

松辽盆地南部油页岩微量元素特征及其成矿期古环境恢复

常思阳^{1,2}, 郭 巍¹

1. 吉林大学 地球科学学院, 吉林 长春 130000 ; 2. 中国石化集团国际石油工程有限公司, 北京 100000

摘 要 油页岩成矿期的古环境控制着油页岩有机质类型与丰度, 而油页岩的有机质类型和丰度对于研究油页岩成因及富集规律具有重要的意义. 松辽盆地南部含油页岩层段总体为深湖-半深湖相稳定沉积, 微量元素特征对古环境的变化敏感, 可利用油页岩微量元素含量的测试及其比值分析的方法恢复油页岩成矿期的古环境. 通过对松辽盆地南部油页岩样品中 20 余种微量元素含量的测试及其比值的分析, 恢复了青山口组与嫩江组油页岩成矿期的古环境. 研究表明, 油页岩成矿期的古气候为温暖湿润-半湿润半干热的气候, 水介质为微咸水-半咸水的还原环境. 青山口期相对嫩江期气候和盐度变化较稳定, 气候略为干热, 盐度也略高.

关键词 油页岩; 微量元素; 古环境; 古盐度; 氧化还原; 古气候; 松辽盆地南部

DOI:10.13686/j.cnki.dzyzy.2016.05.008

CHARACTERISTICS OF TRACE ELEMENTS IN OIL SHALE AND PALEOENVIRONMENT RECOVERY IN THE METALLOGENIC PERIOD IN SOUTHERN SONGLIAO BASIN

CHANG Si-yang^{1,2}, GUO Wei¹

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China;

2. International Petroleum Engineering Co., Ltd., SINOPEC, Beijing 100120, China

Abstract : The paleoenvironment in the metallogenic period of oil shale controls the organic type and abundance of oil shale, which is important for research of the origin and enrichment regularity of oil shale. In southern Songliao Basin, the oil shale formations are generally stable deep lake to semi-deep lake facies. The characteristics of trace elements are sensitive to the changes of ancient environment. Therefore, the contents of trace elements in oil shale and their ratios can be used to restore the paleoenvironment of oil shale in metallogenic period. This article, through test of more than 20 trace elements and analysis for their ratios of the oil shale samples from southern Songliao Basin, restores the paleoenvironment of the Qingshankou Formation and Nenjiang Formation. The results show that the oil shale in the metallogenic period experienced a warm humid-subhumid and dry heat climate, in a reduction environment of brackish water. To compare with the counterparts of Nenjiang period, the climate and salinity changes of Qingshankou period are more stable, with a slightly drier climate and a higher salinity.

Key words : oil shale; trace element; paleoenvironment; paleosalinity; redox; paleoclimate; southern Songliao Basin

收稿日期 2016-01-05; 修回日期 2016-04-13. 编辑 李兰英.

基金项目 国家科技重大专项“东部重点盆地油页岩资源勘查与评价”(2008ZX05018-001).

作者简介 常思阳(1986—) 男, 在读硕士研究生, 主要从事沉积学、石油地质学研究, 通信地址 北京市朝阳区望京阜通东大街 12 号宝能中心 A 座 14 层, E-mail//changsy.sips@sinopec.com

通信作者 郭巍(1960—) 男, 博士, 教授, 主要从事沉积学、石油地质学研究, 通信地址 吉林省长春市建设街 2199 号, E-mail//guowei@jlu.edu.cn

0 引言

油页岩形成的物质基础是藻类、低等生物大量繁殖,而沉积环境与气候等又是控制其物质来源的首要条件,所以开展油页岩成矿期古环境恢复对于油页岩成矿机制的研究具有重要意义^[1]。

松辽盆地南部白垩系青山口组与嫩江组中油页岩分布范围广泛,资源非常丰富。青山口组一段和嫩江组二段沉积时期分别为一套稳定的深湖-半深湖相沉积,构造活动不强,成岩作用较弱。未成熟-低成熟的油页岩蕴含着丰富的古湖泊信息,微量元素含量对于古环境的变化很敏感,可以精确地指示成矿期古环境^[2]。沉积介质中物理化学条件的改变与微量元素含量直接相关,气候的变化也会直接影响到一些微量元素的绝对含量或者相对含量^[3-4]。

