅生^{1,2}, 杨元元^{1,2}, 李宗星^{1,2}, 张谦³,
刘文平³, 曹军^{1,2}, 彭博^{1,2}

1. 中国地质科学院 页岩油气调查评价重点实验室, 北京 100081

2. 中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081

3. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249

ZHANG Xu^{1,2}, LIU Chenglin^{1,2,3,*}, XU Yun³, MA Yinsheng^{1,2}, YANG Yuanyuan^{1,2},
LI Zongxing^{1,2}, ZHANG Qian³, LIU Wenping³, CAO Jun^{1,2}, PENG Bo^{1,2}

1. Key Laboratory of Shale Oil and Gas Survey and Evaluation, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

3. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

ZHANG Xu, LIU Chenglin, XU Yun, et al. The anthraxolite generation and metal mineralization in the active continental tectonic edge: A case study of Tanjianshan group in Tanjianshan area in northern margin of Qaidam Basin. *Earth Science Frontiers*, 2016, 23(5): 146-157

Abstract: Anthraxolite of Tanjianshan group, with high vanadium and nickel content, is widely deposited in the Qaidam Basin. Some metal ore deposits are distributed in good accordance with the anthraxolite's distribution. It is meaningful to study the formation mechanism of the Tanjianshan group anthraxolite and its interaction with metal minerals. That is conducive to the research and exploration of oil, gas and mineral in the Qaidam Basin. The distributional characteristics of anthraxolite of Tanjianshan group were clearly studied based on geological survey. Some metallic element contents and organic geochemical characteristics of anthraxolite were tested for studying the formation mechanism of anthraxolite and paragenesis metals in Tanjianshan group. It shows that anthraxolite is mainly deposited in Saishentengshan, Tanjianshan, Mangyashimiankuang and Kaimuqi of the Qaidam Basin. For Tanjianshan area, anthraxolite mainly occurs in the limestone and sandstone reservoirs, or mudstones. Oil source correlation shows that anthraxolite was generated by mudstones in interval A of Tanjianshan group. Parent material types of anthraxolite were derived from low grade aquatic organisms, e. g. algae, which were formed in the shallow sea-bathyal with anoxia and reducing condition and salt water. They have experienced relatively strong biological effects. With anthraxolite generating, active tectonic and magmatic activity were both beneficial to metal elements enrichment. And initial enrichment of organic matter on metal elements or fluid extraction from the outside conditions resulted in some high metallic elements contents in the anthraxolite. Therefore, there is great metal mineralization potential in Tanjianshan area of the Qaidam Basin.

Key words: anthraxolite; Tanjianshan group; northern margin of Qaidam Basin; metallic mineral deposit

收稿日期: 2015-10-15; 修回日期: 2016-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41272159, 41572099); 中国地质调查局地质调查项目(1212011120964)

作者简介: 张旭(1990—), 男, 博士研究生, 矿产普查与勘探专业。E-mail: xuzhangcags@163.com

* 通讯作者简介: 刘成林(1970—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为油气地球化学与资源评价、非常规油气地质。E-mail: lclzgx@126.com

摘要:柴达木盆地滩涧山群碳沥青广泛分布,资源量大,钒、镍等金属元素含量高,已发现的金属矿床与滩涧山群分布具有较好的一致性。因此,研究滩涧山群碳沥青的形成机制,探讨其与金属矿形成相互作用,有助于对油气与金属矿产共生/共存的研究,对柴达木盆地油气资源和金属矿床的勘探研究具有重要意义。通过野外实测剖面明确碳沥青分布特征,测定碳沥青金属元素含量并进行有机地球化学分析,对碳沥青形成机制及其与金属矿伴生进行探讨。研究表明,柴达木盆地碳沥青主要分布在赛什腾山、滩涧山、茫崖石棉矿和开木齐地区。以柴北缘滩涧山地区为例,碳沥青主要赋存在滩涧山群a段灰岩和砂岩储层或与泥岩同层储存。油源对比表明碳沥青来源于滩涧山群a段泥岩,母质类型为藻类等低等水生生物,形成于浅海-半深水、缺氧还原的海相咸水环境中,并遭受过较强生物作用。滩涧山群碳沥青形成时的活动构造与岩浆作用有利于金属元素富集,促进烃类流体与金属元素相互作用,有机质对金属元素的初始富集或流体从外界条件萃取富集造成滩涧山地区碳沥青中部分金属元素含量高,具有很大的金属成矿潜力。

关键词:碳沥青;滩涧山群;柴北缘;金属矿床

中图分类号:P541;P617 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2016)05-0146-12

0 引言

前人研究表明我国含油气盆地大多数是金属(非金属)矿床与油气藏等多类型成藏组合^[1],具有“有机和无机”的叠合特征^[2-3],并且在区域分布上具有较吻合的构造背景^[4-5]。多数学者认为古油藏与金属矿产的形成及演化机理具有一致性^[6-8],并且有机和无机相互作用对油气形成和演化的全过程都有影响^[9-10]。

亲有机质金属元素(钒、镍等)最初存在于烃源岩内^[11-13],在生油过程中钒、镍等金属元素以卟啉等各种高分子金属-有机络合物或螯合物形式随着油气生成、运移和降解进一步富集在沥青中,并且沥青中的金属元素含量可能与沥青成因有关。也可能原油中的金属元素是在原油生成过程中由围岩和水介质中的元素在一定温压条件进入原油有机组分中^[14]。对于泥质沉积物来说,沉积物有机质含量、粒度、缺氧(还原)环境对钒等金属元素的富集和分散起着重要的作用,影响金属元素的含量与分布^[15-17]。前人对有机质与金属元素相互作用已有深入研究:一方面,一些金属元素对有机质生烃有积极的催化作用,在原油和轻烃裂解过程中过渡金属氧化物可能作为催化剂参与反应^[18-23];另一方面,油气生成所产生的有机酸等物质对金属元素的吸附、溶解、淋滤、螯合等作用有影响^[17,24],利于金属元素的迁移和富集,造成油气藏中的原油或油田卤水中钒等元素高度富集^[13,21],但会受到有机质对金属元素的吸附作用及油气运移通道等条件的影响^[24]。同时,模拟实验证实有机质参与了金属元素的淋滤、萃取、运移、还原、沉淀等地球化学过程^[25],过渡金属

及化合物对有机质生烃过程有影响^[26-28]。

柴达木盆地北部滩涧山群中碳沥青广泛分布^[29],碳沥青中钒、镍等元素含量远大于在地壳中的含量,并且已发现的铅锌矿、铜矿、金矿^[30-32]与滩涧山群地层分布较为一致,如锡铁山铅锌矿、青龙滩铜-硫矿、绿梁山铜矿、滩涧山金矿、青龙沟金矿等(图1),表明滩涧山群具有很好的成矿条件。碳沥青与金属元素富集之间有着密切的联系,沥青中金属的种类、含量和空间分布等信息可对金属矿床的勘探和预测提供重要线索^[21,33]。因此,需要深入研究滩涧山群碳沥青的形成机制,探讨其与金属矿形成相互作用,有助于对油气与金属矿产共生/共存的研究,对柴达木盆地油气资源和金属矿床的勘探研究具有重要意义。

1 研究区地质概况

1.1 地质背景

柴北缘构造带位于青藏高原东北部,南祁连地体和柴达木地块结合部位,其南北边界分别为柴北缘深断裂及拉脊山—中祁连南缘断裂,东西则以哇洪山温泉断裂和阿尔金走滑断裂为界。其内部以宗务隆—青海南山断裂和乌兰—鱼卡断裂为界自北向南可划分为宗务隆山晚古生代—早中生代裂陷带、全吉地块及柴北缘早古生代结合带三个构造单元^[34-35]。寒武纪至早奥陶世,柴北缘地区在陆棚至浅海环境下形成了一套稳定的沉积建造。中奥陶世开始,柴达木陆块向欧龙布鲁克古陆块逐渐靠拢,古洋壳由南向北俯冲,首先在欧龙布鲁克古陆块一侧形成了类似环太平洋地区的火山弧,发育了一套以中基性火山岩为主,含少量细碎屑岩(类复理石)和

