

# 松南长岭断陷沙河子组烃源岩发育特征与成藏启示

李浩, 胡 焯, 王保华, 陆建林, 王 苗, 吕剑虹

(中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126)

**摘要:** 烃源岩形成时期的古构造和古沉积环境共同控制了烃源岩的宏观分布。基于“原型控源”这一思想, 利用元素化学对长岭断陷主力烃源岩, 即下白垩统沙河子组烃源岩, 形成古环境进行了恢复, 结合古构造恢复, 明确了沙河子组残留烃源岩的分布特征。长岭断陷沙河子组沉积时期总体表现为较大的古水深、潮湿—半潮湿气候、淡水相、厌氧—贫氧环境, 这为沙河子组优质烃源岩的形成提供了有利的沉积条件; 该时期盆地由 2 个较统一的断陷构成, 整体为广湖, 烃源岩广泛发育, 受后期多次反转作用影响, 沙河子组发生掀斜并遭受不同程度的剥蚀, 沙河子组残留烃源岩出现在现今斜坡带; 这为斜坡带和盆缘超剥带油气成藏提供了新的思路, 即龙凤山—东岭斜坡、查干花东斜坡和伏龙泉西斜坡富有机质烃源岩发育, 油气成藏“近水楼台”, 为油气勘探有利区。此外, 盆缘超剥带具备了油气成藏条件, 具有一定的勘探潜力。

**关键词:** 烃源岩; 原型控源; 古环境; 多期构造运动; 超剥带; 沙河子组; 长岭断陷; 松辽盆地

中图分类号: TE122.11

文献标识码: A

## Characteristics of source rocks in Shahezi Formation and implications for hydrocarbon accumulation, Changling Fault Depression, southern Songliao Basin

LI Hao, HU Ye, WANG Baohua, LU Jianlin, WANG Miao, LÜ Jianhong

(Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

**Abstract:** The paleo-tectonics and sedimentary environment during source rock deposition controlled the macro distribution of source rocks. The deposition environment of the Lower Cretaceous Shahezi Formation ( $K_1sh$ ) source rocks, which are the main source rocks in the Changling Fault Depression of the southern Songliao Basin, was restored based on the theory that “basin prototype controlled source rock development”. The distribution of preserved source rocks in the  $K_1sh$  was determined using tectonic restoration. The paleo-environment of the Changling Fault Depression during the  $K_1sh$  period was characterized by deep water, humid to subhumid climate and anaerobic freshwater, which was favorable for the deposition of source rocks. The Changling Fault Depression was composed of two relatively unified fault subsags during the  $K_1sh$  period, and the  $K_1sh$  source rocks were widely developed. After multiple stages of reversal, the Shahezi Formation was uplifted and eroded to different degrees, and the residual source rocks were mainly found on the present slope. This study provided a new idea for the oil and gas accumulation on the slope belt and the basin margin super-stripping belt. The Longfengshan—Dongling slope, the Chaganhua east slope and the Fulongquan west slope are favorable exploration areas for oil and gas exploration, where excellent source rocks were developed. In addition, the super-stripping zone of the Shahezi Formation is also favorable for hydrocarbon accumulation, showing a certain exploration potential.

**Key words:** source rock; basin prototype controlled source rock development; paleo-environment; multi-phases of tectonic movement; super-stripping zone; Shahezi Formation; Changling Fault Depression; Songliao Basin

优质烃源岩是形成大中型油田的基础<sup>[1-2]</sup>。早白垩世火石岭期以来, 松辽盆地长岭断陷经历了多期构造运动、多期火山碎屑充填作用。受其影响, 长岭断陷下白垩统烃源岩形成时的盆地面貌发生了巨大变化, 烃源岩分布不落实制约着长岭断陷断陷层(营城组及以下地层)油气勘探进一步突

破。基于“原型控源”理论, 烃源岩发育受烃源岩形成时期的盆地原型, 如盆地类型、古构造特征、古沉积环境控制<sup>[3-7]</sup>。恢复烃源岩形成时期的古构造和古沉积环境对确定优质烃源岩发育层系及其分布非常关键。利用元素化学恢复研究区主要烃源岩形成时期古环境, 结合古构造恢复结果, 建立

原长岭断陷型下的烃源岩发育模式,进而刻画残留烃源岩的分布特征,探索建立多期改造后盆地的盆缘超剥带(指由于后期构造抬升,遭受严重剥蚀的地区,一般位于斜坡带)近源油气成藏模式,有助于认识长岭断陷深层优质烃源岩分布,扩大长岭断陷深层油气勘探空间。

### 1 地质背景及烃源岩地球化学特征

长岭断陷位于松辽盆地中央坳陷区南部(图 1a),为北西走向的断—坳叠置的含油气盆地,整体呈“三凸三洼”的构造格局(图 1b)。成盆以来,主要经历了火石岭期的初始断陷、沙河子—营城期的强烈断陷、登娄库期的断拗转换、青山口—姚家期的稳定拗陷和嫩江—明水期的隆升剥蚀反转阶段。火石岭期和营城期火山作用频发,沙河子期为火山活动间歇期,表现为快速断陷,湖盆中央以深湖—半深湖为主,周缘以扇三角洲、水下扇及湖沼相沉积体系为主。沙河子组上、下 2 段均发育暗色泥岩,夹灰色细砂岩、灰色含砾细砂岩。该套地层在各个次洼中均有分布,上部的沙二段暗色泥岩分布范围更广,厚度更大。

