

doi:10.3799/dqkx.2017.539

长岭断陷下白垩统湖相烃源岩形成古环境及主控因素

李浩¹, 陆建林¹, 李瑞磊², 王保华¹, 徐文², 左宗鑫¹, 王苗¹, 刘娅昭¹

1. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏无锡 214126

2. 中国石油化工股份有限公司东北油气分公司勘探开发研究院, 吉林长春 130062

摘要: 恢复烃源岩形成时期的古环境, 落实优质烃源岩发育主控因素对确定湖相烃源岩发育层系及刻画烃源岩非均质性意义重大。利用岩石学、元素地球化学对长岭断陷早白垩世火石岭期至营城期的古环境进行恢复, 并对反映古环境的微量元素含量及其比值与有机碳含量(Total Organic Carbon, TOC)进行相关性分析, 确定控制湖相烃源岩发育的主要环境因素。研究表明, 从火石岭期至沙河子期, 再到营城期, 长岭断陷经历了古水深从变深到变浅, 古气候从潮湿一半潮湿气候到半干旱气候, 古盐度从淡水相到半咸水相, 湖泊水体还原性从增强到减弱的古环境演化过程, 早白垩世不同时期长岭断陷古环境表现出明显的分带性, 古气候和氧化还原条件是控制长岭断陷下白垩统湖相烃源岩发育的主要环境因素。长岭断陷沙河子组二段烃源岩形成于潮湿与缺氧的古环境, 该时期湖盆演化处于均衡补偿阶段, 且烃源岩古生产力较高, 因此研究区沙河子组二段优质烃源岩十分发育, 分布广。

关键词: 微量元素; 烃源岩; 古环境; 主控因素; 长岭断陷; 松辽盆地; 石油地质。

中图分类号: P631.81

文章编号: 1000-2383(2017)10-1774-13

收稿日期: 2017-03-10

Generation Paleoenvironment and Its Controlling Factors of Lower Cretaceous Lacustrine Hydrocarbon Source Rocks in Changling Depression, South Songliao Basin

Li Hao¹, Lu Jianlin¹, Li Ruilei², Wang Baohua¹, Xu Wen², Zuo Zongxin¹, Wang Miao¹, Liu Yazhao¹

1. Wuxi Branch of SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Wuxi 214126, China

2. Exploration and Development Research Institute, SINOPEC Northeast Oil & Gas Company, Changchun 130062, China

Abstract: Heterogeneity study of lacustrine source rocks relies heavily on a deeper understanding of paleoenvironment and the major controlling factors on their formation. Based on element geochemical and petrological analyses of the paleoenvironment of the Early Cretaceous (from K_1h to K_1yc) in Changling depression, the main controlling factors of organic source rocks development were analyzed according to the characteristics of its tectonics and sedimentary and the primary productivity of the source rocks in this study. Results show that from K_1h period to K_1sh stage to K_1yc stage, Changling depression experienced paleo-water depth change from deep to shallow, palaeoclimate from humid-semi-humid to semi-arid, palaeosalinity from fresh water to brackish water, and reduction condition from enhanced to weakened. From K_1sh period to K_1yc , the paleoenvironment of Changling depression shows obvious zonation; The correlation between trace element indexes indicating the paleoclimate and water reduction and TOC (Total Organic Carbon) of the source rock samples is significant, while the correlation between the trace element indexes indicating the paleosalinity and TOC of the source rock samples is small. So the paleoclimatic and redox conditions are the main environmental factors of the development of Lower Cretaceous lacustrine source rocks in Changling fault depression; K_1sh_2 Formation high quality source rock which developed in equilibrium compensation stage, humid climate, hypoxia and high initial productivity is widely distributed. Followed by K_1sh_1 Formation and K_1h_2 Formation, the organic source rock of K_1yc Formation is relatively developed in the south and east, and the distribution is relatively limited.

Key words: trace element; hydrocarbon source rock; paleoenvironment; main controlling factor; Changling depression; Songliao basin; petroleum geology.

基金项目: 中国石化科技部项目“长岭断陷结构充填特征及有利成藏组合研究”(No.P13073); 国家“十三五”重大专项“陆相页岩油资源潜力评价与分布规律”(No.2017ZX05049-001-006)。

作者简介: 李浩(1984-), 男, 博士, 主要从事油气成藏机理及非常规油气评价研究工作。E-mail: lh107033@163.com

引用格式: 李浩, 陆建林, 李瑞磊, 等, 2017. 长岭断陷下白垩统湖相烃源岩形成古环境及主控因素. 地球科学, 42(10): 1774-1786.

0 前言

优质烃源岩一般具有有机质丰度高、分布稳定(厚度不一定大)的特征,它是形成大、中型油田的物质基础(秦建中,2005;杨华和张文正,2005;王建等,2015)。湖相烃源岩非均质性强,湖相优质烃源岩发育受多种因素控制,其中“保存模式”主要强调因地理隔离、古水深变化或生物作用等因素引起水体缺氧,从而导致优质烃源岩形成(Demaison and Moore, 1980; Katz,1990; Kelts,1991; 贾建亮等,2014),而“生产力模式”主要强调富有机质的形成是由于湖泊表层水体具较高的古生产力,只要古生产力高,即使湖泊水体还原性较弱也可形成优质烃源岩(Meyers and Amaboldi, 2005; Myrbo and Shapley, 2006);沉积速率对烃源岩形成影响较复杂,过高或过低的沉积速率都不利于优质烃源岩的形成(Ibach, 1982),Carroll and Bohacs(2001)还提出湖盆类型也能控制湖相烃源岩生烃潜力。多因素相互作用,增加了对湖相优质烃源岩形成机制认识的难度(张林晔, 2008; 姚永坚等, 2013)。

早白垩世火石岭期以来,长岭断陷经历了多期构造运动、多期火山充填作用。受后期构造改造以及火山充填作用的影响,长岭断陷下白垩统烃源岩形成时的盆地面貌“今非昔比”,这给研究区下白垩统残留烃源岩分布预测带来了较大的困难。烃源岩分布不清一直制约着研究区断陷层(营城组及其以下地层)油气勘探进一步突破。众所周知,烃源岩发育受古环境,诸如古气候、古水深、氧化还原条件以及古盐度等要素控制(张林晔, 2008)。恢复烃源岩形成时期的古环境,落实优质烃源岩发育主控因素对确定优质烃源岩发育层系以及刻画湖相烃源岩非均质性意义重大。笔者利用岩石学、元素化学对长岭断陷早白垩世沙河子期至营城期的古环境进行了重建,并对反映古环境的微量元素含量及其比值与有机碳含量(Total Organic Carbon, TOC)进行相关性分析,确定影响湖相烃源岩发育的主要环境因素,有助于进一步认识长岭断陷下白垩统优质烃源岩发育的层系和分布,以期扩大长岭断陷深层油气勘探的发展空间。

1 地质背景

长岭断陷位于松辽盆地中央坳陷区的南部(图1a),为一北西走向的断、拗叠置的含油气盆地,面积

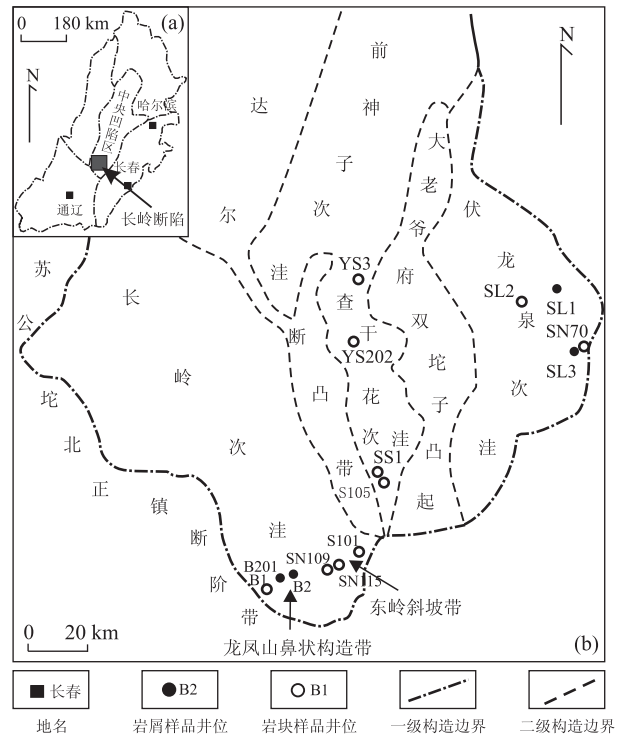


图1 长岭断陷地理位置(a)及构造区划(b)

