

文章编号: 0253-2697(2018)06-0674-12 DOI:10. 7623/syxb201806006

柴达木盆地西部咸化湖相优质烃源岩形成机理

张 斌¹ 何媛媛¹ 陈 琰² 孟庆洋¹ 黄家旋¹ 袁 莉²

(1. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083; 2. 中国石油青海油田公司勘探开发研究院 甘肃敦煌 736202)

摘要:古近系咸化湖相烃源岩是柴达木盆地西部地区主力油源。传统认为该地区烃源岩有机质丰度低、类型差、生油潜力有限,劣质的烃源条件与显著的勘探成效极不匹配。此前的研究首次证实了该地区发育优质烃源岩,对于重新认识柴达木盆地西部油气资源潜力、坚定寻找大中型油气田的信心具有重要的意义。本研究在烃源岩地球化学精细解剖基础上,应用岩石学、元素地球化学和有机地球化学等多种手段,探讨了优质烃源岩发育的条件,发现柴达木盆地西部地区咸化湖相沉积具有水体较浅且相对安静、盐度较高、营养物质相对贫乏的特点。受干旱寒冷气候影响,陆源淡水补给有限,水生生物发育程度相对较低。优越的保存条件有利于水生生物等生油母质的快速保存,形成富含氢元素的烃源岩,且可溶有机质含量较高;而较低的古生产力使得有机质丰度总体低于东部咸化湖盆。半深湖区水体盐度相对较低、营养物质较为丰富,是优质烃源岩形成最有利的地区;沉积凹陷区烃源岩厚度较大,但由于水体盐度高,远离物源区,水体分层明显,有机质丰度中等—好。

关键词:咸化湖盆;优质烃源岩;形成机理;水生生物;古生产力;保存条件;柴达木盆地

中图分类号:TE122.1 **文献标识码:**A

Formation mechanism of excellent saline lacustrine source rocks in western Qaidam Basin

Zhang Bin¹ He Yuanyuan¹ Chen Yan² Meng Qingyang¹ Huang Jiaxuan¹ Yuan Li²

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina Qinghai Oilfield Company, Gansu Dunhuang 736202, China)

Abstract: The Paleogene saline lacustrine source rocks are the main sources of oil in western Qaidam Basin. It is traditionally believed that the source rocks in this area have low organic matter abundance, poor type and limited oil generating potential, and the inferior hydrocarbon source conditions are very inconsistent with significant exploration results. Previous study has confirmed the development of high-quality source rocks in the area, which is of great significance for re-recognizing the potential of oil and gas resources and consolidating the confidence of exploring large and medium-sized oil and gas fields in western Qaidam Basin. Based on the fine geochemical analysis of source rocks, the conditions for the development of high-quality source rocks are discussed by means of petrology, element geochemistry and organic geochemistry. It is found that the saline lacustrine deposits in western Qaidam Basin are characterized by relatively shallow and quite water, high salinity and poor nutrients. Affected by the drought and cold climate, the supply of fresh water is limited, and the development of aquatic organisms is relatively low. Favorable preservation conditions are conducive to the rapid preservation of oil generating biomass such as aquatic organisms, forming source rocks rich in H element with high soluble organic matter content. But lower paleo-productivity leads to the organic matter abundance overallly lower than that of the eastern salinized lacustrine basins. The salinity of water in semi-deep lake is relatively low with rich nutrition, which is favorable to develop excellent source rocks. The source rocks are thick in the sedimentary depression, but due to high water salinity and far away from the source area, water stratification is obvious with moderate-high organic matter abundance.

Key words: saline lacustrine basin; excellent source rock; formation mechanism; aquatic organism; paleo productivity; preservation conditions; Qaidam Basin

引用:张斌,何媛媛,陈琰,孟庆洋,黄家旋,袁莉. 柴达木盆地西部咸化湖相优质烃源岩形成机理[J]. 石油学报,2018,39(6):674-685.

Cite: ZHANG Bin, HE Yuanyuan, CHEN Yan, MENG Qingyang, HUANG Jiaxuan, YUAN Li. Formation mechanism of excellent saline lacustrine source rocks in western Qaidam Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(6): 674-685.

柴达木盆地西部地区(柴西地区)古近系发育一套 机质丰度低、类型差、生油潜力有限^[1-3]。烃源岩有机碳含量多数低于 1%,且以 II₂ 型和 III 型有机质为主,

基金项目:中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2016E-0101)资助。

第一作者及通信作者:张 斌,男,1978 年 8 月生,2002 年获大庆石油学院石油与天然气地质专业学士学位,2012 年获得中国地质大学(北京)能源地质工程博士学位,现为中国石油勘探开发研究院高级工程师,主要从事石油地质与油气地球化学研究工作。Email: zhangbin01@petrochina.com.cn

优质烃源岩的缺失是柴达木盆地油气勘探的制约因素之一^[4-5]。柴达木盆地不断有新的油气发现,尤其是近 10 年来,先后在昆仑山北部、英雄岭构造带中浅层和深层发现了多个亿吨级储量区块,展示了优良的勘探前景^[4-6],丰富的油气资源与劣质的烃源岩完全不匹配。此前的研究通过对位于尕斯库勒油田附近的跃灰 106X 井系统分析,证实了该地区发育优质烃源岩,有机质丰度较高,TOC 最高可达 4% 以上,且以 I 型和 II₁ 型为主^[7-8]。优质烃源岩的发现,对于重新认识柴达木盆地西部油气资源潜力、坚定柴达木盆地寻找大中型油气田的信心具有重要的意义。但对烃源岩分布范围和控制因素讨论较少,更加深入的研究才能有效指导油气资源潜力评价和有利目标区带优选。

前人大量研究已经证实,柴西地区广泛发育古近系下干柴沟组上段(E₃²)和新近系上干柴沟组(N₁)两

套烃源岩,并以前者为主,沉积环境主要是咸水湖泊^[1-3,9]。笔者以 E₃² 为主要研究层段,应用岩石学、元素地球化学、有机地球化学等多种分析手段,探讨柴西地区咸化湖相烃源岩发育机理,并建立烃源岩发育模式,为下一步确定优质烃源岩有利分布区奠定理论基础。

1 区域地质概况

柴达木盆地西邻阿尔金山,北接祁连山,南抵昆仑山,是一个在前侏罗系地块上发育起来的具有走滑和挤压背景的山间盆地。盆内发育中生界侏罗系、白垩系以及新生界古近系、新近系和第四系等多套地层,包括 3 个主要的油气系统:柴西古近系—新近系石油系统、柴北缘侏罗系石油和天然气系统以及柴东第四系生物气系统^[4-6](图 1)。

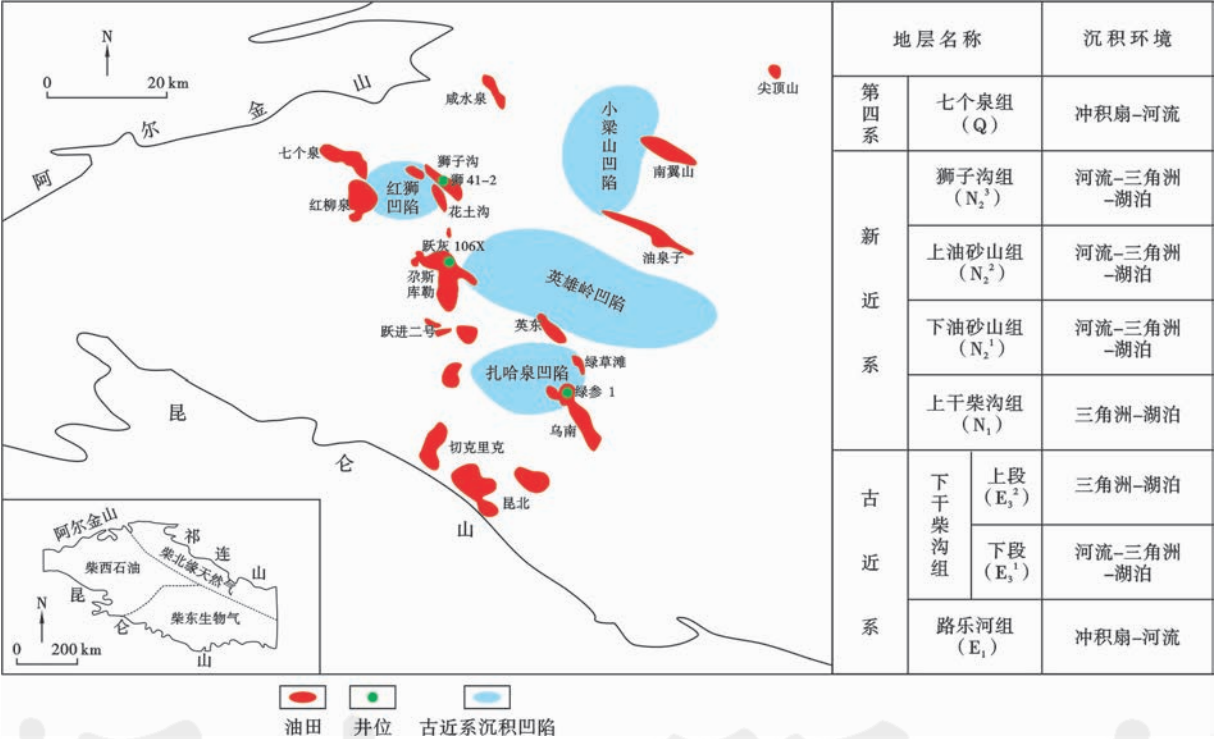


图 1 柴西地区油田及古近纪沉积凹陷分布

Fig. 1 Distribution of oilfields and Paleogene depressions of the western Qaidam Basin