在对松辽盆地大量野外露头、探槽和钻井岩心研究的基础上,采集了嫩江组 19 块、青山口组 17 块油页岩样品进行了 B、Ba、Co、Cr、Cu、Ga、Li、Mn、Nb、Ni、Pb、Rb、Sc、Sr、Th、Ti、U、V、Zn 等 19 种微量元素含量测试,分析了油页岩微量元素的特征,恢复了松辽盆地南部油页岩成矿期的古环境。

2 地质背景

松辽盆地位于中国大陆东北部,整体呈北北东向展布(图 1),是一个中生代具有断拗双重结构的大型复合沉积盆地。基底是晚古生代末至早中生代初所固结的大陆地壳,主要是石炭系、二叠系变质岩及同期岩浆岩,沉积盖层由中生界白垩系、古近系和新近系组成,总厚度可达万米以上。其拗陷期沉积主要为下白垩统泉头组及上白垩统青山口组、姚家组、嫩江组,主要是大型拗陷湖盆中沉积的湖泊及河流相的陆源碎屑岩。其中,青山口组和嫩江组为油页岩主要发育层位,一般发育 3~5 层厚度为 2.0~12.0 m 的油页岩^[5]。这 2 个时期为松辽盆地发育的全盛时期,湖泊面积大且生物繁盛^[6]。

松辽盆地油页岩资源丰富,油页岩颜色主要呈黑—灰黑色、深灰色及灰褐色,具泥质结构,致密块状构造,个别油页岩页理发育,以半深湖-深湖相沉积为主^[7]。

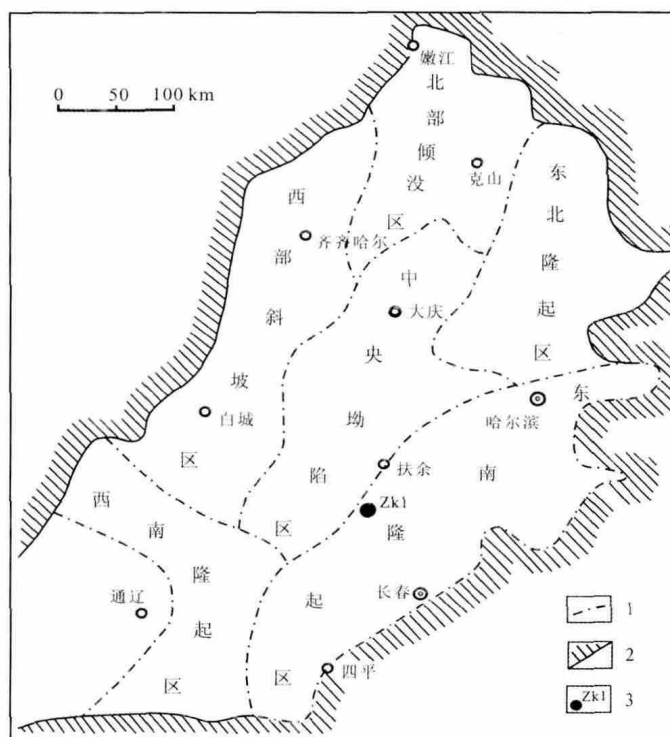


图 1 松辽盆地一级构造单元

Fig. 1 The first-order tectonic units in Songliao Basin

1—一级构造单元分界线(border of first-order tectonic units) 2—盆地边界(boundary of basin) 3—井位(drill hole)

3 微量元素特征

3.1 嫩江组油页岩微量元素特征

油页岩样品主要取自八里营子地区和永安地区,对这 2 个地区嫩江组油页岩的微量元素分别取平均值与地壳元素对比。可以看出:与地壳元素平均含量相比,本区嫩江组油页岩的微量元素 B、Ba、Li、Rb 含量偏高,而 Co、Cr、Cu、Nb、Ni、Sr、Th、V、Zn 等含量偏低, Ga、Hf、Pb、Ta、U、Zr 等含量与地壳相差不大(图 2)。