Fig.1 Location of Changling depression (a) and tectonic division (b)

约 $1.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。研究区构造单元由西向东划分为苏公坨—北正镇断阶带、长岭次洼(南部为龙凤山与东岭地区)、达尔罕断凸带、前神字—查干花次洼、大老爷府—双坨子凸起带和伏龙泉次洼,整体呈“三凸三凹”的构造格局(图1b)。其区域上受控于北北东与北西向控凹断裂,生烃洼陷主要呈北北西或近南北向展布。成盆期以来,研究区主要经历了初始断陷期(火石岭期)、强烈断陷期(沙河子期和营城期)、断拗转换期(登娄库期)、稳定拗陷期(青山口—姚家期)和隆升剥蚀反转期(嫩江—明水期)5个构造演化阶段。而且在沙河子末期和营城末期,局部地区还发生了构造反转运动,造成不同程度的隆升和剥蚀。沙河子期至营城期盆地强烈伸展,断陷初期形成的小型分散断陷群开始发展为较统一的中型断陷,强烈断陷期是研究区下白垩统烃源岩形成的主要时期。

此外,在火石岭期和营城期,研究区还伴随有强烈的火山活动。总体上火石岭组一段主要以中基性火山岩为主,火石岭组二段以灰绿色、灰色含砾细砂岩、细砂岩和暗色泥岩为主;沙河子期为火山活动间歇期,沙河子组上下两段均发育大套暗色泥岩、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发育,其中上部的沙河子组二段暗色泥岩最发育,分布较广;营城组发育大套火山岩和碎屑岩,其

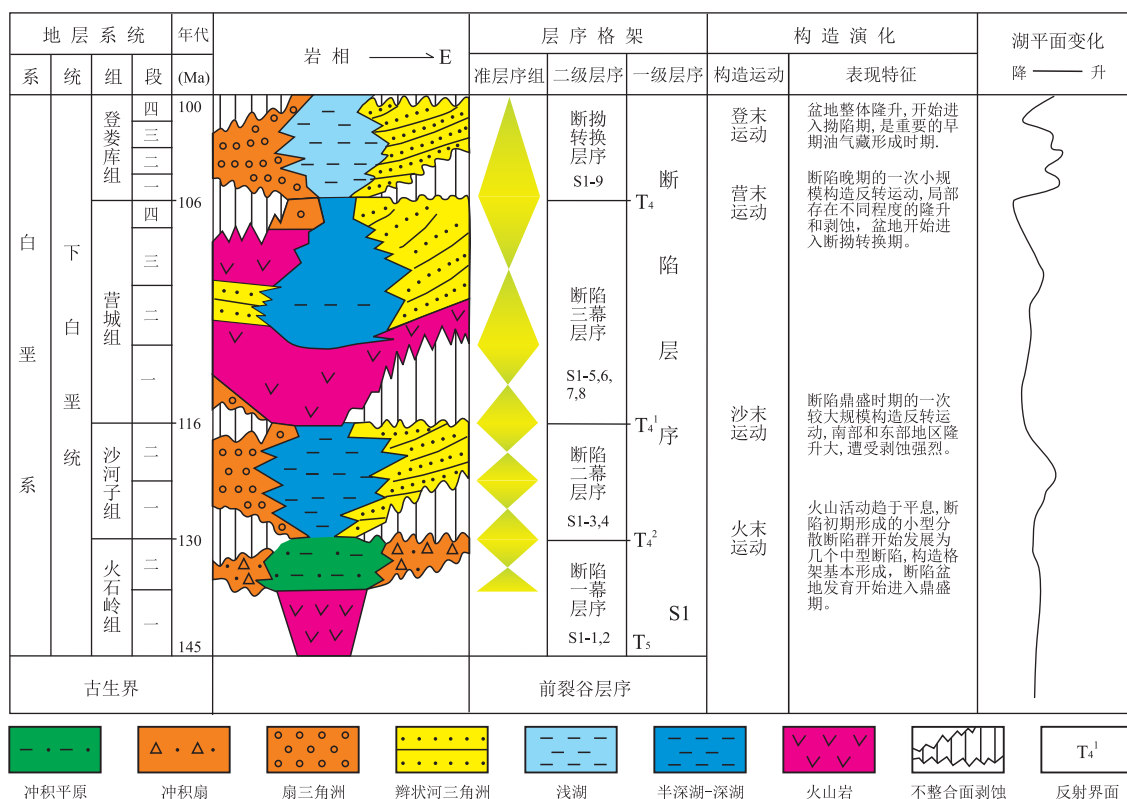


图 2 长岭断陷下白垩统沉积充填及断陷期构造演化

Fig.2 The sedimentary filling features of the lower Cretaceous and structural evolution in early Cretaceous

中营城组一段在西部和北部地区主要发育中酸性火山岩,而在东部的伏龙泉地区和南部的龙凤山地区则以砂泥岩互层为主,营二段主要发育暗色泥岩夹灰色细砂岩、灰色含砾细砂岩,营城组三段在西部和北部地区则发育大套连片的中酸性火山岩,局部含灰色砂砾岩和泥岩,营四段分布范围较局限,主要为一套灰色细砂岩和红褐色泥岩互层地层(图 2)。

总之,长岭断陷多期构造运动、多幕反转以及火山—沉积二元充填特征在中国东部中生代盆地的演化中具有独特性,同时这也加大了研究区下白垩统残留烃源岩分布预测的难度。

2 样品处理与测试方法

样品主要采自长岭断陷洼陷带和内斜坡的下白垩统火石岭组、沙河子组和营城组地层,样品岩性主要为灰色泥岩、深灰色泥岩和灰黑色泥岩,样品类型包括钻井岩屑和岩块样品,样品点分布如图 1b 所示。其中,岩屑样品共 201 个,采样间隔为 15~30 cm,岩块样品共 152 个。

笔者对上述样品分别进行金属元素分析和有机碳含量测试。其中测试金属元素的样品处理过程如

下:首先将每个挑选出的岩屑和岩块样品进行碎样,并筛选至 200 目以下,再称重 0.05 g 并加入 0.25 g 偏硼酸锂混匀,在 480 °C 条件下熔融,加入浓度 10% 稀 HCl 定容至 50 mL,最后上机测试,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,波长范围为 175~785 nm,分辨率为 0.009 nm(一级),检测最小级为 10~9 级,检测依据是 SY/T 6404-1999《沉积岩中金属元素的电感耦合等离子体发射光谱分析方法》;有机碳含量样品测试所采用的仪器为美国 LECO 公司的 CS-200 碳硫分析仪。上述样品测试均在中石化无锡石油地质研究所实验室完成。

3 下白垩统烃源岩地球化学特征

研究区下白垩统从下往上发育火石岭组、沙河子组和营城组 3 套烃源岩,其中主要烃源岩层系为沙河子组沙二段(下白垩统烃源岩样品 816 个 TOC 实测数据中好及很好烃源岩所占比例为(66%)和沙一段(64%),其次为火石岭组二段(60%)、营城组一段(35%)、营二段(29%)、营三段(37%)(图 3);干酪根碳同位素值为 -29‰~-21.4‰,均值为