柴西地区位于阿尔金山和昆仑山之间,是在中生代—新生代构造挤压背景下形成的拗陷湖盆。英雄岭构造带以南的柴西南地区是油气最为富集的地区,目前已经发现了尕斯库勒、狮子沟、英东等多个亿吨级储量区块^[4-5](图 1)。柴西地区自下而上发育了古近系路乐河组(E₁₊₂)、下干柴沟组下段(E₃¹)、下干柴沟组上段(E₃²)、新近系上干柴沟组(N₁)、下油砂山组(N₂¹)、上油砂山组(N₂²)、狮子沟组(N₂³)以及七个泉组(Q)等多套地层。其中,主力烃源岩层段(E₃²)是一

套三角洲—湖泊沉积,存在红狮、小梁山、英雄岭和扎哈泉 4 个局部沉积凹陷,地层厚度差异较大,一般在 0.5~1.5 km,局部可超过 2 km。跃灰 106X 井取心层段位于 E₃² 的中下部,其中 TOC>1% 的好烃源岩层段位于古近系底部,厚度约 40 m,占取心井段的 47%^[7]。

2 样品与实验

本研究的样品来自柴西地区跃灰 106X 井和狮 41-2 井(井位见图 1)。其中,跃灰 106X 井取样井段

3 269~3 303 m 和 3 335~3 394 m,采集样品 290 个,主要开展烃源岩有机地球化学、岩石学和元素分析;狮 41-2 井取样井段为 4 067~4 214 m,采集样品 197 个,主要开展烃源岩地球化学分析。

所有分析测试均为常规分析。其中,岩石热解、TOC、生物标志化合物等有机地球化学分析在中国石油天然气集团公司油气地球化学重点实验室完成;X 衍射在中国石油天然气集团公司油气储层重点实验室完成,所用仪器为 D/max-2500;元素分析在核工业地质研究院分析测试研究中心完成,常量元素所使用的

仪器为 AxiosmAX 型 X 射线荧光光谱仪,微量元素所使用的仪器为 Nex ION 300D 型等离子体质谱仪。

3 烃源岩岩石学特征

在蓝光激发的烃源岩显微荧光照片中,可见有机质丰度较高的烃源岩(TOC>2%)中存在较为丰富的藻类体(图 2,亮黄色),甚至局部发育藻纹层[图 2(a)—图 2(c)]。但总体来说藻纹层的分布十分有限,占绝大多数的 TOC<2%的样品仅可见零星藻类体[图 2(d)],藻纹层远不如渤海湾盆地发育^[10]。

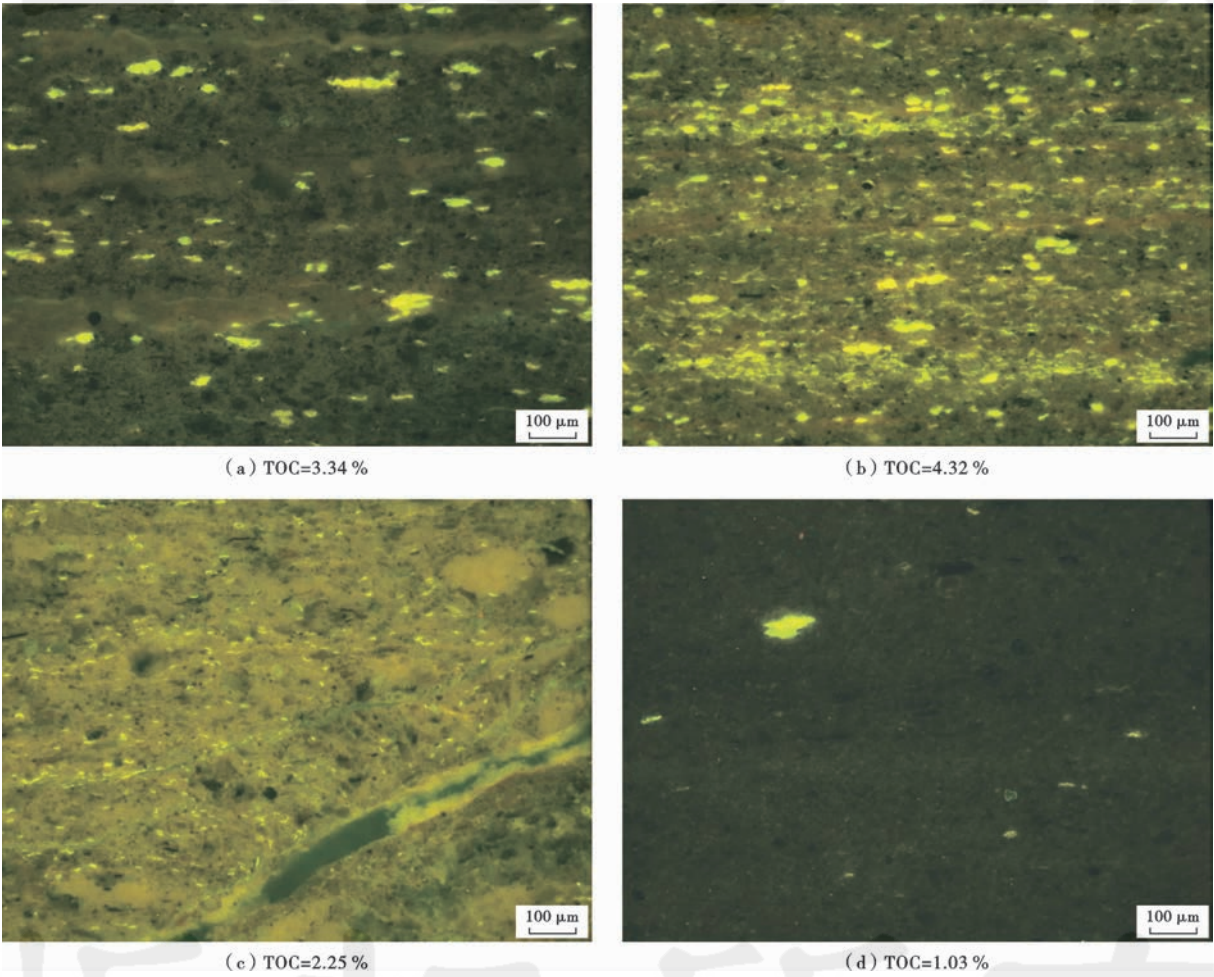


图 2 跃灰 106X 井烃源岩显微荧光照片
Fig. 2 Micro-fluorescence photos of the source rock of Well Yuehui-106X

笔者对跃灰 106X 井的 64 个样品进行了 X 衍射分析。结果显示,柴西地区咸化湖相烃源岩具有明显不同于淡水—微咸水湖相烃源岩的特征。主要表现为贫碎屑岩矿物,尤其是黏土矿物含量极低,而碳酸盐岩矿物却很高。黏土矿物含量为 4.6%~39.1%,平均仅为 18.8%;长石+石英的含量为 6.9%~52.3%,平均仅为 27.7%;碳酸盐岩矿物含量则很高,为 5.2%~78.0%,平均为 43.7%;碳酸盐岩矿物中,以方解石和

铁白云石为主,前者平均值为 23.0%,后者为 17.6%。有机质丰度与黏土矿物含量几乎没有任何关系,而与碳酸盐岩矿物含量则呈现一定的正相关关系(图 3)。极低的黏土矿物含量和陆源碎屑矿物指示沉积水体非常安静,缺乏陆源碎屑物输入。这与前人的研究结果是一致的^[1-2]。