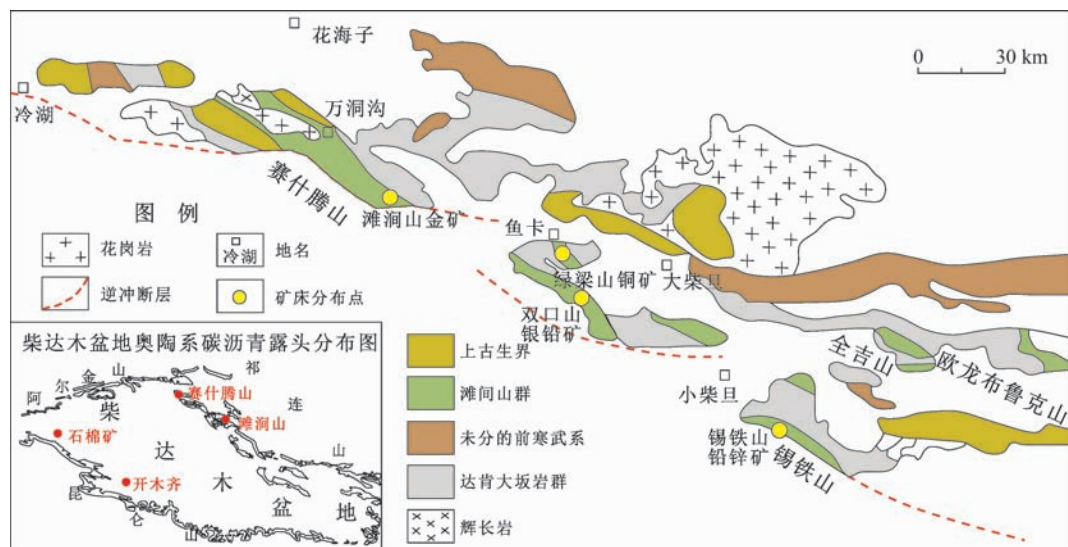


图1 柴达木盆地碳沥青及部分金属矿床分布图
(据文献[32])

Fig.1 Anthraxolite and metallic mineral deposits distribution in the Qaidam Basin

碳酸盐岩的火山沉积建造滩涧山(岩)群。火山岩具有从早期拉斑玄武岩系列向晚期钙碱性玄武岩系列演化趋势^[36-37]。

1.2 滩涧山群形成背景

滩涧山群在柴北缘地区广泛分布,岩石因后期强烈的韧性剪切和区域动力热变质作用普遍发生变质,总体发育一套由浅变质的滨浅海-半深海相碳酸盐岩、砂泥岩及火山岩组成的火山-沉积建造^[38-39]。汪劲草等^[40]依据前人同位素年代学与化石建立的数据认为滩间山群时代为晚寒武世至晚奥陶世。付建刚等^[41]对柴北缘锡铁山滩涧山群c岩性组紫红色含砾砂岩中的大量碎屑锆石测年表明c岩性组沉积年龄应晚于431 Ma,可能为晚志留世一早泥盆世。李峰等^[42]基于野外地质特征、古生物组合、同位素年龄、构造-热事件等的综合分析,认为柴北缘滩间山群形成于早一晚奥陶世,时限496~440 Ma。王惠初等^[36]研究认为滩间山群很可能是寒武纪-奥陶纪的产物,岩石组合具岛弧背景的建造特点,地球化学特征也显示了火山弧的构造属性。高晓峰等对柴北缘滩涧山群玄武岩测年表明形成时限约在510~460 Ma,代表了寒武纪-奥陶纪岩浆作用,具有岛弧火山岩性质,代表了早古生代区域上洋陆俯冲过程中不同阶段的产物^[43]。现阶段一般将滩涧山群及与之伴生的侵入岩划归为滩涧山岛弧混杂岩带^[35],认为其与鱼卡-沙柳河洋早古生代的洋陆俯冲活动有关^[43-45]。尽管滩涧山群形成年代还存在争议,但目前研究古生物组合、岩浆岩年龄、碎屑岩锆

石年龄、构造热事件等均表明形成早古生代,岩浆岩具有岛弧火山岩形成特征,此时柴北缘属于活动大陆边缘,具有广阔的成矿空间和多种成矿系列类型的成矿条件^[46]。

2 滩涧山群碳沥青分布

2.1 碳沥青空间展布特征

柴达木盆地碳沥青主要分布在赛什腾山、滩涧山、茫崖石棉矿和开木齐地区(图1),赛什腾山和滩涧山地区滩涧山群a段灰岩和砂岩储层或与泥岩同层见碳沥青,石棉矿铁石达斯群a段灰岩和开木齐地区纳赤台群坡积物中见碳沥青,但滩涧山群与铁石达斯群、纳赤台群构造背景极为相似。对滩间山地区地质填图与探槽调查表明,区内见辉绿岩侵入岩和花岗岩体,并见辉绿岩捕虏体和花岗岩体侵入滩涧山群a段泥岩中,区内曾发生过至少两期岩浆活动,且花岗岩体年代晚于辉绿岩;滩涧山碳沥青呈北西-南东向展布,且在石英脉出现的地方均见沥青显示^[29]。滩涧山地区联合沟剖面实测滩涧山群a段总厚219.74 m,其中黑色泥岩厚约70.01 m,部分变质成千枚岩,烃源岩发育厚度较大。纵向上,滩涧山群划分为泥岩灰岩段(a)、安山岩凝灰岩段(b)、砂岩段(c)及安山岩段(d)(图2)。剖面中碳沥青主要分布在滩涧山群a段中,与泥岩同层分布或储存在砂岩、灰岩储层中,泥岩、灰岩与砂岩交互发育。

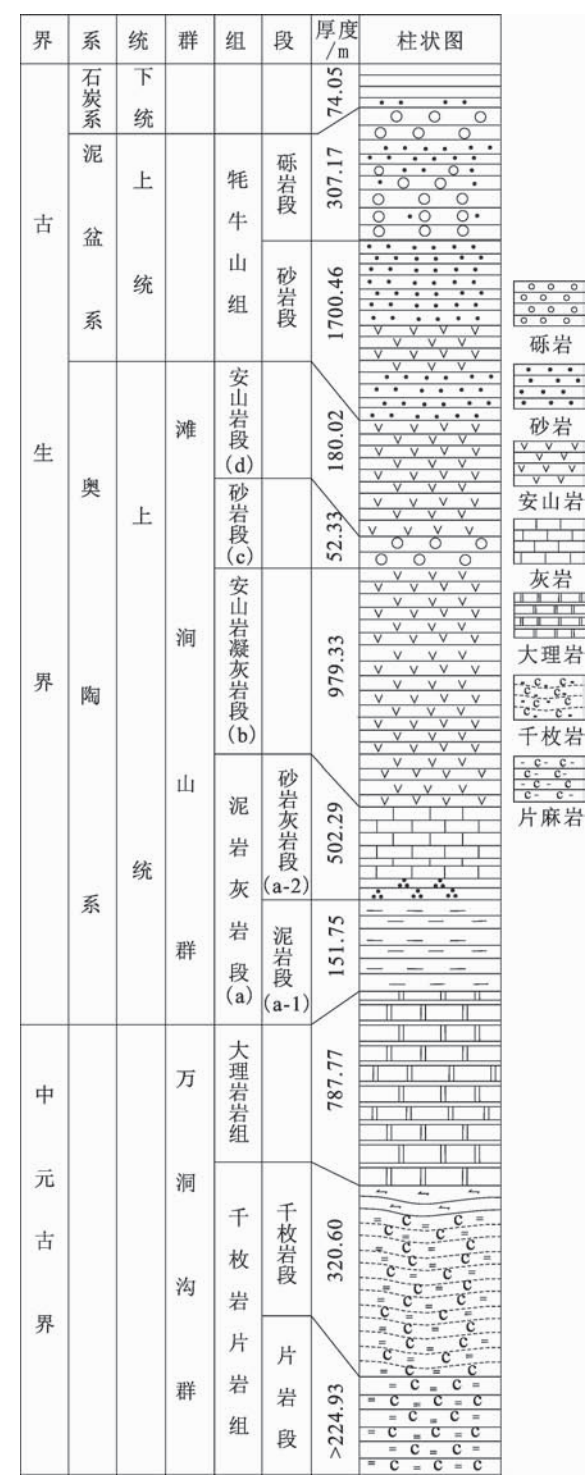


图2 柴达木盆地中元古界-古生界地层柱状图
Fig.2 Stratigraphic column of the Mesoproterozoic and Paleozoic in the Qaidam Basin