3.2 青山口组油页岩微量元素特征

青山口组油页岩样品主要采自青山口和长春岭地区。分别取两个地区青山口组油页岩微量元素含量平均值与地壳元素相比,青山口组油页岩微量元素 B、Ba、Li、Pb、Rb、Zr 含量偏高,而 Co、Cr、Cu、Nb、Ni、Sr、Th、V 含量偏低, Ga、Hf、Ta、U、Zn 含量与地壳平均值接近(图 3)。

3.3 微量元素与含油率相关关系分析

含油率是油页岩的一个重要工业特征,与油页岩形成的古环境有着密切联系^[8]。通过含油率与微量元素相关系数的计算,进一步探讨其与微量元素的关系,从而

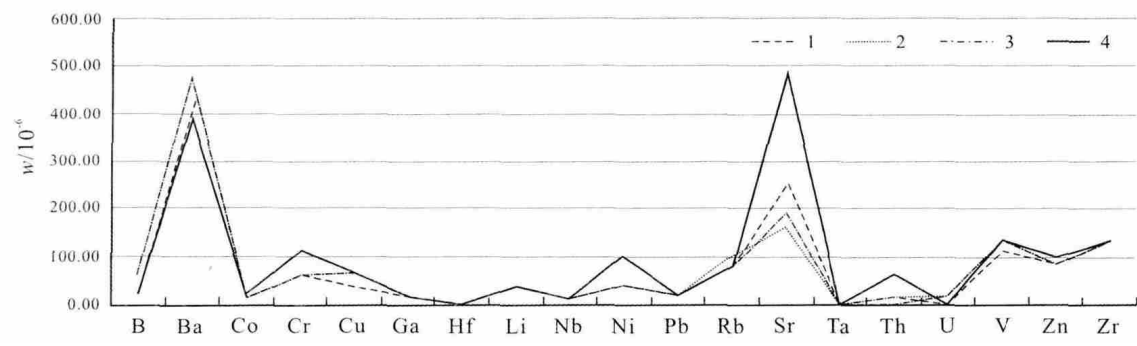


图 2 嫩江组油页岩微量元素含量与地壳平均含量对比图

Fig. 2 Correlation of trace elements in the oil shale of Nenjiang Formation and the crust

1—八里营子地区平均(average of Baliyingzi area) 2—永安地区平均(average of Yongan area) 3—嫩江组总体平均(average of Nenjiang fm.) 4—地壳平均(average of crust)

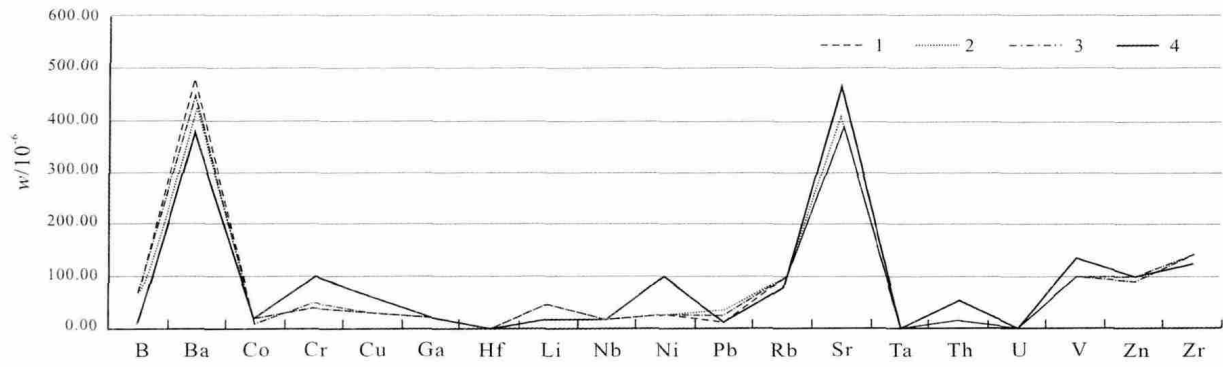


图 3 青山口组油页岩微量元素含量与地壳平均含量对比图

Fig. 3 Correlation of trace elements in the oil shale of Qingshankou Formation and the crust

1—青山口乡地区平均(average of Qingshankou area) 2—长春岭地区平均(average of Changchunling area) 3—青山口组总体平均(average of Qingshankou fm.) 4—地壳平均(average of crust)

揭示油页岩成矿期古环境对油页岩含油率的影响.