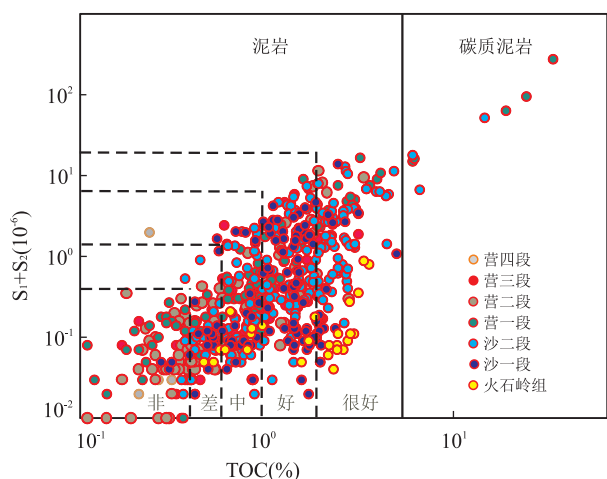


图 3 长岭断陷下白垩统烃源岩 TOC 与 $S_1 + S_2$ 关系
Fig.3 $w(\text{TOC}) - S_1 + S_2$ crossplot of the lower Cretaceous source rocks in Changling depression

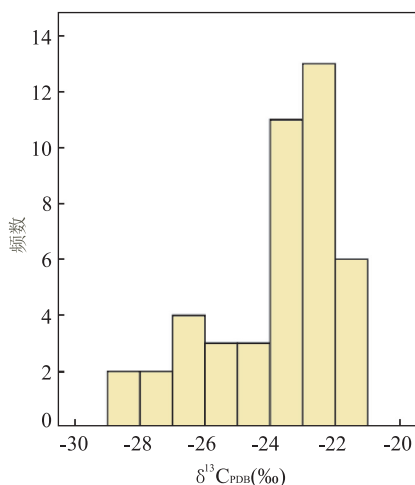


图 4 长岭断陷下白垩统烃源岩干酪根碳同位素直方图
Fig.4 The histogram of kerogen carbon isotopes of the lower Cretaceous source rocks in Changling depression

-23.9‰, 总体以腐殖型或偏腐殖型为主, 由于下白垩统断陷层各层系天然气成因类型均以煤型气为主(李浩等, 2016), 这也进一步证实了下白垩统烃源岩的偏腐殖型特征(图 4); 该烃源岩镜质体反射率为 0.6%~2.9%, 均值为 1.6%, 其中斜坡带(如东岭斜坡带和龙凤山南部地区)以成熟烃源岩为主, 其他地区主要为高熟—过熟烃源岩。

4 早白垩世古环境恢复

4.1 古气候

气候主要影响降水量、湖流、水体分层和沉积充填, 而且盐度的变化某种程度上也受到气候的控制。

在构造稳定的情况下, 气候一般是控制盆地沉积过程的根本因素(Gradstein *et al.*, 2004; 贾艳艳等, 2015)。不同气候条件下形成沉积物中的金属元素含量会有所不同。古气候指数、金属元素 Cu 含量、金属元素含量比 Sr/Cu、Fe/Cu 等参数为反映古气候的常用参数(刘刚和周东开, 2007; 宋明水, 2005), 其中古气候指数“C 值”为喜湿型金属元素总丰度与喜干型金属元素总丰度比值。

前人通过对其他地区的研究表明, 潮湿—半潮湿气候: $1 < \text{Sr}/\text{Cu} < 10, 0.6 < C < 1$, 半潮湿—半干燥气候: $\text{Sr}/\text{Cu} > 10, 0.2 < C < 0.6$; 干燥气候: $C < 0.2$ (刘刚和周东开, 2007; 赵增义等, 2007; 宋立军等, 2016)。参考该标准, 从图 5 中可见, 早白垩世火石岭期到登娄库期, 长岭断陷古气候经历了从潮湿—半潮湿气候逐渐向半干燥气候演变的过程。图中火石岭组烃源岩样品金属元素含量比 Sr/Cu 均值 5.7, 古气候指数均值 0.8, 其多数样品点落在图版潮湿—半潮湿的区域; 沙河子组一段烃源岩样品点在图中分布区域与火石岭组样品类似, 反映古气候仍为潮湿—半潮湿气候, 但其部分样品点古气候指数值小于 0.6, 说明古气候有变干燥的趋势; 沙河子组二段烃源岩样品点在图版中分布进一步发散表明沙河子中晚期研究区古气候有进一步变干燥趋势, 但总体仍以半潮湿气候为主, 由于该段在局部地区还发育碳质泥岩和煤线, 这也表明当时气候仍较湿润; 营城期烃源岩金属元素含量比 Sr/Cu 一般大于 10, 古气候指数一般小于 0.6, 反映研究区营城期总体以半潮湿—半干燥、半干燥气候

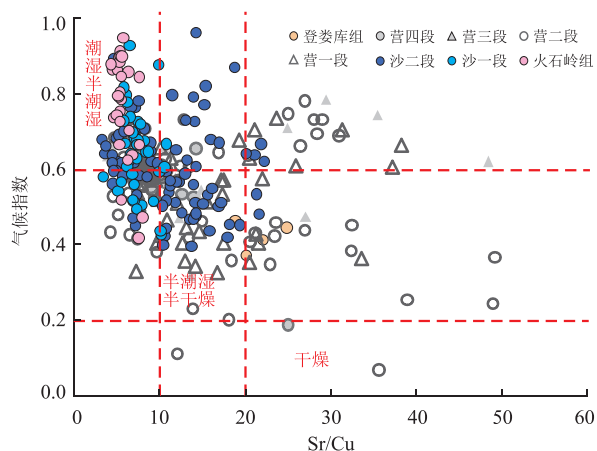


图 5 长岭断陷下白垩统湖相烃源岩元素含量比 Sr/Cu 与古气候指数关系
Fig.5 Relationship between Sr/Cu and paleoclimatic index in lacustrine source rocks of the lower Cretaceous samples from Changling depression

表 1 SL3 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 the lower Cretaceous lacustrine source rocks of SL3 well

层位	泥岩主要颜色	暗地比 (%)	Fe/Mn		(Al+Fe)/(Ca+Mg)		反映古水深	参考指标范围
			范围	均值	范围	均值		
营四段	灰色、褐色	17	43~54	49	4.5~8.3	6.8	三角洲平原	
营三段	灰色、深灰色	40	43~49	46	5.8~7.6	6.7	滨浅湖	深湖: Fe/Mn < 30, (Al+Fe)/(Ca+Mg) < 2.5; 半深湖: 30 < Fe/Mn < 40, 2.5 < (Al+Fe)/(Ca+Mg) < 5.0; 滨浅湖: Fe/Mn > 40, (Al+Fe)/(Ca+Mg) > 5.0
营二段	灰色	66	42~53	46	6.0~7.5	6.5	滨浅湖	
营一段	灰色	13	34~46	41	6.9~8.9	7.9	滨浅湖	
沙二段	黑色、深灰色	82	17~52	37	0.7~5.6	2.9	深湖	
沙一段	深灰色, 顶部灰黑色	66	28~48	39	3.6~5.8	4.7	半深湖	
火二段	深灰色	25	38~65	48	5.0~8.2	6.6	滨浅湖	

为主。而营城组三段和四段烃源岩样品金属元素含量比 Sr/Cu 总体略小于营一段和营二段, 古气候指数前者略大于后者, 反映营城中晚期较营城早期气候更湿润。

4.2 古水深

古水深分析对于再造古环境、盆地构造及演化具有重要意义。近年来现代沉积研究表明, 金属元素的地球化学特征与湖盆水体深度以及离岸距离具有一定的相关性, 在古代大型湖泊沉积中, 这种相关性尤为明显。一般 Fe 的化合物易在滨岸富集, 而 Mn 的化合物稳定性较 Fe 的化合物强, 可经过长距离迁移, 并在远离滨岸的湖盆中富集。此外, 金属元素 Ca 和 Mg 主要赋存于碳酸盐岩中, 碳酸盐岩含量的增多表明陆源物质的缺乏以及离岸距离的增大, 因此, 随着离岸距离的增大和水深的增加, 金属元素含量比 Fe/Mn 和 (Al+Fe)/(Ca+Mg) 呈现逐渐减小的趋势, 这 2 个参数常用来指示湖泊古水深(张永生等, 2003; 王春连等, 2012)。