2.2 沥青中金属元素含量

碳沥青属于非常规烃类资源,其发热量均较高,富含钒、镍等金属元素。滩涧山群碳沥青中钒元素含量较高,分布在 179~252 μg/g,平均值为 221.8 μg/g;镍

元素分布在 34.8~145 μg/g,平均值为 87.1 μg/g (表 1)。在静海和缺氧环境中形成的有机质 V/(V+Ni)>0.5,而在氧化环境中 V/(V+Ni)<0.4^[13]。实测滩涧山群碳沥青中 V/(V+Ni)分布在 0.55~0.88,平均值为 0.72,表明当时为缺氧沉积环境。

表 1 柴北缘滩涧山群碳沥青中金属元素含量分布表
Table 1 Metal elements content of anthraxolite of Tanjianshan group in northern margin of the Qaidam Basin

样品编号	采样点	金属元素含量/(μg·g ⁻¹)						V/(V+Ni)
		V	Ni	Cu	Zn	Pb	Au	
DSS17801	赛什	179	145.0	77.6	156	28.0	5.86	0.55
DSS17802	腾山	204	83.5	49.6	131	26.3	1.53	0.71
DT18001	滩涧山	237	86.8	93.1	178	8.44	8.14	0.73
DT18002		228	73.3	57.5	247	11.00	1.02	0.76
DT18003		231	99.2	43.7	157	6.35	2.27	0.70
DT18101		252	34.8	131.0	61	14.50	3.02	0.88

3 碳沥青形成条件分析

3.1 碳沥青来源

柴达木盆地目前已发现中一下侏罗统、石炭系两套烃源岩系,滩涧山群 a 段发育较厚黑色泥岩,也可以作为烃源岩。因此,本文主要对比滩涧山群碳沥青与侏罗系、石炭系及滩涧山群 a 段烃源岩油源特征,分析碳沥青的来源。

3.1.1 植烷系列

侏罗系烃源岩的 Pr/Ph 分布在 0.46~6.22,平均值为 1.3,分布范围广泛;石炭系烃源岩的 Pr/Ph 分布在 0.39~2.13,平均值为 1.01;滩涧山群 a 段烃源岩的 Pr/Ph 分布在 0.59~0.81,平均值为 0.72;而碳沥青的 Pr/Ph 分布在 0.49~0.81,平均值为 0.66。从 Pr/Ph-Pr/nC₁₇-Ph/nC₁₈ 分布三角图可以看出,碳沥青与滩涧山群 a 段黑色泥岩具有可对比性,与其他烃源岩可比性差(图 3)。

3.1.2 甾烷系列

规则甾烷 C₂₇-C₂₈-C₂₉ 分布三角图表明碳沥青与滩涧山群 a 段烃源岩具有可对比性,与其他源岩差别较大(图 4)。侏罗系烃源岩规则甾烷 C₂₇-C₂₈-C₂₉ 呈不对称的“V”字形分布,规则甾烷分布形式为 C₂₉>C₂₇>C₂₈,以 C₂₉ 为主,C₂₈ 分布在 25.11%~45.56%,平均值为 29.25%;石炭系烃源岩规则甾烷 C₂₇-C₂₈-C₂₉ 也呈不对称的“V”字形分布,为 C₂₇>C₂₉>C₂₈,而滩涧山群 a 段烃源岩规则甾烷 C₂₇-C₂₈-C₂₉ 呈现“L”型分布,为 C₂₇>C₂₉>C₂₈;碳沥青甾烷

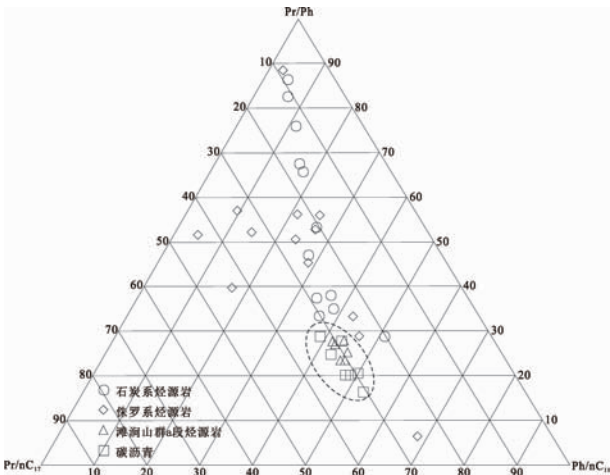


图3 Pr/Ph-Pr/nC₁₇-Ph/nC₁₈分布三角图
Fig. 3 The triangle distribution of Pr/Ph-Pr/nC₁₇-Ph/nC₁₈

呈现“L”型分布(图5)。

3.1.3 三芳甾烷系列

石炭系和侏罗系烃源岩的芳烃馏分中不含有三芳甾烷系列化合物,而滩洞山群a段黑色泥岩和碳沥青芳烃馏分中均含一定量的三芳甾烷系列(图6),表明碳沥青与石炭系和侏罗系烃源岩不具有对比性,与滩洞山群a段具有可对比性。

3.1.4 三环萜烷系列

侏罗系和石炭系烃源岩的C₂₄-四环萜烷较高,侏罗系烃源岩C₂₄ TE/C₂₆ TT分布在2.28~2.88;石炭系烃源岩C₂₄ TE/C₂₆ TT分布在1.47~2.62,平均值为2.09;而滩洞山群a段烃源岩的四环萜烷含量相对较低,C₂₄ TE/C₂₆ TT分布在0.47~0.55;

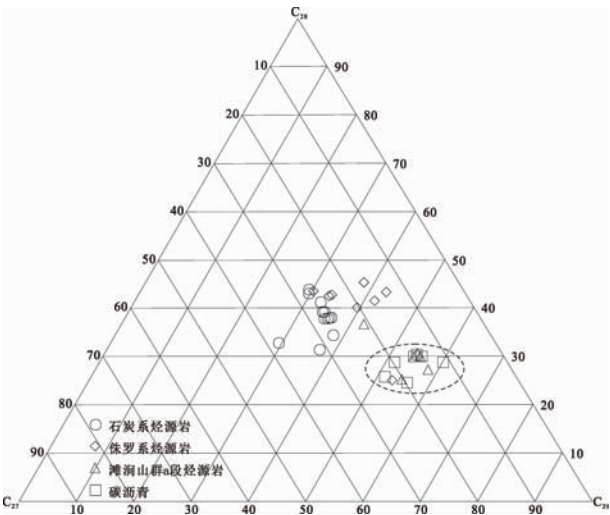


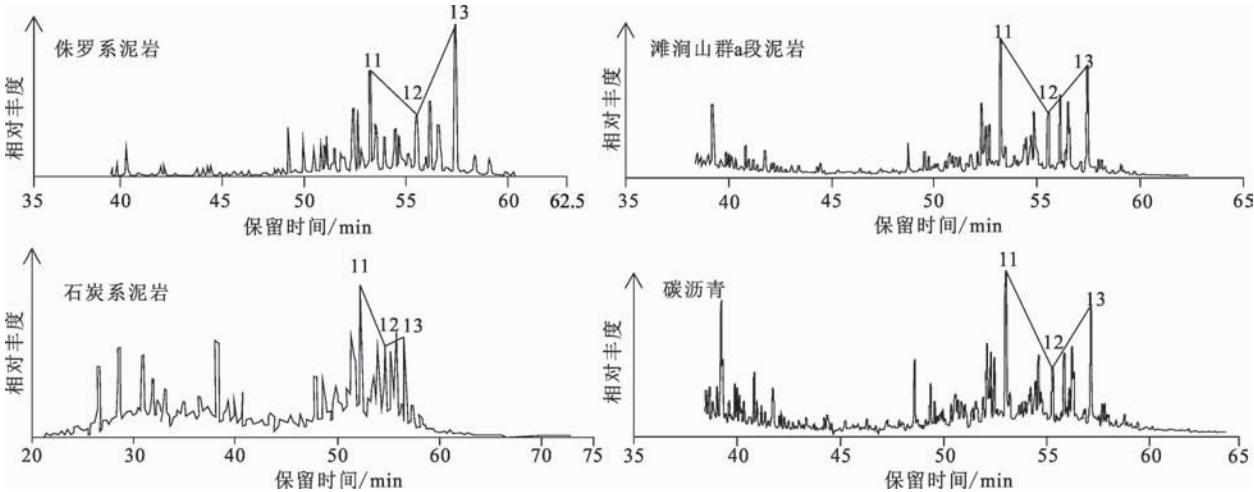
图4 规则甾烷C₂₇-C₂₈-C₂₉分布三角图
Fig. 4 The triangle distribution of rules of sterane C₂₇-C₂₈-C₂₉