烃源岩中黄铁矿含量为 0.8%~9.9%,平均为 5.7%,指示了强还原环境。有机质丰度与黄铁矿含量

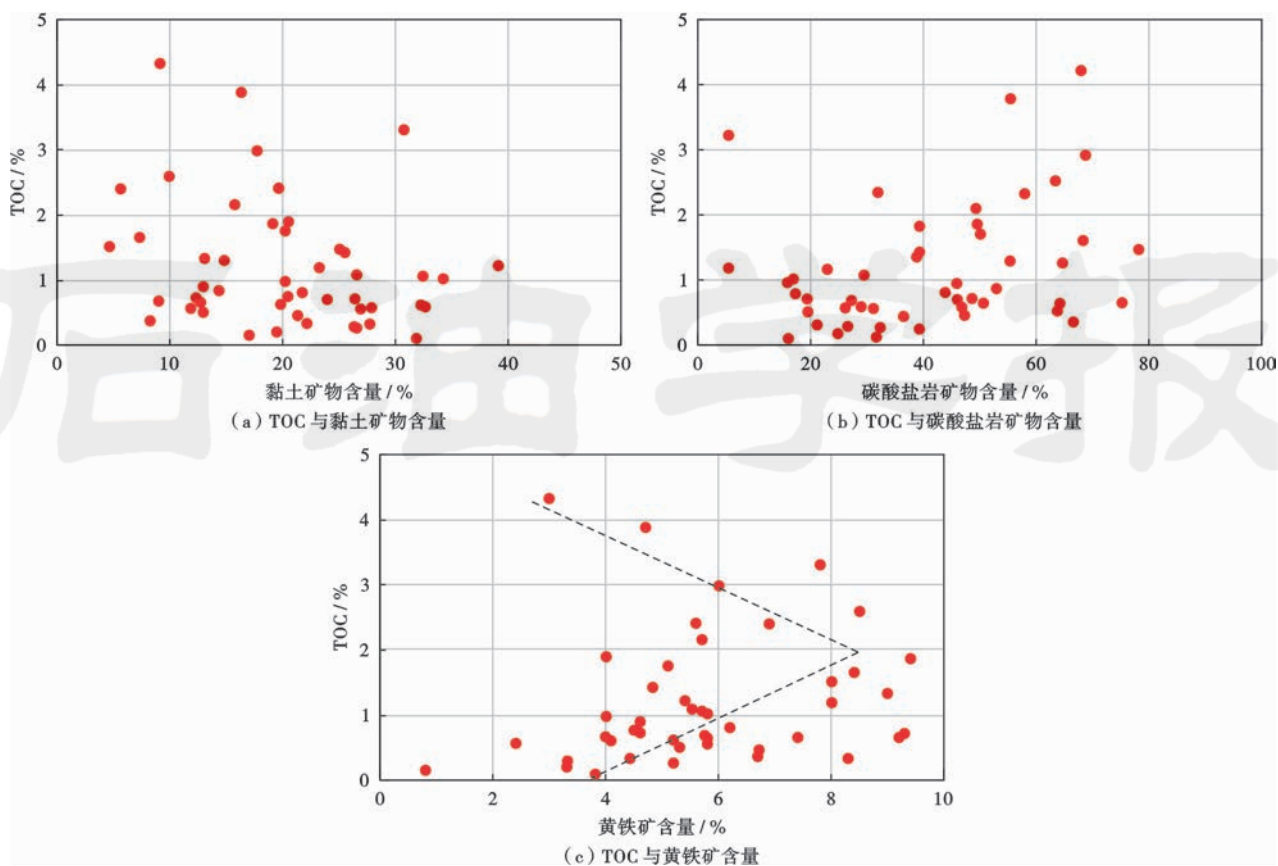


图 3 烃源岩有机质丰度与矿物含量关系

Fig. 3 Relationship between TOC and mineral content of the source rocks

呈现一定的正相关关系。但是,也存在例外。高黄铁矿含量的样品,其 TOC 值一般为 1%~2%,而 TOC>2%的样品其黄铁矿含量一般小于 8%,尤其是 TOC 值最高的两个样品,黄铁矿含量却不到 5%。因此,强还原环境是形成好烃源岩的重要条件,但要形成高有机质丰度的优质烃源岩,还可能受到其他因素影响。

4 元素地球化学特征

4.1 常量元素

与四川盆地侏罗系和鄂尔多斯盆地三叠系淡水湖相烃源岩相比^[11,12],柴西地区咸化湖盆烃源岩表现出明显的特殊性。跃灰 106X 井 290 个岩心样品分析结果表明,Si 含量最高,为 9.58%~60.92%,平均为 39.99%,与淡水湖盆基本相当;Al 含量明显偏低,为 2.50%~17.83%,平均值为 11.83%,低于淡水湖盆;CaO 含量较高,一般为 0.24%~38.53%,平均为 15.41%,略高于四川盆地侏罗系,远高于鄂尔多斯盆地三叠系;MgO 含量也很高,可达 0.89%~15.32%,平均为 3.44%,高于淡水湖盆;P 含量低,仅为 0.05%~0.32%,平均为 0.16%(图 4)。指示了柴西地区咸化湖相烃源岩总体具有陆源碎屑物输入量低、水体还原程度高、营养物质相对贫乏的沉积特征。

为了区分不同有机质丰度烃源岩的元素组成,本文按照 TOC 值将烃源岩划分为 4 类。对比常量元素含量(图 5),可以看出,与典型泥岩^[13]相比,柴西地区烃源岩 Si 含量远低于泥岩平均值,Al 含量也低于泥岩平均值,而 CaO 含量远高于泥岩平均值。有机质丰度越高,Si、Al 含量越低,而 CaO 含量越高,这同样指示了本地区湖泊中陆源沉积物输入较低、钙质成分越多的地区越有利于形成优质烃源岩。

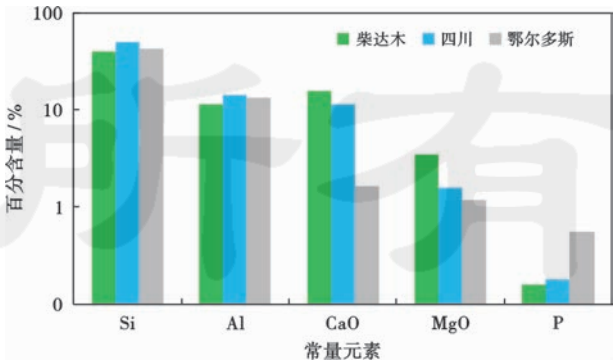


图 4 柴西地区古近系咸化湖盆与典型淡水湖盆烃源岩常量元素对比

Fig. 4 Comparison of the major elements of the source rocks in Paleogene salty lake of the werstern Qaidam Basin and typical freshwater basins

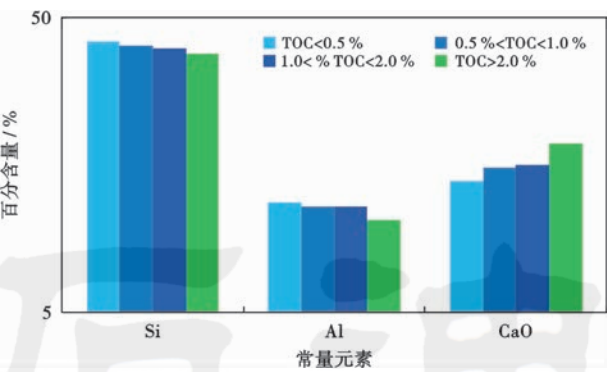


图 5 柴西地区不同有机质丰度烃源岩常量元素对比
Fig. 5 Comparison of the major elements of the source rocks with different TOC values in western Qaidam Basin

4.2 微量元素

从跃灰 106X 井的 290 个岩心样品分析结果看，V、Mo、U 等指示沉积环境的元素与 TOC 呈现良好正相关关系(图 6)，证实缺氧的还原环境是有机质保存并富集的重要因素。

本文使用 Wignall 等^[14]提出的交汇图版，判断不同有机质丰度的烃源岩形成的氧化还原环境(图 7)。从图中可以看出，烃源岩总体处于贫氧—缺氧环境。有机质丰度与贫氧程度呈现一定的相关关系；TOC<0.5%的非烃源岩，多数处于贫氧环境，Th/U 比值相对较高；0.5%<TOC<1.0%的样品 Th/U 比值明显降低，但多数样品仍分布在贫氧环境区间内，少数为缺

