

长岭断陷南部断陷层湖相优质烃源岩发育控制因素

李浩¹, 陆建林¹, 左宗鑫¹, 王保华¹, 李瑞磊², 刘娅昭¹

(1. 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; 2. 中国石化东北油气分公司 勘探开发研究院, 吉林 长春 130062)

摘要:明确湖相优质烃源岩形成的主控因素对其非均质性的刻画意义重大。对松辽盆地长岭断陷南部地区沙河子组和营城组两套烃源岩进行岩石学、地球化学和层序地层学分析, 并利用元素含量比 Al/Ti 值评估烃源岩古生产力, 同时利用 V/Cr、V/(V+Ni)、Sr 丰度、Sr/Ba、Sr/Cu 和古气候指数来评估沉积环境。研究表明, 长岭断陷断陷层优质烃源岩层位(沙河子组上部)发育于原始生产力中等、气候潮湿、低盐度、沉积速率较低的高位域和湖侵域, 具有富集 Al、Ba、Cu、Cr、V 和 Ni, 亏损 Mn、Pb 和 S 的特征; 而差烃源岩层位(营城组)发育于原始生产力较低、气候半干燥、半咸水、沉积速率较高的低位域, 具有富集 Co、Sr 和 V, 亏损 Al、Ba、Cr、Cu、Mn、Pb 和 Ni 的特征。由此认为, 体系域控制了烃源岩的宏观分布, 中等-好的初级生产力是优质烃源岩发育的首要条件, 而潮湿气候、较低的盐度和沉积速率促进了有机质的富集。

关键词:微量元素; 古生产力; 沉积环境; 优质烃源岩; 长岭断陷; 松辽盆地

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Controlling factors of high-quality lacustrine hydrocarbon source rocks in southern Changling Depression

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

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

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

Abstract: Heterogeneity study of lacustrine source rocks relies heavily on a deeper understanding of the major controlling factors on their formation. Geochemical, petrological and sequence stratigraphy analyses of two sets of source rocks (K_1sh and K_1yc) in southern Changling Depression, Soliao Basin, reveal that multiple factors played roles in shaping the distribution of organic matters there. Al/Ti ratio was used to evaluate their paleoproductivity. Parameters like V/Cr, V/(V+Ni), Sr concentration, Sr/Ba, and Sr/Cu as well as paleoclimatic indexes, were also employed to study their sedimentary settings. Results show that high-quality source rocks (mainly in upper Shahezi Formation) were developed in a highstand system tract and lacustrine transgressive system tract that featured in medium paleoproductivity, humid paleoclimate, low paleosalinity and low deposition rate. They are rich in Al, Ba, Cu, Cr, V and Ni, but lack of Mn and S. Meanwhile, low-quality source rocks (mainly found in the Yingcheng Formation), were developed in lowstand system tract (LST) that was characterized by low paleoproductivity, semi-arid paleoclimate, high paleosalinity and high deposition rate. They are abundant in Co, Sr and V but lack of Al, Ba, Cr, Cu, Mn and Ni. We therefore suggest that, in the study area, (1) system tracts controlled the distribution of source rocks, (2) moderate-to-good primary productivity was a critical precondition for the development of high-quality source rocks, and (3) humid climate, low salinity as well as favorable sedimentation rate, were the reasons behind organic matter accumulations.

Key words: trace element, paleoproductivity, sedimentary setting, high-quality hydrocarbon source rock, Changling Depression, Songliao Basin

湖相烃源岩具有非均质性特征。随着研究的深入, 学者们逐渐认识到优质烃源岩是形成大、中型油田的物质基础^[1-2]。优质烃源岩在生烃层系中往往厚度

不大, 但有机质丰度高^[3-4]。关于湖相优质烃源的形成机制及控制因素问题已经受到人们普遍关注, 并提出了多种观点。“生产力模式”强调富有机质的形成

收稿日期: 2014-10-27; 修订日期: 2015-02-27。

第一作者简介: 李浩(1984—), 男, 博士, 石油地质。E-mail: lh107033@163.com。

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”(P13073)。

是由于表层水体具较高原始生产力,只要生产力高,即使在含氧的水底也会使有机质来不及氧化而富集形成烃源岩^[5-8]。“保存模式”强调由于地理隔离或生物作用等因素引起水体缺氧,从而导致富有机质地层形成^[9-12];沉积速率对烃源岩形成影响颇为复杂,过高或过低的沉积速率都不利于优质烃源岩的形成,总有机碳含量(TOC)与沉积速率之间呈非线性关系^[13];Carroll等认为湖盆的类型控制了湖相烃源岩油气生成的潜力,并把全球湖相烃源岩划分为河湖相、波动深水相和蒸发相3种类型^[14]。原始生产力、保存条件、沉积速率和湖盆类型等多个因素相互作用,增加了对优质烃源岩形成机制认识的难度^[15-16]。

近两年来,长岭断陷南部地区的断陷层(登娄库组以下地层)勘探取得较大进展。2013年,在该地区部署的B2、B201和S104三口探井在营城组和沙河子组均获得工业油流和较好油气显示。其中,B2井沙河子组压后最高日产气11 116 m³,并含少量轻质油;营城组压后日产气11 995 m³;S104井在沙河子组获低产油流,压后日产油0.65 m³。通过油-源对比,B2井原油与沙河子组泥岩的规则甾烷分布特征相似,均具有较高的C₂₇甾烷含量,以水生生物来源为主,表明二者具有亲缘性。这进一步证实了长岭断陷南部地区断陷层湖相烃源岩的存在。目前,对这套湖相烃源岩发育的控制因素尚不清楚。通过岩石学、地球化学分析,借助于

古生产力、氧化-还原条件、古盐度、沉积速率等信息,结合古地理格局、湖平面相对变化和生境型资料等,分析优质烃源岩发育的控制因素,有助于认识其分布规律,发现新的优质烃源岩发育的地区和层系,以期扩大长岭断陷油气勘探的发展空间。

1 地质背景

长岭断陷位于松辽盆地南部的中央凹陷区(图1a),为一北西走向的断、凹相间的典型断陷盆地。断陷层由西至东分别为苏公坨-北正镇断阶带、长岭次凹、达尔罕断凸带、前神子-查干花次凹、大老爷府-双坨子凸起带和伏龙泉次凹,整体呈“三凸三凹”的构造格局(图1b)。

长岭断陷南部地区主要包括长岭南次凹(又称龙凤山次凹)和东岭斜坡带,区域上受控于南部的苏公坨断层和北正镇断层等边界断层,形成西断东超的箕状断陷结构,大致经历了初始断陷期(火石岭期)、强烈断陷期(沙河子期)和断-拗萎缩期(营城期)3个演化阶段。本区断陷层发育沙河子组和营城组两套烃源岩。其中,沙河子组是在早白垩世长岭断陷形成初期沉积的一套灰黑色泥岩夹煤层的辫状河三角洲相与湖沼相碎屑岩沉积。该套烃源岩主要发育于沙河子组顶部,沉积中心位于B2井北部附近地区,厚度在100~

