

文章编号: 1001-6112(2008)05-0512-06

柴达木盆地北缘西段 石炭系烃源岩和油气地球化学特征

陈 琰^{1,2}, 张 敏², 马立协², 王燕平², 孙 康², 张国卿², 张 霞², 廖爱兰²

(1. 中国地质大学 资源学院, 武汉 430074; 2. 中国石油 青海油田分公司 勘探开发研究院, 甘肃 敦煌 736202)

摘要: 长期以来, 由于柴达木盆地北缘发现的原油大多来源于侏罗系烃源岩, 所以油气勘探始终以侏罗系含油气系统为目标。石炭系在柴北缘西段分布零星, 学术界一直认为其生烃能力低下而未引起重视。冷湖五号构造冷科 1 井钻探后, 对 4 666 m 以下的地层归属产生极大争议, 通过对岩性、电性、古生物等资料进行系统分析, 现已确定这套地层属于石炭系, 并由此认识到冷湖地区深 86 井也钻遇了石炭系; 2004 年绿梁山前钻探的尕丘 1 井钻遇了较厚石炭系, 进一步揭示了石炭系的勘探潜力。通过分析石炭系烃源岩的地球化学特征, 发现石炭系烃源岩成熟度高而重排甾烷和重排藿烷含量低, 这与侏罗系烃源岩存在明显不同; 结合岩性、电性及古生物资料, 可以很好地区分石炭系和侏罗系。油源对比研究还发现在柴北缘西段存在少量来源于石炭系烃源岩的油气, 从而揭示了柴北缘油气勘探的新领域。

关键词: 生物标志化合物; 油气地球化学; 油源对比; 烃源岩; 石炭系; 柴达木盆地

中图分类号: TE122.11

文献标识码: A

THE CARBONIFEROUS SOURCE ROCKS IN WEST PART OF NORTH MARGIN OF QAIDAM BASIN AND THEIR PETROLEUM GEOCHEMICAL CHARACTERIZATION

Chen Yan^{1,2}, Zhang Min², Ma Lixie², Wang Yanping², Sun Kang², Zhang Guoqing², Zhang Xia², Liao Ailan²

(1. School of Resources, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China;

2. Exploration and Development Research Center, Qinghai Oilfield, CNPC, Dunhuang, Gansu 736202, China)

Abstract: The Jurassic petroleum system has been being the exploration target because most oils found in north margin of Qaidamu Basin are thought to sourced from the Jurassic source rocks for a long time. The Carboniferous distributed scatteredly in west part of north margin of Qaidam Basin has not been minded for the thought of poor capability of hydrocarbon generation. There are some disputes on the attribution of the stratum deeper than 4 666 m after the drilling of Well Lengke1 in Lenghu 5th structure. The stratum is the Carboniferous based on study on lithology, electricity, paleontology, and it is realized that what has been drilled to in Well Shen86, Lenghu area is also Carboniferous. Thick Carboniferous in Well Gaqiu1 drilled before Luliang Mountain in 2004 suggested the exploration perspective of the Carboniferous. It is realized that there is not only one set of source rock, the Jurassic for the discovery of the Carboniferous in the west part of north margin of Qaidam Basin. The Carboniferous and the Jurassic source rocks are very different based on their geochemical characterization. The most remarkable difference is high maturity with low abundance of disasteranes and diahopanes for the Carboniferous source rocks. The Carboniferous and the Jurassic can be distinguished well by geochemical characterization, combing with lithology, electricity and paleontology. Correlation results of oil and source indicate that some petroleum is sourced from the Carboniferous in west part of north margin of Qaidam Basin rather than all petroleum is from the Jurassic, indicating new petroleum exploration area in north margin of Qaidam Basin.

Key words: biomarkers; oil and gas geochemistry; oil-source correlation; source rocks, Carboniferous, the Qaidam Basin

收稿日期: 2008-03-13; 修订日期: 2008-09-01。

作者简介: 陈 琰(1972-), 女, 高级工程师, 主要从事石油地质及油气地球化学研究工作。E-mail: licqh@petrochina.com.cn。

柴达木盆地属于中国西部大型内陆湖泊沉积盆地,为阿尔金山、祁连山和昆仑山所夹持,呈不规则菱形^[1~5]。柴北缘位于柴达木盆地东北部,西起阿尔金山前的鄂博梁 I 号构造,东至德令哈凹陷大浪—土尔岗构造带东端,北以祁连山前深大断裂系为界,南至鄂博梁南缘—陵间断裂—黄泥滩断裂—埃姆尼克山南缘山前深大断裂,属盆地一级构造单元。本文以绿梁山与埃姆尼克山之间为界将柴北缘划分为东段和西段,并以柴北缘西段石炭系为主要研究对象^[6~10](图 1)。