以研究区 SL3 井为例(表 1), 该井段火石岭组二段到沙河子组二段, 泥岩颜色逐渐变深, 暗地比值逐渐增大, 金属元素含量比 Fe/Mn 和 (Al+Fe)/(Ca+Mg) 值依次降低, 这反映古水深逐渐变深, 而从沙河子组二段到营城组四段, 该井段暗色泥岩含量逐渐降低, 反映古水深的这 2 个指标均呈增大趋势, 这表明古水深逐渐变浅。因此, 早白垩世沙河子中晚期, 研究区古水深最大, 是下白垩统优质烃源岩发育的最有利时期。

4.3 氧化还原条件

一般情况湖盆水体缺氧环境有利于有机质的保存(Hunt, 1979)。金属元素 V、Cr、Ni 和 Co 等一般在沉积过程中, 在不同的氧化还原条件下产生分异, 因此, 金属元素含量比 V/Cr 和 Ni/Co 为判别古湖泊水体氧化还原条件的有效参数(Hatch and Leventhal, 1992; Jones and Manning, 1994; Mongenot *et al.*,

1996)。以研究区 B2 井为例, 下部的沙河子组一段泥岩颜色以深灰色、灰黑色为主, 暗色泥岩累积厚度 105 m, 暗色泥岩含量 45%, 沙河子组二段泥岩颜色则以黑色为主, 暗色泥岩累积厚度 169 m, 暗色泥岩含量高达 66%, 上部的营城组以灰色、深灰色泥岩为主, 暗色泥岩累积厚度 128 m, 暗色泥岩含量仅 31%, 泥岩主要颜色和暗地比垂向变化规律表明, 从沙河子组一段到沙河子组二段再到营城组, 研究区湖泊水体还原条件先增强, 随后减弱。而从沙河子组到营城组金属元素含量 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, 湖相泥岩的 V/Cr 越大, 反映的湖泊水体氧化性越强。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 2.00 < V/Cr < 4.25, 厌氧环境 V/Cr < 2.00; 此外 Ni/Co 值大于 1.8 反映厌氧条件(Jones and Manning, 1994)。

根据该标准, 长岭断陷下白垩统湖相烃源岩形成环境总体以厌氧、贫氧—厌氧环境为主, 这有利于有机质保存。但从沙河子组一段到营城组四段, 图版中落在贫氧区和富氧区的数据点逐渐增多(图 6), 这表明从沙河子早期至营城晚期, 研究区古湖泊水体还原性经历了从增强到减弱的演化过程, 沙河子组二段有机质保存条件最好, 营城组则相对较差。

4.4 古盐度

古盐度是反映古湖泊水介质条件的一个重要特征。湖泊水体盐度主要通过影响生物种类与繁殖程度来影响优质烃源岩的形成。金属元素 Sr 丰度和元素含量比 Sr/Ba 一般与古盐度正相关, 为湖泊水体古盐度判别的有效参数(郑荣才和柳梅青, 1999; 李进龙和陈东敬, 2003)。根据表 2 古盐度判别标准(刘刚和周东开, 2007; 文华国等, 2008), 研究区从早白垩世沙河子早期至营城晚期, 湖水古盐度经历了从淡水相到半咸水相逐渐变咸的演化过程(图 7)。图中

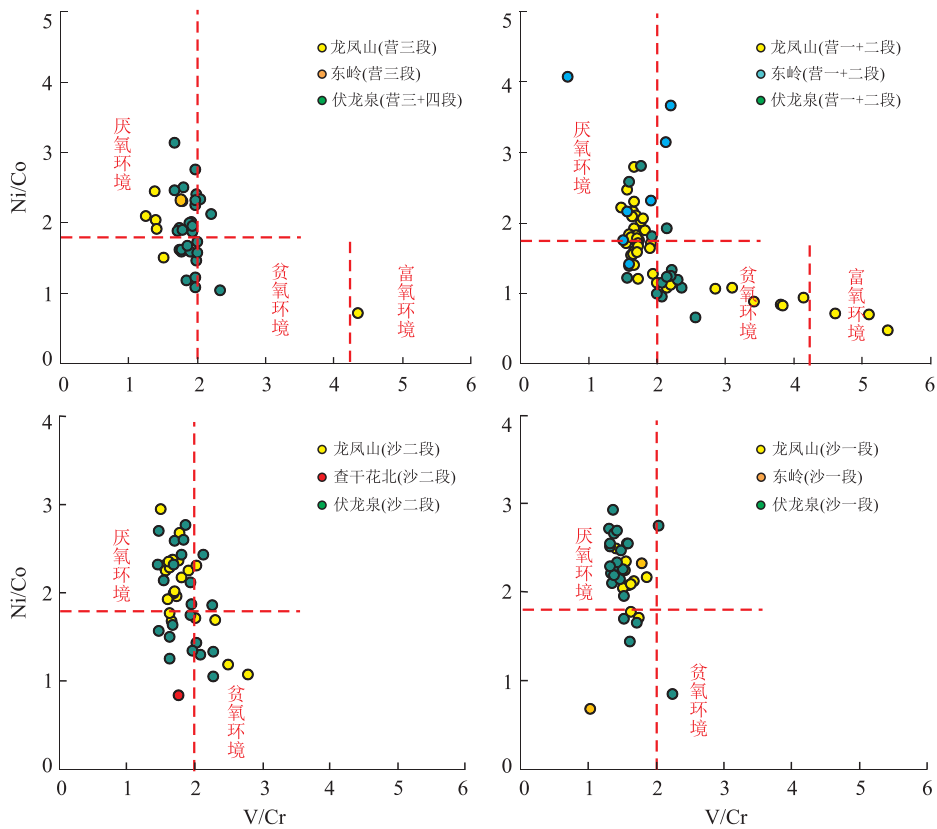


图 6 长岭断陷下白垩统湖相烃源岩元素含量比 V/Cr 与 Ni/Co 关系

Fig.6 Relationship between V/Cr and Ni/Co in lacustrine source rocks of the lower Cretaceous samples from Changling depression

表 2 古盐度微量元素判断指标

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

注:据郑荣才和柳梅青(1999);李进龙和陈东敬(2003).

所示,沙河子早期,研究区沙河子组二段烃源岩样品金属元素含量比 Sr/Ba 为 0.18~0.56,均值为 0.38, Sr 含量为 $182 \times 10^{-6} \sim 395 \times 10^{-6}$,均值为 236×10^{-6} ,以典型淡水相为主;到沙河子中晚期,研究区总体仍以淡水相为主,但查干花次洼和伏龙泉地区湖水古盐度较其他地区稍高,局部表现为淡水—半咸水相.这说明沙河子中晚期,查干化次洼和伏龙泉次洼湖水可能保持一定的连通,而与长岭次洼(包括龙凤山和东岭地区)尚未连片,水体具有一定的分隔性;营城早期,研究区伏龙泉地区和查干花南次洼以淡水相为主,龙凤山地区以淡水—半咸水相为主,东岭地区以半咸水相为主,查干花北次洼较复杂,既有淡水相,又有淡水—半咸水相,研究区不同地区湖水古盐度的多样性反映了该时期湖水较强的分隔

性.究其原因,为该时期火山岩强烈喷发导致水体相隔而造成不同地区水体盐度的差异性;营城晚期,东岭地区表现为淡水相,其他地区以半咸水为主.

综合上述分析,基于 B2 井和 SL3 井等典型钻井下白垩统烃源岩金属元素分布特征建立了研究区早白垩世古环境演化剖面(图 8 和图 9).从图中可知,从火石岭期至沙河子期,再到营城期,长岭断陷经历了古水深从变深到变浅,古气候从潮湿—半潮湿气候到半干旱气候,古盐度从淡水相到半咸水相,湖泊水体的还原性先增强后减弱的古环境演化过程.总体上,早白垩世沙河子期和营城期,研究区古环境表现出明显的分带性.研究区早白垩世不同时期古环境的差异决定了不同层系烃源岩的生烃潜力的差异.