碳沥青的C₂₄ TE/C₂₆ TT分布在0.43~0.52,平均值为0.49。从C₂₄ TE/C₂₆ TT-C₂₁ TT/C₂₃ TT分布图可以看出,碳沥青与石炭系和侏罗系烃源岩对比性差,与滩洞山群a段具有可对比性(图7,图8)。

3.2 碳沥青形成环境

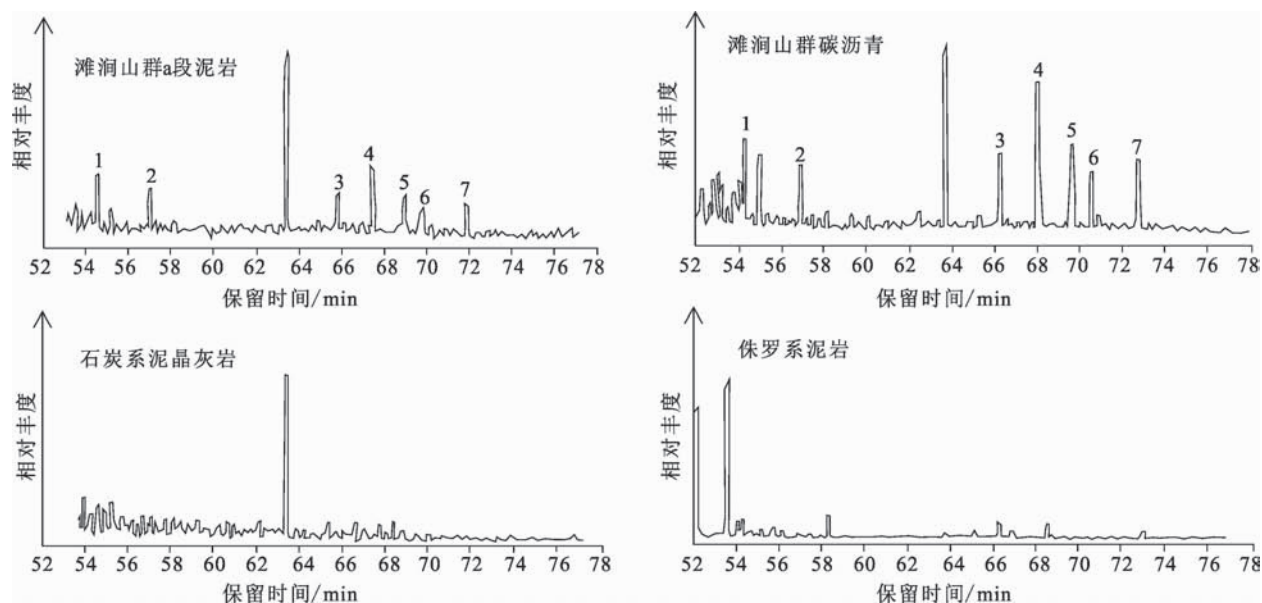
3.2.1 母质类型

一般来讲,来源于藻类为主的低等水生生物的有机质,其碳同位素值较低;而来源于高等植物等陆源生物的有机质,其碳同位素值较高^[47]。测定滩洞山群碳沥青饱和烃δ¹³C_{PDB}分布在-30.6‰~-27.7‰,平均值为-29.1‰;芳烃δ¹³C_{PDB}分布在-31.4‰~-26.8‰,平均值为-28.2‰。总体上,碳同位素



11—aaa(20R)C₂₇甾烷;12—aaa(20R)C₂₈甾烷;13—aaa(20R)C₂₉甾烷。

图5 m/z 217 质量分布图
Fig. 5 Mass chromatogram (m/z 217) of saturated hydrocarbon of anthraxolite



1— C_{20} 三芳甾烷; 2— C_{21} 三芳甾烷; 3— $C_{26}, 20S$ 三芳甾烷; 4— $C_{26}, 20R + C_{27}, 20S$ 三芳甾烷; 5— $C_{28}, 20S$ 三芳甾烷; 6— $C_{27}, 20R$ 三芳甾烷; 7— $C_{28}, 20R$ 三芳甾烷。

图6 芳烃 m/z 231 质量色谱图

Fig. 6 Mass chromatogram (m/z 231) of aromatic hydrocarbon

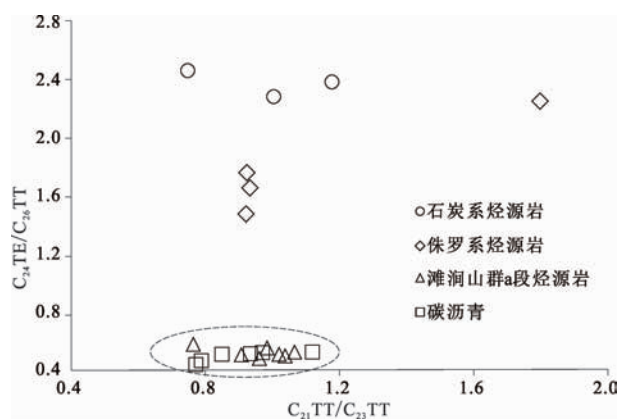


图7 $C_{24} TE/C_{26} TT - C_{21} TT/C_{23} TT$ 分布图

Fig. 7 The distribution of $C_{24} TE/C_{26} TE$ and $C_{21} TT/C_{23} TT$

偏轻并表现出饱和烃 $\delta^{13}C_{PDB} < \text{芳烃 } \delta^{13}C_{PDB}$ 的特征(表2),表明碳沥青有机质主要来源于藻类等低等水生生物。

3.2.2 氧化/还原环境

3.2.2.1 链烷烃系列

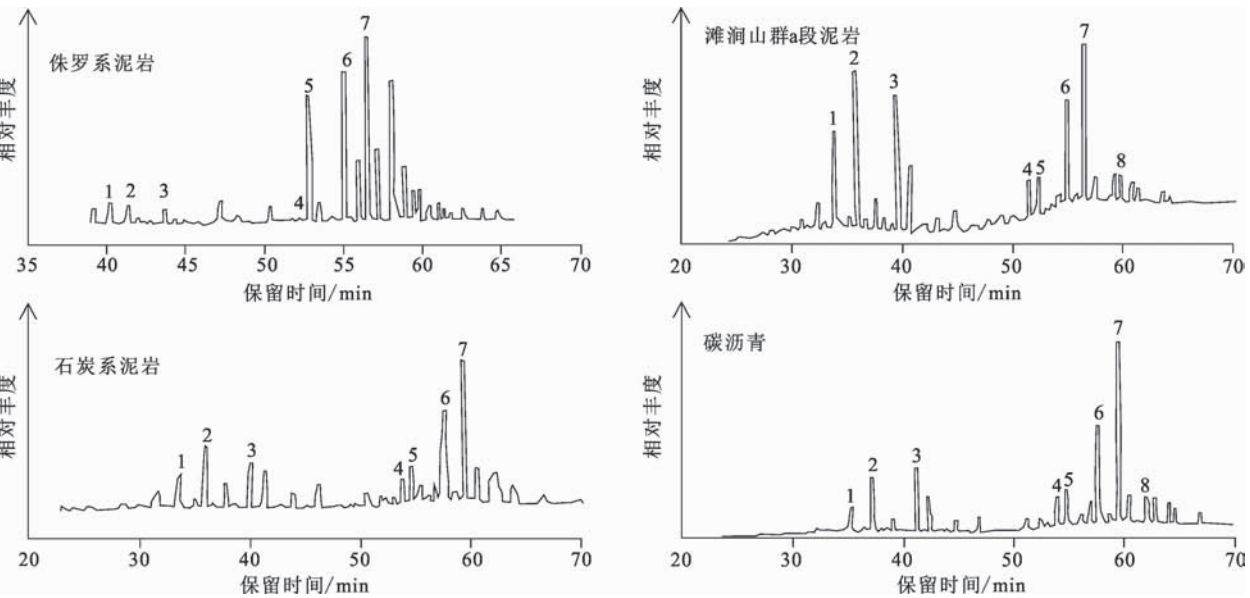
研究表明,氧化沉积环境形成的饱和烃中,色谱质谱图多呈前峰型,主峰碳较低,为 C_{15-18} 等,高 Pr/Ph (3.0),有较多的异构烷烃, Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 值一般较高;还原环境形成的饱和烃色谱质谱图多呈后峰型,主峰碳数高,可大于 C_{23} ,低 Pr/Ph (0.6),有较多的正构烷烃, Pr/nC_{17} 和 Ph/nC_{18} 一般显示低