长岭断陷下白垩统主力烃源岩发育于沙河子组,该套烃源岩有机质丰度高,有机碳(TOC)含量在 0.3%~16.9%,均值 1.6%,有机碳含量大于 1.0%

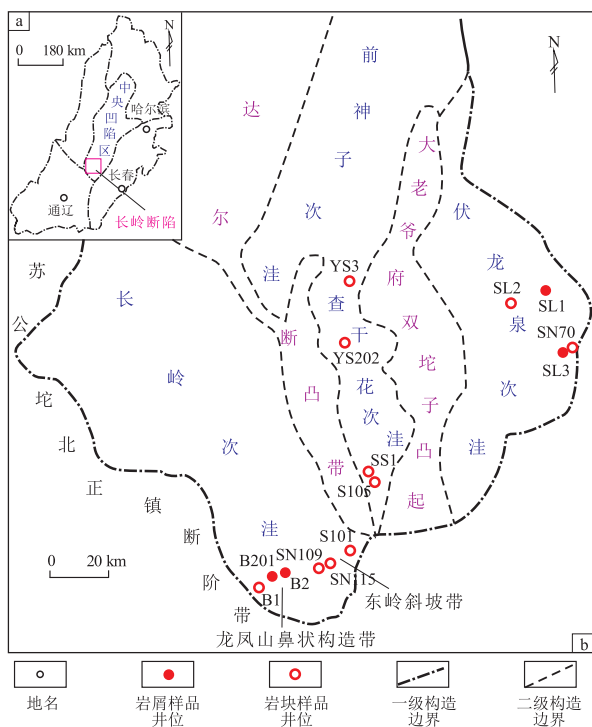


图 1 松辽盆地长岭断陷地理位置及构造区划  
Fig.1 Location and tectonic units in Changling Fault Depression, Songliao Basin

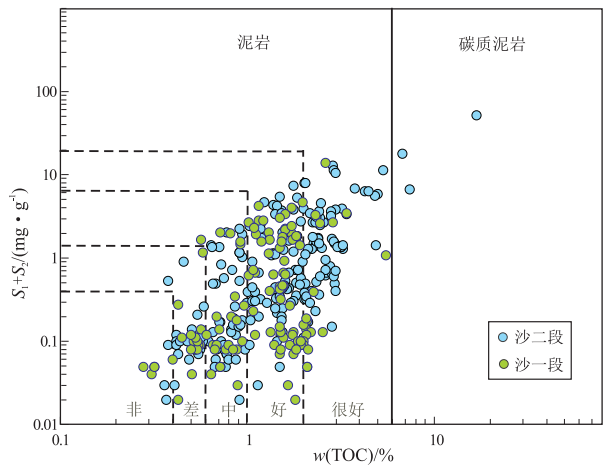


图 2 松辽盆地长岭断陷下白垩统沙河子组烃源岩 TOC 与 S<sub>1</sub>+S<sub>2</sub> 关系

Fig.2 Relationship between TOC content and S<sub>1</sub>+S<sub>2</sub> values of K<sub>1</sub>sh source rocks in Changling Fault Depression, Songliao Basin

的样品数占比超过 66%(426 个样品实测 TOC 数据),生烃潜力 S<sub>1</sub>+S<sub>2</sub> 为 0.01~97.9 mg/g,均值 1.4 mg/g(图 2);以高熟—过熟为主,镜质体反射率(R<sub>o</sub>)一般为 1.1%~2.9%,均值 1.5%,热解最高峰温(T<sub>max</sub>)均值 494 °C;有机质类型以 II<sub>2</sub>—III 型为主,干酪根碳同位素值 -26.4‰~-21.4‰,均值 -23.4‰。

### 2 烃源岩形成环境及水介质条件

烃源岩发育受古环境控制,恢复烃源岩形成时期的古环境对刻画烃源岩分布非常重要。样品主要取自沙河子组,岩性主要为灰色泥岩、深灰色泥岩和灰黑色泥岩,类型包括钻井岩屑和岩块样品(图 1b)。其中,岩屑样品共 83 个,采样间隔为 15~30 m;岩块样品共 78 个。对上述样品进行金属元素测试分析,测试仪器采用美国 VARIAN 公司的 Vista MPX 电感耦合等离子发射光谱仪,分辨率为 0.009 nm(一级),测试均在中国石化无锡石油地质研究所实验室完成。

#### 2.1 古气候

在构造稳定的情况下,气候对富有机质烃源岩分布有很大的影响。古气候指数和 Sr/Cu 为古气候的敏感指标<sup>[8-10]</sup>,其中,古气候指数“C 值”为喜湿型元素总丰度与喜干型元素总丰度比值,公式如下:

$$C = \frac{\sum (Fe+Mn+Cr+Ni+V+Co)}{\sum (Ca+Mg+Sr+Ba+K+Na)}$$

前人通过对其他地区的研究表明,潮湿—半潮湿气候:1<Sr/Cu<10,0.6<C<1;半潮湿—半干燥气候:10<Sr/Cu<20,0.2<C<0.6;干燥气候:C<0.2<sup>[9]</sup>。

根据古气候指数与 Sr/Cu 恢复研究区早白垩世沙河子期古气候特征。如图 3 所示,研究区早白垩世沙河子期主要为潮湿—半潮湿气候,并有逐渐变干燥的趋势。沙一段多数样品点落在潮湿—半潮湿的区域;沙二段样品点在图版中分布逐渐发散,反映沙河子中晚期气候开始变干燥,但仍以半潮湿气候为主。沙河子期半潮湿的气候条件有利于生物勃发,有助于烃源岩的形成。

### 2.2 古水深

Fe、Mn、Ca 和 Mg 等元素与湖盆水体的深度和离岸距离有一定的关系<sup>[12-13]</sup>。一般而言,随水深增加,元素丰度比 Fe/Mn 与 (Al+Fe)/(Ca+Mg) 会呈现逐渐减小的趋势。以 SL1 井为例(表 1),从沙一段到沙二段,暗色泥岩含量逐渐增多, Fe/Mn 和 (Al+Fe)/(Ca+Mg) 值逐渐降低,反映古水深变深。结合研究区沉积层序特征,沙河子中晚期长岭断陷古水深最大,较深的古水深有利于烃源岩形成。