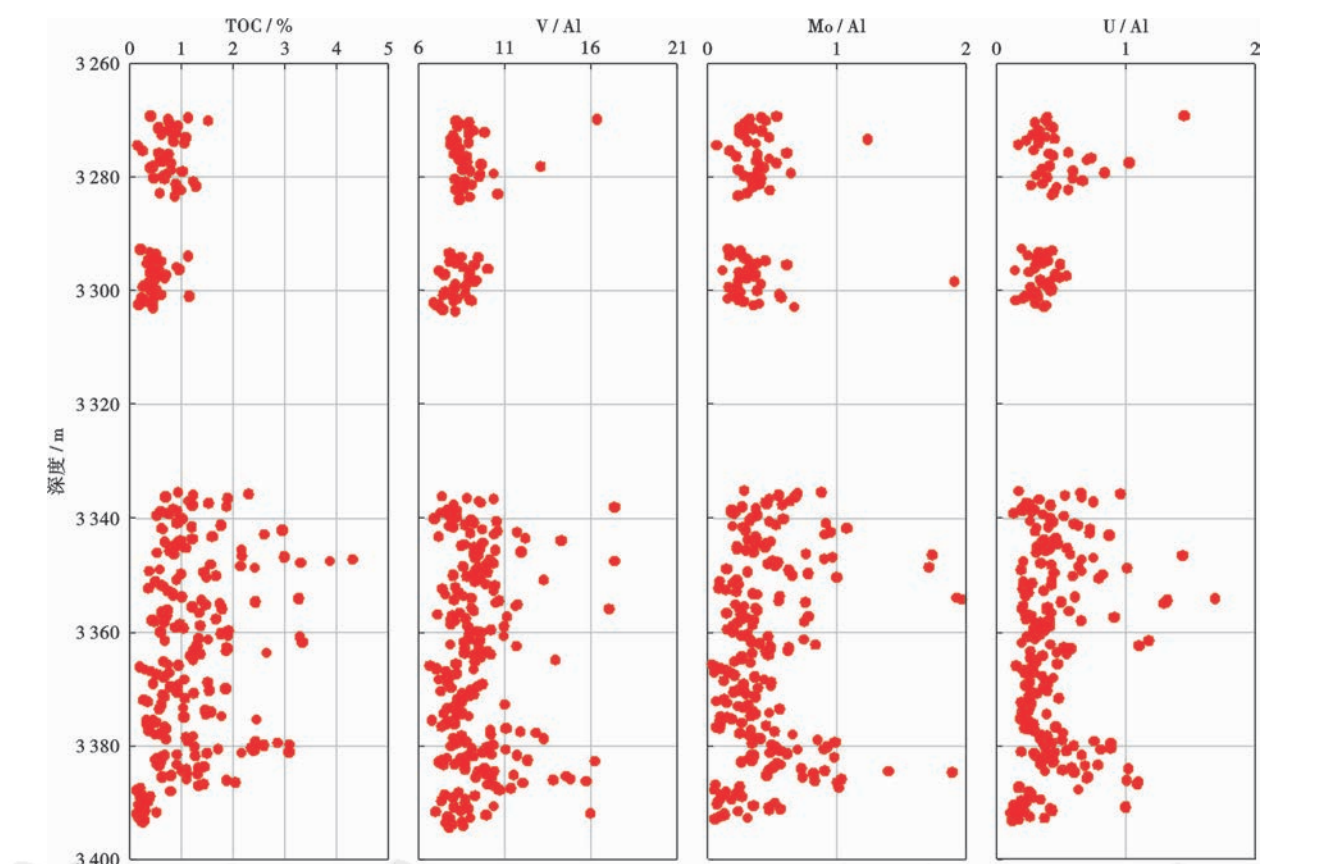


图 6 跃灰 106X 井有机质丰度与指示保存环境微量元素柱状图
Fig. 6 Column section of TOC and the trace elements indicating preservation in Well Yuehui-106X

氧环境；TOC>1.0%的样品处于缺氧环境的样品明显增多，尤其是 TOC>2.0%的优质烃源岩样品，多数处于缺氧环境。这一结果进一步证明了缺氧的还原环境是优质烃源岩形成的重要因素。

微量元素中，Sr/Ba、V/Ni 等比值常被用来作为海相和陆相环境的指标^[15-20]。柴达木盆地古近系烃源岩 Sr/Ba 比值一般大于 0.5，最高可达 4.1，平均为 1.1；V/Ni 比值为 0.54~3.31，平均值为 1.88。上述两项参数均表现为海相环境，而柴西地区古近纪为内

陆湖泊，不存在海侵^[21]，说明该地区沉积环境水体盐度相对较高。

这两项参数与有机质丰度的关系曲线存在“拐点”(图 8)。如：当 Sr/Ba<1.5 时，TOC 与 Sr/Ba 呈正相关关系，而当 Sr/Ba>1.5 时 TOC 反而与 Sr/Ba 呈负相关关系；同样地，当 V/Ni<1.8 时，TOC 与 V/Ni 呈正相关，而当 V/Ni>1.8 时，两者呈负相关。即 TOC 高值区往往对应 Sr/Ba 为 0.5~2、V/Ni 为 1.2~2.8。

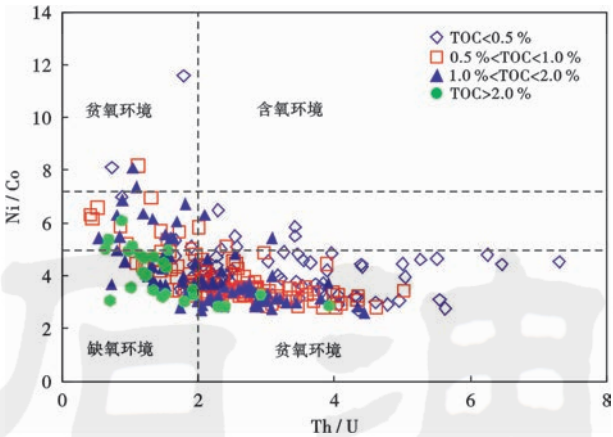


图 7 柴西地区不同有机质丰度烃源岩 Th/U 与 Ni/Co 关系
Fig. 7 Relationship between of Ni/Co and Th/U of source rocks with different TOC values in western Qaidam Basin

在陆源碎屑物向咸水湖泊的搬运过程中,呈游离态的 Sr 和 Ba 地球化学行为发生分异, Ba^{2+} 易与水中的 SO_4^{2-} 离子结合形成 BaSO_4 沉淀,且其离子半径较大,易与黏土矿物、胶体和有机质结合而沉淀。而 Sr 具有更大的活性,搬运过程中不易形成沉淀。与 Ba

相比, Sr 与黏土矿物、胶体和有机质结合的能力较弱, 运移的距离更远。因此,可用 Sr/Ba 比值反映沉积物的搬运距离,即距离湖岸的距离。从研究区烃源岩元素分析结果来看,只有当搬运距离适中时,有机质丰度较高,而当沉积物搬运距离较大时,有机质丰度反而降低。

V/Ni 主要反映水体氧化还原条件,较高的 V/Ni 比,反映水体分层强,底部出现 H_2S 还原环境。柴西地区 V/Ni 元素比与有机质丰度的关系表明,还原环境是有机质富集的必要条件,但在过还原导致水体明显分层的环境下形成的烃源岩有机质丰度未必最高。

反映水体营养元素的 P、Fe 等元素与 TOC 呈现一定的正相关关系,指示营养物质对有机质丰度具有一定的控制作用,而 K 元素自下而上相对稳定(图 9)。总体来说,柴达木盆地烃源岩中的营养元素含量明显偏低,不仅远低于鄂尔多斯三叠系的淡水湖盆(图 4),也低于渤海湾盆地古近系沙河街组^[10],这也是该地区烃源岩有机质丰度不如东部咸化湖盆(如渤海湾盆地沙河街组四段上亚段)的主要原因。

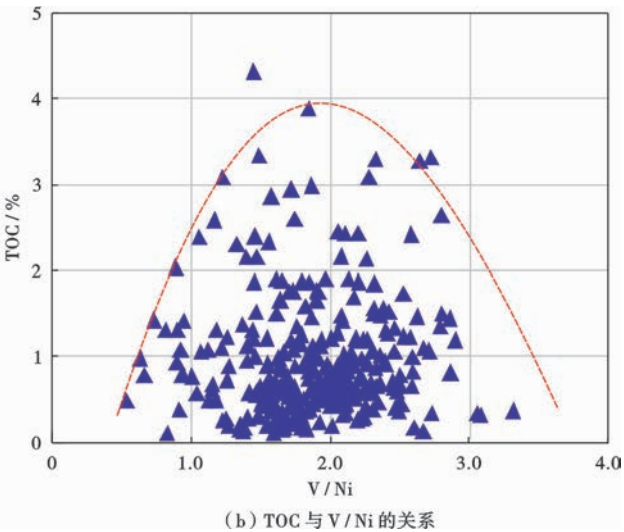
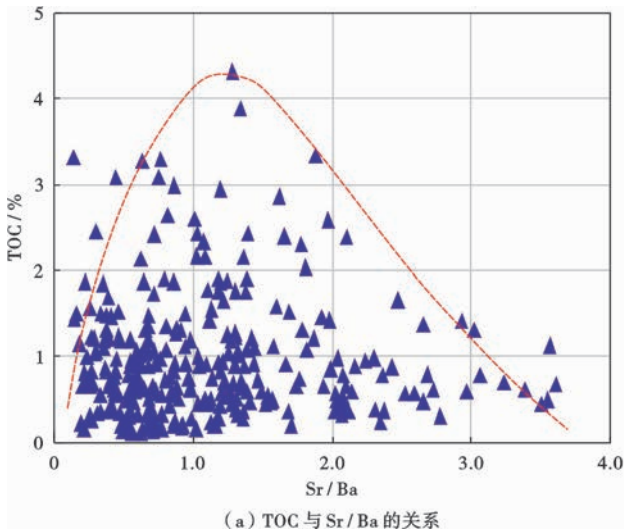


图 8 指示沉积环境参数与有机质丰度的关系
Fig. 8 Relationship between TOC and trace elements indicating sedimentary settings