1 柴北缘井下钻遇石炭系的确定

1998 年冷湖五号构造的科学探索井——冷科 1 井完钻后,大家对 4 666 m 以下的地层归属产生极大争议。尽管很多人存在不同的看法,但当时还是保守地把这套地层划归下侏罗统,不但认为其中的海相生物化石是异地搬运而来的,并且对其地球化学特征没有明确认识,只是认为属于侏罗系中较特别的一类。2004 年,通过青海油田分公司组织各方专家多次会商,对岩性、电性、古生物等资料进行系统分析讨论,正式确定这套地层属于石炭系。

认为 4 666 m 为冷科 1 井下侏罗统与石炭系分界线的依据主要有:1)据岩心观察,其上岩性为正常含煤地层,其下出现灰岩、沉凝灰岩、轻变质粉砂岩等,岩性致密,广泛发育两组相交裂缝,并为方解石、石英脉所充填。此外,在 4 666 m 以下岩心中发现个别腕足类、棘皮类、藓等海相化石碎片,反映古生代海陆交互相的特点;2)据电测资料,界线

之下电阻率陡然升高至 200~1 700 $\Omega \cdot m$,远高于其上下侏罗统的电阻率;3)据镜质体反射率测定结果,界线之下 R_o 为 3.98%~4.16%,比其上侏罗系的 R_o 值(0.8%~1.4%)陡然增高;4)从地层倾角资料来看,界线之上地层倾向北西,倾角为 15°~40°,而在界线之下地层产状无序,无层状特征;5)从地震剖面上分析,4 666 m 以上波阻为弱反射,以下为强反射,产状相变,并有底超现象,若将本井段归侏罗系则出现局部急剧加厚的不协调的现象;6)经过复查冷科 1 井老资料,确认 4 666 m 之上存在煤层,而之下并未发现煤层。

通过冷科 1 井石炭系的确定,青海油田研究院对柴北缘西段钻井资料进行了系统复查对比,认识到冷湖四号构造深 86 井也钻遇了石炭系。

2004 年在绿梁山西侧山前钻探的尕丘 1 井钻遇了 600 余米海陆交互相石炭系(未见底),在此井东南侧绿梁山前地面见有三处岩性与之相似的下石炭统露头分布。

2 石炭系烃源岩地球化学特征

2.1 基础地化特征

3 口井石炭系样品均具有较高的有机质成熟度,一些反映烃源岩中有机质丰度和类型的基础地球化学参数发生了明显的变异,可能很难客观地反映这些烃源岩的本来面目。冷科 1 井与尕丘 1 井石炭系样品在岩性和热解参数上存在明显差异:如尕丘 1 井基本为碳酸盐岩,而冷科 1 井大多为泥岩;尕丘 1 井岩样的热解参数均很低,而冷科 1 井岩样的热解参数则相对较高,反映这 2 口井的石炭系样品具有完全不同的生烃潜力。

就冷科 1 井石炭系样品的分析结果而言(图 2),其有机碳含量基本都大于 0.50%,且大多介于 1.0%~5.0%之间,表明该地区石炭系烃源岩具有较好的生烃物质基础,属于中—好烃源岩。此外,这些烃源岩样品中有机质的氢指数(I_H 介于 100~300 mg/g,表明它们仍具有一定的降解生烃潜力。鉴于这部分烃源岩目前已处于高演化阶段,可以推测冷科 1 井石炭系具有很好原始有机质丰度和较好的有机质类型,应该具有不可低估的生烃潜力,值得关注。

热解分析表明,尕丘 1 井石炭系样品基本均以低有机碳含量为特征,具有有机质丰度低、有机质类型差而有机质成熟度高的特点(表 1、图 3)。如尕丘 1 井绝大多数样品中的 TOC 均小于 0.10%,只有 2 个样品中的 TOC 值达到了 0.50%,表明尕