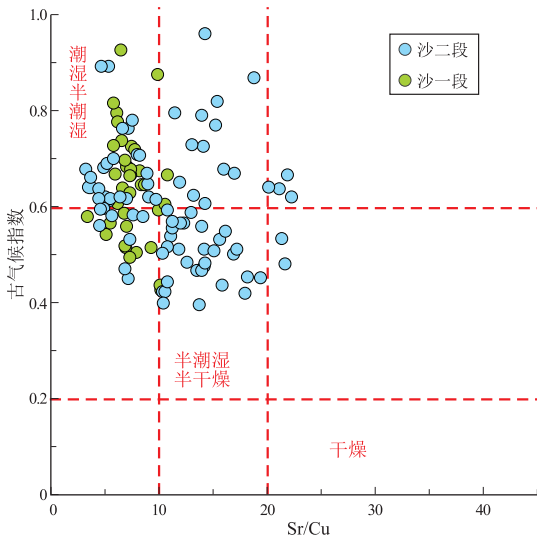


图 3 松辽盆地长岭断陷下白垩统沙河子组湖相烃源岩元素含量比 Sr/Cu 与古气候指数关系<sup>[9,11]</sup>

Fig.3 Relationship between Sr/Cu ratio and paleoclimate index of lacustrine source rocks in K<sub>1sh</sub>, Changling Fault Depression, Songliao Basin

### 2.3 氧化还原条件

还原环境是有机质保存的有利条件<sup>[14-17]</sup>。利用元素丰度比 V/Cr 和 Ni/Co 恢复研究区沙河子组沉积期的氧化还原性。从沙一段到沙二段再到营城组,研究区湖泊水体还原性表现出先增强后减弱的特征,而相应的金属元素含量却表现出 V 富集、Cr 和 Ni 不断亏损,金属元素含量比 V/Cr 增大和 Ni/Co 降低。显然,不同于海相地层,研究区的湖相泥岩的 V/Cr 越大,反映的湖泊水体氧化性越强<sup>[11]</sup>。根据泥岩颜色和岩性组合特征,结合古水深变化,确定了研究区下白垩统湖相烃源岩氧化还原条件的判别标准为:富氧环境, V/Cr>4.25;贫氧环境, 2<V/Cr<4.25;厌氧环境, V/Cr < 2<sup>[17]</sup>;此外 Ni/Co 值大于 1.8 反映的是厌氧条件<sup>[16]</sup>。根据该标准,从沙一段到沙二段再到营城组,水体还原性先增强,随后减弱。沙河子期,总体以厌氧和贫氧环境为主,这有利于有机质保存(图 4)。

### 2.4 古盐度

水体盐度主要对生物种类与繁殖程度有影响<sup>[18-21]</sup>。根据 Sr 丰度和元素含量比 Sr/Ba 恢复研究区沙河子期水体古盐度特征(表 2)。长岭断陷从沙河子期,经历了从淡水到半咸水逐渐变咸的演化过程(图 5)。沙河子期研究区不同构造带湖水古盐度差异较小,反映研究区可能为广湖环境。此外,淡水相环境一般较咸湖环境生物种类多,这也有利于研究区沙河子组富有机质烃源岩的形成。

综上所述,研究区沙河子期古环境总体表现为较大的古水深、潮湿—半潮湿气候、淡水相、厌氧—贫氧环境,这为沙河子组富有机质烃源岩的形成提供了优越的沉积条件。

## 3 构造演化特征与烃源岩形成

### 3.1 湖盆演化类型控制烃源岩的宏观分布

湖盆演化类型所对应的潜在可容空间(主要是构造成因)与沉积物供应、沉积速率之间的相对

表 1 松辽盆地长岭断陷 SL1 井下白垩统元素标志、水体相对深度及沉积环境划分

Table 1 Element indexes, relative water depth and sedimentary environments of Lower Cretaceous in well SL1, Changling Fault Depression, Songliao Basin

层位	泥岩主要颜色	泥地比/ %	Fe/Mn		(Al+Fe)/(Ca+Mg)		反映的 沉积环境	参考指标范围
			范围	均值	范围	均值		
营二段	灰色	32	38~56	47	5.7~7.9	6.9	滨浅湖	滨浅湖: Fe/Mn>40, (Al+Fe)/(Ca+Mg)>5.0;
营一段	灰色	4	64	64	7.7	7.7	滨浅湖	半深湖: 30<Fe/Mn<40, 2.5<(Al+Fe)/(Ca+Mg)<5.0;
沙二段	黑色、深灰色	57	24~45	37	0.9~5.6	3.1	深湖	深湖: Fe/Mn<30, (Al+Fe)/(Ca+Mg)<2.5
沙一段	深灰色,顶部灰黑色	50	35~49	39	4.1~5.7	5.0	半深湖	