5 生物标志化合物特征

生物标志化合物为烃源岩有机质来源提供了重要证据。此前的报道指出^[7],在总离子流图(TIC)上可以见到丰富的甾烷类化合物,甚至高于正构烷烃,表明水生生物是主要的生油母质,低姥植比(Pr/Ph 一般小于 0.5)指示了缺氧的还原环境;甾烷气相色谱图上($m/z = 217$)可见到 $\text{C}_{27}\alpha\alpha\text{R} > \text{C}_{29}\alpha\alpha\text{R} > \text{C}_{28}\alpha\alpha\text{R}$ 的不对称“V”型或者 $\text{C}_{27}\alpha\alpha\text{R} > \text{C}_{28}\alpha\alpha\text{R} > \text{C}_{29}\alpha\alpha\text{R}$ 的“L”型,同样指示生油母质主要来自于水生生物,而陆源高等植

物对有机质的贡献十分有限,且沉积环境水体盐度较高;萜烷类化合物($m/z = 191$)表现的高伽马蜡烷、高 C_{35} 藿烷等都反映了高盐度的沉积环境。

芳烃类生物标志化合物中,烷基类异戊二烯烷基苯类化合物对指示有机质的沉积环境具有专属性^[22-25]。丰富的类异戊二烯烷基苯往往指示有机质受到绿硫细菌或紫硫细菌的改造作用,而绿硫细菌或紫硫细菌主要分布在无氧透光带,指示有机质形成于水体较浅但缺氧的还原环境。柴西地区烃源岩和原油中均存在丰富的烷基类异戊二烯烷基苯(图10),反

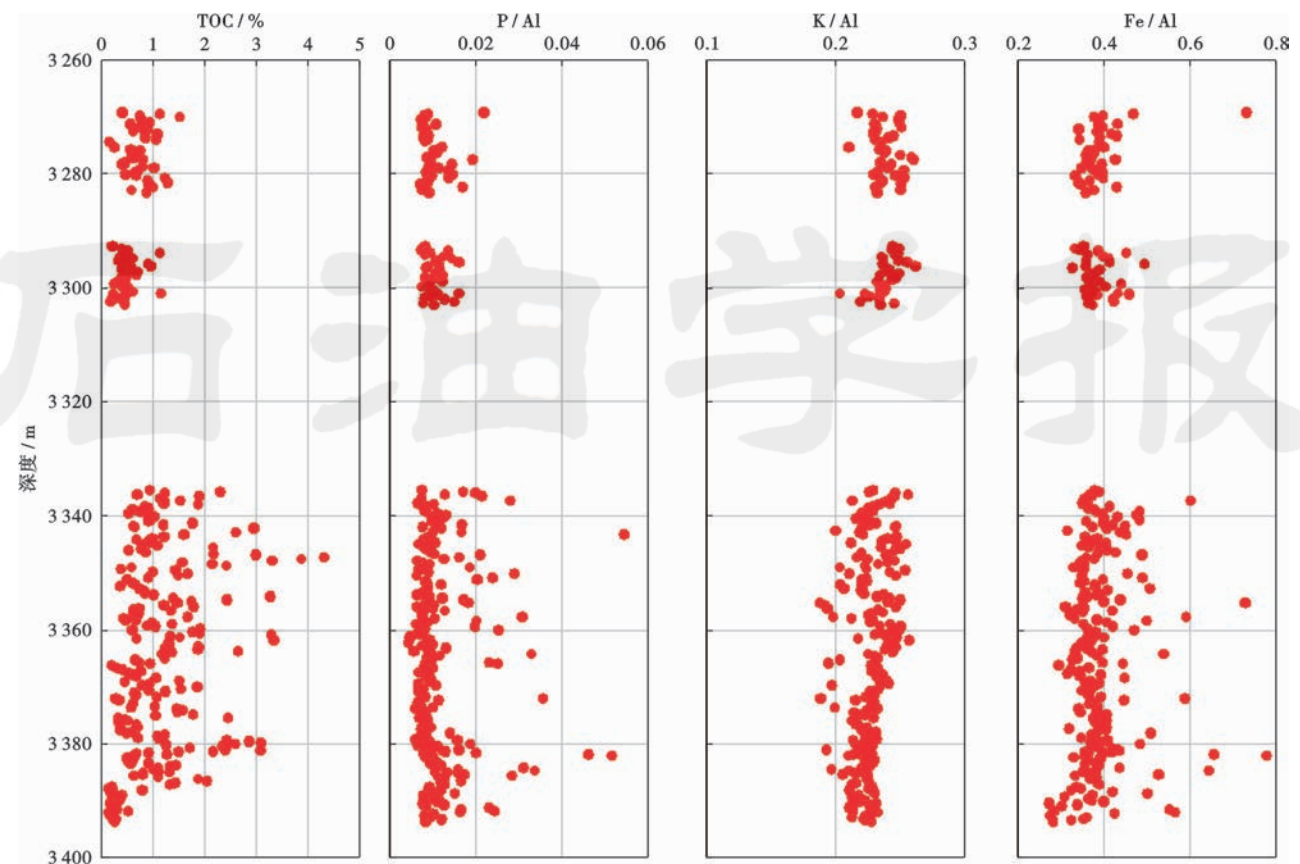


图 9 跃灰 106X 井有机质丰度与指示水体营养物质元素柱状图

Fig. 9 Column section of TOC and the trace elements indicating nutrients in Well Yuehui-106X

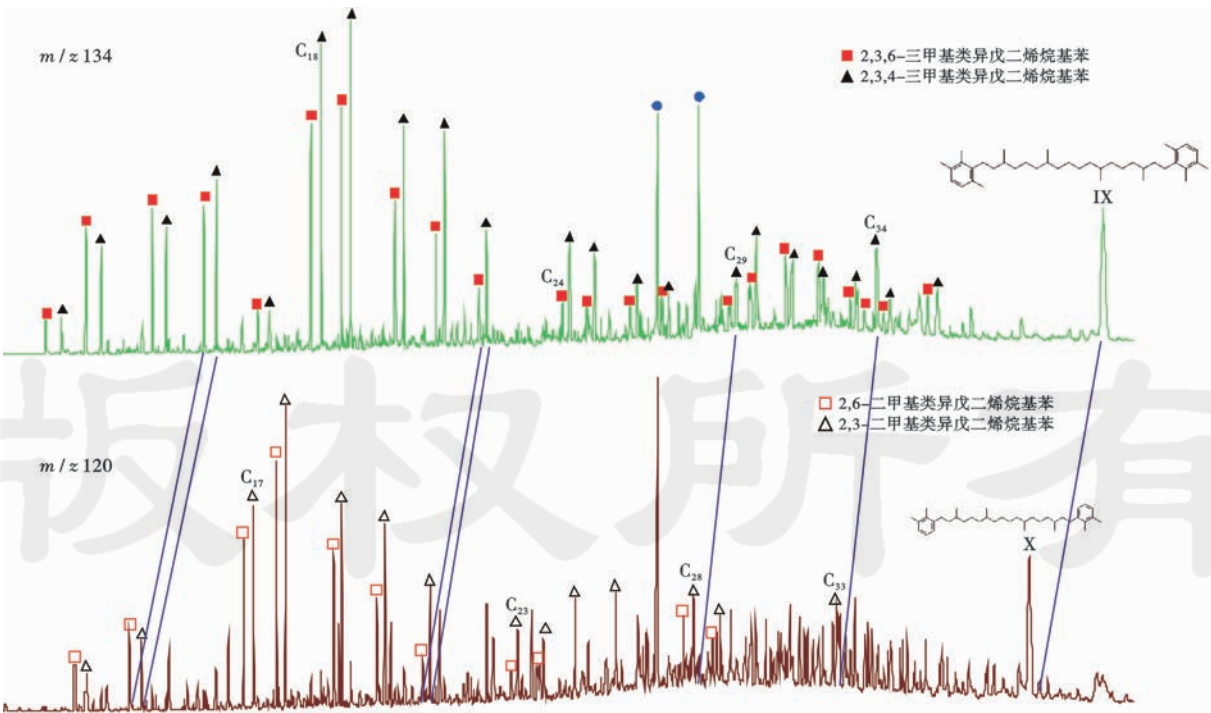


图 10 柴西地区典型咸化湖相烃源岩芳烃生物标志化合物

Fig. 10 Aromatic isoprenoids from typical salt lake source rocks in western Qaidam Basin