5 影响优质烃源岩发育的古环境因素分析

烃源岩形成时的沉积古环境包括湖泊水体的古水深、氧化还原性、古盐度和古气候条件等,它是形成湖相优质烃源岩重要控制因素.

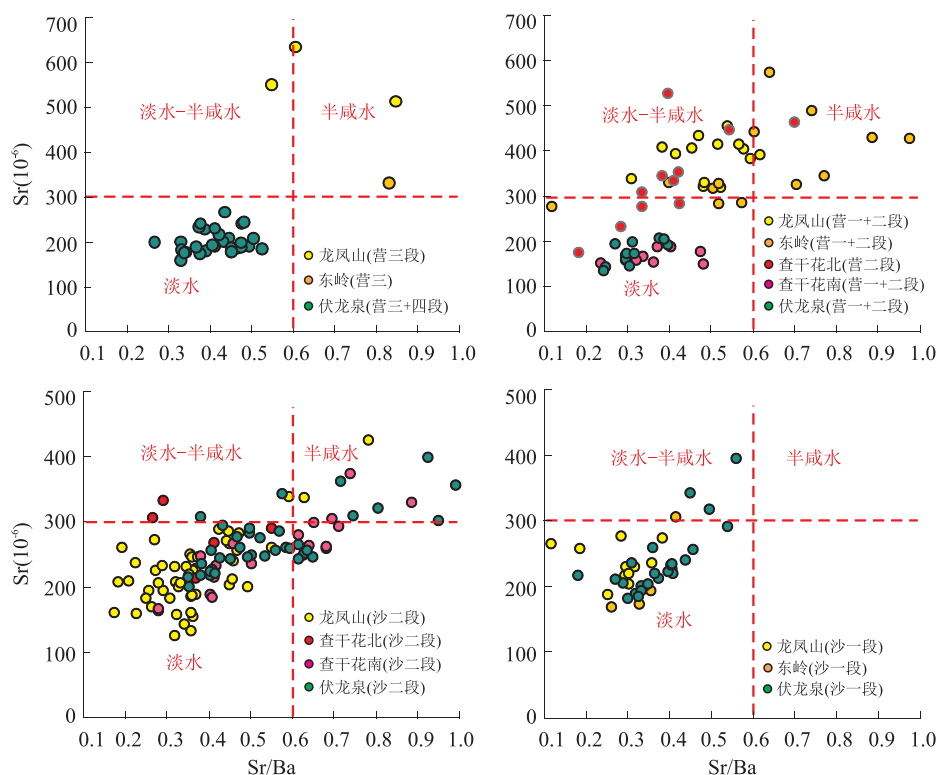


图 7 长岭断陷下白垩统湖相烃源岩元素含量比 Sr/Ba 与 Sr 含量关系

Fig.7 Relationship between Sr/Ba and Sr in lacustrine source rocks of the lower Cretaceous samples from Changling depression

对研究区 B2 井、B201 井、SL1 井和 SL3 井共 107 个烃源岩样品的有机碳含量 (TOC) 和金属元素含量进行相关性分析。结果表明,长岭断陷下白垩统优质烃源岩富集金属元素 Cr、Ni、Cu、V、Ba、Co、Al、Mn 等元素,亏损 K、Na、Ca 和 Zr 等元素。从反映古环境的微量元素含量及其比值与有机碳含量 (TOC) 关系图 10 可见,样品 TOC 值与反映氧化还原条件的敏感参数 Cr、Ni、V、Ni/Co 与 V/Cr 相关程度高,相关系数分别为 0.84、0.81、0.69、0.67 和 -0.73, TOC 值大于 2.0 的烃源岩样品显著富集 V、Ni、Cr 等元素,显而易见,研究区下白垩统优质烃源岩的形成受湖水氧化还原条件影响大,强还原条件有利于有机质保存;此外,样品 TOC 值与反映古气候的敏感参数 Cu、古气候指数、Fe/Cu 与 Sr/Cu 相关程度亦较高,相关系数分别为 0.78、0.70、-0.71 和 -0.52, TOC 值大于 2.0 的烃源岩样品显著富集 Cu 元素,古气候指数多大于 0.7,且 Sr/Cu 一般小于 6,属于典型的半潮湿—潮湿气候,这说明研究区下白垩统优质烃源岩的形成亦与古气候密切相关;另外样品 TOC 值与反映湖水古盐度的敏感参数 Sr、Sr/Ba 与 Sr/Ca 相关性均较差,同理,湖水古盐度对研究区下白垩统优质烃源岩的形成影响不大。

综上,沉积环境诸要素中的氧化还原条件与古气候控制了研究区下白垩统优质烃源岩的形成。

此外,古生产力与沉积环境的氧化还原、古气候是十分相关的,更直接地反映出有机质在哪种环境下更加富集,它是形成高 TOC 的基础,是优质烃源岩最直接的显示。通常,生物作用影响沉积物中 Al 元素富集,而且 Al 元素化学性质较稳定,受后期成岩作用和风化作用影响小 (Deuser *et al.*, 1983), Ba 元素在沉积过程中易沉淀富集,深海中 Ba 元素富集还与生物聚集有关 (马超, 2009), 因此,金属元素含量比 Al_2O_3/K_2O 、Al/Ti、Ba/Ca 和 Ba/Al 常用作估算烃源岩的古生产力 (Kryc *et al.*, 2003; 任景玲等, 2005)。虽然利用这些指标尚不能定量计算受陆源影响较大的湖相烃源岩的原始生产力,但仍能反映其古生产力相对大小。从图 11 可知,样品 TOC 值与 Al_2O_3/K_2O 、Al/Ti 正相关程度较高,相关系数分别达到 0.71 和 0.60,而且与金属元素 Ba 含量也表现出一定的正相关性,表明研究区下白垩统优质烃源岩的形成受烃源岩古生产力影响较大。图 8 和图 9 显示沙河子组和火石岭组烃源岩均具有较高的古生产力,而营城组烃源岩相对较低。