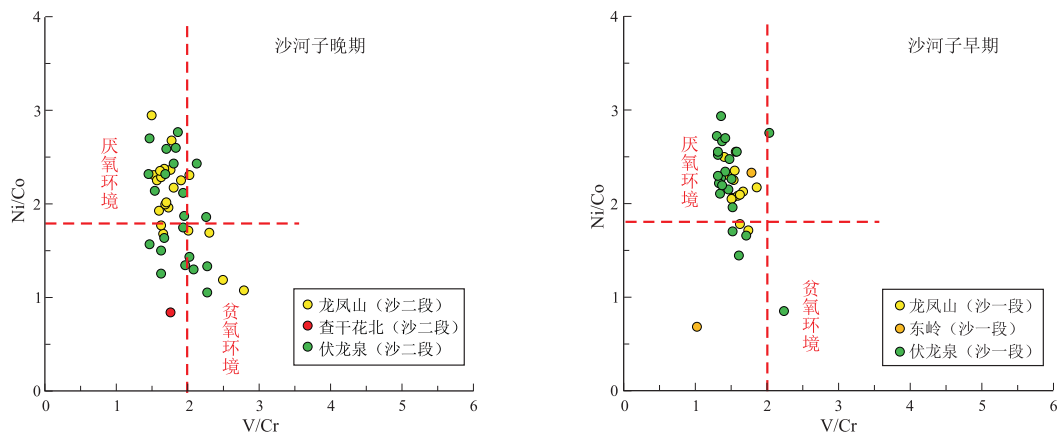


图 4 松辽盆地长岭断陷下白垩统湖相烃源岩元素含量比 V/Cr 与 Ni/Co 关系<sup>[11,15-16]</sup>

Fig.4 Relationship between V/Cr and Ni/Co ratios of lacustrine source rocks in Lower Cretaceous, Changling Fault Depression, Songliao Basin

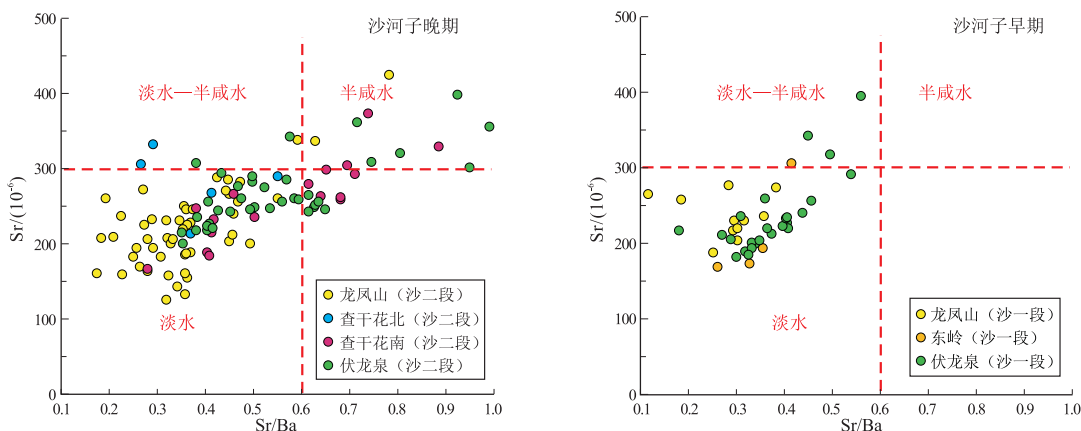


图 5 松辽盆地长岭断陷下白垩统湖相烃源岩元素含量比 Sr/Ba 与 Sr 含量关系

Fig.5 Relationship between Sr/Ba ratio and Sr content in lacustrine source rock in Lower Cretaceous, Changling Fault Depression, Songliao Basin

表 2 古盐度微量元素判断指标<sup>[18-19]</sup>

Table 2 Trace element index for paleosalinity recognition in samples

判断指标	淡水	半咸水	咸水
Sr 丰度/ $10^{-6}$	<300	300~500	>500
Sr/Ba	<0.6	0.6~1.0	>1.0

平衡控制了湖泊的发生、沉积物发育和展布。一般而言,均衡补偿盆地最有利于形成优质烃源岩<sup>[22-23]</sup>。

长岭断陷下白垩统烃源岩发育于具有左行走滑性质的断陷盆地中,从火石岭期至营城期,长岭断陷伸展作用强烈,可容空间增长快,而且控凹断裂在断陷期不同演化阶段具有继承性。因此,受控于北东北及北西向控凹断裂,火石岭组、沙河子组和营城组 3 个时期的烃源岩宏观上均呈近南北向展布特征,各组洼陷带暗色泥岩均较厚,约 200~400 m。但受沉积体系演化控制,不同时期烃源岩

平面发育规模迥异,从火石岭期至营城期,研究区经历了一次大的水进与水退的过程,同时伴有 2 次大的火山喷发旋回,对应于火石岭早期(火一段沉积时期)与营城组早期、中晚期(营一段和营三段沉积时期),该时期烃源岩相对欠发育,平面分布相对局限。沙河子组沉积晚期为最大湖泛期,是优质烃源岩发育的有利时期,而且平面分布广。构造与沉积演化共同控制了研究区下白垩统烃源岩宏观分布格局。探讨可容空间(主要是构造成因)与沉积物供应、沉积速率的相对平衡对客观评价烃源岩尤为重要。

根据长岭断陷构造演化特征,结合元素地球化学特征划分研究区不同断陷时期的湖盆演化类型(图 6)。沙河子组沉积早期(沙一段沉积时期)为强烈断陷期,湖盆快速沉降,可容空间增长快。此外,反映构造活动性的 K 和 Na 元素相对含量值高,表明此时湖盆活动性较强,可容空间增长快;易