对松辽盆地油页岩的 B、Ba、Co、Cr、Cu、Hf、Li、Nb、Ni、Pb、Rb、Sr、Ta、Th、U、V、Zn、Zr 等 18 种微量元素与含油率相关系数进行计算(表 1) 结果表明 ,Cu、Ni、U、V 4 种元素与含油率呈正相关关系 ,Ga、Hf、Li、Nb、Pb、Rb、Sr、Ta、Th 与含油率呈反相关 ,其余几种元素与含油率相关性较小. U、V 和 Ni 与含油率呈正相关关系 ,说明这 3 种元素很可能是松辽盆地油页岩有机质的原始组成组分. 而 Li、Nb、Pb、Sr 等元素一般在黏土矿物中富集 故与含油率呈反相关关系.

从相关系数看来 ,含油率与 Th/U、V/(V+Ni) 相关性较强 ,其次为 Sr/Cu、Fe³⁺/Fe²⁺和 V/Ni. 可见 ,含油率与反映氧化还原条件的元素相关性更强 ,故油页岩成矿期的氧化还原条件对油页岩形成有着更大的影响 ,其次为气候的影响和盐度的影响.

表 1 微量元素及其比值与含油率的相关系数表

Table 1 The correlation coefficients of oil contents with trace elements and their ratios

元素	与含油率的相关系数	元素	与含油率的相关系数	元素比值	与含油率的相关系数
B	-0.147	V	0.569	B/Ga	-0.059
Ba	-0.287	Cl	0.023	Sr/Ba	-0.095
Cu	0.338	P	0.22	Sr/Cu	-0.33
Ga	-0.074	Fe	-0.036	Mn/Ti	-0.184
Mn	-0.155	Fe ³⁺	-0.321	Th/U	-0.457
Ni	0.372	Fe ²⁺	0.242	Mg/Ca	-0.009
Sr	-0.259	Mg	-0.106	Fe/Mn	0.054
Th	-0.1	Ca	-0.213	Fe ³⁺ /Fe ²⁺	-0.338
Ti	0.201	Na	-0.161	V/(V+Ni)	0.489
U	0.382	K	-0.067	Sr/Ca	-0.182
				Na/Ca	-0.091
				V/Ni	0.274

4 成矿期古环境恢复

4.1 嫩江组油页岩成矿期古环境恢复

成矿期古环境恢复包括湖泊古盐度特征、氧化还原条件以及古气候条件 3 个方面.

4.1.1 嫩江期湖泊古盐度

古盐度(S_p)可以通过 B 元素含量和 B/Ga、Sr/Ba、Pb/K 比值来恢复(表 2).

表 2 古盐度的微量元素判别标志

Table 2 Trace element discrimination for paleosalinity					
古盐度	B / 10 ⁻⁶	B/Ga	Sr/Ba	Pb/K	Sp / ‰
咸水	>100	<3	>1	大	0.01~0.5
半咸水	60~100	3~4.5	1~0.6		0.5~16
淡水	<60	4.5~5	<0.6	小	16~47

硼法计算古盐度是较常用也较精确的方法^[9]. 实验证明,溶液中的硼可被黏土矿物吸收固定,无论其呈吸附状态存在或是进入黏土矿物晶格,都不因后期水体硼浓度的下降而被解吸,故可以用黏土矿物中 B 的含量来计算古盐度.

松辽盆地油页岩中的黏土矿物以伊利石为主,嫩江组油页岩伊利石平均含量占黏土矿物总数的 58.62%,另有 29%的伊蒙混层,符合沃克相当硼法对黏土矿物特征的要求,故适用于亚当斯和科奇的古盐度计算公式.

通过亚当斯公式对古盐度的计算,嫩江组油页岩的成矿期湖水古盐度在 2.04‰~20.49‰之间(表 3),绝大多数位于 0.5‰~16‰的半咸水区间,仅有 2 个数值位于 16‰~47‰的咸水区间,平均值为 10.82‰. 同时采用科奇公式 $\log B_k = 1.28 \log S_p + 0.11$ 计算(B_k 为校正硼含量),得出嫩江组盐度平均为 8.93,与亚当斯公式计算出的盐度误差不到 15%,验证了亚当斯公式计算本地区古盐度的可行性. 计算结果表明嫩江组油页岩成矿期主要为半咸水环境.