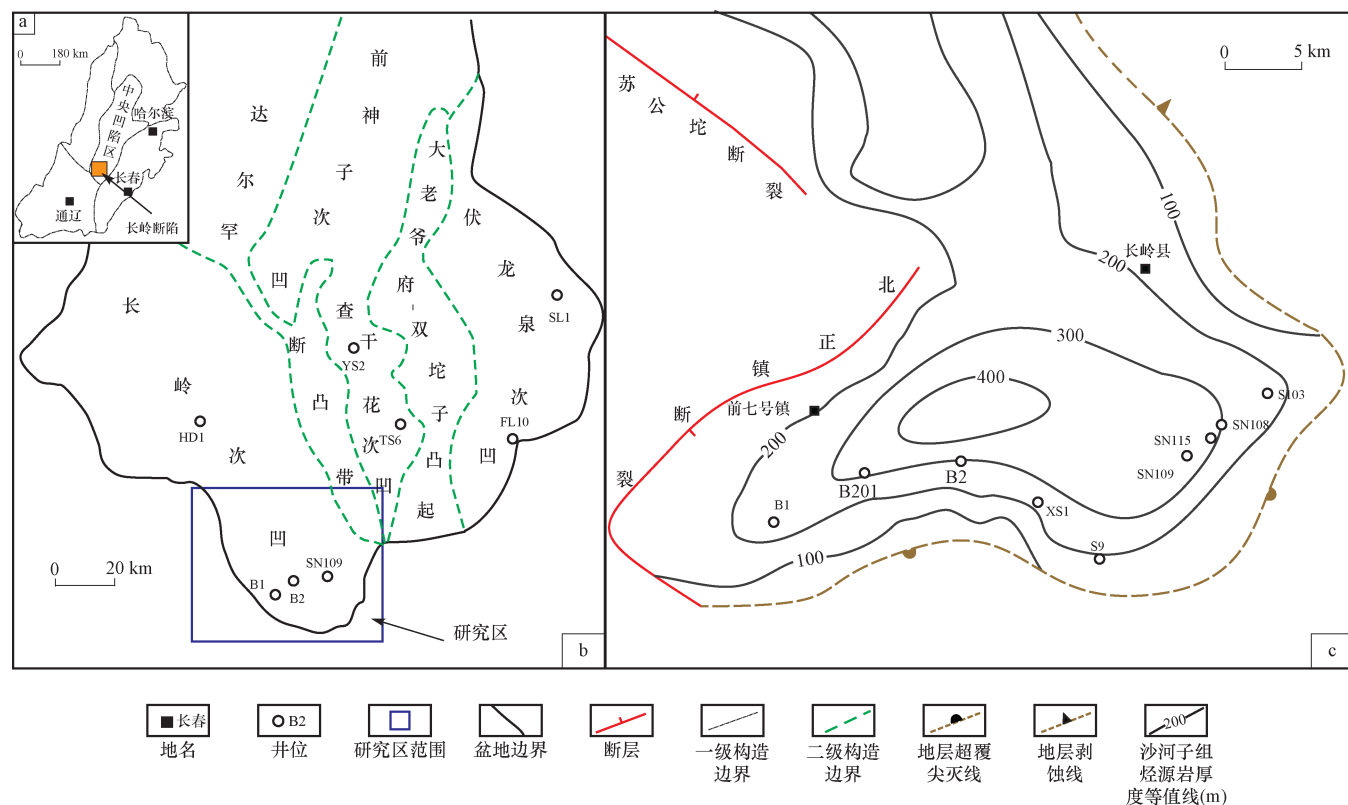


图1 长岭断陷地理位置及其南部地区沙河子组烃源岩等厚图

Fig. 1 Location of the Changling Depression and isopach map of the K_{1sh} source rock in south of the depression

a. 长岭断陷地理位置;b. 研究区位置;c. 研究区沙河子组烃源岩等厚图

400 m(图1c),泥地比约30%~60%,*TOC*(有机碳含量)一般为0.6%~2.0%,有机质类型主要为Ⅱ₁-Ⅱ₂型,以高成熟-过成熟为主。营城组沉积期,湖盆面积扩大。在其早期,发育扇三角洲相沉积,深灰色泥岩与灰色细砂岩、杂色砂砾岩互层,表现为沉积物快速堆积、沉积相带变化迅速。烃源岩在龙凤山次凹地区厚度为180~350 m,泥地比约35%~70%,*TOC*一般为0.4%~1.5%,有机质类型主要为Ⅱ₁-Ⅲ型,基本达到成熟-高成熟阶段;营城组晚期,主要发育火山喷发岩,烃源岩欠发育。

2 样品处理与测试方法

样品采自长岭断陷南部龙凤山地区的B2井、B1井以及东岭斜坡带的SN108井、SN115井。在其断陷层段共采集岩心样品14个,其中沙河子组和营城组各7个。样品岩性主要为灰色泥岩和深灰色泥岩。

对样品分别进行元素分析、有机碳含量测定和饱和烃色谱-质谱分析。其中,微量元素分析碎样至200目以下,称重0.05 g加入0.25 g偏硼酸锂(Li-BO₂)混匀,在480℃熔融,加入10% HCl定容至50 mL,再上机测试。元素分析采用美国VARIAN公司的Vista MPX电感耦合等离子体发射光谱仪,其波长范围为175~785 nm,分辨率为0.009 nm(一级),检测限为10⁻⁹级,检测依据为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》。总有机碳含量的测试利用美国LECO公司的CS-200碳硫分析仪完成。色谱-质谱生标定量分析利用59731色谱-质谱仪完成。各项测试均在中国石化无锡石油地质研究所实验研究中心完成,主要测试数据见表1和表2。

3 结论与分析

3.1 生产力与烃源岩的形成

生物作用过程影响沉积物中Al元素的富集,加之Al化学性质稳定,不易受后期成岩作用和风化作用的影响^[17];此外,Ba元素进入盆地后易沉淀富集,且不易迁移,深海中Ba的高含量与生物聚集有关^[18]。通过热解法恢复了原始有机质丰度(表2),在此基础上建立Ba元素含量与原始有机碳含量(*TOC*)的关系(图2),Ba累积量与原始有机质丰度具有较好的正相关性。此外,元素含量比Al/Ti值、Ba/Ca值和Ba/Al值常用作原始生产力计算的指标^[19-21]。这些指标一般适用于生源组分高、受陆源影响小的古海洋地区;但对于受陆源影响较大的古湖泊,生产力恢复难度大。

因此,古湖泊生产力恢复以定性分析为主。规则甾烷特征(图3)表明,长岭断陷南部地区营城组湖相烃源岩以陆源动植物输入为主,受陆源影响大,表现在Al/Ti比值与原始有机质丰度相关性较差;而长岭南次凹的沙河子组则以水生浮游动植物为主,受陆源影响相对较小,表现在Al/Ti比值与原始有机质丰度具有较好的负相关性(图4)。因此,利用Al/Ti值定性评价研究区沙河子组烃源岩的原始古生产力是可行的。以B2井为例,钻井揭示,在沙河子组上部埋深3 875.0~4 140.0 m井段为一套黑色泥岩,从上至下4个样品点的实测*TOC*值依次为0.85%,1.18%,2.66%,1.83%,微量元素Al/Ti值依次为27.0%,21.7%,23.9%,24.2%,表明这套优质烃源岩原始生产力由上至下具有先增大后减小的特征。

3.2 沉积环境与烃源岩的形成

沉积环境包括古湖泊水体的氧化还原性、古盐度和古气候等,它是优质烃源岩形成的重要控制因素。

3.2.1 氧化还原条件

Hunt^[22]认为,水底缺氧环境有利于有机质的保存。在地质过程中,V和Cr等元素在不同的氧化还原条件下会产生分异。在缺氧条件下,V和Cr会扩散到沉积物中形成自生矿物沉淀。因此,元素含量比V/Cr和V/(V+Ni)可以作为判别古湖泊氧化还原环境的参数。其中,富氧环境V/Cr<2.00,V/(V+Ni)<0.46;贫氧环境2.00<V/Cr<4.25,0.46<V/(V+Ni)<0.60;厌氧环境V/Cr>4.25,V/(V+Ni)>0.60^[23]。参考该标准,沙河子组和营城组泥岩样品的V/(V+Ni)值均大于0.66,平均值均为0.76,V/Cr平均值各为1.90和1.80,表明沙河子组和营城组均为贫氧-厌氧环境(图5)。在整体贫氧-厌氧环境背景下,还原性的增强并不能显著提高烃源岩有机质丰度,表现为V/(V+Ni)比值与有机碳含量(*TOC*)的正相关性并不明显(图6),因此,氧化还原性并不是决定长岭断陷沙河子组和营城组*TOC*差异性的决定性因素。也就是说,在整体还原条件下,还原性的增强并不能显著促进优质烃源岩的形成。