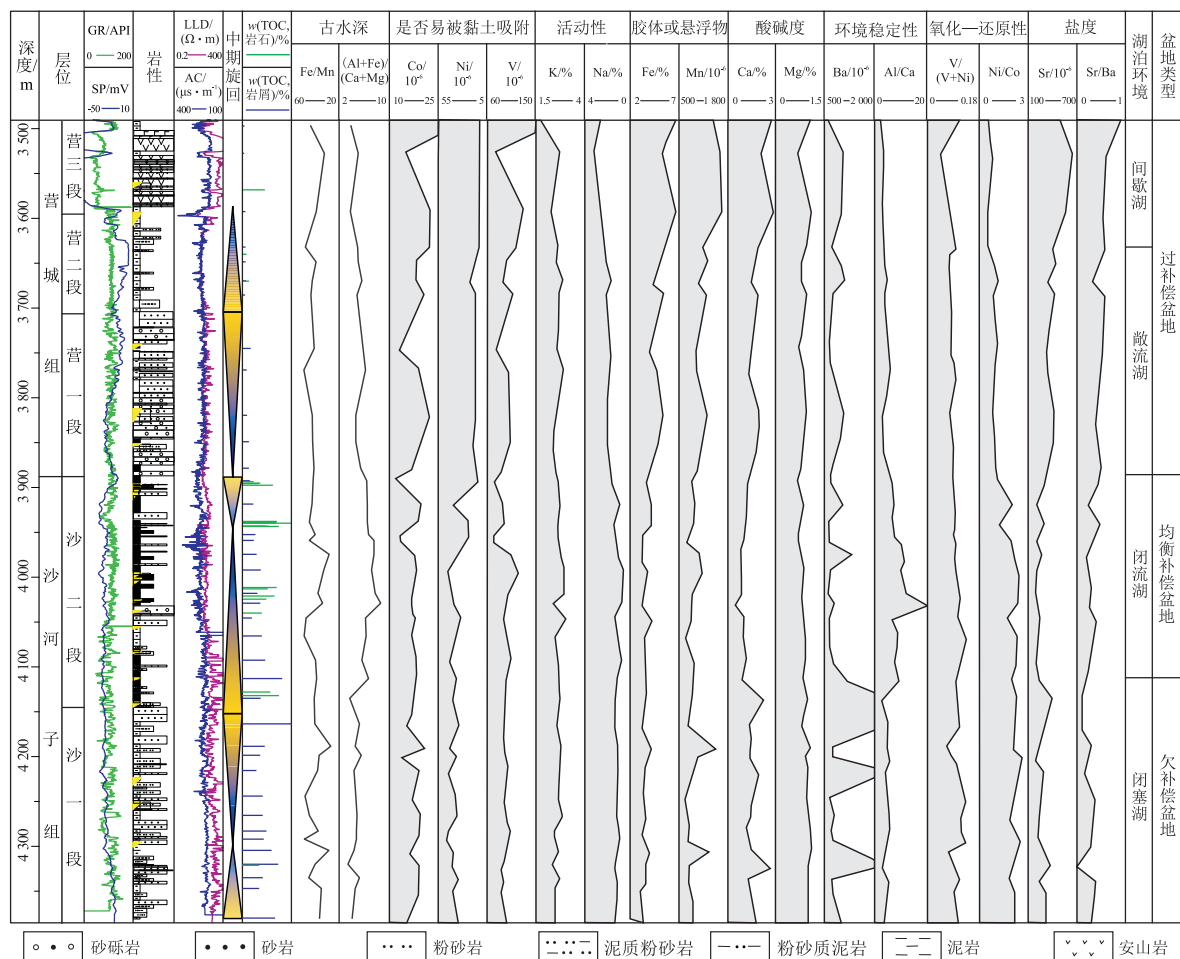


图 6 松辽盆地长岭断陷 B2 井下白垩统泥岩微量元素特征与湖盆演化  
Fig.6 Trace element characteristics of mudstones in Lower Cretaceous and basin evolution, well B2, Changling Fault Depression, Songliao Basin

被黏土吸附的微量元素 Co、Ni 和 V 相对含量较低,胶体或悬浮物的特征元素 Fe 和 Mn 含量较低,表明沉积物供给率较低,供给率小于可容空间增长率,湖盆处于欠补偿阶段。沙河子组沉积中晚期(沙二段沉积时期),构造断陷活动较早期减弱,反映构造活动性的 K 和 Na 元素、易被黏土吸附的微量元素 Co、Ni 和 V、胶体或悬浮物的特征元素 Fe 和 Mn 的相对含量值均适中,表明此时湖盆的沉积物供给率和可容空间增长速率处于均衡状态,湖盆处于均衡补偿阶段,为优质烃源岩发育的最有利时期,因此,从可容空间与沉积物供应来看,沙河子组二段亦为优质烃源岩发育的最有利层系。

3.2 后期构造掀斜运动使得洼陷烃源岩出现在斜坡

沙河子组烃源岩形成以后,长岭断陷至少发生了 4 期构造反转,分别为沙河子组沉积末期和营城组沉积末期的局部反转以及嫩江组沉积末期和明水组沉积末期的区域反转。多期构造反转作用导致沙河子组在不同地区遭受了不同程度的隆升或剥蚀,长岭断陷现今沙河子组“隆凹”格局发生了

改变,原来的沉积中心靠近现今斜坡带,出现了沙河子组残留烃源岩位于现今斜坡带的现象(图7)。

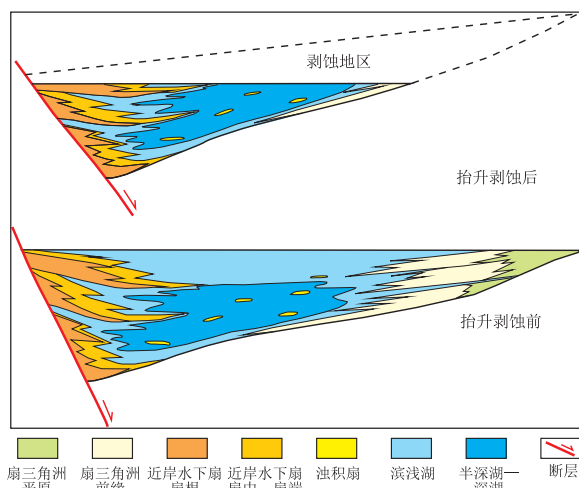


图 7 松辽盆地长岭断陷沙河子组抬升剥蚀前后烃源岩分布示意

Fig.7 Source rock distribution before and after the uplifting and erosion of Shahezi Formation, Changling Fault Depression, Songliao Basin