映了浅水但极为安静的沉积环境,陆源淡水及沉积物补给缓慢,与该地区高盐度的还原环境、陆源碎屑及有机质输入少是一致的。

6 烃源岩发育模式

6.1 烃源岩发育的控制因素

优越的保存条件是柴西地区优质咸化湖相烃源岩发育最为有利的因素。柴西地区咸化湖相烃源岩有机质类型明显优于多数淡水湖盆,以 I 型和 II₁ 型为主,干酪根中明显富含氢组分,低成熟样品的氢指数最高可达 900 mg/g (TOC) 以上,干酪根 H/C 原子比高达 1.6 以上。不仅如此,烃源岩中还含有大量可溶有机质。烃源岩中的游离烃(热解参数 S₁)、氯仿沥青“A”等参数均明显偏高,指示高可溶烃含量。可溶有机质被认为是咸化湖盆低熟油的主要来源。黄第藩等^[26]指出,咸化环境是形成“未熟-低熟油”的必要条件。柴西地区发现了中国储量规模最大的系列低熟油藏,如尕斯库勒、红柳泉、七个泉等,进一步证实了咸化的水体环境对有机质保存的重要意义。在咸化环境中,位于盐跃层之上的水体盐度相对较低,可发育浮游藻类等水生生物,而盐跃层之下的水生生物种类和数量则大幅减少,同时分解有机质的细菌含量也会大量减少,柴西地区高甾烷、低藿烷的生物标志化合物特征指示细菌对有机质的贡献极为有限。浮游生物死亡后即可进入盐跃层之下的还原水体,即硫酸盐还原带,其中的

脂类化合物等生油组分得以保存,而产甲烷菌受到抑制而不发育,使得有机质中多数富氢官能团没有遭受破坏而有效保存下来,不仅具备在低成熟阶段生油的潜力,干酪根中也富集了大量氢组分。

然而,较低的生产力是限制柴西地区咸化湖盆烃源岩有机质丰度的主要不利因素。与渤海湾盆地古近系咸化湖盆相比,柴西地区有机质丰度明显偏低,主要与该地区气候条件及古生产力有关。尽管有研究表明高盐度的湖泊具有较高的生产力^[27,28],但柴达木盆地古近纪受古气候条件和营养物来源所限,原始生产力并不高。构造研究表明^[8],始新世青藏高原开始隆升,柴西地区处于干旱寒冷的气候环境,不利于生物的生长。另外,由于陆源沉积物输入量低,水体中营养物质极为贫乏,不利于生物的生长。

柴西地区烃源岩发育环境可与现今的青海湖类比。青海湖是中国最大的内陆咸水湖泊,盐度小于 15‰,远低于海水。通过对青海湖的考察发现^[29],其中的水生生物相对贫乏,有机质种类相对单一,数量有限,其底部淤泥的 TOC 值一般约为 1%,几乎没有见到藻纹层。

6.2 烃源岩发育模式

烃源岩的发育程度与其所处的沉积环境密切相关。总体来说,柴西地区古近纪湖相沉积陆源淡水补给有限,水体较为安静,分区明显,不同沉积环境有机质富集机理有较大差异,烃源岩的分布模式如图 11 所示。

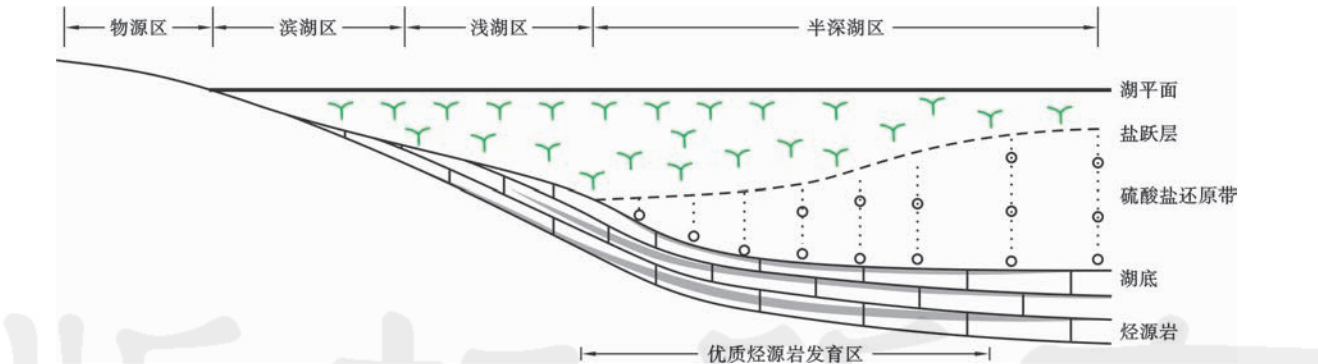


图 11 柴西地区咸化湖盆烃源岩沉积模式

Fig. 11 Excellent salt source rock development pattern in the western Qaidam Basin

靠近湖岸淡水注入的滨湖—浅湖区,由于陆源碎屑物质的输入较大,营养物质相对丰富,水生生物相对繁盛,但水体浅,盐度相对较低,有机质的保存条件不如湖盆中心,大量有机质在水中被分解,难以形成高有机质丰度的烃源岩,且有机质类型多为 II₂ 型和 III 型。此前报道的柴西地区低有机质丰度烃源岩多形成于此类环境^[1,2]。

半深湖是古生产力和保存条件匹配最佳的地区,

有利于形成优质烃源岩。一方面,存在一定的陆源碎屑物的输入,营养物质较为丰富;另一方面,存在盐度分层,盐跃层之上的水生生物数量较多,生物死亡后经过较短的时间即可进入盐跃层之下,处于硫酸盐还原带,富含氢组分的有机质得以快速保存,形成富含可溶有机质的烃源岩。该地区形成的烃源岩有机质丰度最高,类型最好,多为 I 型和 II₁ 型。

沉积凹陷区长期处于沉积中心,形成的烃源岩厚度

较大。但由于远离湖岸,缺乏淡水补给,水体盐度相对较高,分层更加明显,盐跃层向上迁移,氧化带深度减小,高盐度限制了水生生物的发育。同时,由于远离物源区,营养物质贫乏,不利于水生生物生长。因此,在沉积凹陷区,由于生物发育受限,原始生产力较为低下,难以形成高有机质丰度的优质烃源岩,而是以有机质丰度中等、有机质类型好、富含可溶有机质的烃源岩为主。

下面以 3 口井实测数据为例,对比不同环境有机质丰度。跃灰 106X 井位于英雄岭凹陷西端的尕斯库勒油田,狮 41-2 井位于红狮凹陷东端的狮子沟地区,绿参 1 井位于扎哈泉凹陷东部的绿草滩地区(图 1、图 13)。这 3 口井均靠近沉积凹陷,但由于古盐度差

异明显,导致有机质丰度有较大差距。根据柴西地区古盐度分析^[1,2],狮子沟地区地层水盐度最高,氯离子含量超过 4 000 $\mu\text{g/g}$,对应的古盐度达到 25‰,为咸水;尕斯库勒地区氯离子含量低于 1 000 $\mu\text{g/g}$,对应的古盐度约为 17‰,为半咸水;绿草滩地区氯离子含量仅为 500 $\mu\text{g/g}$,对应的古盐度约为 15‰(图 13)。烃源岩地球化学分析表明,跃灰 106X 井优质烃源岩发育,TOC 最高可达 4% 以上, $S_1 + S_2$ 最高可达 40 mg/g 以上,其中 $\text{TOC} > 2\%$ 、 $S_1 + S_2 > 12 \text{ mg/g}$ 的优质烃源岩厚度超过 20 m[图 12(a)];狮 41-2 井烃源岩有机质丰度则明显低于跃灰 106X 井,TOC 多数约为 1.0%,仅个别样品接近 2%, $S_1 + S_2$ 最高 14 mg/g [图 12(b)];