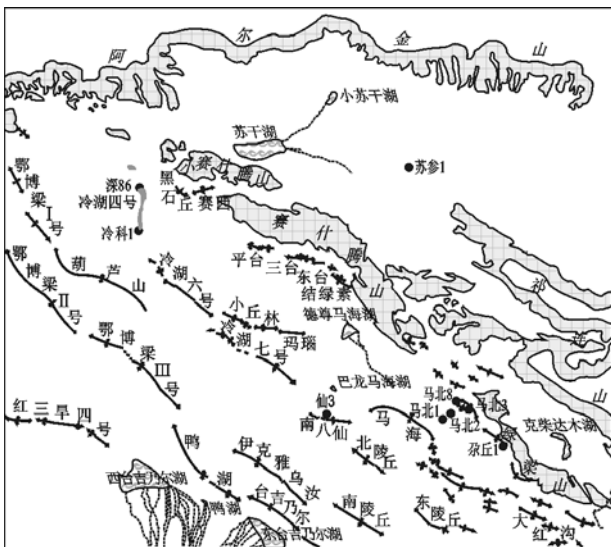


图 1 柴达木盆地北缘西段地理位置示意

Fig. 1 The location map of the west part of north margin of Qaidam Basin

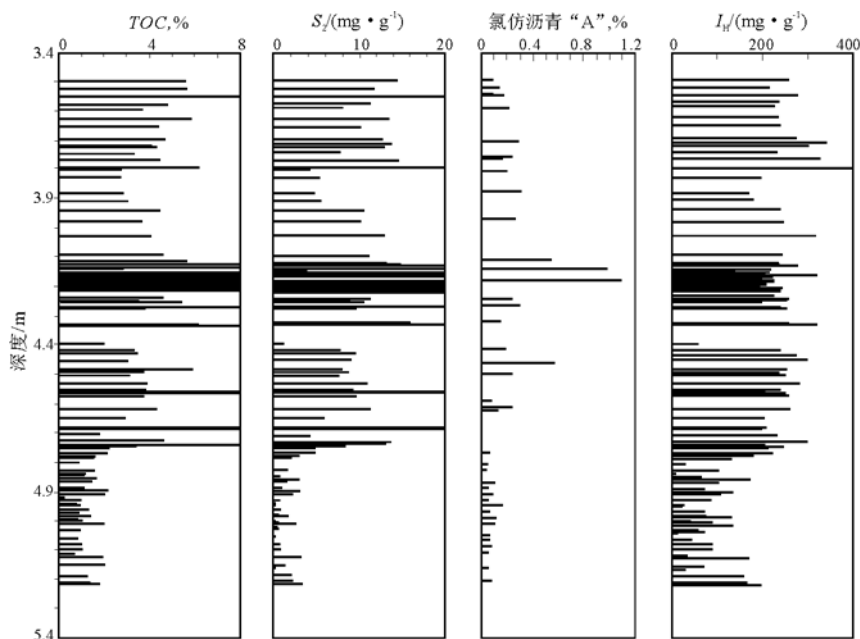


图 2 柴达木盆地北缘冷科 1 井侏罗系及石炭系烃源岩地化指标

Fig. 2 Geochemical index profile of Jurassic and Carboniferous source rocks in Well Lengkel in the north margin of Qaidam Basin

表 1 柴达木盆地北缘尕斯 1 井石炭系残余有机碳含量

Table. 1 The residual organic carbon of Carboniferous in Well Gasiu1 in the north margin of Qaidam Basin

深度/m	岩性	TOC, %
1 902	灰岩	0.04
1 930	灰岩	0.03
1 905.2	灰岩	0.03
1 906.1	灰岩	0.03
1 906.6	灰岩	0.07
1 907	灰岩	0.04
1 908	灰岩	0.10
1 592~1 595	泥质灰岩	1.01
1 737~1 738	泥质灰岩	0.58

尕斯 1 井石炭系烃源岩并不发育。值得注意的是,在尕斯 1 井石炭系中,随着泥岩含量的增加,其 TOC 值明显增高,有机质丰度达到烃源岩的标准。

2.2 生物标志化合物特征

尽管地理位置相隔较远,但从冷科 1 井和尕斯 1 井石炭系样品的生物标志化合物来看,柴北缘石炭系具有相似的特征(图 4,5)。总体看来,石炭系烃源岩的生物标志化合物特征主要有:三环萜烷含量相对较高且呈现以 C₂₁ 或 C₂₃ 三环萜烷为主的正态分布特征;T_m 含量略大于 T_s;伽马蜡烷含量相对较高(伽马蜡烷/C₃₀ 藿烷比值一般都大于 0.2);降萘烷相对含量较低;重排甾烷含量极低。

表面看来,石炭系烃源岩生物标志化合物特征与侏罗系烃源岩较为相似,但仔细分析发现二者间

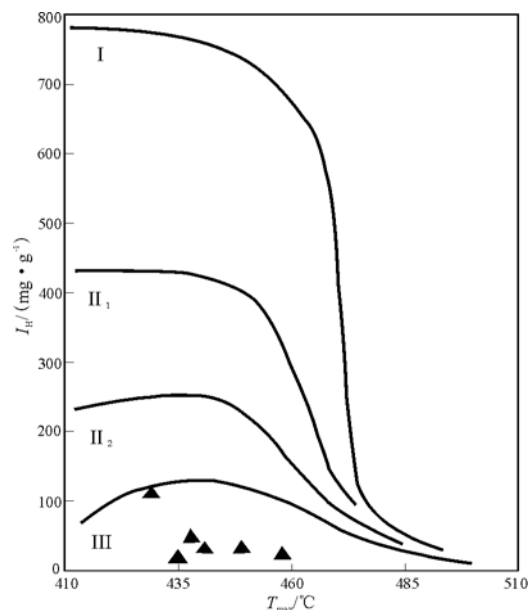


图 3 柴达木盆地北缘尕斯 1 井石炭系热解氢指数 I_H 与 T_{max} 关系

Fig. 3 The relationship between I_H and T_{max} in Well Gasiu1 in the north margin of Qaidam Basin