值;过渡环境中的饱和烃色谱质谱图一般呈双峰特征,相应参数介于上述两种环境之间^[48]。

测定滩涧山群碳沥青正构烷烃系列均呈后峰形单峰态分布型式,部分呈双峰态分布,碳数分布范围在 $C_{11} - C_{35}$,主峰碳数为 C_{25} 和 C_{27} , CPI 分布于 1.11~1.42,平均值为 1.24;正构烷烃高碳数部分普遍具奇碳优势, OEP 分布于 1.11~1.54,平均值为 1.25;蜡质烃含量较高, C_{21-}/C_{22+} 含量在 0.06~0.51,平均值为 0.21; Pr/Ph 为 0.50~0.92(表3)。这表明碳沥青具有以还原环境藻类为主的生源特征且成熟度高。饱和烃气相色谱图基线较平稳但部分出现“鼓包”,表明其正构烷烃系列遭受过一定程度的生物降解作用(图9)。沥青样品 m/z 177 质量色谱图中存在 $C_{29}-25$ -降藿烷(图10),表明沥青有过较强烈微生物活动,并遭受氧化及生物降解^[49-50]。

3.2.2.2 甾烷系列

一般说来在早古生代海相石油及烃源岩中, $C_{27}/C_{29} > 1$,表示浅海环境; $C_{27}/C_{29} < 1$,表示远离深水环境; $C_{27}/C_{29} \approx 1$,表示半深水环境(局部地区若有较多褐藻类,会出现 $C_{27}/C_{29} < 1$)^[51-52]。滩涧山群碳沥青的甾烷分布模式为 $C_{27} > C_{29} > C_{28}$,呈现“L”型分布(图11), C_{27} 含量较高,介于 31.17%~47.46%,平均值为 39.55%; C_{28}/C_{29} 介于 0.53~0.71,平均值为 0.65; C_{27}/C_{29} 介于 0.76~1.54,反映有机质来源



1—C₂₀ 三环萜烷;2—C₂₁ 三环萜烷;3—C₂₃ 三环萜烷;4—Ts;5—Tm;6—17 α ,21(H)30-降藿烷;7—6-17 α ,21(H)藿烷;8—伽马蜡烷。

图 8 饱和烃 m/z 191 质量色谱图
Fig. 8 Mass chromatogram (m/z 191) of saturated hydrocarbon

表 2 碳沥青饱和烃/芳烃碳同位素分布表

Table 2 Saturated and aromatic hydrocarbon carbon isotope distribution in anthraxolite			
编号	岩性	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	
		饱和烃	芳烃
DTL0902-01	油浸灰岩储层沥青	−30.5	−28.5
DTL0902-06		−28.4	−27.3
DTL1003-02		−28.0	−26.8
DTL1103-02		−30.1	−31.4
DTL2102-01		−29.0	−27.7
DTL2305-01		−28.1	−27.6
DTL2401-01		−29.0	−27.4
DTL2801-01		−27.7	−27.7
DTL3006-01		−27.7	−27.5
DTL3301-01		−28.5	−27.5
编号	岩性	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	
		饱和烃	芳烃
DTL0902-04	黑色泥岩同层沥青	−28.3	−27.4
DTL0905-01		−30.3	−28.8
DTL1003-04		−30.6	−27.4
DTL1103-03		−29.9	−28.0
DTL1611-01		−29.9	−29.2
DTL2503-01		−29.9	−31.4
DTL2804-01		−29.5	−27.5

表 3 滩涧山群碳沥青饱和烃地化参数表

Table 3 Geochemical characteristic parameters of anthraxolite in Tanjianshan group								
编号	主峰碳	C ₂₁ −/C ₂₂ +	C ₍₂₁₊₂₂₎ /C ₍₂₈₊₂₉₎	Pr/Ph	Pr/nC ₁₇	Ph/nC ₁₈	CPI	OEP
DT18001	nC ₂₇	0.11	0.23	0.90	0.93	0.83	1.11	1.15
DT18003	nC ₂₇	0.18	0.41	0.71	1.08	1.17	1.28	1.19
TC0601	nC ₂₅	0.20	0.60	0.92	0.71	0.91	1.22	1.11
TC0801	nC ₂₅	0.22	0.54	0.85	1.00	1.12	1.16	1.14
DTL0902-01	nC ₂₅	0.06	0.18	0.81	0.91	1.09	1.15	1.22
DTL1003-02	nC ₂₅	0.51	1.67	0.65	0.93	1.57	1.38	1.54
DTL1103-02	nC ₂₅	0.11	0.28	0.80	0.83	1.23	1.14	1.26
DTL2305-01	nC ₂₅	0.29	0.70	0.50	0.94	1.61	1.42	1.30
DTL3301-01	nC ₂₅	0.26	2.30	0.66	1.05	1.55	1.33	1.37

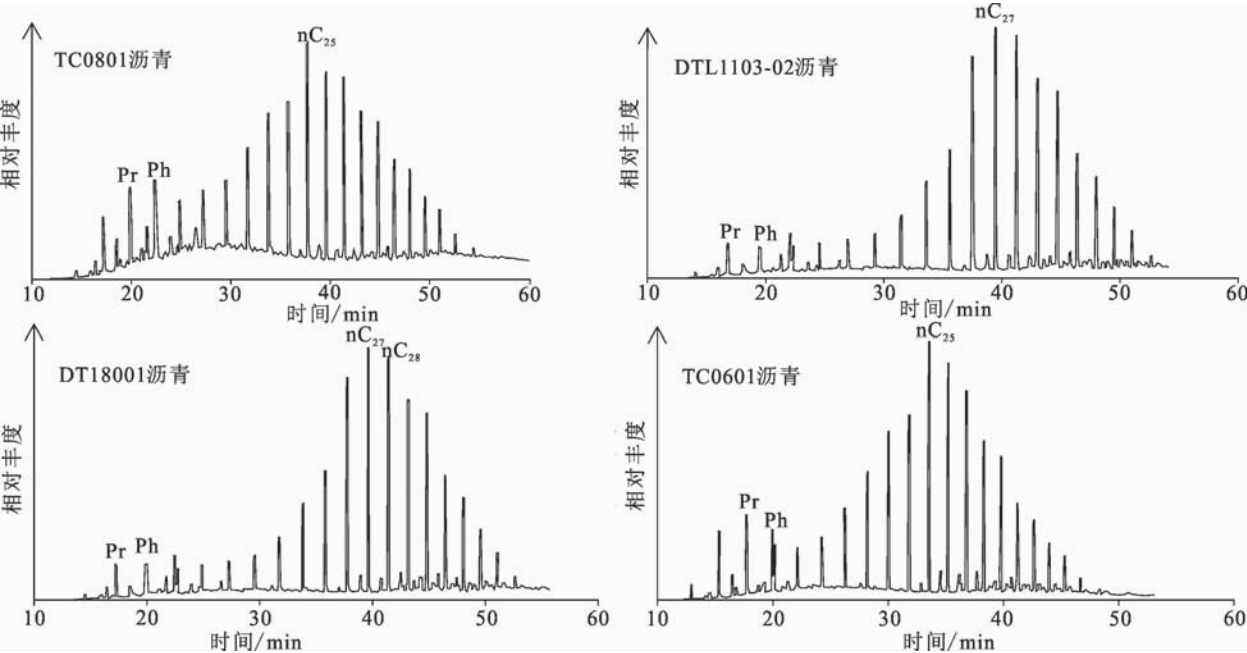


图 9 碳沥青饱和烃气相色谱图
Fig. 9 Gas chromatography of saturated hydrocarbon of anthracolite