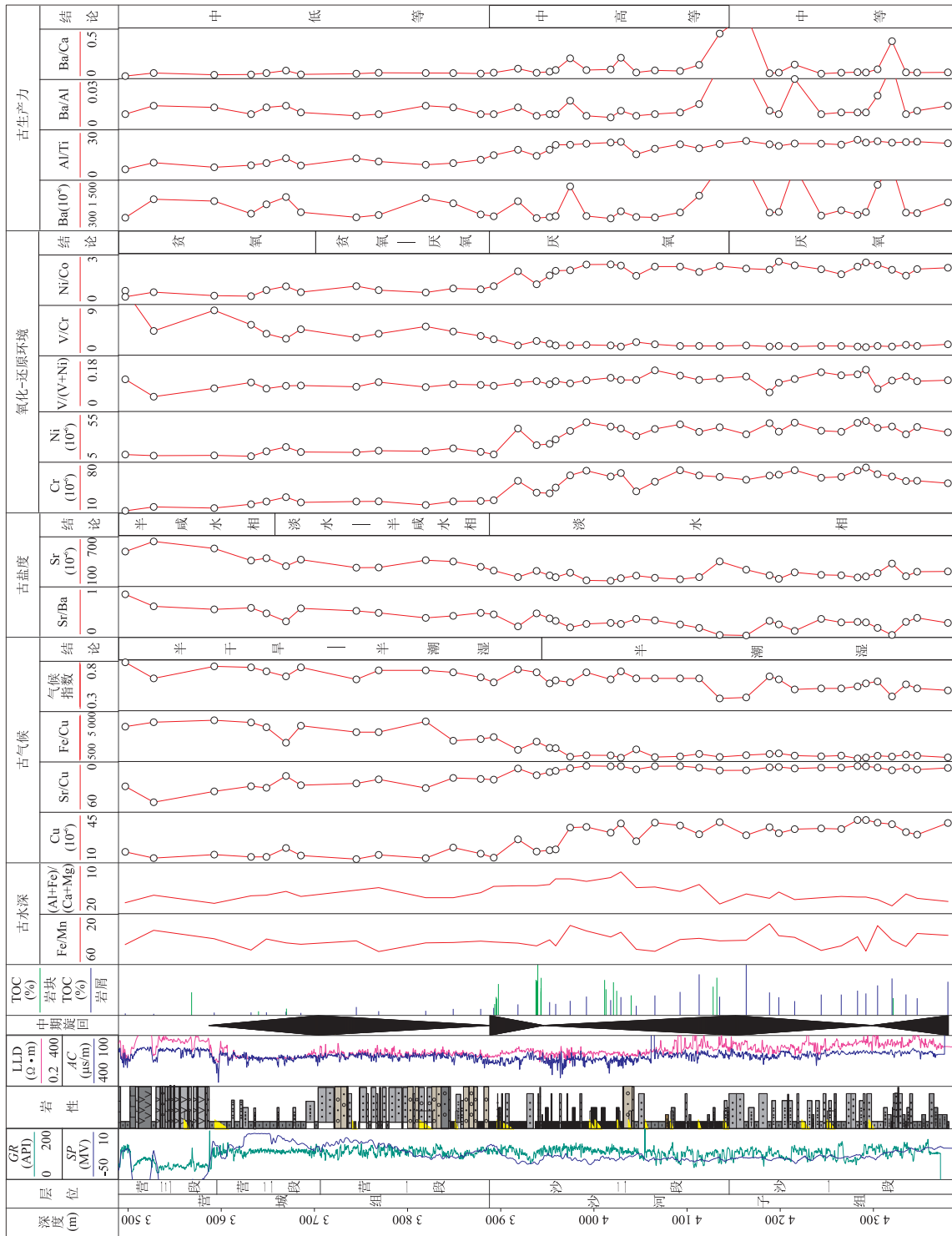


图 8 龙凤山地区 B2 井下白垩统湖相烃源岩元素标志与古环境恢复
 Fig. 8 Identification of the paleoenvironment by the vertical distribution of element contents in the lower Cretaceous lacustrine source rocks of B2 well from Longfengshan area, Changling depression

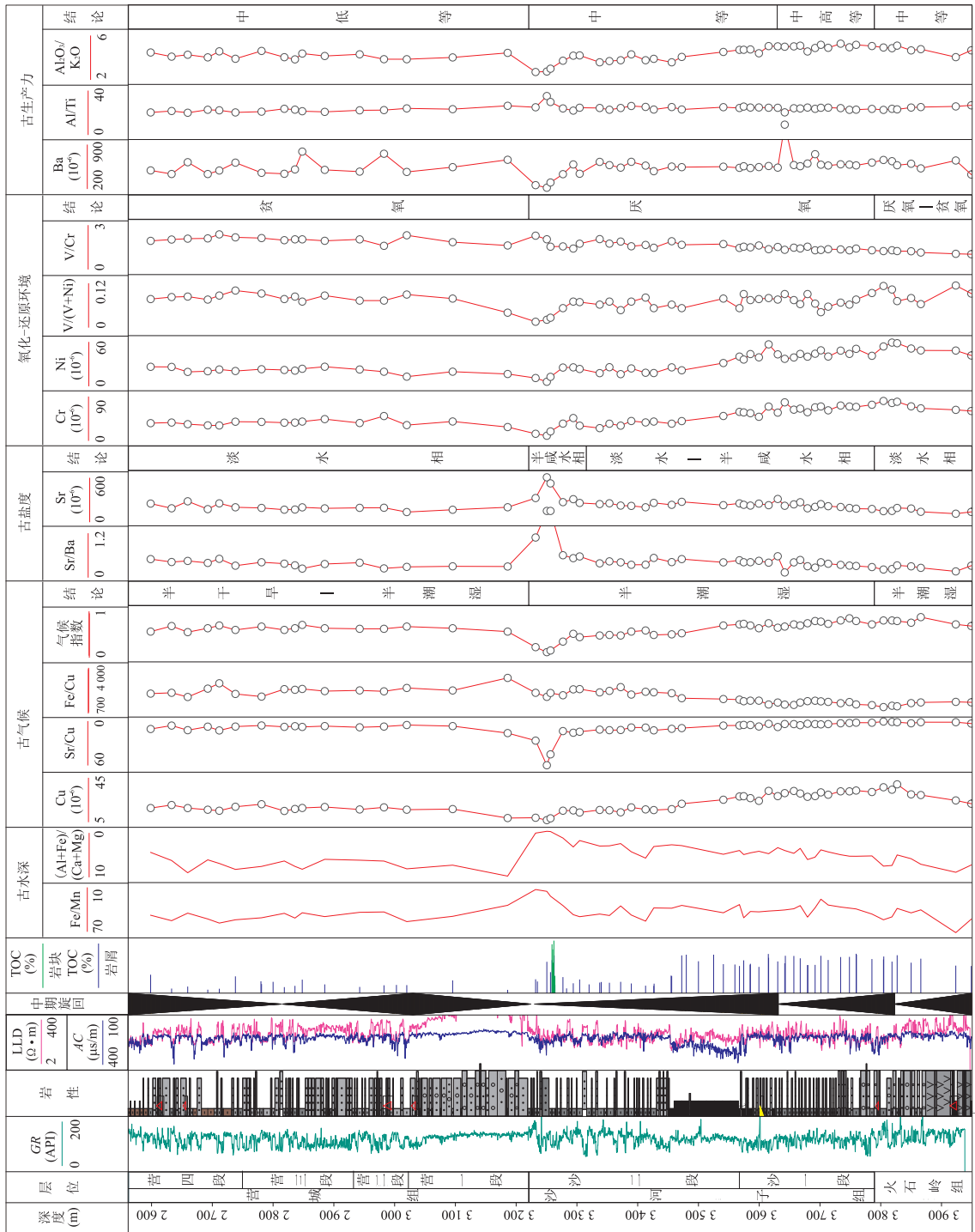


图 9 伏龙泉地区SL3井下白垩统湖相烃源岩元素标志与古环境恢复
 Fig. 9 Identification of the paleoenvironment by the vertical distribution of element contents in the lower Cretaceous lacustrine source rocks of SL3 well from Fulongsquan area, Changling depression