存在明显差异。

总体来看,柴北缘大部分侏罗系烃源岩的生物标志化合物特征主要有(图 6):三环萜烷系列以 C₁₉ 含量最高,呈阶梯形分布特征;伽马蜡烷含量相对较低(伽马蜡烷/C₃₀ 藿烷比值一般都小于 0.1),这与石炭系烃源岩明显不同。

研究还发现,在柴北缘也存在少数侏罗系烃源

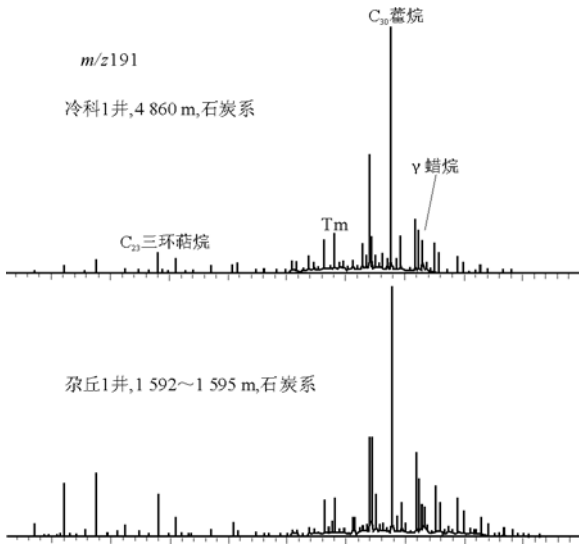


图 4 柴达木盆地北缘石炭系烃源岩藿烷系列分布特征
Fig. 4 The distribution of hopanoid in Carboniferous source rock of the north margin of Qaidam Basin

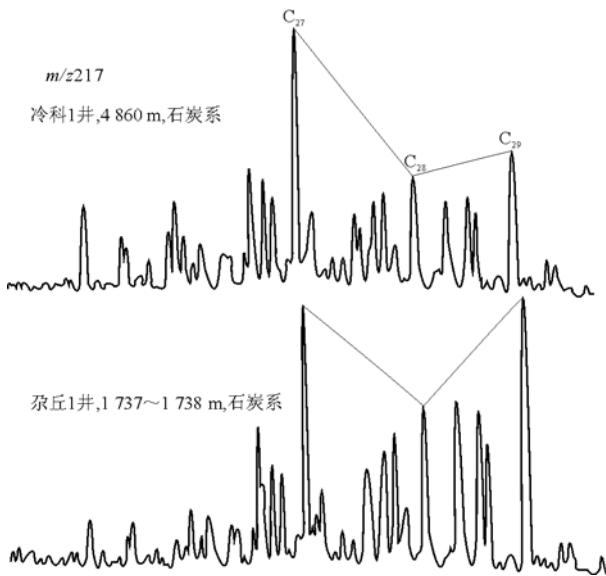


图 5 柴达木盆地北缘石炭系烃源岩甾烷系列分布特征
Fig. 5 The distribution of gonane in Carboniferous source rock of the north margin of Qaidam Basin

岩,如下侏罗统上部及鱼卡断陷个别中侏罗统烃源岩,也具有与石炭系烃源岩相似的部分生物标志化合物特征:即三环萜烷系列呈现以 C₂₁ 或 C₂₃ 三环萜烷为主的正态分布特征(图 7)。但经过仔细分析,这些侏罗系烃源岩不但一般成熟度都较低,而且其生物标志化合物特征与石炭系烃源岩还是存在差异:尽管这部分侏罗系烃源岩也具有三环萜烷系列呈正态分布的特征,但其伽马蜡烷含量相对较低而降萘烷及重排甾烷含量则较高,并且重排甾烷含量随烃源岩有机质成熟度增大而明显增高,明显与石炭系烃源岩不同。一般情况下,烃源岩中的重