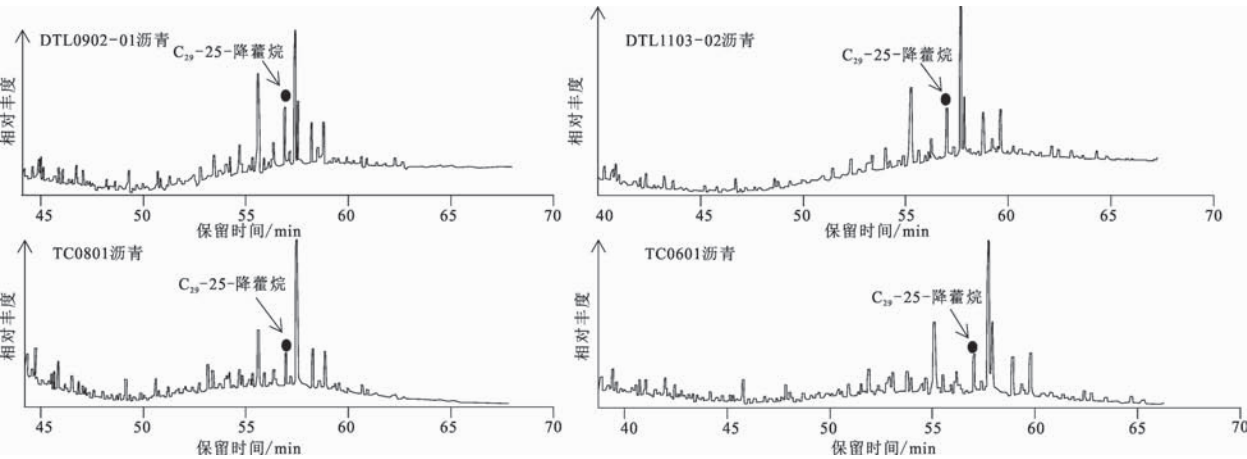


图 10 碳沥青饱和烃 m/z 177 质量色谱图
Fig. 10 Mass chromatogram (m/z 177) of saturated hydrocarbon of anthracolite

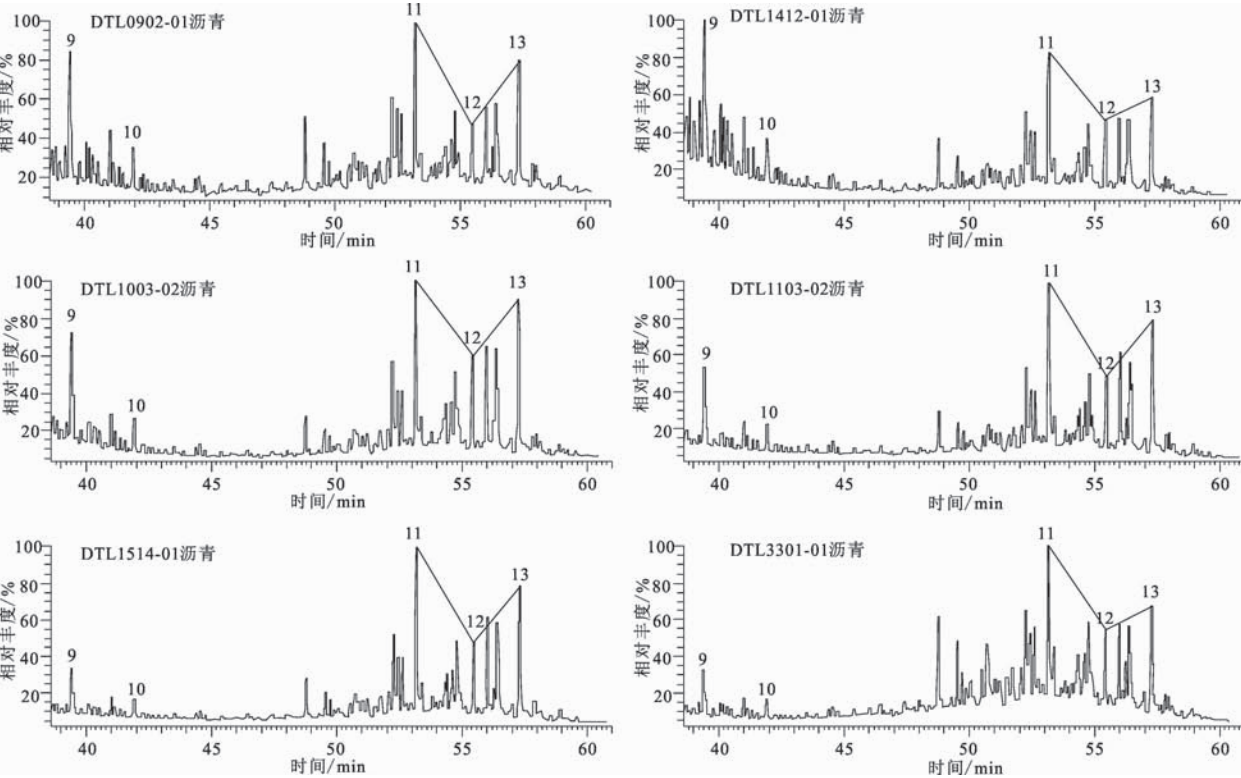
以水生生物为主,主要为浅海—半深水环境;孕甾烷和升孕甾烷的相对含量较高,(孕甾烷+升孕甾烷)比值分布在 0.39~1.78,平均值为 0.9;重排甾烷的含量较低,重排甾烷/规则甾烷分布在 0.32~0.49 (表 4),平均值为 0.37,甾烷/藿烷分布在 0.30~0.52,平均值为 0.24,表明有机质遭受过微生物改造^[53]。

3.2.3 水体盐度

芴、硫芴和氧芴及其烷基取代的衍生物称为“三芴”系列,通常三芴系列的相对组成可以指示沉积环

境,偏氧化沉积环境的有机质其氧芴含量高,而来源于海相咸水的强还原环境中有机质的原油及烃源岩含有高的硫芴系列化合物^[52]。

滩涧山群碳沥青具有绝对的硫芴优势(表 5),硫芴含量分布范围为 75%~98%,平均为 89.5%,反映其生源条件为咸水条件下的强还原环境的特征。Hughes 等^[54]建立了 Pr/Ph-二苯并噻吩/菲(DBT/P)图版来解释原油与烃源岩的沉积环境和有机相,Pr/Ph<1,代表水体为还原环境;若 DBT/P<1,表示海相或湖相泥页岩沉积;DBT/P>3,表示



9—孕甾烷;10—升孕甾烷;11—*aaa*(20R)*C*₂₇甾烷;12—*aaa*(20R)*C*₂₈甾烷;13—*aaa*(20R)*C*₂₉甾烷。

图 11 碳沥青 *m/z* 217 质量色谱图

Fig. 11 Mass chromatogram (*m/z* 217) of saturated hydrocarbon of anthraxolite

表 4 碳沥青甾烷参数分布表

Table 4 Parameter distribution of sterane of anthraxolite

编号	相对组成含量/%			<i>C</i> ₂₈ / <i>C</i> ₂₉	<i>C</i> ₂₇ / <i>C</i> ₂₉	重排甾烷/ 规则甾烷	甾烷/藿烷
	<i>C</i> ₂₇	<i>C</i> ₂₈	<i>C</i> ₂₉				
DTL0902-01	40.77	20.56	38.68	0.53	1.05	0.39	0.30
DTL1003-02	37.52	24.53	37.95	0.65	0.99	0.32	0.36
DTL1103-02	38.92	23.46	37.63	0.65	1.03	0.49	0.40
DTL2305-01	31.17	27.79	41.04	0.68	0.76	0.34	0.52
DTL3301-01	47.46	21.70	30.84	0.70	1.54	0.32	0.44
DTL1412-01	41.46	24.24	34.30	0.71	1.21	0.31	0.38