3.2.2 古盐度

古盐度是地质历史中沉积环境的一个重要特征。记录在沉积物中的Sr丰度和Sr/Ba含量比值与古盐度呈明显正相关性,为古盐度判别的灵敏标志^[24-25]。根据古盐度判别标准^[26-27](表3),认为研究区断陷层古湖泊水体盐度分布有如下特征:

1) 沙河子组沉积期,从湖泊沉积中心(深凹带)向

表 1 长岭断陷南部断陷层烃源岩元素含量数据
Table 1 Statistics of trace elements in samples from the source rocks in southern Changling Depression

层位	样号	岩性	深度/m	元素含量/10 ⁻⁶																																					
				Al	Ba	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	K	Li	Mg	Mn	Pb	Na	Ni	P	Sr	Ti	V	Zn	Zr																		
沙河子组	B2-1	灰色泥岩	3 895.70	102 761.31	456.86	3 577.03	20.53	84.30	37.99	46 269.60	31 256.80	52.34	12 517.30	590.425	17.79	4 624.97	36.43	517.53	204.75	4 738.31	136.45	182.70	60.95																		
	B2-2	灰色泥岩	3 893.50	116 340.85	473.88	3 601.80	17.05	71.54	31.86	35 790.89	34 139.30	35.17	10 029.68	574.311	<10.54	3 125.03	37.11	698.38	261.02	4 307.75	129.32	76.01	114.92																		
	B2-3	黑灰色泥岩	3 939.16	67 204.81	408.96	6 748.74	22.79	66.37	43.15	36 928.32	17 885.50	58.23	9 405.45	540.249	<10.54	7 526.84	52.61	327.00	201.49	2 812.85	134.03	78.26	31.50																		
	B2-4	灰黑色泥岩	3 943.15	94 906.46	550.81	2 600.97	32.00	95.07	45.81	31 027.46	29 798.40	48.65	12 161.66	382.179	36.97	9 160.36	85.64	491.54	257.41	3 927.88	168.24	149.36	39.13																		
	B1-1	黑色泥岩	2 736.19	90 085.43	804.83	7 708.00	13.66	36.56	10.84	32 397.97	21 494.50	38.90	6 497.18	554.797	11.83	12 890.55	16.63	615.31	415.59	4 305.23	63.20	98.19	120.44																		
	B1-2	灰黑色泥岩	2 737.79	98 854.94	897.45	5 100.84	13.21	31.00	12.13	19 444.04	30 281.40	48.15	5 130.17	329.582	<10.54	12 554.90	14.90	498.03	407.67	4 607.31	68.32	92.35	72.69																		
	B1-3	灰黑色泥岩	2 740.79	92 916.96	847.23	7 260.32	18.52	33.77	12.27	29 991.16	22 535.10	39.79	6 235.54	577.935	11.80	13 324.84	21.49	594.94	456.17	4 524.73	67.54	100.18	98.55																		
	平均值			94 724.39	634.29	5 228.24	19.68	59.80	27.72	33 121.35	26 770.14	45.89	8 853.85	507.070		9 029.64	37.83	534.68	314.87	4 174.87	109.59	111.01	76.88																		
营城组	B1-4	黑色泥岩	2 237.20	91 426.67	636.96	2 905.80	22.94	41.49	19.32	35 396.81	31 139.80	53.49	8 746.32	261.576	19.96	12 374.89	24.99	576.58	392.99	4 444.25	89.09	148.53	130.98																		
	B1-5	灰黑色泥岩	2 243.23	92 435.43	648.32	3 096.92	16.45	39.63	15.40	41 464.43	29 805.80	57.96	9 505.98	478.389	14.79	13 043.85	21.16	568.79	384.89	4 161.45	77.21	110.09	128.84																		
	SN108-1	灰色泥岩	2 366.85	81 733.98	440.63	23 080.28	32.76	59.53	33.45	57 563.34	35 237.70	47.05	13 341.58	1 308.245	<10.54	8 092.30	46.81	891.94	428.81	3 744.54	95.09	108.55	80.09																		
	SN108-2	灰色泥岩	2 368.50	89 561.10	488.17	18 983.27	23.75	66.35	34.31	46 624.05	37 787.00	54.24	13 032.52	646.984	<10.54	7 133.19	41.89	955.58	431.41	3 991.90	99.89	129.63	99.30																		
	SN108-3	灰色泥岩	2 371.20	88 174.46	466.85	3 596.05	5.19	37.39	18.12	11 426.06	30 815.10	51.27	3 389.30	158.073	<10.54	19 832.78	12.05	661.58	328.30	4 505.95	71.55	65.25	66.78																		
	SN115-1	深灰色泥岩	2 157.35	100 405.32	399.34	2 945.59	9.31	39.04	24.32	17 260.81	35 509.30	43.34	4 140.19	170.125	13.28	11 509.61	21.58	593.49	331.33	4 509.91	68.64	63.15	101.16																		
	SN115-2	灰色泥岩	2 285.72	94 953.02	450.64	6 311.12	10.99	47.78	25.83	24 214.47	34 276.70	44.72	6 222.98	247.156	<10.54	11 074.55	23.87	675.16	347.17	4 669.22	74.43	89.39	77.69																		
	平均值			91 241.43	504.42	8 702.72	17.34	47.32	24.39	33 421.42	33 510.20	50.30	8 339.84	467.220		11 865.88	27.48	703.30	377.84	4 289.60	82.27	102.08	97.83																		
	泥岩克拉克值			580.00				19.00				90.00				45.00				850.000				20.00		68.00				350.00				60.00				71.00			

表 2 长岭断陷南部断陷层特征微量元素含量比值和有机碳含量 (TOC) 数据

Table 2 Statistics of trace element ratios and TOC in samples from the source rocks in southern Changling Depression