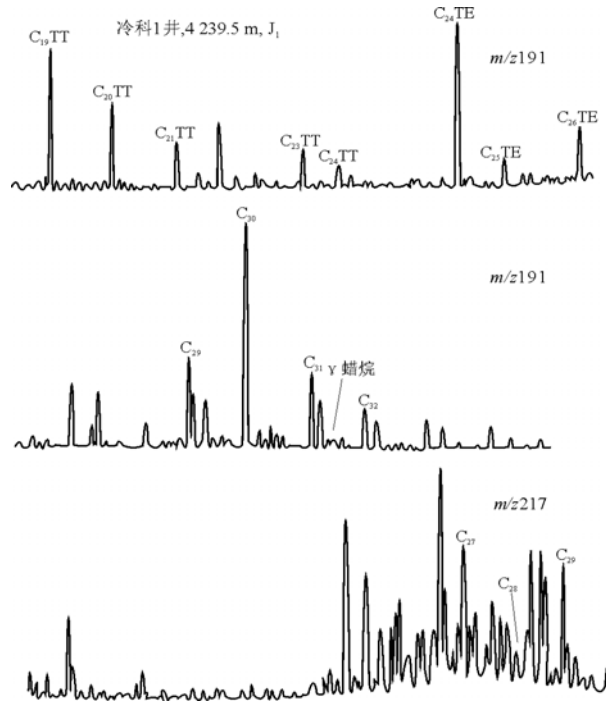


图 6 柴达木盆地北缘下侏罗统
烃源岩三环萜烷、藿烷及甾烷系列分布特征
Fig. 6 The distribution of tricyclic terpane, hopanoid and gonane in Lower Jurassic source rock of the north margin of Qaidam Basin

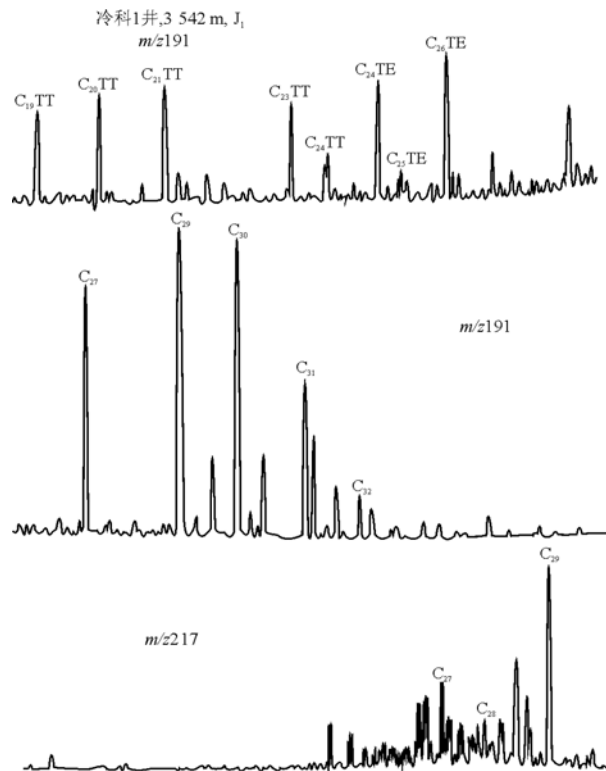


图 7 柴达木盆地北缘下侏罗统上部
烃源岩三环萜烷、藿烷及甾烷系列分布特征
Fig. 7 The distribution of tricyclic terpane, hopanoid and gonane in Lower Jurassic source rock of the north margin of Qaidam Basin

排甾烷、重排藿烷的含量随着热成熟度的增高而逐渐增大。石炭系烃源岩虽然成熟度较高,但其重排甾烷和重排藿烷的含量却相对较低。分析认为造成这一现象是由于柴北缘的石炭系烃源岩属海陆交互相沉积,碳酸盐岩含量较高而粘土矿物含量较低,其中的有机质缺乏粘土矿物的酸性催化作用,从而使甾醇、藿醇在成岩作用期间没有大量转化为重排甾烯、藿烯并最终被还原成重排甾烷或重排藿烷^[11]。

柴北缘石炭系和侏罗系烃源岩之间生物标志化合物特征的差异也反映了其沉积环境的差异,从另一个侧面证实柴北缘石炭纪为海陆交互沉积环境,而侏罗纪转变为陆相湖沼沉积环境。

3 对石炭系烃源岩油气的认识

3.1 原油

前人认为在柴北缘发现的油气皆来源于侏罗系。但是最近通过研究发现,柴北缘马北地区马北2井和马北8井存在一类早期原油,其中检测到丰度较高的25-降藿烷系列(图8),而目前在马北构造的其它原油中并没有检测出25-降藿烷系列的存在。

由于25-降藿烷系列是一类表征原油遭受深度生物降解作用改造的生物标志物^[11],正常情况下在这样的原油中不可能再出现链烷烃系列(正构烷烃系列和植烷系列),即在后期没有新生原油补充的前提下,25-降藿烷系列与正构烷烃系列和植烷

系列是不可能同时并存的^[12]。但马北2井原油全色谱特征(图8)清楚地表明该原油中存在丰富且完整的正构烷烃系列和植烷系列,即在该原油中出现了25-降藿烷系列与正构烷烃系列和植烷系列同时并存的现象。这一现象的出现实际上揭示出马北2井所处的区域在地质历史时期曾出现过至少两次油气充注的过程,早期注入的油气遭受了生物降解作用的改造,结果导致链烷烃系列的消失和25-降藿烷系列的形成;此后,新的烃源岩层(中侏罗统)发生生排烃作用和大规模的油气运移,从而使该区又接受了后期新生油气的注入,从而造成了目前该原油中出现25-降藿烷系列与正构烷烃系列和植烷系列同时并存的“异常现象”。