### 3.2.1 斜坡带发育反转背斜

地层受到多期挤压反转会产生褶皱变形,而且强烈反转作用亦产生断裂形成断背斜。例如,南部的龙凤山地区经历了沙河子组沉积末期和营城组沉积末期 2 次强烈的挤压反转,造成该区原本处于低部位的沙河子组发生挤压抬升,营城期前活动的龙凤山断裂受到挤压形成反转断背斜。

### 3.2.2 斜坡带沙河子组接触以“削截”为主

从地层接触关系看,沙河子组“超覆”现象在现今斜坡带并不常见,而是多以“削截”为主(图 8),表明沙河子组形成后受多期反转发生掀斜,导致地层遭受剥蚀。

### 3.2.3 斜坡带暗色泥岩含量高且有机碳丰度高,类型较好

从岩性组合与烃源岩地球化学特征来看,研究区发育于斜坡带的烃源岩具有半深湖—深湖相的特征,具有暗色泥岩发育程度高、富有机质且以偏腐泥型为主要特征。以东岭斜坡 S103 井为例,该井沙河子组井段累积暗色泥岩厚度 420 m,泥地比高达 61%,有机碳含量为 0.5%~2.0%,均值 1.1%,规则甾烷呈“L”型分布, $\alpha\alpha\alpha C_{27}$ 甾烷含量高于  $C_{29}$ 甾烷,反映母源有机质低等浮游生物较丰富,有机质类型偏腐泥型。

### 3.2.4 沙河子期盆地由 2 个较统一的断陷构成

沙河子组沉积末期和营城组沉积末期,盆地南部的东岭斜坡和东部的伏龙泉地区构造反转强烈,隆升幅度大,沙河子组遭受强烈剥蚀。利用测井声波时差,结合地层趋势法进行地层剥蚀量恢复,龙凤山斜坡的 B201 井、东岭斜坡的 SN109 井、查干花南洼西斜坡的 SS1 井、伏龙泉西斜坡的胜利 2 井剥蚀量分别为 753, 307, 972, 405 m。

应用回剥法,结合剥蚀量恢复结果,恢复沙河子组原始沉积厚度和残留地层厚度来反映沙河子

组沉积末期古地貌和现今地貌。恢复结果表明,沙河子组沉积时期东部前神子次洼、查干花次洼及伏龙泉次洼为统一地堑,受乾安断裂、查干花断裂及伏龙泉断裂控制,地层原始沉积厚度约 1 000~1 500 m,伏龙泉次洼和查干花次洼之间的大老爷府凸起为后期隆升形成。西部的长岭次洼分为南北 2 个沉积中心,南部的龙凤山次洼沙河子组沉积厚度较大,最大厚度近 1 000 m。沙河子组沉积前长岭次洼中部 DB10 井—DS1 井一线可能为古火山,在沙河子组沉积早期长岭南次洼和北次洼因古火山分隔水体尚未联通,至沙河子组沉积中晚期湖平面上升,才形成统一的洼陷。沙河子组沉积末期和营城组沉积末期,受构造反转作用,沙河子组遭受不同程度剥蚀,现今残留沙河子组分布格局表现为几个独立分割的残留洼陷。

综上所述,长岭断陷沙河子组沉积时期古构造与现今差异大,由东西 2 个较统一的断陷构成,现今的东岭斜坡、查干花东斜坡以及伏龙泉西斜坡为后期构造反转掀斜形成,该区在沙河子组沉积期古水深较大,烃源岩较发育。从沙河子组烃源岩残留厚度图可知(图 9),研究区主要发育 5 个烃源岩集中发育区,分别是龙凤山次洼(长岭南次洼)、长岭北次洼、查干花次洼、伏龙泉次洼及前神子次洼等。沙河子组烃源岩分布广,总体呈南厚北薄、西厚东薄分布特征。

### 3.2.5 最新钻探成果

SL2 井位于伏龙泉地区西斜坡,该井在沙河子组(新近完钻的 3 080~3 500 m 井段)钻遇了大套黑色、深灰色等暗色泥岩,暗色泥岩厚度 332 m,泥地比高达 79%,有机碳含量为 1.5%~3.9%,均值 2.4%,具有典型的深湖—半深湖沉积特征,这进一步证实了上述结论的合理性。

## 4 对油气成藏的启示

由于长岭断陷经历多期构造反转造成沙河子组掀斜,并遭受不同程度的剥蚀。盆地改造后的沙河子组残留烃源岩出现在现今斜坡带。这为研究斜坡带和盆缘超剥带油气成藏提供了新的思路。一方面,研究区现今斜坡带油气成藏“近水楼台”,具有优越的烃源条件,加之圈闭条件良好,同时为油气运移指向区。由此推测龙凤山—东岭斜坡、查干花东斜坡以及伏龙泉西斜坡为有利油气勘探区。近年来,龙凤山斜坡带 B2 井与 B201 井的突破表明了长岭断陷斜坡带具有较大的勘探潜力。另一方面,沙河子组剥蚀线附近的盆缘超剥带也具有

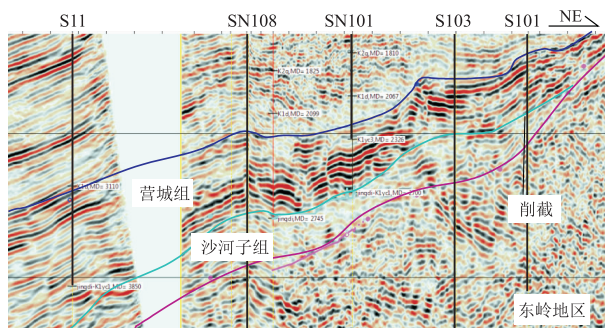


图 8 松辽盆地长岭断陷斜坡带沙河子组“削截”特征

Fig.8 “Cut-off” features of Shahezi Formation on slope belt, Changling Fault Depression, Songliao Basin