层位	样号	岩性	深度/m	特征微量元素含量比														古气候指数	TOC/%	有机碳回复系数	原始 TOC/%		
				V/(V + Ni)	V/Ni	V/Cr	Ni/Co	Sr/Ba	Sr/Ca	Ca/Mg	V/Co	Zn/Co	Sr/Cu	Ba/Al	Al/Ti	Ba/Ca	Mn/Fe					K ₂ O/Al ₂ O ₃	Zr/Ba
沙河子组	B2-1	灰色泥岩	3 895.70	0.79	3.75	1.62	1.77	0.45	0.06	0.29	6.65	8.90	5.39	0.004 4	21.69	0.13	0.01	0.19	0.13	0.90	1.18	1.40	1.65
	B2-2	灰色泥岩	3 893.50	0.78	3.48	1.81	2.18	0.55	0.07	0.36	7.58	4.46	8.19	0.004 1	27.01	0.13	0.02	0.19	0.24	0.72	0.85	1.42	1.21
	B2-3	黑灰色泥岩	3 939.16	0.72	2.55	2.02	2.31	0.49	0.03	0.72	5.88	3.43	4.67	0.006 1	23.89	0.06	0.01	0.17	0.08	0.90	2.66	1.35	3.59
	B2-4	灰黑色泥岩	3 943.15	0.66	1.96	1.77	2.68	0.47	0.10	0.21	5.26	4.67	5.62	0.005 8	24.16	0.21	0.01	0.20	0.07	0.59	1.83	1.37	2.51
	B1-1	黑色泥岩	2 736.19	0.79	3.80	1.73	1.22	0.52	0.05	1.19	4.63	7.19	38.35	0.008 9	20.92	0.10	0.02	0.15	0.15	0.68	2.86	1.23	3.52
	B1-2	灰黑色泥岩	2 737.79	0.82	4.58	2.20	1.13	0.45	0.08	0.99	5.17	6.99	33.62	0.009 1	21.46	0.18	0.02	0.20	0.08	0.37	2.10	1.25	2.62
	B1-3	灰黑色泥岩	2 740.79	0.76	3.14	2.00	1.16	0.54	0.06	1.16	3.65	5.41	37.18	0.009 1	20.54	0.12	0.02	0.15	0.12	0.62	2.03	1.25	2.54
	平均值			0.76	3.32	1.88	1.78	0.50	0.07	0.70	5.54	5.86	19.00	0.004 1	22.81	0.13	0.02	0.18	0.12	0.68	1.93	1.32	2.52
营城组	B1-4	黑色泥岩	2 237.20	0.78	3.56	2.15	1.09	0.62	0.14	0.33	3.88	6.48	20.34	0.007 0	20.57	0.22	0.01	0.22	0.21	0.65	3.65	1.01	1.31
	B1-5	灰黑色泥岩	2 243.23	0.78	3.65	1.95	1.29	0.59	0.12	0.33	4.69	6.69	24.99	0.007 0	22.21	0.21	0.01	0.21	0.20	0.75	1.25	1.03	1.29
	SN108-1	灰色泥岩	2 366.85	0.67	2.03	1.60	1.43	0.97	0.02	1.73	2.90	3.31	12.82	0.005 4	21.83	0.02	0.02	0.28	0.18	0.74	0.36	2.29	0.82
	SN108-2	灰色泥岩	2 368.50	0.70	2.38	1.51	1.76	0.88	0.02	1.46	4.21	5.46	12.57	0.005 5	22.44	0.03	0.01	0.27	0.20	0.61	0.44	1.54	0.68
	SN108-3	灰色泥岩	2 371.20	0.86	5.94	1.91	2.32	0.70	0.09	1.06	13.78	12.57	18.12	0.005 3	19.57	0.13	0.01	0.22	0.14	0.20	0.47	1.32	0.62
	SN115-1	深灰色泥岩	2 157.35	0.76	3.18	1.76	2.32	0.83	0.11	0.71	7.37	6.78	13.62	0.004 0	22.26	0.14	0.01	0.23	0.25	0.32	0.60	1.17	0.70
	SN115-2	灰色泥岩	2 285.72	0.76	3.12	1.56	2.17	0.77	0.06	1.01	6.78	8.14	13.44	0.004 7	20.34	0.07	0.01	0.23	0.17	0.42	0.35	1.34	0.47
	平均值			0.76	3.41	1.78	1.77	0.77	0.08	0.95	6.23	7.06	16.56	0.010 0	21.32	0.12	0.01	0.24	0.19	0.53	0.68	1.23	0.84

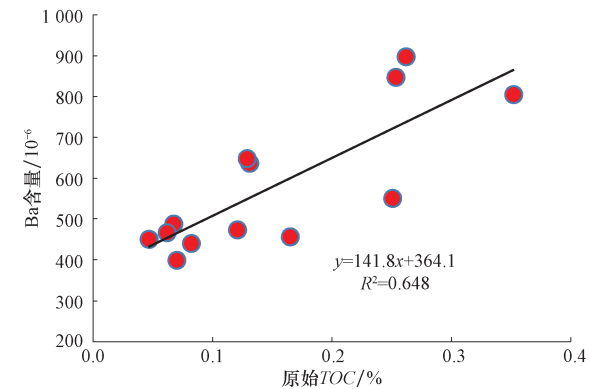


图 2 长岭断陷南部湖相烃源岩原始有机碳含量(TOC)与 Ba 元素含量关系

Fig. 2 Relationship between initial TOC and Ba content in lacustrine source rocks, southern Changling Depression

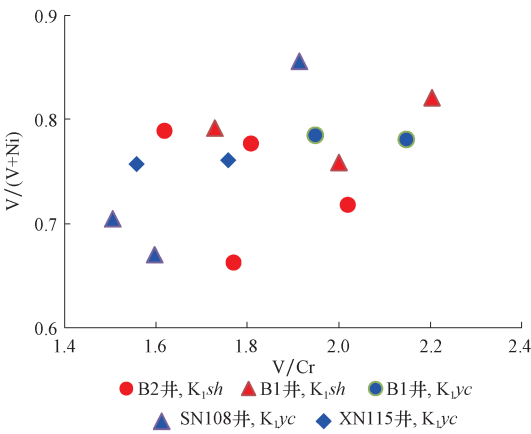


图 5 长岭断陷南部湖相烃源岩元素含量比 V/Cr 与 V/(V + Ni) 关系

Fig. 5 Relationship between V/Cr and V/(V + Ni) in lacustrine source rock samples from southern Changling Depression

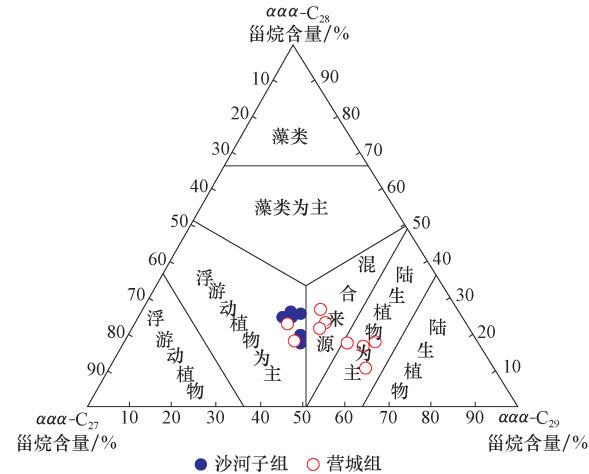


图 3 长岭断陷南部沙河子组和营城组烃源岩 C₂₇-C₂₈-C₂₉ 甾烷组成三角图

Fig. 3 Triangular plot of C₂₇-C₂₈-C₂₉ steranes in samples from the source rocks in southern Changling Depression

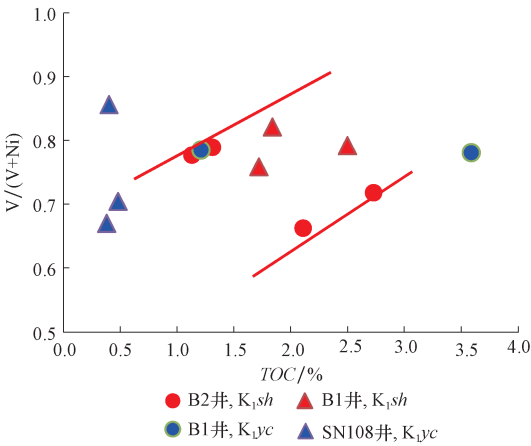


图 6 长岭断陷南部湖相烃源岩有机碳含量(TOC)与元素含量比 V/(V + Ni) 关系

Fig. 6 Relationship between TOC and V/(V + Ni) in lacustrine source rock samples from southern Changling Depression