从原油中烃类的组成特征来看,由于该类原油中生物标志物的分布与组成特征完全不同于相邻构造上的中侏罗统原油,这一方面说明早期的原油在成因和来源上不同于晚期原油,同时也暗示了晚期注入的原油可能来源于生物标志物浓度偏低的在淡水环境中沉积的烃源岩。

其中早期注入的原油生成、运移和成藏时间均较早,由于受到后期构造运动的改造,目前已遭受了严重生物降解作用的破坏,但在一些相对稳定的区块也许会有部分原油被保存下来。依据这类原油所特有的生物标志物的分布与组成特征,再结合这类原油形成时间早,理论上推测它可能来源于下侏罗统烃源岩层或前侏罗系烃源岩。

笔者根据多年研究经验分析认为,这些原油也具有三环萜系列含量相对较高且呈正态分布(C_{21} , C_{23} 三环萜烷含量相对较高)、伽马蜡烷含量相对较高、重排甾烷含量较低的地球化学特征,与侏罗系烃源岩存在差异而与石炭系烃源岩一致,应为来源于石炭系烃源岩的原油(图9)。经过研究还发现,类似原油在南八仙构造也有零星分布,如仙3井1076~1082.6 m原油。

3.2 天然气

通过对柴北缘的天然气进行系统取样研究发现,柴北缘西段冷湖五号、南八仙及马北构造大部分天然气 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值都大于1000,与侏罗系来源的天然气明显不同,具有石炭—二叠系天然气 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 的特征(表2)。笔者通过对柴北缘烃源岩的分析研究,认为其亦极有可能来源于石炭系烃源岩。

4 结论

1)柴达木盆地北缘西段不但在山前带地面有石炭系出露,而且钻探揭示盆地内部亦存在石炭系,

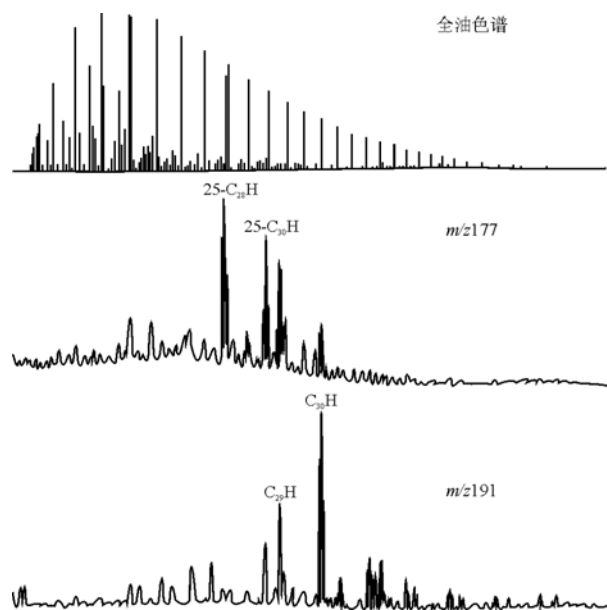


图8 柴达木盆地北缘马北2井原油中25-降藿烷系列分布特征

Fig.8 The distribution of 25-norhopane in the oil of Well Mabei2 in the north margin of Qaidam Basin