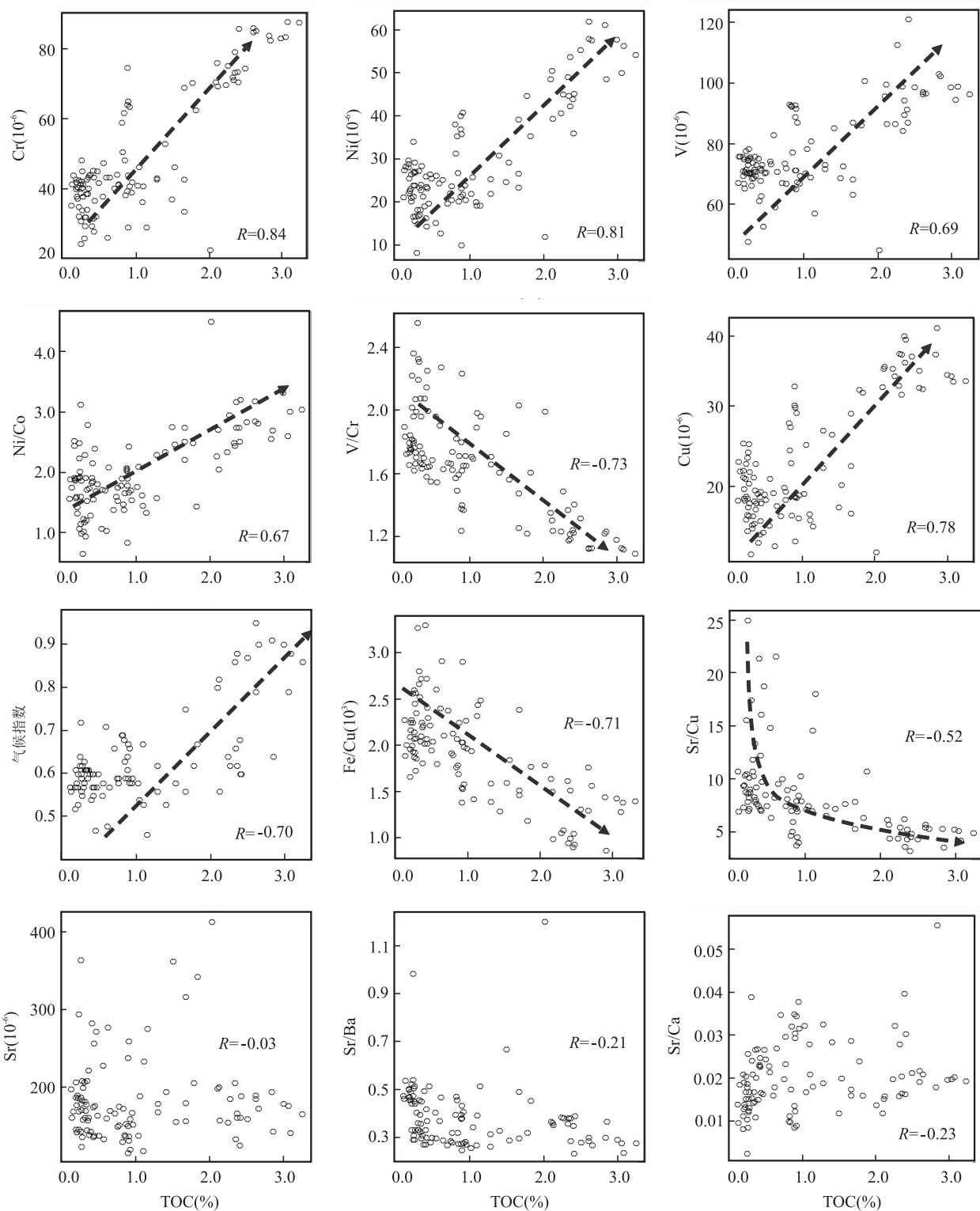


图 10 长岭断陷下白垩统烃源岩微量元素含量及其比值与 TOC 关系

Fig.10 Relationship between the element contents or its ratio and TOC in lacustrine source rocks of the lower Cretaceous samples from Changling depression

反映氧化还原条件的参数:微量元素含量 Cr、Ni、V,元素含量比 Ni/Co 与 V/Cr;反映古气候的参数:微量元素含量 Cu,古气候指数,元素含量比 Fe/Cu 与 Sr/Cu;反映古盐度的参数:微量元素含量 Sr,元素含量比 Sr/Ba 与 Sr/Ca

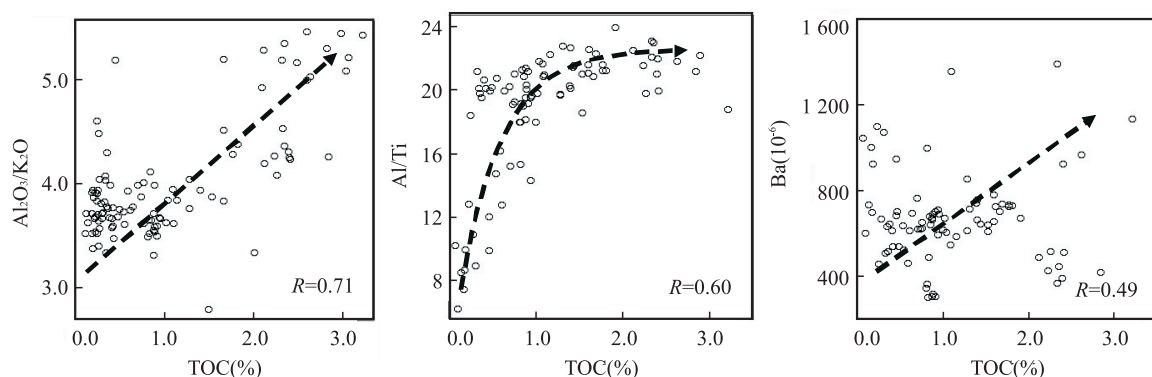


图 11 长岭断陷下白垩统烃源岩反映古生产力的微量元素参数与 TOC 关系

Fig.11 Relationship between TOC and trace element parameters reflected paleoproductivity of lacustrine source rocks of the lower Cretaceous samples from Changling depression

6 结论与认识

(1)从火石岭期至沙河子期,再到营城期,长岭断陷经历了古水深从变深到变浅,古气候从潮湿一半潮湿气候到半干旱气候,古盐度从淡水相到半咸水相,湖泊水体还原性从增强到减弱的古环境演化过程。沙河子期和营城期,长岭断陷古环境表现出明显的分带性,而且沙河子组烃源岩原始生产力总体上高于营城组烃源岩,其生烃潜力更大。

(2)反映古气候与湖泊水体还原性的微量元素参数与样品 TOC 相关性大,而反映古盐度的微量元素参数与样品 TOC 相关性较小,古气候和氧化还原条件是控制长岭断陷下白垩统湖相烃源岩发育的主要环境因素;发育于潮湿气候、缺氧以及均衡补偿阶段、较高古生产力条件下的沙河子组二段优质烃源岩最发育,分布较广,其次为沙河子组一段和火石岭组二段,营城组优质烃源岩在南部和东部地区较发育,分布相对局限。

References

Carroll, A. R., Bohacs, K. M., 2001. Lake-Type Controls on Petroleum Source Rock Potential in Nonmarine Basins. *AAPG Bulletin*, 85(6):1033–1053.

Demaison, G.J., Moore, G.T., 1980. Anoxic Environments and Oil Source Bedgenesis. *AAPG Bulletin*, 64(8):1179–1209.

Deuser, W.G., Brewer, P.G., Jickells, T.D., et al., 1983. Biological Control of the Removal of Abiogenic Particles from the Surface Ocean. *Science*, 219(4583):388–391.

Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Smith, A.G., et al., 2004. A New Geological Time Scale, with Special Reference to Precambrian and Neogene. *Episodes*, 27(2):83–100.

Hatch, J. R., Leventhal, J. S., 1992. 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, USA. *Chemical Geology*, 99(1/3):65–82.

Hunt, J. M., 1979. *Petroleum Geochemistry and Geology*. W. H. Freeman and Company, New York.

Ibach, L. E. J., 1982. Relationship between Sedimentation Rate and Total Organic Carbon Content in Ancient Marine Sediments. *AAPG Bulletin*, 66(2):170–188.

Jia, J. L., Liu, Z. J., Achim, B., et al., 2014. Major Factors Controlling Formation of Oil Shale in Nenjiang Formation of Songliao Basin. *Earth Science*, 39(2):174–186 (in Chinese with English abstract).

Jia, Y. Y., Xing, X. J., Sun, G. Q., et al., 2015. The Paleogene-Neogene Paleoclimate Evolution in Western Sector of Northern Margin of Qaidam Basin. *Earth Science*, 40(12):1954–1967 (in Chinese with English abstract).

Jones, B., Manning, D. A. C., 1994. Comparison of Geological Indices Used for the Interpretation of Palaeoredox Conditions in Ancient Mudstones. *Chemical Geology*, 111(111):111–129.

Katz, B. J., 1990. Controls on Distribution of Lacustrine Source Rocks through Time and Space. *AAPG Memoir*, 24(10):61–76.

Kelts, K., 1991. Sedimentary Environment in Lacustrine Source Rocks. In: Wang, P. X., Liu, C. L., eds., *Memoir of Palaeolimnology*. China Ocean Press, Beijing, 68–77 (in Chinese).