嫩江组油页岩 B/Ga 值为 2.13~5.94,平均为 4.16,大部分位于 3~4.5 的半咸水相分布区间. 据刘平略的分析,白垩系总体 B/Ga 值分布在 3~4 的区间内,显然嫩江组油页岩形成时湖盆的盐度要略高于白垩系总体的盐度. 嫩江组油页岩的 Sr/Ba 值的分布区间为 0.26~0.59,平均 0.34. 根据古盐度判别表,嫩江组油页岩处于微咸水—半咸水沉积环境. Pb/K 值在 0.0046~0.0051 之间,为微咸水沉积.

表 3 嫩江组古盐度计算表

Table 3 Paleosalinity calculation of the Nenjiang Formation

样品编号	含油率	校正硼	相当硼	盐度计算 (亚当斯公式)	湖水 性质	盐度验证 (科奇公式)
SN-Y-042	4.5	124.80	95.00	2.04	半咸水	4.63
SN-Y-011	5.6	181.69	138.00	6.33	半咸水	6.61
SN-Y-003	5.5	287.04	208.00	13.31	半咸水	9.27
SN-Y-027	6.1	307.18	225.00	15.00	半咸水	10.26
SN-Y-028	4.8	285.58	210.00	13.51	半咸水	9.65
SN-Y-041	6.0	191.00	142.00	6.73	半咸水	6.51
SN-Y-091	5.5	201.00	152.00	7.72	半咸水	7.79
SN-Y-075	3.6	187.27	150.00	7.53	半咸水	8.40
SN-Y-083	3.9	205.49	163.00	8.82	半咸水	9.09
SN-Y-089	6.1	207.83	158.00	8.32	半咸水	7.81
SN-Y-205	7.3	218.67	170.00	9.52	半咸水	8.40
SN-Y-209	0.9	254.48	202.00	12.71	半咸水	10.96
SN-Y-117	0.4	227.41	170.00	9.52	半咸水	8.16
SN-Y-206	0.5	217.33	173.00	9.82	半咸水	9.39
SN-Y-118		274.35	220.00	14.50	半咸水	11.86
SN-Y-119	3.0	343.39	273.00	19.79	咸水	14.37
SN-Y-120	1.1	211.60	165.00	9.02	半咸水	8.65
平均				10.25	半咸水	8.93

通过以上几个元素及比值综合分析,嫩江期的松辽盆地为一个微咸水—半咸水的湖盆.

4.1.2 嫩江期湖水氧化还原条件

古湖泊的氧化还原条件可通过 Fe^{3+}/Fe^{2+} 、Cu/Zn、Ni/Co、V/Cr、Th/U 和 V/(V+Ni)来恢复(表 4).

表 4 氧化还原条件的微量元素判别标志

Table 4 Trace element discrimination for redox conditions

氧化还原条件	Fe ³⁺ /Fe ²⁺	Cu/Zn	Ni/Co	V/Cr	Th/U	V/(V+Ni)
氧化	>>1	高	<5	>2	>1.3	<0.46
弱氧化	>1		5~7	2~4.25		
中性	≈1		≈7	≈4.25	0.8~1.3	0.46~0.54
弱还原	<1	低	>7	>4.25	<0.8	>0.54
还原	<<1					

Fe^{3+}/Fe^{2+} 平均值为 0.59, Cu/Zn 平均值为 0.79, 指示了嫩江期的还原环境. V/Cr 值介于 1.66~2.65 之间, Ni/Co 值介于 2.62~5.63 之间, 指示了嫩江期的弱还原环境. Th/U 值介于 0.15~2.37 之间, V/(V+Ni) 介于 0.68~0.87 之间, 也说明嫩江组油页岩形成于还原环境.