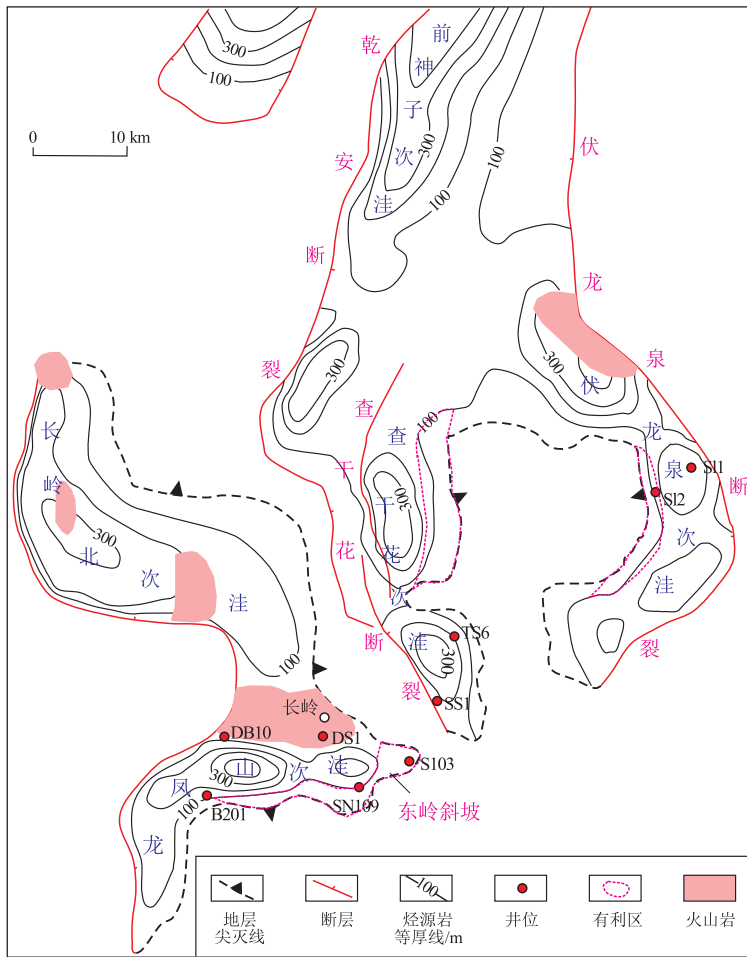


图9 松辽盆地长岭断陷沙河子组暗色泥岩厚度等值线

Fig.9 Thickness isopach of K<sub>1</sub>sh dark mudstones, Changling Fault Depression, Songliao Basin

定的勘探潜力。盆缘超剥带是一种以地层多次剥蚀和超覆为特点的区带结构类型<sup>[24]</sup>。盆缘超剥带一般具有“多源供烃、多期充注、复合输导”的成藏特征。长岭断陷沙河子组超剥带经历了多次剥蚀和超覆,断裂、不整合面或淋滤层较发育,上覆泉头组和青山口组泥岩盖层对超剥带油气富集起到良好的封盖作用,油气成藏条件尚可。

### 5 结论

(1)沙河子组沉积时期,松辽盆地长岭断陷总体表现为较大的古水深、潮湿—半潮湿气候、淡水相、厌氧—贫氧环境,这为沙河子组富有机质烃源岩的形成提供了优越的沉积条件。

(2)长岭断陷沙河子组沉积时期盆地由2个较统一的断陷构成,湖盆面积较大,烃源岩广泛发育。受后期多次反转作用影响,沙河子组发生掀斜并遭受不同程度的剥蚀,沙河子组残留烃源岩出现在现今斜坡带。

(3)斜坡带和盆缘超剥带油气成藏表现为一

种新的模式,具有2个方面的特征:一方面,龙凤山—东岭斜坡、查干花东斜坡以及伏龙泉西斜坡富有机质烃源岩较发育,油气成藏“近水楼台”,为油气勘探有利区;另一方面,沙河子组盆缘超剥带具备了油气富集条件,具有一定的勘探潜力。

### 参考文献:

[1] 秦建中.中国烃源岩[M].北京:科学出版社,2005.  
QIN Jianzhong.Source rocks of China[M].Beijing:Science Press, 2005.

[2] 王健,王权,钟雪梅,等.二连盆地优质烃源岩发育特征及成藏贡献[J].石油实验地质,2015,37(5):641-647.  
WANG Jian, WANG Quan, ZHONG Xuemei, et al.Characteristics of high-quality hydrocarbon source rocks and their contributions to reservoirs in the Erlian Basin[J].Petroleum Geology & Experiment, 2015,37(5):641-647.

[3] 张渝昌.中国含油气盆地原型分析[M].南京:南京大学出版社,1997.  
ZHANG Yuchang.Prototype analysis of petroliferous basins in China[M].Nanjing:Nanjing University Press,1997.