Kryc, K. A., Murray, R. W., Murray, D. W., 2003. Al-to-Oxide and Ti-to-Organic Linkages in Biogenic Sediment: Relationships to Paleo-Export Production and Bulk Al/Ti. *Earth and Planetary Science Letters*, 211(1–2):

125—141.

- Li, H., Lu, J. L., Wang, B. H., et al., 2016. Reservoir-Forming Mechanism and Its Exploration Potential of Songliao Basin in the Southern Area of Changling Depression. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 40(3): 44—54 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. L., Chen, D. J., 2003. Summary of Quantified Research Method on Paleosalinity. *Petroleum Geology and Recover Efficiency*, 10(5): 1—3 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G., Zhou, D. S., 2007. Application of Microelements Analysis in Identifying Sedimentary Environment—Takin Qianjiang Formation in the Jiangnan Basin as an Example. *Petroleum Geology & Experiment*, 29(3): 307—314 (in Chinese with English abstract).
- Ma, C., 2009. Initial Conference of the Ecostratigraphic Framework and Primary Productivity, Silurian, Upper Yangtze Region, China (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Meyers, P. A., Arnaboldi, M., 2005. Trans-Mediterranean Comparison of Geochemical Paleoproductivity Proxies in a Mid-Pleistocene Interrupted Sapropel. *Palaeogeography, Palaeochimatology, Palaeoecology*, 222(3—4): 313—328.
- Mongenet, T., Tribovillard, N. P., Desprairies, A., et al., 1996. Trace Elements Palaeoenvironmental Markers in Strongly Mature Hydrocarbon Source Rocks: The Cretaceous La Luna Formation of Venezuela. *Sedimentary Geology*, 103(103): 23—37.
- Myrbo, A., Shapley, M. D., 2006. Seasonal Water-Column Dynamics of Dissolved Inorganic Carbon Stable Isotopic Composition in Small Hard Water Lakes in Minnesota and Montana. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 70(11): 2699—2714.
- Qin, J. Z., 2005. Hydrocarbon Source Rocks of China. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Ren, J. L., Zhang, J., Liu, S. M., 2005. A Review on Aluminum to Titanium Ratio as a Geochemical Proxy to Reconstruct Paleoproductivity. *Advances in Earth Science*, 20(12): 1314—1320 (in Chinese with abstract).
- Song, L. J., Liu, C. Y., Zhao, H. G., et al., 2016. Geochemical Characteristics, Sedimentary Environment and Tectonic Setting of Huangqikou Formation, Ordos Basin. *Earth Science*, 41(8): 1295—1308 (in Chinese with abstract).
- Song, M. S., 2005. Sedimentary Environment Geochemistry in the Shasi Section of Southern Ramp, Dongying Depression. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 25(1): 67—73 (in Chinese with abstract).
- Wang, C. L., Liu, C. L., Hu, H. B., et al., 2012. Sedimentary Characteristics and Its Environmental Significance of Salt-Bearing Strata of the Member 4 of Paleocene Shashi Formation in Southern Margin of Jiangling Depression, Jiangnan Basin. *Journal of Palaeogeography*, 14(2): 165—175 (in Chinese with abstract).
- Wang, J., Wang, Q., Zhong, X. M., et al., 2015. Characteristics of High-Quality Hydrocarbon Source Rocks and Their Contributions to Reservoirs in the Erlian Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 37(5): 642—647 (in Chinese with abstract).
- Wen, H. G., Zheng, R. C., Tang, F., et al., 2008. Reconstruction and Analysis of Paleosalinity and Paleoenvironment of the Chang 6 Member in the Gengwan Region, Ordos Basin. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 28(1): 114—120 (in Chinese with abstract).
- Yang, H., Zhang, W. Z., 2005. Leading Effect of the Seventh Member High-Quality Source Rock of Yanchang Formation in Ordos Basin during the Enrichment of Low-Penetrating Oil-Gas Accumulation: Geology and Geochemistry. *Geochimica*, 34(2): 147—154 (in Chinese with abstract).
- Yao, Y. J., Lü, C. L., Kang, Y. S., et al., 2013. Characteristics of Hydrocarbon Source Rocks and Their Main Controlling Factors in Southeast Asia. *Earth Science*, 38(2): 368—378 (in Chinese with abstract).
- Zhang, L. Y., 2008. The Progress on the Study of Lacustrine Source Rocks. *Petroleum Geology & Experiment*, 30(6): 591—595 (in Chinese with abstract).
- Zhang, Y. S., Yang, Y. Q., Qi, Z. X., et al., 2003. Sedimentary Characteristics and Environments of the Salt-Bearing Series of Qianjiang Formation of the Paleogene in Qianjiang Sag of Jiangnan Basin. *Journal of Palaeogeography*, 5(1): 29—35 (in Chinese with abstract).
- Zhao, Z. Y., Zhao, J. H., Wang, H. J., et al., 2007. Distribution Characteristics and Applications of Trace Elements in Junggar Basin. *Natural Gas Exploration & Development*, 30(6): 30—32 (in Chinese with abstract).
- Zheng, R. C., Liu, M. Q., 1999. Study on Paleosalinity of Chang-6 Oil Reservoir Set in Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 20(1): 20—25 (in Chinese with abstract).

附中文参考文献

- 贾建亮, 刘招君, Achim, B., 等, 2014. 松辽盆地嫩江组油页岩发育控制因素. *地球科学*, 39(2): 174—186.
- 贾艳艳, 邢学军, 孙国强, 等, 2015. 柴北缘西段古—新近纪古气候演化. *地球科学*, 40(12): 1954—1967.
- Kelts, K., 1991. 湖相烃源岩的沉积环境: 绪论. 见: 汪品先,

- 刘传联编,古湖泊论文集.北京:海洋出版社,68—77.
- 李浩,陆建林,王保华,等,2016.长岭断陷南部地区断陷层油气成藏机制及勘探潜力.中国石油大学学报(自然科学版),40(3): 44—54.
- 李进龙,陈东敬,2003.古盐度定量研究方法综述.油气地质与采收率,10(5): 1—3.
- 刘刚,周东升,2007.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.石油实验地质,29(3): 307—314.
- 马超,2009.上扬子地区志留系生态地层格架及其初级生产力的初步探讨(硕士学位论文).北京:中国地质大学.
- 秦建中,2005.中国烃源岩.北京:科学出版社.
- 任景玲,张经,刘素美,2005.以 Al /Ti 比值为地球化学示踪剂反演海洋古生产力的研究进展.地球科学进展,20(12): 1314—1320.
- 宋立军,刘池阳,赵红格,等,2016.鄂尔多斯地区黄旗口组地球化学特征及其沉积环境与构造背景.地球科学,41(8): 1295—1308.
- 宋明水,2005.东营凹陷南斜坡沙四段沉积环境的地球化学特征.矿物岩石,25(1): 67—73.
- 王春连,刘成林,湖海兵,等,2012.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.古地理学报,14(2): 165—175.
- 王建,王权,钟雪梅,等,2015.二连盆地优质烃源岩发育特征及成藏贡献.石油实验地质,37(5): 642—647.
- 文华国,郑荣才,唐飞,等,2008.鄂尔多斯盆地耿湾地区长 6 段古盐度恢复与古环境分析.矿物岩石,28(1): 114—120.
- 杨华,张文正,2005.论鄂尔多斯盆地长 7 段优质油源岩在低渗透油气藏富集中的主导作用:地质地球化学特征.地球化学,34(2): 147—154.
- 姚永坚,吕彩丽,康永尚,等,2013.东南亚地区烃源岩特征与主控因素.地球科学,38(2): 368—378.
- 张林晔,2008.湖相烃源岩研究进展.石油实验地质,30(6): 591—595.
- 张永生,杨玉卿,漆智先,等,2003.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.古地理学报,5(1): 29—35.
- 赵增义,赵建华,王海静,等,2007.准噶尔盆地微量元素的分布特征及其应用.天然气勘探与开发,30(6): 30—32.
- 郑荣才,柳梅青,1999.鄂尔多斯盆地长 6 油层组古盐度研究.石油与天然气地质,20(1): 20—25.