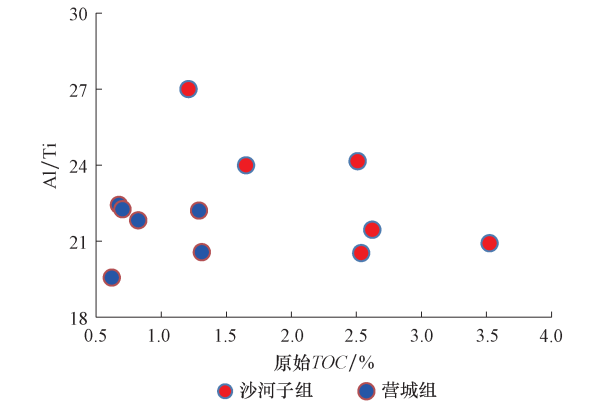


图 4 长岭断陷南部营城组烃源岩原始有机碳含量(TOC)与元素含量比 Al/Ti 关系

Fig. 4 Relationship between initial TOC and Al/Ti in samples from the source rocks in southern Changling Depression

斜坡带水体盐度逐渐增高,由淡水相过渡到半咸水相。如靠近沉积中心的 B2 井沙河子组样品(采样点平均埋深为 3 917.9 m) Sr 丰度均值约 231×10^{-6} ,

表 3 古盐度微量元素判断指标^[26-27]

Table 3 Trace element indexes for paleosalinity recognition in samples

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

Sr/Ba 均值为 0.49,显示为淡水环境;离沉积中心较远的 B1 井(采样点平均埋深为 2 738.3 m) Sr 丰度均值则为 426×10^{-6} ,Sr/Ba 均值为 0.50,显示为淡水-半咸水环境。

2) 从沙河子组到营城组沉积期, Sr 丰度值和 Sr/Ba 比值均呈增大趋势。斜坡带营城组烃源岩样品(除 B2 井样品外)均落在半咸水-咸水相范围(图 7),而且其伽马蜡烷含量较大,伽马蜡烷/ C_{30} 藿烷值一般均值为 0.17,碳数大于 C_{30} 的藿烷相对含量约占 25%,显示营城组水体盐度为半咸水相。

水体盐度通过影响生物种类与繁殖程度进而影响烃源岩的形成^[26]。图8中Sr丰度值与有机碳含量(TOC)表现负相关性,说明盐度较低的淡水-半咸水环境更有利于长岭断陷南部地区优质烃源岩的发育。

3.2.3 古气候

气候的冷热干湿影响降水、湖流、水体分层和沉积充填,甚至盐度的变化也受气候控制。以米兰柯维奇旋回为代表的高频旋回地层学已经证明在构造稳定的前提下,气候旋回是控制盆地沉积过程的根本因素^[28]。古气候指数和元素含量比Sr/Cu为古气候的敏感指标^[27,29],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:

$$C = \frac{\sum (\text{Fe} + \text{Mn} + \text{Cr} + \text{Ni} + \text{V} + \text{Co})}{\sum (\text{Ca} + \text{Mg} + \text{Sr} + \text{Ba} + \text{K} + \text{Na})} \quad (1)$$

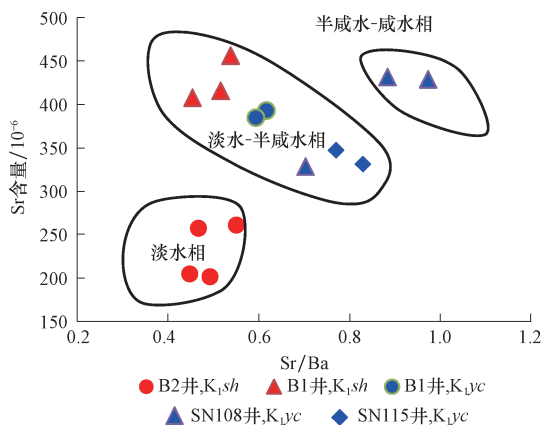


图7 长岭断陷南部湖相烃源岩元素含量比Sr/Ba与Sr元素含量关系

Fig. 7 Relationship between Sr/Ba and Sr content in lacustrine source rock samples from southern Changling Depression

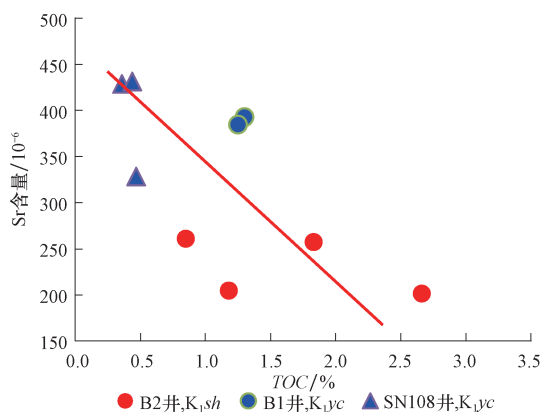


图8 长岭断陷南部湖相烃源岩有机碳含量(TOC)与Sr元素含量关系

Fig. 8 Relationship between TOC and Sr content in lacustrine source rock samples from southern Changling Depression

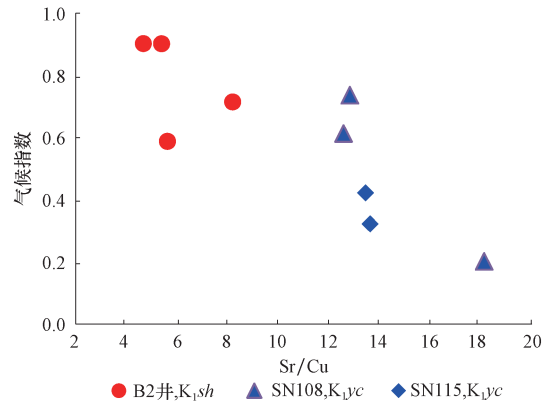


图9 长岭断陷南部湖相烃源岩元素含量比Sr/Cu与古气候指数关系

Fig. 9 Relationship between Sr/Cu and paleoclimatic index in acustrine source rock samples from southern Changling Depression

一般而言,潮湿-半潮湿气候中: $0.6 < C < 1.0$, $1 < \text{Sr}/\text{Cu} < 10$;半潮湿-半干燥气候中: $0.2 < C < 0.6$, $\text{Sr}/\text{Cu} > 10$;干燥气候中: $C < 0.2$ ^[27,30]。

由图9可知,长岭断陷南部地区在沙河子组沉积期气候较潮湿,如B2井古气候指数为0.6~0.9,元素含量比Sr/Cu为4~8,表现为半潮湿-潮湿气候;营城组沉积期气候较干旱,B1井、SN108井和SN115井古气候指数在0.2~0.7, Sr/Cu在12~25,表现为半潮湿-半干燥气候。这表明,长岭断陷从沙河子期到营城组古气候经历了从半潮湿-潮湿气候到半潮湿-半干燥气候的演变过程。因此,沙河子组优质烃源岩较营城组发育。

综上所述,结合其他地区研究资料表明,古代及现代潮湿气候和还原条件下的淡水-半咸水湖泊是最富营养型和高生物生产力的湖泊,也是形成富有机质沉积物的最有利环境^[31]。