沉积环境为海相碳酸盐岩^[18]。而滩涧山群碳沥青 DBT/P 比值较低(表 5),分布在 0.01~0.21;且 Pr/Ph 分布较集中在 0.5~0.8,说明当时的沉积有机质为还原环境海相泥页岩沉积。

4 碳沥青形成与金属矿伴生探讨

滩间山群 a 段泥岩有机质来源于藻类等低等水生生物,浅海-半深水、缺氧还原的海相咸水环境下有利于生物从海水中对金属元素的初始富集。活动

大陆边缘金属成矿作用与火山-侵入岩密切相关^[46],因而构造演化和岩浆活动是柴达木盆地碳沥青与金属矿床形成的主要条件之一。

滩涧山群形成过程中的活动构造及岩浆作用很大改变了成油成矿条件,对滩涧山群碳沥青和金属矿的形成产生重要影响(图 12)。一方面岩浆活动能将地壳中的金属元素带入有机质演化生成的碳氢化合物流体中,另一方面活动构造和岩浆热液作用促进有机质生烃,碳氢化合物流体可以从围岩、水等中萃取金属元素。随着有机质的不断演化,流体不

表 5 碳沥青芳烃生物标志化合物参数表
Table 5 Biomarker of aromatic hydrocarbon of anthraxolite

样品编号	岩性	芴	二苯并噻吩(硫芴)	二苯并呋喃(氧芴)	Pr/Ph	DBT/P
DTL0902-04		11.40	87.44	1.16	0.81	0.14
DTL1003-04	黑色	3.28	96.72	0.00	0.73	0.09
DTL1103-03	泥岩	21.89	75.79	2.32	0.59	0.21
DTL1611-01	同层	29.90	66.90	3.19	0.65	0.14
DTL2804-01	沥青	7.98	91.21	0.81	0.49	0.06
DTL2503-01		0.00	100.00	0.00	0.50	0.11
DTL0902-01		0.00	100.00	0.00	0.71	0.06
DTL1003-02	灰岩	7.52	92.48	0.00	0.76	0.10
DTL1103-02	储层	44.21	40.51	15.29	0.69	0.08
DTL2305-01	沥青	0.00	100.00	0.00	0.80	0.08
DTL3301-01		0.00	100.00	0.00	0.68	0.04

断运移,当构造作用与岩浆活动改变的温度、压力、PH 等达到成油成矿条件时,到达稳定的储层空间碳氢化合物最终以碳沥青、天然气等形式赋存,而其中部分金属元素在系列成矿作用下形成稳定金属矿物。也可能岩浆活动与构造演化促进有机质生烃演化与金属成矿作用,形成的碳氢化合物流体与含金属流体不断运移,两类流体逐渐发生混合,最终形成碳沥青与金属矿床。滩润山地区滩润山群碳沥青广泛分布,部分金属元素含量高,并且发现的金属矿床

与碳沥青分布有一致性,表明有机质与金属元素相互作用有利于成藏、成矿,滩润山群具有很好的油气成藏和金属成矿的潜力。但在滩润山群形成的构造背景下,有机质和金属元素相互作用过程目前尚不清楚,碳沥青与金属矿物的伴生机制也不明确,需要系统深入研究滩润山群油气成藏过程与金属成矿条件,这对研究区有机-无机矿产共探具有重要意义。

5 结论

- (1)柴达木盆地滩润山群碳沥青分布广泛,包括赛什腾山、滩润山、茫崖石棉矿和开木齐地区,滩润山地区碳沥青主要在滩润山群 a 段灰岩和砂岩储层或与泥岩同层储存。
- (2)油源对比表明滩润山群碳沥青来源于滩间山群 a 段泥岩,母质类型为藻类等低等水生生物,形成于浅海-半深水、缺氧还原的海相咸水环境中,沥青演化成熟度高,遭受过较强生物降解作用。
- (3)滩润山群形成时的活动构造及岩浆作用有利于金属元素富集,促进烃类流体与金属元素相互作用,有机质对金属元素的初始富集或流体从外界条件萃取富集造成滩润山地区碳沥青中部分金属元素含

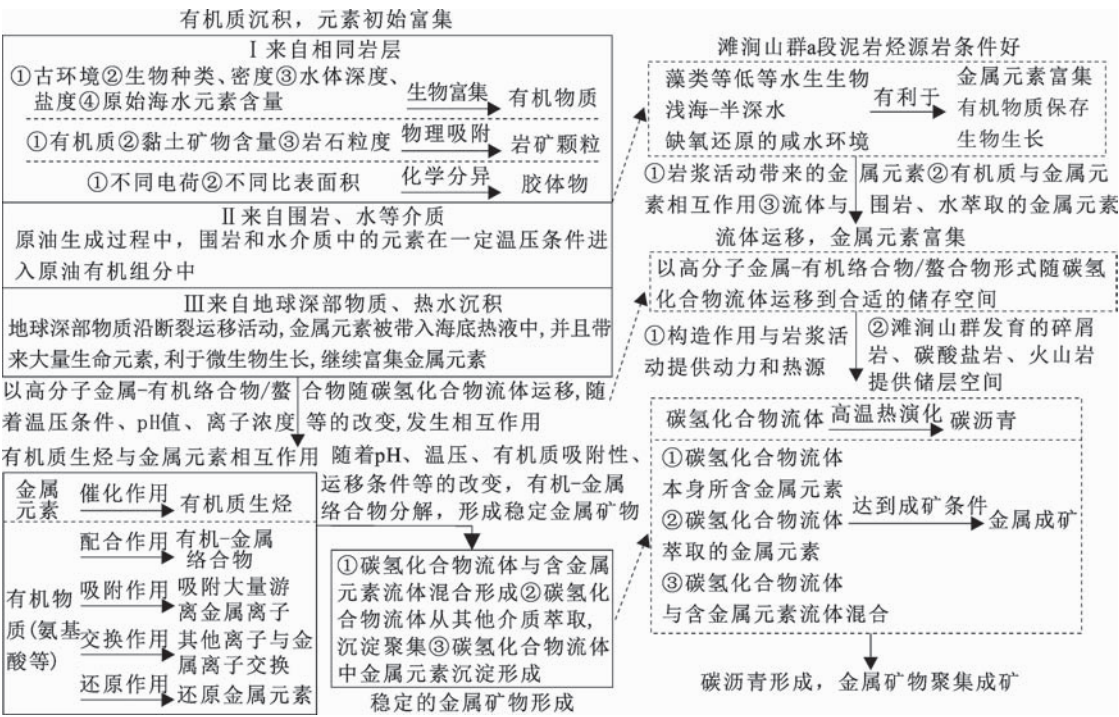


图 12 有机质生烃与金属元素成矿过程示意图
Fig. 12 Sketch of hydrocarbon generation and metal elements enrichment in ore-forming process