综合以上几个指标，嫩江油页岩成矿期为弱还原—还原环境。

4.1.3 嫩江期古气候条件

古气候环境可以通过 Sr/Cu 和气候指数 *C* 来表现^[10](表5)。

表5 古气候的微量元素判别标志

Table 5 Trace element discrimination for paleoclimate

古气候	Sr/Cu	气候指数 (<i>C</i>)	Fe/Mn	Mg/Ca
温湿	1.3~5.0	0.8~1.0	高	低
半湿润		0.6~0.8		
半湿润-半干热	5.0 左右	0.4~0.6	低	高
半干热	>5.0	0.2~0.4		
干热		<0.2		

Sr/Cu 值位于 1.6~6.89 之间,平均值为 2.74,最高值 6.89 出现在八里营子地区. 永安地区的 Sr/Cu 值相对较小,均小于3,且 Fe/Mn 平均值为 67.63,Mg/Ca 平均值为 0.33,故嫩江组的油页岩形成于温湿气候。

气候指数 $C=(Fe+Mn+Cr+Ni+V+Co)/(Ca+Mg+Sr+Ba+K+Na)$. 嫩江组油页岩的气候指数介于 0.59~0.80 之间,为半潮湿气候。

所以，嫩江期油页岩形成时的古气候为温暖湿润-半湿润的气候。

4.2 青山口组油页岩成矿期古环境恢复

成矿期古环境恢复包括湖水古盐度特征、氧化还原条件以及古气候条件 3 个方面。

4.2.1 青山口组油页岩成矿期古盐度特征

成矿期古盐度特征可以通过 B 元素含量和 B/Ga、Sr/Ba、Pb/K 比值来恢复。

古盐度的定量计算亦通过亚当斯公式与科奇公式完成. 其中,亚当斯公式计算出的平均盐度为 7.4‰(表 6),科奇公式计算出的盐度为 8.8‰,相对误差仅为 19%,说明青山口时期为半咸水环境。

青山口组油页岩 B/Ga 分布于 2.32~3.78 之间,平均值为 3.14,说明其为陆相半咸水沉积,但盐度较低. Sr/Ba 值分布于 0.36~1.63 之间,多数小于 1,平均值为 0.96,也说明其为半咸水沉积. Pb/K 平均值为 0.0041,为微咸水页岩沉积。

综合以上几个指标，青山口组油页岩也形成于半咸水沉积环境,但相比嫩江组盐度值,青山口组油页岩成矿期湖水盐度变化较小,水体盐度稳定。

表 6 青山口组古盐度计算表

Table 6 Paleosalinity calculation of the Qingshankou Formation

样品编号	含油率	校正硼	相当硼	盐度计算 (亚当斯公式)	湖水 性质	盐度验证 (科奇公式)
SN-Y-058	3.8	125.55	102.00	2.74	半咸水	6.26
SN-Y-052	3.8	206.47	172.00	9.72	半咸水	10.12
SN-Y-048	4.2	207.58	169.00	9.42	半咸水	9.76
SN-Y-100	4.1	166.24	130.00	5.53	半咸水	7.49
SN-Y-101	4.8	171.38	133.00	5.83	半咸水	7.42
SN-Y-121	0.9	197.36	153.00	7.82	半咸水	8.30
SN-Y-122	2.0	175.04	145.00	7.03	半咸水	8.52
SN-Y-123	1.3	210.47	174.00	9.92	半咸水	10.69
SN-Y-124	2.1	174.79	149.00	7.43	半咸水	9.01
SN-Y-125	1.8	182.43	172.00	9.72	半咸水	9.22
SN-Y-207	3.6	179.94	151.00	7.62	半咸水	8.92
SN-Y-126	1.1	209.64	173.00	9.82	半咸水	10.78
SN-Y-208	4.1	179.64	148.00	7.33	半咸水	9.19
SN-Y-127	2.2	151.31	122.00	4.73	半咸水	7.29
SN-Y-128	1.2	195.73	168.00	9.32	半咸水	10.02
SN-Y-129		180.38	150.00	7.53	半咸水	9.32
SN-Y-130	4.4	140.56	118.00	4.33	半咸水	7.14
平均				7.40	半咸水	8.80