3.3 沉积体系域(湖平面升降与沉积速率)与烃源岩的形成

湖平面升降控制沉积环境、沉积相的特征和分布,优质烃源岩应有规律地分布于层序地层格架中的特定部位。对于陆相湖盆而言,湖侵体系域和高位体系域沉积物供给速率等于或略大于可容空间的增长速率,盆地基本处于补偿阶段,细粒沉积物在该阶段一般较发育,而且该时期多为缺氧-厌氧环境,这有利于烃源岩的发育^[32]。长岭断陷断陷层划分为沙河子组和营城组两个二级层序地层(沙河子组对应于强烈裂陷期,营城组对应于裂陷萎缩早期),其中沙河子组细分为SQ3和SQ4两个三级层序,营城组分为SQ5和SQ6两个三级层序。选取不同构造带典型井进行层序地层和烃源岩评价。分析表明,长岭断陷断陷层各三级层序中的湖侵体系域(EST)和高位体系域(HST)发育的烃

源岩声波时差与电阻率测井曲线幅度差较大,有机碳含量(*TOC*)0.7%~1.8%,均值1.2%,有机质类型主要为Ⅰ-Ⅱ型,以中等-好烃源岩为主,而且泥岩含量高,泥地比一般为38.0%~100.0%,均值为72.8%,泥岩单层厚度也较大,范围为1.0~23.0 m,均值为6.3 m;而其低位体系域(LST)有机质丰度低,以非生油岩或差烃源岩为主,泥地比和单层泥岩厚度均较小(表4;图10)。总体上,优质烃源岩主要发育于湖侵体系域和高位体系域。因此,优质烃源岩宏观分布受控于沉积体系域。

表 4 长岭断陷南部典型井不同体系域烃源岩发育特征

Table 4 Development characteristics of source rocks in different system tracts in typical wells of southern Changling Depression

井号	层序	体系域	深度/m	泥岩总厚度/m	泥地比/%	泥岩单层厚度/m		<i>TOC</i> /%		<i>R</i> _o /%		有机质类型	烃源岩评价
					%	范围	均值	范围	均值	范围	均值		
XS1	SQ3 (<i>K</i> ₁ <i>sh</i> ¹)	LST	4 273~4 373	22.0	22.0	1.0~5.0	2.2	0.4	0.4				非
		EST	4 233~4 273	5.0	12.5	2.0~3.0	2.5	0.6~1.0	0.8				中等
		HST	4 073~4 233	5.0	3.1	2.0~3.0	2.5	0.6~0.7	0.7			Ⅲ型	中等
	SQ4 (<i>K</i> ₁ <i>sh</i> ²)	LST	3 946~4 073	45.0	35.4	1.0~10.0	3.8	0.4~0.6	0.5			Ⅲ型	差
		EST	3 923~3 946	23.0	100	23.0	23.0	0.9~1.3	1.1			Ⅱ ₁ 型	好
B2	SQ5(<i>K</i> ₁ <i>yc</i> ¹)	LST	3 793~3 923	49.0	21.3	1.0~23.0	6.0	0.4~0.8	0.6	1.1~2.2	1.5		差
	SQ4 (<i>K</i> ₁ <i>sh</i> ²)	HST	3 887~3 948	43.0	70.5	0.1~15.5	3.3	1.1~2.7	1.8	2.1	2.1	Ⅱ ₂ 型	好
		EST	3 946~4 140	134.0	69.8	2.0~23.0	7.9	1.8	1.8				好
		EST	2 561~2 685	106.0	85.5	0.3~17.0	5.6	0.4~2.0	1.2	1.2	1.2	Ⅰ型	好
S103	SQ3 (<i>K</i> ₁ <i>sh</i> ¹)	HST	2 434~2 561	49.0	38.0	1.0~9.0	3.8	0.6~1.5	1.0	1.2	1.2	Ⅰ型	好
		EST	2 314~2 396	67.0	81.7	1.0~10.0	5.2	0.6~2.0	1.1	0.5~1.6	1.1	Ⅱ ₂ 型	好
		LST	2 265~2 314	26.0	53.1	1.0~5.0	2.4	0.5	0.5				差
	SQ5	EST	1 956~2 084	77.0	60.2	2.0~17.0	5.5	0.5~1.5	1.0				好
	SQ6	EST	1 887~1 956	53.0	76.8	1.0~10.0	3.8	0.5~1.3	0.9				中等

注:*TOC*为有机碳含量;*R*_o为镜质体反射率。

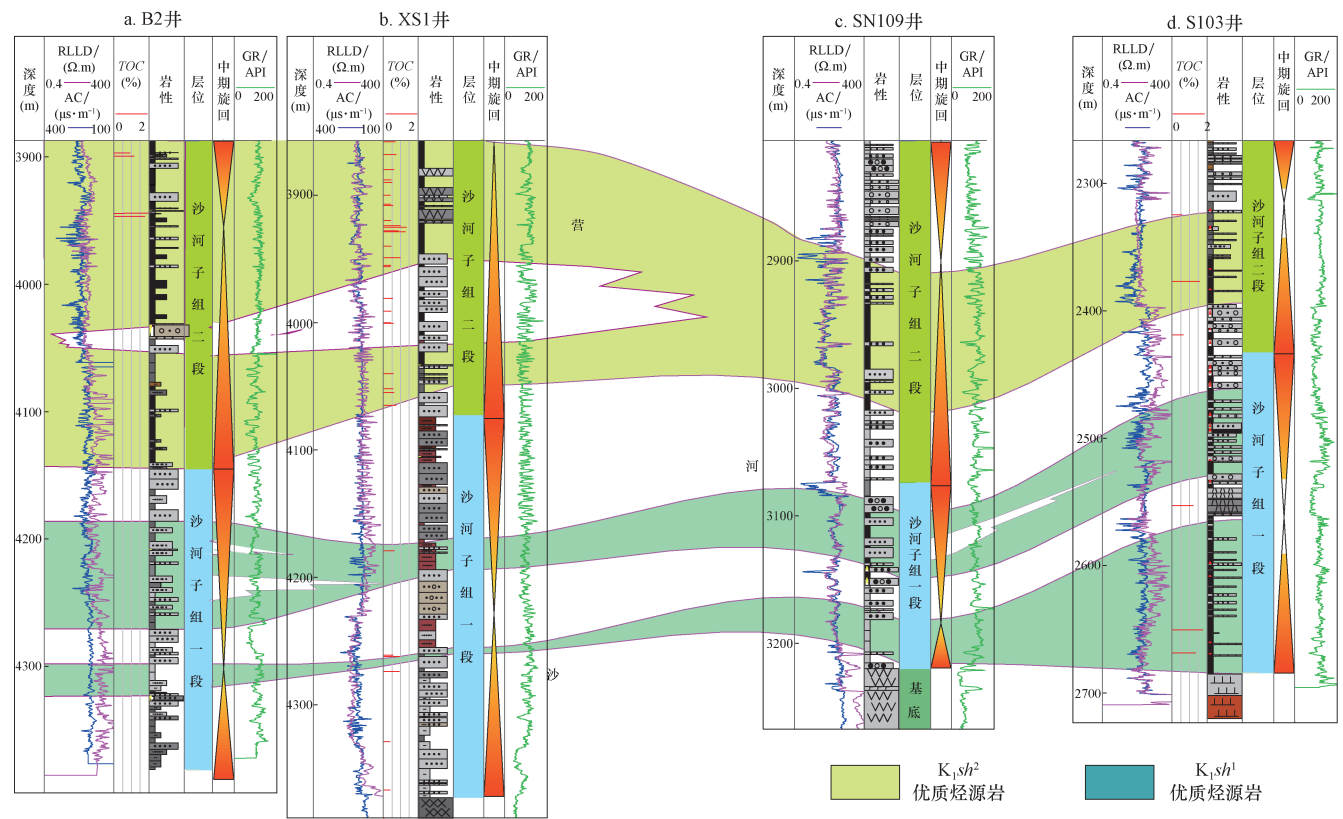


图 10 长岭断陷 B2 井—XS1 井—SN109 井—S103 井沙河子组烃源岩连井剖面

Fig. 10 Correlation of *K*₁*sh* source rocks among B2, XS1, SN109 and S103 wells in southern Changling Depression