[4] DEMAISON G J, MOORE G T. Anoxic environments and oil

- source bed genesis [J]. AAPG Bulletin, 1980, 64 (8): 1179-1209.
- [5] KATZ B J. Controls on distribution of lacustrine source rocks through time and space[M]//KATZ B J. Lacustrine basin exploration; case studies and modern analogs, AAPG memoir, 1990: 61-76.
- [6] KELTS K. 湖相烃源岩的沉积环境: 绪论[C]//汪品先, 刘传联. 古湖泊论文集. 北京: 海洋出版社, 1991: 68-77.  
KELTS K. Sedimentary environment in lacustrine source rocks[C]//WANG Pinxian, LIU Chuanlian. Memoir of palaeolimnology. Beijing: China Ocean Press, 1991: 68-77.
- [7] 张林峰. 湖相烃源岩研究进展[J]. 石油实验地质, 2008, 30(6): 591-595.  
ZHANG Linye. The progress on the study of lacustrine source rocks [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(6): 591-595.
- [8] GRADSTEIN F M, OGG J G, SMITH A G, et al. A new geologic time scale, with special reference to Precambrian and Neogene[J]. Episodes, 2004, 27(2): 83-100.
- [9] 刘刚, 周东升. 微量元素分析在判别沉积环境中的应用: 以江汉盆地潜江组为例[J]. 石油实验地质, 2007, 29(3): 307-310.  
LIU Gang, ZHOU Dongsheng. Application of microelements analysis in identifying sedimentary environment: taking Qianjiang Formation in the Jianghan Basin as an example[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(3): 307-310.
- [10] 宋明水. 东营凹陷南斜坡沙四段沉积环境的地球化学特征[J]. 矿物岩石, 2005, 25(1): 67-73.  
SONG Mingshui. Sedimentary environment geochemistry in the Shasi section of southern ramp, Dongying Depression[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2005, 25(1): 67-73.
- [11] 李浩, 陆建林, 李瑞磊, 等. 长岭断陷下白垩统湖相烃源岩形成古环境及主控因素[J]. 地球科学, 2017, 42(10): 1774-1786.  
LI Hao, LU Jianlin, LI Ruilei, et al. Generation paleoenvironment and its controlling factors of Lower Cretaceous lacustrine hydrocarbon source rocks in Changling Depression, south Songliao Basin[J]. Earth Science, 2017, 42(10): 1774-1786.
- [12] 王春连, 刘成林, 湖海兵, 等. 江汉盆地江陵凹陷南缘古新统沙市组四段含盐岩系沉积特征及其沉积环境意义[J]. 古地理学报, 2012, 14(2): 165-175.  
WANG Chunlian, LIU Chenglin, HU Haibing, et al. Sedimentary characteristics and its environmental significance of salt-bearing strata of the Member 4 of Paleocene Shashi Formation in southern margin of Jiangling Depression, Jianghan Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(2): 165-175.
- [13] 张永生, 杨玉卿, 漆智先, 等. 江汉盆地潜江凹陷古近系潜江组含盐岩系沉积特征与沉积环境[J]. 古地理学报, 2003, 5(1): 29-35.  
ZHANG Yongsheng, YANG Yuqing, QI Zhixian, et al. Sedimentary characteristics and environments of the salt-bearing series of Qianjiang Formation of the Paleogene in Qianjiang Sag of Jianghan Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2003, 5(1): 29-35.
- [14] HUNT J M. Petroleum geochemistry and geology[M]. San Francisco: W. H. Freeman, 1979: 1-617.
- [15] HATCH J R, LEVENTHAL J S. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U.S.A. [J]. Chemical Geology, 1992, 99(1/3): 65-82.
- [16] JONES B, MANNING D A C. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones[J]. Chemical Geology, 1994, 111(1/4): 111-129.
- [17] MONGENOT T, TRIBOVILLARD N P, DESPRAIRIES A, et al. Trace elements as palaeoenvironmental markers in strongly mature hydrocarbon source rocks: the Cretaceous La Luna Formation of Venezuela[J]. Sedimentary Geology, 1996, 103(1/2): 23-37.
- [18] 李进龙, 陈东敬. 古盐度定量研究方法综述[J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(5): 1-3.  
LI Jinlong, CHEN Dongjing. Summary of quantified research method on paleosalinity[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2003, 10(5): 1-3.
- [19] 郑荣才, 柳梅青. 鄂尔多斯盆地长 6 油层组古盐度研究[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(1): 20-25.  
ZHENG Rongcai, LIU Meiqing. Study on paleosalinity of Chang 6 oil reservoir set in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(1): 20-25.
- [20] 文华国, 郑荣才, 唐飞, 等. 鄂尔多斯盆地耿湾地区长 6 段古盐度恢复与古环境分析[J]. 矿物岩石, 2008, 28(1): 114-120.  
WEN Huaguo, ZHENG Rongcai, TANG Fei, et al. Reconstruction and analysis of paleosalinity and paleoenvironment of the Chang 6 member in the Gengwan region, Ordos Basin[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2008, 28(1): 114-120.
- [21] 王彦青, 陈迎宾, 胡焯, 等. 蒸发环境烃源岩生烃能力探讨: 以川西拗陷雷口坡组为例[J]. 断块油气田, 2018, 25(4): 426-430.  
WANG Yanqing, CHEN Yingbin, HU Ye, et al. Discussion on hydrocarbon generation ability of evaporation environment: a case study of Leikoupo Formation in West Sichuan Depression[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2018, 25(4): 426-430.
- [22] CARROLL A R, BOHACS K M. Lake-type controls on petroleum source rock potential in Nonmarine basins[J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(6): 1033-1053.
- [23] 王辉, 朱占平, 宋土顺, 等. 泉泉盆地中侏罗统万宝组沉积环境与烃源岩特征[J]. 断块油气田, 2019, 26(6): 687-692.  
WANG Hui, ZHU Zhanping, SONG Tushun, et al. Sedimentary environment and characteristics of hydrocarbon source rock of Middle Jurassic Wanbao Formation in Tuquan Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2019, 26(6): 687-692.
- [24] 沈扬, 林会喜, 赵乐强, 等. 准噶尔盆地西北缘超剥带油气运聚特征与成藏模式[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(5): 505-509.  
SHEN Yang, LIN Huixi, ZHAO Leqiang, et al. Hydrocarbon migration-accumulation characteristics and pool-forming patterns in overlap-erosion zones in northwestern margin of Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(5): 505-509.