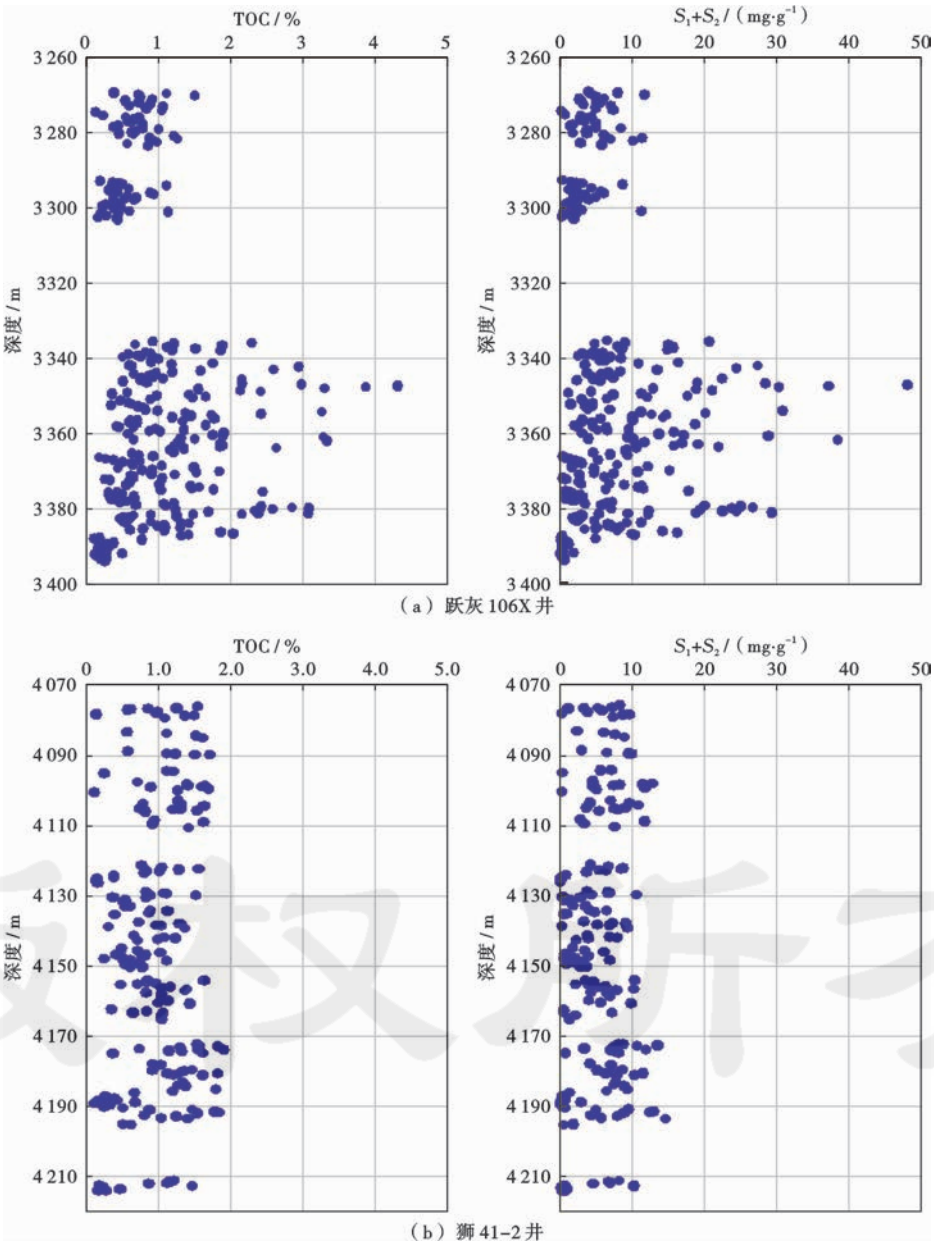


图 12 柴西地区代表井有机质丰度剖面

Fig. 12 Organic matters abundance of typical wells in the western Qaidam Basin

绿参 1 井没有系统取心,本研究没有采集到相关样品,前人通过岩屑地球化学分析^[1-2],发现其 TOC 值最高可达 2.5%, $S_1 + S_2$ 超过 20 mg/g,其中 $TOC > 2\%$ 、 $S_1 + S_2 > 12 \text{ mg/g}$ 的优质烃源岩厚度超过 10 m。上述分析表明,过高的盐度可能不利于形成优质烃源岩。

6.3 有利烃源岩分布区

在烃源岩发育模式基础上,结合烃源岩沉积环境及古盐度分布^[1-2,30-31],编制了柴西地区咸化湖相烃源岩分布图(图 13)。

在柴西南地区, $TOC > 2.0\%$ 的优质烃源岩分布总体呈现 NW—SE 向展布,与目前发现的主力油田方向基本一致。红狮凹陷以南—英雄岭凹陷西段—扎哈泉凹陷以北一带,距离物源区较近,可接受一定的陆源碎屑供应,水体盐度适中,有利于水生生物的发育,是烃源岩形成的有利区带,优质烃源岩厚度可超过 20 m。该地区西北端的红柳泉、七个泉等地区,以及东南部的扎哈泉凹陷及其周缘也发育有优质烃源岩,其厚度可达 10 m。位于柴西北的南翼山及其以北地区,距离物源区距离及水体盐度等有机质发育条件与柴西南类似,

尽管目前缺乏实测井数据证实,推测可能发育一定规模的优质烃源岩[图 13(a)]。

红狮凹陷以东及狮子沟地区水体盐度为全区最高,高有机质丰度的优质烃源岩不发育,但由于与物源区距离适中,可接受较多的陆源营养物质供给,发育一定数量的水生生物,烃源岩有机质丰度总体属于中等—好,且处于沉积中心, $1.0\% < TOC < 2.0\%$ 的烃源岩厚度大。柴西地区最大的沉积凹陷——英雄岭凹陷古近纪水体盐度总体较高,有机质保存条件优越,但由于距离物源区远,营养物质贫乏,生物发育受限,其烃源岩发育程度属中等,其西段可发育厚度较大的烃源岩,而东段烃源岩厚度较薄;扎哈泉凹陷烃源岩厚度较大,有机质丰度较高, $1.0\% < TOC < 2.0\%$ 的烃源岩厚度可达 150 m 以上;小梁山凹陷烃源岩发育条件与英雄岭凹陷西段类似,推测 $1.0\% < TOC < 2.0\%$ 烃源岩厚度最大超过 100 m。

由于钻井和岩心分析数量受限,仅初步勾绘了烃源岩的分布范围,更精细的烃源岩分布图还有待更多资料进一步确定。

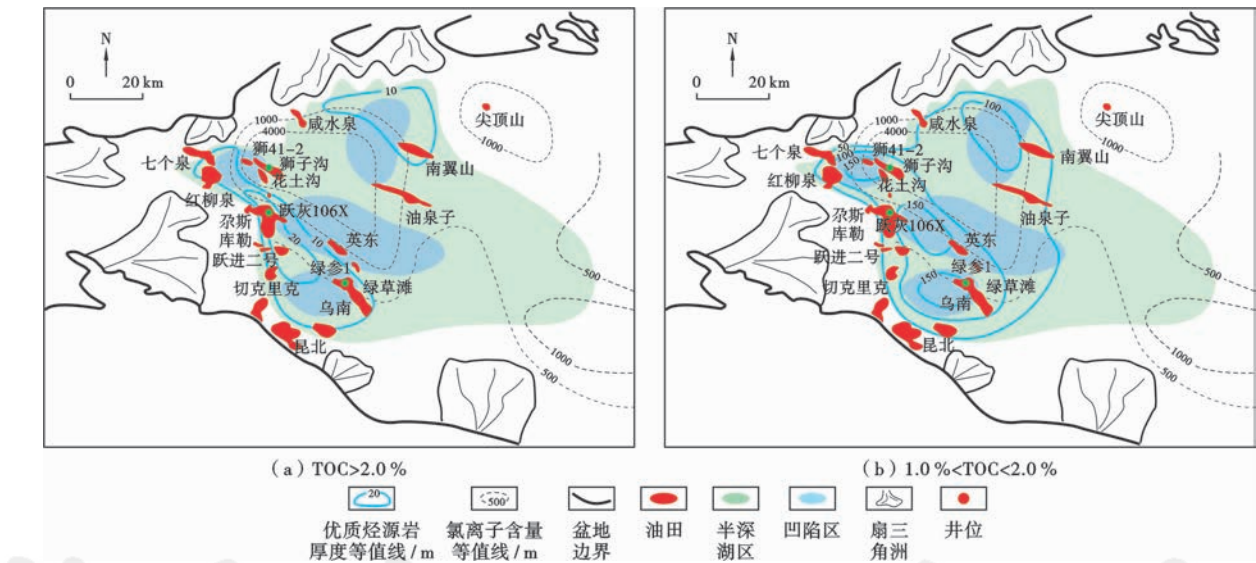


图 13 柴西地区古近系湖相烃源岩分布
Fig. 13 Occurrence of excellent Paleogene salty lacustrine source rocks in the western Qaidam Basin

7 结 论

(1) 柴西地区咸化湖相沉积具有水体较浅且相对安静、盐度较高、营养物质相对贫乏的特点。优越的保存条件有利于水生生物等生油母质的快速保存,形成富含氢组分的烃源岩,且可溶有机质含量较高。但受干旱寒冷气候影响,陆源淡水补给有限,水生生物发育程度偏低,较低的古生产力使得有机质丰度总体低于东部咸化湖盆。

(2) 水体盐度相对较低、距离物源区相对较近的半深湖区最有利于优质烃源岩的发育,形成的烃源岩厚度最大、有机质丰度最高;湖盆中心水体盐度最高、远离物源区,形成的烃源岩有机质丰度中等—好。

(3) 柴达木盆地西部烃源岩分布总体呈现 NW—SE 方向展布,与目前发现的主力油田方向基本一致。柴西南优质烃源岩最发育的地区是红狮凹陷以南—英雄岭凹陷西段—扎哈泉凹陷以北一带,西北端的红柳泉、七个泉等地区,以及东南部的扎哈泉凹陷及其周缘

也发育有优质烃源岩。位于柴西北的南翼山及其以北地区,距离物源区距离及水体盐度等有机质发育条件与柴西南类似,也可能发育一定规模的优质烃源岩。红狮凹陷以东及狮子沟地区水体盐度为全区最高,高有机质丰度的优质烃源岩不发育,中等—好烃源岩厚度大。英雄岭凹陷东段由于距离物源区远,营养物质贫乏,烃源岩发育程度应属中等。