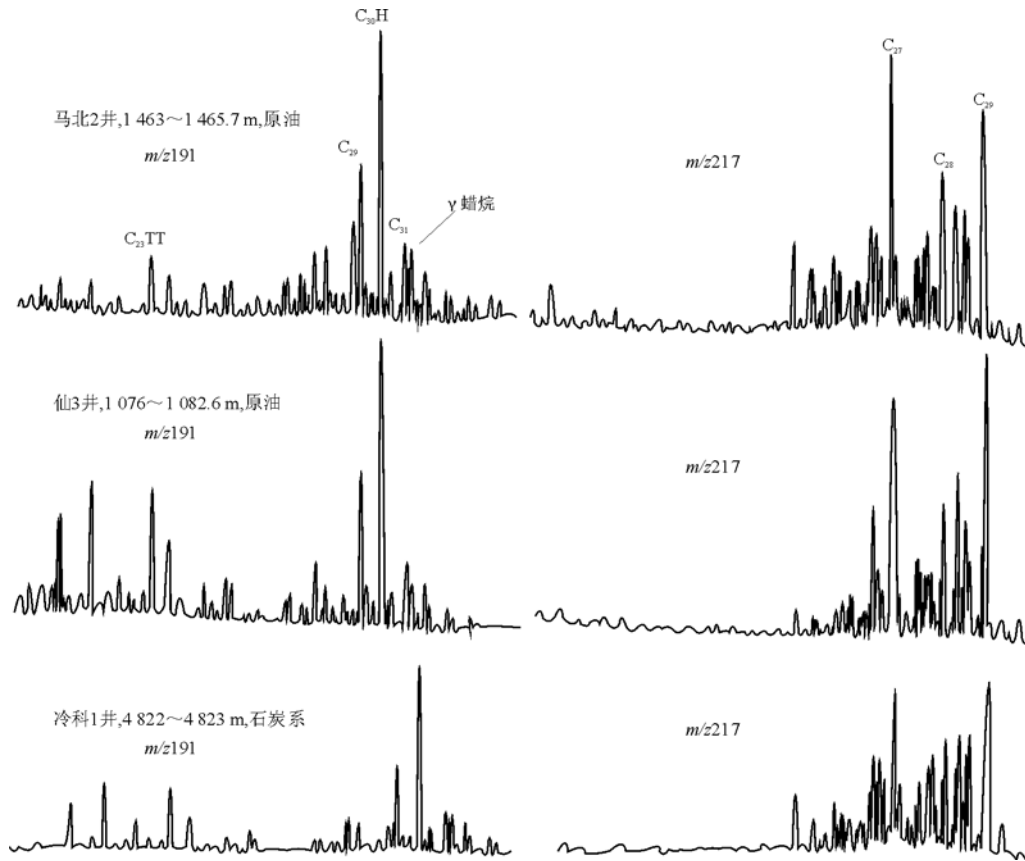


图 9 柴达木盆地北缘原油与石炭系烃源岩甾萜烷分布特征

Fig. 9 The comparison of hopanoid and gonane between Carboniferous source rocks and crude oil in north margin of Qaidam Basin

表 2 柴达木盆地北缘西段部分天然气 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 及折算地质年龄表

Table 2 The gas $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ and reduced geological age in the west part of north margin of Qaidam Basin

井号	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	地质年代/Ma
马北 106	1 540	369
马北 H4-1	1 712	393
马北 H5-1	1 549	370
马北 3	790	215
马北 8-1	951	258
冷 5-58	1 143	300
冷 4-581	533	124
仙 7	1 073	286
仙 14	895	244
仙中 7	1 180	307
仙中 10	1 151	302
仙中 11	1 189	309
仙试 7	1 194	310

系,研究证实其具备一定的生烃能力。

2)柴北缘西段石炭系烃源岩以成熟度相对较高而重排甾烷、重排藿烷含量低并且三环萜烷呈正态分布特征(C_{21} 、 C_{23} 三环萜烷含量相对较高)为最主要的地球化学特征,与中、下侏罗统烃源岩存在

明显差异;将烃源岩生物标志化合物特征与岩性、电性及古生物资料相结合,可以很好地区分柴北缘的石炭系和侏罗系烃源岩,进而作为油源对比依据,对柴北缘油气研究工作具有较好指导意义。

3)通过油源对比工作,已发现在柴北缘西段存在来源于石炭系烃源岩的油气,证明石炭系是柴北缘不可忽视的又一套供烃源岩,为柴北缘的油气勘探揭示了一个全新的领域。

致谢:文中部分样品的地球化学数据分别由长江大学包建平教授、中科院兰州地质所张晓宝研究员以及中国石油勘探开发科学研究院赵长毅高工实验提供,特此表示感谢!

参考文献:

- 1 罗 群. 柴达木盆地成因类型探讨[J]. 石油实验地质, 2008, 30(2):115~120
- 2 刘志宏,杨建国,万传彪等. 柴达木盆地北缘地区中生代盆地性质探讨[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(6):620~624
- 3 杨明林,尹太举,张昌民等. 柴达木盆地北缘马海以东地区地层油气藏评价[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(1):45~47

NH_4^+ 和 N_2 也可能分别是营养物 P, K 和 N 的最主要来源。于是,在缺氧、但具有营养物来源的条件下,SRB 很可能与其它厌氧微生物一起,联合降解烃类,产生 H_2S 、黄铁矿。

一般认为,微生物只能降解溶解于水中的烃类,由于甲烷的溶解度最大、分子最简单,于是甲烷比其它烃类更易被微生物所降解^[3,8,9];富 ^{12}C 的甲烷优先被氧化,导致了甲烷碳同位素发生了分馏效应^[3]。

石油烃厌氧生物降解,被认为与好氧降解具有类似的降解序列,差异在于降解的速率比好氧降解慢得多,在几十年内可能都观察不出来^[5]。东胜和钱家店铀矿床中,石油中含有 25-降藿烷和去甲基三环萜烷系列,为严重生物降解作用的产物。而与之伴生的是强还原环境下生物成因的黄铁矿,很好地说明了石油烃降解作用是发生在无氧的环境。而石油烃降解所产生低 $\delta^{13}\text{C}$ 的 CO_2 和方解石,都很好地保存在地层中。有意义的是,生物成因的黄铁矿与来自油气碳的方解石、铀石或铀石化的微化石紧密共生,于是,在东胜铀矿床和钱家店铀矿床中,石油烃厌氧降解与硫酸盐还原、U(VI)还原,形成黄铁矿和 U(IV)矿床,存在耦合关系。