4.2.2 青山口组油页岩成矿期氧化还原条件

氧化还原条件通过 Fe^{3+}/Fe^{2+} 、V/Cr 和 $V/(V+Ni)$ 来恢复。

Fe^{3+}/Fe^{2+} 为 0.45~1.14,平均为 0.82,V/Cr 值介于 2.07~2.80 之间,平均值为 2.39,指示了当时的弱还原环境. $V/(V+Ni)$ 介于 0.80~0.84 之间,平均值为 0.82,指示了当时的还原环境。

综上，青山口组油页岩成矿期水体为弱还原—还原环境。

4.2.3 青山口组油页岩成矿期古气候条件

古气候环境可以通过气候指数 *C*、Fe/Mn 和 Mg/Ca 来表现。

青山口组油页岩的气候指数 *C* 介于 0.35~0.46 之间,明显低于嫩江组,青山口组时期比嫩江组时期的古气候略为干热,为半温湿-半干热的气候。

Fe/Mn 平均值为 87.25,Mg/Ca 平均值为 0.61,也高于嫩江组,进一步指示了青山口组油页岩形成时的略为干热的古气候。

综上, 青山口组油页岩形成于半温湿—半干热的气候。

研究表明, 适宜油页岩形成的生长条件为较温湿气候下的微咸水—半咸水还原环境。故在气候条件、氧化还原条件与盐度达到一定的平衡时, 最利于油页岩形成, 这一点清晰地微量元素中表现出来。

5 结论

(1) 松辽盆地青山口组和嫩江组油页岩中整体 B、Ba、Li、Pb、Rb、Zr 含量偏高, 而 Co、Cr、Cu、Nb、Ni、Sr、Th、V 含量偏低, Ga、Hf、Ta、U、Zn 含量与地壳差别不大。

(2) 根据聚类分析结果, 把 21 种微量元素分为 4 组, 选择组间不同性质元素组合, 以其比值作为恢复古环境依据。并且通过含油率与微量元素相关系数得知, 油页岩成矿期的氧化还原条件对油页岩形成有着更大的影响, 其次为气候的影响和盐度的影响。

(3) 通过古盐度定量计算以及微量元素比值分析, 松辽盆地油页岩成矿期古环境主要为温暖湿润—半湿润气候, 湖水盐度为微咸水—半咸水的还原环境。青山口组相对于嫩江组盐度变化相对稳定, 气候为半湿润—半干热气候。

(4) 青山口组和嫩江组古环境自下而上分别呈 2 个旋回变化, 自下而上气候由温暖湿润变得略为干热

再变向温暖湿润。古盐度先变高再变低。

(5) 适宜油页岩形成的生长条件为较温湿气候下的微咸水—半咸水还原环境。在气候条件、氧化还原条件与盐度达到一定的平衡时, 油页岩品质最好。

参考文献:

- [1] 郭巍, 李成博, 宋玉勤, 等. 民和盆地炭山岭油页岩特征及成矿控制因素分析[J]. 吉林大学学报 地球科学版, 2006, 26(6): 923-927.
- [2] 刘春莲, 秦红, 车平, 等. 广东三水盆地始新统布心组生油岩元素地球化学特征及沉积环境[J]. 古地理学报, 2005, 7(1): 125-136.
- [3] 邓宏文, 钱凯. 沉积地球化学与环境分析[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993: 4-29.
- [4] 邓平. 微量元素在油气勘探中的应用[J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(1): 27-32.
- [5] 刘招君, 柳蓉. 中国油页岩特征及开发利用前景分析[J]. 古地理学报, 2005, 12(3): 315-323.
- [6] 王东坡, 刘招君, 刘立. 松辽盆地演化与海平面升降[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 97-103.
- [7] 刘招君, 董清水, 叶松青, 等. 中国油页岩资源现状[J]. 吉林大学学报 地球科学版, 2006, 26(6): 869-876.
- [8] 王慎余, 许家朋, 王振海. 我国油页岩资源开发利用状况及发展对策[J]. 中国地质经济, 1992(5): 16-19.
- [9] 王敏芳, 黄传炎, 徐志诚, 等. 综述沉积环境中古盐度的恢复[J]. 新疆石油天然气, 2006, 2(1): 9-12.
- [10] 王随继, 黄杏珍, 妥进才, 等. 泌阳凹陷核桃园组微量元素演化特征及其古气候意义[J]. 沉积学报, 1997, 15(1): 65-70.