参 考 文 献

- [1] 苏爱国,陈志勇,梁狄刚,等. 青藏高原油气形成[M]. 北京:地质出版社,2006.
SU Aiguo, CHEN Zhiyong, LIANG Digang, et al. Oil-gas formation in Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.
- [2] 陈志勇,苏爱国,马达德,等. 柴达木盆地西部石油的形成[M]. 北京:地质出版社,2006.
CHEN Zhiyong, SU Aiguo, MA Dade, et al. Petroleum generation in the western Qaidam basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.
- [3] 翟光明,高维亮,宋建国,等. 中国石油地质志(卷一)[M]. 北京:石油工业出版社,1996.
ZHAI Guangming, GAO Weiliang, SONG Jianguo, et al. Petroleum geology of China (V1) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996.
- [4] 付锁堂,马达德,陈琰,等. 柴达木盆地油气勘探新进展[J]. 石油学报, 2016, 37(S1): 1-10.
FU Suotang, MA Dade, CHEN Yan, et al. New advance of petroleum and gas exploration in Qaidam Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(S1): 1-10.
- [5] 付锁堂. 柴达木盆地西部油气成藏主控因素与有利勘探方向[J]. 沉积学报, 2010, 28(2): 373-379.
FU Suotang. Key controlling factors of oil and gas accumulation in the western Qaidam Basin and its implications for favorable exploration direction [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(2): 373-379.
- [6] 马达德,魏学斌,夏晓敏. 柴达木盆地英东油田的发现及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2016, 37(S1): 11-21.
MA Dade, WEI Xuebin, XIA Xiaomin. The discovery and key exploration and prospecting technology of Yingdong Oilfield in Qaidam Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(S1): 11-21.
- [7] 张斌,何媛媛,陈琰,等. 柴达木盆地西部咸化湖相优质烃源岩地球化学特征及成藏意义[J]. 石油学报, 2017, 38(10): 1158-1167.
ZHANG Bin, HE Yuanyuan, CHEN Yan, et al. Geochemical characteristics and oil accumulation significance of the high quality saline lacustrine source rocks in the western Qaidam Basin, NW China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(10): 1158-1167.
- [8] 管树巍,张水昌,张永庶,等. 柴达木盆地西部古近系生烃凹陷的边界效应与油气聚集模式[J]. 石油学报, 2017, 38(11): 1217-1229.
GUAN Shuwei, ZHANG Shuichang, ZHANG Yongshu, et al. Boundary effect and hydrocarbon accumulation pattern of Paleogene hydrocarbon-generation depression in the western Qaidam Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2017, 38(11): 1217-1229.
- [9] 张晓宝,胡勇,马立元,等. 柴达木盆地西部第三系盐湖相天然气碳同位素特征、成因与分布[J]. 中国科学(D辑), 2002, 32(7): 598-608.
ZHANG Xiaobao, HU Yong, MA Liyuan, et al. Carbon isotope characteristics, origin and distribution of the natural gases from the Tertiary salty lacustrine facies in the West Depression Region in the Qaidam Basin[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2003, 46(7): 694-707.
- [10] 张林晔,孔祥星,张春荣,等. 济阳拗陷下第三系优质烃源岩的发育及其意义[J]. 地球化学, 2003, 32(1): 35-42.
ZHANG Linye, KONG Xiangxing, ZHANG Chunrong, et al. High-quality oil-prone source rocks in Jiyang Depression [J]. Geochimica, 2003, 32(1): 35-42.
- [11] 张薇. 川中东北部早中侏罗世古湖泊演化与致密油储层形成[D]. 成都:成都理工大学, 2013.
ZHANG Wei. The evolution of the ancient lake and tight oil reservoirs formation of the early and middle Jurassic in the NE part of Central Sichuan Basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2013.
- [12] 张文正,杨华,杨奕华,等. 鄂尔多斯盆地长 7 优质烃源岩的岩石学、元素地球化学特征及发育环境[J]. 地球化学, 2008, 37(1): 59-64.
ZHANG Wenzheng, YANG Hua, YANG Yihua, et al. Petrology and element geochemistry and development environment of Yanchang Formation Chang-7 high quality source rocks in Ordos Basin [J]. Geochimica, 2008, 37(1): 59-64.
- [13] WEDEPOHL K H. Environmental influences on the chemical composition of shales and clays[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 1971, 8: 305-333.
- [14] WIGNALL P B, TWITCHETT R J. Oceanic anoxia and the end Permian mass extinction[J]. Science, 1996, 272(5265): 1155-1158.
- [15] ALGEO T J, TRIBOVILLARD N. Environmental analysis of paleoceanographic systems based on molybdenum-uranium covariation[J]. Chemical Geology, 2009, 268(3/4): 211-225.
- [16] CHAKRABARTI R, BASU A R, CHAKRABARTI A. Trace element and Nd-isotopic evidence for sediment sources in the mid-Proterozoic Vindhyan Basin, central India [J]. Precambrian Research, 2007, 159(3/4): 260-274.
- [17] LÉZIN C, ANDREU B, PELLENARD P, et al. Geochemical disturbance and paleoenvironmental changes during the Early Toarcian in NW Europe [J]. Chemical Geology, 2013, 341: 1-15.
- [18] NESBITT H W, YOUNG G M, BOSMAN S A. Major and trace element geochemistry and genesis of supracrustal rocks of the North Spirit Lake Greenstone belt, NW Ontario, Canada [J]. Precambrian Research, 2009, 174(1/2): 16-34.
- [19] RIMMER S M, THOMPSON J A, GOODNIGHT S A, et al. Multiple controls on the preservation of organic matter in Devonian-Mississippian marine black shales: geochemical and petrographic evidence [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeo-

oecology,2004,215(1/2):125-154.

[20] VINCENT B, RAMBEAU C, EMMANUEL L, et al. Sedimentology and trace element geochemistry of shallow-marine carbonates; an approach to paleoenvironmental analysis along the Pagny-sur-Meuse Section (Upper Jurassic, France) [J]. *Facies*, 2006, 52(1): 69-84.

[21] 孙镇城, 杨藩, 张枝焕, 等. 中国新生代咸化湖泊沉积环境与油气生成[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.

SUN Zhencheng, YANG Fan, ZHANG Zhihuan, et al. Sedimentary environment and petroleum generation in China Cenozoic salty lakes[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.

[22] PETERS K E, WALTERS C C, MOLDOWAN J M. The biomarker guide; volume 2, biomarkers and isotopes in petroleum exploration and earth history[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

[23] MOLDOWAN J M, DAHL J, MCCAFFREY M A, et al. Application of biological marker technology to bioremediation of refinery byproducts[J]. *Energy & Fuels*, 1995, 9(1): 155-162.

[24] HANSON A D, RITTS B D, ZINNIKER D, et al. Upper Oligocene lacustrine source rocks and petroleum systems of the northern Qaidam Basin, Northwest China [J]. *AAPG Bulletin*, 2001, 85(4): 601-620.

[25] ZHANG Chunming, ZHANG Yuqing, CAI Chunfang. Aromatic isoprenoids from the 25-65 Ma Saline lacustrine formations in the western Qaidam Basin, NW China [J]. *Organic Geochemistry*, 2011, 42(7): 851-855.

[26] 黄第藩, 张大江, 王培荣, 等. 中国未成熟石油成因机制和成藏条件[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.

HUANG Difan, ZHANG Dajiang, WANG Peirong, et al. Genetic mechanism and accumulation condition of immature oil in China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.

[27] KELTS K. Environments of deposition of lacustrine petroleum source rocks: an introduction [C]//FLEET A J, KELTS K, TALBOT M R. *Lacustrine Petroleum Source Rocks*. London: Geological Society Special Publication, 1988, 40: 3-26.

[28] 李国山, 王永标, 卢宗盛, 等. 古近纪湖相烃源岩形成的地球生物学过程[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(6): 1206-1217.

LI Guoshan, WANG Yongbiao, LU Zongsheng, et al. Geobiological processes of the formation of lacustrine source rock in Paleogene [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 57(5): 976-987.

[29] 中国科学院兰州地质研究所. 青海湖综合考察报告[M]. 北京: 科学出版社, 1979.

Lanzhou Institute of geology of Chinese Academy of Sciences. Comprehensive survey report on Qinghai Lake [M]. Beijing: Science Press, 1979.

[30] 夏志远, 刘占国, 李森明, 等. 岩盐成因与发育模式——以柴达木盆地英西地区古近系下干柴沟组为例[J]. *石油学报*, 2017, 38(1): 55-66.

XIA Zhiyuan, LIU Zhanguo, LI Senming, et al. Origin and developing model of rock salt; a case study of Lower Ganchaigou Formation of Paleogene in the west of Yingxiang ridge, Qaidam Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(1): 55-66.

[31] 黄成刚, 常海燕, 崔俊, 等. 柴达木盆地西部地区渐新世沉积特征与油气成藏模式[J]. *石油学报*, 2017, 38(11): 1230-1243.

HUANG Chenggang, CHANG Haiyan, CUI Jun, et al. Oligocene sedimentary characteristics and hydrocarbon accumulation model in the western Qaidam Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(11): 1230-1243.

(收稿日期 2017-12-30 改回日期 2018-05-06 编辑 宋 宁)