6 结论

1) 在含有 H_2S 、黄铁矿的油气储层中,油气烃类的生物降解作用多与 SRB 有关。

2) 东胜铀矿床和钱家店铀矿床油气发生了厌氧氧化作用,产生了 25-降藿烷和去甲基三环萜烷系列,并导致了方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ 低于 -21‰ 。

3) 油气厌氧氧化与 U(VI)、硫酸盐的还原作用存在耦合关系;微生物、油气可直接参与铀成矿作用。

参考文献:

1 So C M, Young L Y. Isolation and characterization of a sulfate-re-

ducing bacterium that anaerobically degrades alkanes[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, 65:2969~2976

2 Boetius A, Ravensschlag K, Schubert C J, et al. A marine microbial consortium apparently mediating anaerobic oxidation of methane[J]. *Nature*, 2000, 407:623~626

3 Cai Chunfang, Richard H Worden, et al. Chemical and isotopic evidence for secondary alteration of natural gases in the Hetianhe Field, Bachu Uplift of the Tarim Basin[J]. *Organic Geochemistry*, 2002, 43:1415~1427

4 Aitken C M, Jones D M, Larter S R. Anaerobic hydrocarbon biodegradation in deep subsurface oil reservoirs[J]. *Nature*, 2004, 431:291~294

5 Larter S, Wilhelms A, Head I, et al. The controls on the composition of biodegraded oils in the deep subsurface—part 1: biodegradation rates in petroleum reservoirs[J]. *Organic Geochemistry*, 2003, 34:601~613

6 Cai Chunfang, Richard H Worden, George A W, et al. Origin of sulfur rich oils and H_2S in Tertiary lacustrine sections of the Jinxian Sag, Bohai Bay Basin, China[J]. *Applied Geochemistry*, 2005, 20:1427~1444

7 Lovley D R, Roden E E, Phillips E J P, et al. Enzymatic iron and uranium reduction by sulfate-reducing bacteria[J]. *Marine Geology*, 1993, 113: 41~53

8 Cai Chunfang, Dong Hailiang, Li Hongtao, et al. Mineralogical and geochemical evidence for coupled bacterial uranium mineralization and hydrocarbon oxidation in the Shashagetai deposit, NW China[J]. *Chemical Geology*, 2007, 236:167~179

9 Cai Chunfang, Li Hongtao, Qin Mingkuan, et al. Biogenic and petroleum-related ore-forming processes in Dongsheng uranium deposit, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 32:262~274

10 桑吉盛,张永保,陈为义. 松辽盆地中南部及其邻区新构造运动与铀成矿[J]. *铀矿地质*, 2004, 20(4):219~224

11 Peters K E, Moldowan J M. The biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments[M]. New Jersey: Prentice Hall, Inc, 1993

12 Blanc P H, Connan J. Origin and occurrence of 25-norhopanes: a statistical study[J]. *Organic Geochemistry*, 1992, 18:813~828

(编辑 李凤丽)

~~~~~

(上接 517 页)

4 彭立才,杨慧珠,刘兰桂等. 柴达木盆地北缘侏罗系烃源岩沉积有机相划分及评价[J]. *石油与天然气地质*, 2001, 22(2): 178~181

5 甘贵元,严晓兰,赵东升等. 柴达木盆地德令哈断陷石油地质特征及勘探前景[J]. *石油实验地质*, 2006, 28(5):499~503

6 文志刚,王正允,何幼斌等. 柴达木盆地北缘上石炭统烃源岩评价[J]. *天然气地球科学*, 2004, 15(2):125~127

7 孟仟祥,房媛,徐永昌等. 柴达木盆地石炭系烃源岩和煤岩生物标志物特征及其地球化学意义[J]. *沉积学报*, 2004, 22(4): 729~736

8 李慧莉,邵志兵,金之钧等. 多旋回盆地复杂生烃史条件下烃源岩生烃量研究[J]. *石油实验地质*, 2007, 29(2): 164~166

9 陈志勇,肖安成,周苏平等. 柴达木盆地侏罗系分布的主控因素研究[J]. *地学前缘*, 2005, 12(3):149~155

10 李守军,张洪. 柴达木盆地石炭系地层特征与分布[J]. *地质科技情报*, 2000, 19(1):1~4

11 Peters K E, Moldowan J. 生物标志化合物指南[M]. 姜乃煌, 张水昌, 林永汉等译. 北京:石油工业出版社, 1995

12 包建平. 未降解原油和烃源岩中的 25-降藿烷系列[J]. *科学通报*, 1996, 41(20):1875~1878

(编辑 徐文明)