除此之外,构造与断裂活动对湖相烃源岩的形成也起着十分重要的作用。一方面,构造运动和断裂活动控制着盆地古地理面貌,决定着盆地蓄水空间的形成和消亡,进而决定了湖相烃源岩的形成、分布及发育规模。表现在空间上为沉积中心,即烃源岩集中发育区靠近边界断裂展布。如长岭次凹在靠近苏公坨-北正镇边界断裂的西部地区暗色泥岩厚度大,B2 井揭示沙河子组暗色泥岩厚度高达 248 m;而在控陷断裂另一侧的东岭斜坡带,沙河子组暗色泥岩厚度均值不到 70 m。另一方面,控凹断裂(或控源断裂)控制了烃源岩演化进程,进而控制了成熟烃源岩的主要分布范围^[33]。表现在烃源岩成熟度分布与控凹断裂活动强度匹配,即断裂活动强烈的部位或者时期,烃源岩成熟度演化程度较高。

3.4 断陷层优质烃源岩发育的主控因素

与上地壳页岩克拉克值相比,沙河子组上部优质烃源岩明显富集 Al,Ba,Cu,Cr,V,Ni 和 Zn,亏损 Mn,Pb 和 Sr;营城组差烃源岩富集 Co,Sr,V 和 Zn,亏损 Al,Ba,Cr,Cu,Mn,Pb 和 Ni。比较优质烃源岩和差烃源岩层位的原始生产力、沉积环境(氧化还原条件、古盐度、古气候)和沉积体系域 3 个因素(表 5),发现长岭断陷断陷层优质烃源岩层位(沙河子组上部)发育于原始生产力中等、气候潮湿、低盐度、沉积速率较低

的高位域;而差烃源岩层位(营城组)原始生产力较低,沉积环境为半干燥气候、半咸水环境、沉积速率较高的低位域。

选取 B2 井和 SN108 井共 7 个样品,对其有机碳含量(TOC)分别与特征元素含量及其比值作相关性分析(图 11)。结果表明,样品 TOC 值与元素含量及其比值 Al,Sr,Sr/Ba,Sr/Cu 和 Cu 相关程度高,相关系数分别达到 98.3%,76.5%,71.4%,71.4% 和 72.8%;而与氧化还原条件指标,如 V/(V + Ni) 和 V/Cr 相关性较小,相关系数不足 50%。加之,优质烃源岩宏观分布具有受体系域控制的特征。因此,古盐度、古气候和体系域为长岭断陷南部地区断陷层优质烃源岩发育的主控因素。

由此看来,中等-好的初级生产力是优质烃源岩发育的首要条件,而气候潮湿、较低的盐度和沉积速率促进了有机质富集,体系域控制烃源岩的宏观分布。

4 结论

- 1) 与上地壳平均页岩相比,沙河子组上部优质烃源岩明显富集 Al,Ba,Cu,Cr,V,Ni 和 Zn,亏损 Mn,Pb 和 Sr;营城组差烃源岩富集 Co,Sr,V 和 Zn,亏损 Al,Ba,Cr,Cu,Mn,Pb 和 Ni。
- 2) 元素含量比 Al/Ti 值是湖相烃源岩古生产力

表 5 长岭断陷南部优质烃源岩发育主控因素

地层	埋深/m	烃源岩判断 (依据 TOC, Cu,Ni)	生产力评价 (依据 Al/Ti)	氧化还原条件 [依据 V/(V + Ni),V/Cr]	古盐度 (依据 Sr, Sr/Ba)	古气候 (依据古气候 指数,Sr/Cu)	体系域 (沉积速率)	烃源岩 质量	代表井
沙河子组(K ₁ sh)	3 895.7 ~ 3 943.2	高	中等	贫氧	淡水	半潮湿-潮湿	高位域(低)	好	B2
营城组(K ₁ yc)	2 366.8 ~ 2 371.2	低	中等	贫氧	半咸水	半干燥-半潮湿	低位域(高)	差	SN108

注: TOC 为有机碳含量; Cu, Ni, Al, Ti, V, Ni, Cr, Sr, Ba, Cu 为元素含量。

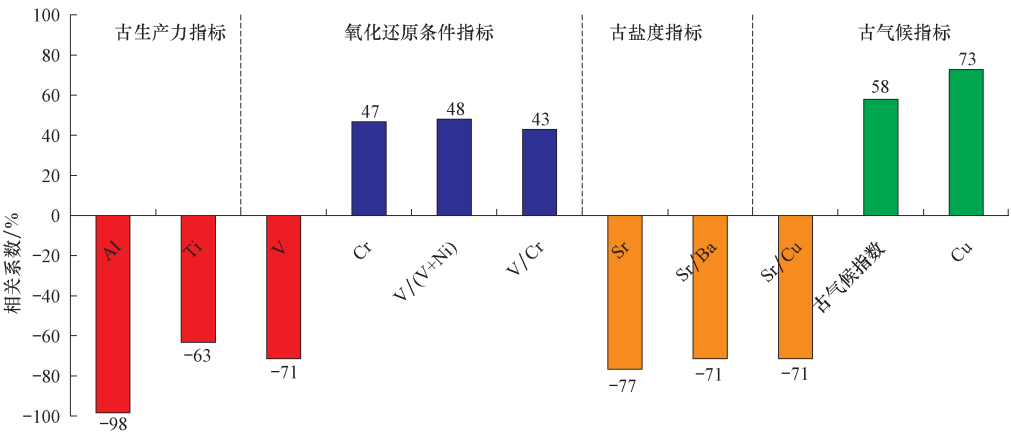


图 11 长岭断陷断陷层烃源岩有机碳含量(TOC)与特征元素含量相关程度
Fig. 11 Correlations of TOC and trace element ratios of source rock
samples from southern Changling Depression

的敏感指标(受陆源影响较小的情况下), V/Cr 和 $V/(V+Ni)$ 值是氧化还原环境的敏感指标, Sr 丰度和 Sr/Ba 比值是古盐度的敏感指标, 古气候指数(喜湿元素和喜干元素总丰度比值)和 Sr/Cu 比值是古气候的敏感指标。

3) 长岭断陷断陷层优质烃源岩层位(沙河子组上部)发育于原始生产力中等、气候潮湿、低盐度及沉积速率较低的高位域和湖侵域;而差烃源岩层位(营城组)原始生产力较低, 沉积环境为半干燥气候、半咸水环境及沉积速率较高的低位域。