量高,尤其是钒元素含量平均值为 $221.8 \mu\text{g/g}$,表明滩涧山群有很好的金属成矿前景。

参考文献

- [1] 翟光明,王世洪,靳久强. 论块体油气地质体与油气勘探[J]. 石油学报, 2009, 30(4): 475-483.
- [2] 赵文智,何登发,池英杉,等. 中国复合含油系统的基本特征与勘探技术[J]. 石油学报, 2001, 22(1): 6-13.
- [3] 花林宝,丁梅花,真允庆,等. 试论我国油气田与金属矿床的伴生与共生关系[J]. 地质与勘探, 2010, 46(5): 814-827.
- [4] 赵一鸣,吴良士,白鸽. 中国主要金属矿床成矿规律[M]. 北京:地质出版社, 2004.
- [5] 陈毓川,王登红,朱裕生. 中国成矿体系与区域成矿评价[M]. 北京:地质出版社, 2007.
- [6] 向才富,胡建成. 右江盆地流体运移过程中成矿成藏作用[J]. 地球学报, 2003, 24(5): 423-428.
- [7] 向才富,庄新国,陆友明,等. 有机流体成矿作用与古油藏成藏作用相互耦合:以右江盆地微细浸染型金矿为例[J]. 地球科学, 2002, 27(1): 35-39.
- [8] 顾雪祥,李葆华,徐仕海,等. 右江盆地含油气成矿流体性质及其成藏-成矿作用[J]. 地学前缘, 2007, 14(5): 133-146.
- [9] 徐庆鸿,陈远荣,贾国相,等. 烃类组分在金属矿床的成矿理论和矿产勘查研究中的应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2623-2638.
- [10] 吴越,张长青,毛景文,等. 油气有机质与MVT铅锌矿床的成矿:以四川赤普铅锌矿为例[J]. 地球学报, 2013, 34(4): 425-436.
- [11] Parnell J. Metal enrichments in solid bitumens: A review[J]. Mineralium Deposita, 1988, 23: 191-199.
- [12] 刘德汉,林茂福. 碳沥青中几种钒、镍矿物的发现和成因讨论[J]. 中国科学: B辑, 1983, 10: 935-939.
- [13] 陈广坡,徐国盛,王天奇,等. 论油气成藏与金属成矿的关系及综合勘探[J]. 地学前缘, 2008, 15(2): 200-206.
- [14] 曹剑,吴明,王绪龙,等. 油源对比微量元素地球化学研究进展[J]. 地球科学进展, 2012, 27(9): 925-936.
- [15] 卢家烂,傅家谟,彭平安,等. 金属成矿中的有机地球化学研究[M]. 广州:广东科技出版社, 2004.
- [16] 段丽琴,宋金明,许思思. 海洋沉积物中的钒、钼、铈、镓及其环境指示意义[J]. 地质论评, 2009, 55(3): 420-427.
- [17] 胡承伟. 贵州镇远江古钒矿床地质地球化学特征[D]. 贵州:贵州大学, 2009.
- [18] Kissin Y V. Catagenesis and composition of petroleum: Origin of n-alkanes and isoalkanes in petroleum crudes [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1987, 51: 2445-2457.
- [19] 周世新,邹红亮,解启来,等. 沉积盆地油气形成过程中有机-无机相互作用[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(1): 42-47.
- [20] Mango F D. The origin of light hydrocarbons[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 64(7): 1265-1277.
- [21] 顾雪祥,章永梅,李葆华,等. 沉积盆地中金属成矿与油气成藏的耦合关系[J]. 地学前缘, 2010, 17(2): 83-105.
- [22] 吴越. 催化化学[M]. 北京:科学出版社, 1999.
- [23] 李玉敏. 工业催化原理[M]. 天津:天津大学出版社, 1992.
- [24] 陈孝红,汪啸风. 湘西地区晚震旦世一早寒武世黑色岩系的生物和有机质及其成矿作用[J]. 华南地质与矿产, 2000(1): 16-23.
- [25] 刘金钟,傅家谟,卢家烂. 有机质在沉积改造型金矿成矿中作用的实验研究[J]. 中国科学: B辑, 1993, 23(9): 993-1000.
- [26] Mango F D, Hightower J W, James A T. Role of transition-metal catalysis in the formation of natural gas[J]. Nature, 1994, 368: 536-538.
- [27] Mango F D. Transition metal catalysis in the generation of natural gas[J]. Organic Geochemistry, 1996, 24: 977-984.
- [28] 宁占武,王卫华,温美娟,等. 过渡金属对有机质热解生烃过程的影响[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(3): 317-319.
- [29] 刘成林,徐韵,马寅生,等. 柴达木盆地北部滩涧山群碳沥青地球化学特征与成因[J]. 地球科学与环境学报, 2015, 37(1): 85-93.
- [30] 汪劲草,彭恩生. 青海锡铁山铅锌矿床喷流沉积后的构造再造过程[J]. 大地构造与成矿学, 2000, 24(2): 163-169.
- [31] 王莉娟,祝新友,王京斌,等. 青海锡铁山铅锌矿床喷流沉积系统成矿流体研究[J]. 岩石学报, 2008, 24(10): 2433-2440.
- [32] 许荣科,郑有业,周宾,等. 柴北缘绿梁山一带与造山作用相关的铜铅锌矿床成矿规律及找矿启示[J]. 西北地质, 2012, 45(1): 192-201.
- [33] 杨斌,廖宗延. 广西大厂礁灰岩区碳沥青的产状特征及其与多金属成矿关系探讨[J]. 沉积学报, 1999, 17(增刊): 668-674.
- [34] 潘桂棠,李兴振,王立全,等. 青藏高原及邻区大地构造单元初步划分[J]. 地质通报, 2002, 21(11): 701-707.
- [35] 王惠初,陆松年,莫宣学,等. 柴达木盆地北缘早古生代碰撞造山系统[J]. 地质通报, 2005, 24(7): 603-612.
- [36] 王惠初,陆松年,袁桂邦,等. 柴达木盆地北缘滩涧山(岩)群的构造属性及形成时代[J]. 地质通报, 2003, 22(7): 487-493.
- [37] 郝国杰,陆松年,王惠初,等. 柴达木盆地北缘前泥盆纪构造格架及欧龙布鲁克古陆块地质演化[J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 115-122.
- [38] 朱小辉,陈丹玲,刘良,等. 柴北缘绿梁山地区早古生代弧后盆地型蛇绿岩的年代学、地球化学及大地构造意义[J]. 岩石学报, 2014(3): 822-834.
- [39] 李峰,吴志亮,李保珠,等. 柴达木盆地北缘滩涧山群新厘定[J]. 西北地质, 2006, 39(3): 83-90.

- [40] 汪劲草, 韦云龙, 郝森, 等. 柴北缘滩间山群构造对南祁连加里东造山及超高压变质岩折返的启示[J]. 桂林理工大学学报, 2013, 33(4): 575-586.
- [41] 付建刚, 梁新权, 王策, 等. 柴北缘锡铁山滩间山群c岩性组的时代归属及其物源特征[J]. 地质学报, 2014, 88(6): 1081-1092.
- [42] 李峰, 吴志亮, 李保珠. 柴达木北缘滩间山群时代及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(2): 226-233.
- [43] 高晓峰, 校培喜, 贾群子. 滩间山群的重新厘定: 来自柴达木盆地周缘玄武岩年代学和地球化学证据[J]. 地质学报, 2011, 85(9): 1452-1463.
- [44] 许志琴, 杨经绥, 吴才来, 等. 柴达木北缘超高压变质带形成与折返的时限及机制[J]. 地质学报, 2003, 77(2): 163-176.
- [45] 史仁灯, 杨经绥, 吴才来. 柴北缘早古生代岛弧火山岩中埃达克质英安岩的发现及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(3): 229-236.
- [46] 裴荣富, 李进文, 梅燕雄. 大陆边缘成矿[J]. 大地构造与成矿学, 2005, 29(1): 24-34.
- [47] 黄第藩, 李晋超. 干酪根类型划分的X图解[J]. 地球化学, 1982, 11(1): 21-30.
- [48] 卢双舫, 张敏. 油气地球化学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- [49] Peters K E, Moldowan J M. The Biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments [M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall Englewood Cliffs, 1993.
- [50] Bennett B, Fustic M, Farrimond P, et al. 25-norhopanes: Formation during biodegradation of petroleum in the subsurface[J]. Organic Geochemistry, 2006, 37: 787-797.
- [51] Grantham P J. The occurrence of unusual C₂₇ and C₂₉ sterane predominances in two types of Oman crude oil[J]. Organic Geochemistry, 1986, 9(1): 1-10.
- [52] 林壬子, 王培荣, 戴允彪, 等. 矿物燃料中多环芳烃的石油地球化学意义[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
- [53] Tissot B P, Welte D H. Petroleum Formation and Occurrence[M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1978.
- [54] Hughes W B, Holba A G, Dzou L I P. The ratios of dibenzothiophene to phenanthrene and pristane to phytane as indicators of depositional environment and lithology of petroleum source rocks[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(17): 3581-3598.