4) 中等-好的初级生产力是优质烃源岩发育的首要条件, 而气候潮湿、较低的盐度和沉积速率促进了有机质富集。

参 考 文 献

- [1] 秦建中. 中国烃源岩[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
Qin Jianzhong. Hydrocarbon source rocks of China[M]. Beijing: Sciences Press, 2005.
- [2] 杨华, 张文正. 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[J]. 地球化学, 2005, 34(2): 147-154.
Yang Hua, Zhang Wenzheng. Leading effect of the Seventh Member high-quality source rock of Yanchang Formation in Ordos Basin during the enrichment of low - enetrating oil-gas accumulation: Geology and geochemistry[J]. Geochimica, 2005, 34(2): 147-154.
- [3] 朱光有, 金强. 东营凹陷两套优质烃源岩层地质地球化学特征研究[J]. 沉积学报, 2003, 21(3): 506-512.
Zhu Guangyou, Jin Qiang. Geochemical characteristics of two sets of excellent source rocks in Dongying Depression[J]. Acta Sedimentologica, 2003, 21(3): 506-512.
- [4] 刘华, 李凌, 吴智平. 胶莱盆地烃源岩分布及有机地球化学特征[J]. 石油实验地质, 2006, 28(6): 574-580.
Liu Hua, Li Ling, Wu Zhiping. Distribution and organic geochemical characteristics of hydrocarbon source rocks in the Jiaolai Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2006, 28(6): 574-580.
- [5] 尹秀珍. 松辽盆地中部晚白垩世早期古湖泊生产力研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2008.
Ying Xiuzhen. Palaeolacustrine productivity study of Early Late Cretaceous in the central area of Songliao Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2008.
- [6] Meyers P A, Amaboldi M. Trans-Mediterranean comparison of geochemical paleoproductivity proxies in a mid-Pleistocene interrupted sapropel [J]. Palaeogeography, Palaeochimatology, Palaeoecology, 2005, 222: 313-328.
- [7] Myrbo A, Shapley M D. Seasonal water-column dynamics of dissolved inorganic carbon stable isotopic composition in small hard water lakes in Minnesota and Montana[J]. Geochimica Cosmochimica Acta, 2006, 70: 2699-2714.
- [8] 刘传联, 徐金鲤. 生油古湖泊生产力的估算方法及应用实例[J]. 沉积学报, 2002, 20(1): 144-150.
Liu Chuanlian, Xu Jinli. Estimation method on productivity of oil-producing lake and a case study[J]. Acta Sedimentologica, 2002, 20(1): 144-150.
- [9] Demaison G J, Moore G T. Anoxic environments and oil source bedgenesis[J]. AAPG Bulletin, 1980, 64: 1179-1209.
- [10] Katz B J. Controls on distribution of lacustrine source rocks through time and space[C] // Katz B J. Lacustrine basin exploration: Case studies and modern analogs. AAPG Memoir 50, 1990: 61-76.
- [11] 耳闻, 赵靖舟, 白玉彬, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组富有机质泥页岩储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(5): 708-716.
Er Chuang, Zhao Jingzhou, Bai Yubin, et al. Reservoir characteristics of the organic-rich shales of the Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(5): 708-716.
- [12] 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 Pingxian, Liu Chuanlian. Memoir of Palaeolimnology. Beijing: China Ocean Press, 1991: 68-77.
- [13] Ibach L E J. Relationship between sedimentation rate and total organic carbon content in ancient marine sediments[J]. AAPG Bulletin, 1982, 66: 170-188.
- [14] 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.
- [15] 李牛, 胡超涌, 马仲武, 等. 四川广元上寺剖面上二叠统大隆组优质烃源岩发育主控因素初探[J]. 古地理学报, 2011, 13(3): 347-354.
Li Niu, Hu Chaoyong, Ma Zhongwu, et al. Main control factors of high quality hydrocarbon source rocks of the Upper Permian Dalong Formation at Shangsi section of Guangyuan, Sichuan Province[J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(3): 347-354.
- [16] 张林畔. 湖相烃源岩研究进展[J]. 石油实验地质, 2008, 30(6): 591-595.
Zhang Linpe. The progress on the study of lacustrine source rocks[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2008, 30(6): 591-595.
- [17] Deuser W G, Brewer P G, Jickells T D, et al. Biological control of the removal of abiogenic particles from the surface ocean[J]. Science, 1983, 219: 388-391.
- [18] 马超. 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[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.
Ma Chao. Initial conference of the ecostratigraphic framework and primary productivity, Silurian, Upper Yangtze region, China[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2009.
- [19] Kryc K A, Murray R W, Murray D W. Al-to-oxide and Ti-to-organic linkages in biogenic sediment: Relationships to paleo-export production and bulk Al/Ti[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 211: 125-141.
- [20] 任景玲, 张经, 刘素美. 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[J]. 地球科学进展, 2005, 20(12): 1314-1320.
Ren Jinglin, Zhang Jin, Liu Sumei. A review on aluminum to titanium ratio as a geochemical proxy to reconstruct paleoproductivity[J]. Advance in Earth Sciences, 2005, 20(12): 1314-1320.
- [21] 吴朝东, 储著银. 黑色页岩微量元素形态分析及地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, (1): 14-20.
Wu Chaodong, Chu Zhuyin. Sequential extraction of trace elements and the geological significance of rractions in black shales, West Hunan and East Guizhou[J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2001, (1): 14-20.

- 特征及成因机理分析[J]. 现代地质, 2012, 26(4): 755–761.
- Xue Jingjing, Sun Jing, Zhu Xiaomin, et al. Characteristics and formation mechanism for dolomite reservoir of Permian Fengcheng Formation in Junggar Basin[J]. Geoscience, 2012, 26(4): 755–761.
- [18] 雷德文, 文晓涛, 丁靖, 等. 地震方法识别乌夏断裂带风城组白云质灰岩裂缝[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(5): 525–527.
- Lei Dewen, Wen Xiaotao, Ding Jing, et al. Seismic detection method for identification of fractures in Fengcheng dolomitic limestone in Wuerhe-Xiazijie fault belt, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32(5): 525–527.
- [19] 赵玉红, 任云鹏, 侯磊, 等. 地震属性对云质岩储层识别的探讨[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(6): 891–895.
- Zhao Yuhong, Ren Yunpeng, Hou Lei, et al. Discussion on seismic attributes of dolomitic rock reservoir identification[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10(6): 891–895.
- [20] Dorigo M, Maniezzo V, Colomi A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on, 1996, 26(1): 29–41.
- (编辑 张玉银)
-
- (上接第218页)
- [22] Hunt J M. Petroleum Geochemistry and Geology[M]. New York: W H Freeman Company, 1979: 1–617.
- [23] 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, USA[J]. Chemical Geology, 1992, 99: 65–82.
- [24] 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 quanti-fied research method on paleosalinity[J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2003, 10(5): 1–3.
- [25] 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 Roucai, Liu Meiqing. Study on palaeosalinity of Chang 6 oil reservoir set in Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 1999, 20(1): 20–25.
- [26] 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 Roucai, 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.
- [27] 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): 307–314.
- 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): 307–314.
- [28] Gradstein F M, Ogg J G, Smith A G, et al. A new geological time scale, with special reference to Precambrian and Neogene[J]. Episodes, 2004, 27(2): 83–100.
- [29] 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.
- [30] 赵增义, 赵建华, 王海静, 等. 准噶尔盆地微量元素的分布特征及其应用[J]. 天然气勘探与开发, 2007, 30(6): 30–32.
- Zhao Zengyi, Zhao Jianhua, Wang Haijing, et al. Distribution characteristics and applications of trace elements in Junggar Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2007, 30(6): 30–32.
- [31] 韩永林, 王海红, 陈志华, 等. 耿湾—史家湾地区长6段微量元素地球化学特征及古盐度分析[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(4): 20–26.
- Han Yonglin, Wang Haihong, Chen Zhihua, et al. Paleosalinity analysis and trace element geochemistry of Chang 6 member in Gengwan-Shijiawan area, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2007, 19(4): 20–26.
- [32] 朱筱敏. 层序地层学[M]. 北京: 中国石油大学出版社, 2000.
- Zhu Xiaomin. Sequence stratigraphy[M]. Dongying: China University of Petroleum Press, 2000.
- [33] 高先志, 李浩, 刘启东. 高邮凹陷断层控油气作用的多样性[J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34(1): 20–28.
- Gao Xianzhi, Li Hao, Liu Qidong. Various effects of faults on generation, migration and accumulation of oil/gas in Gaoyou Sag[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012, 34(1): 20–28.
- (编辑 李军)