

# 松辽盆地营城组两类酸性火山岩地球化学特征与成因\*

孟凡超<sup>1</sup> 路玉林<sup>2</sup> 刘嘉麒<sup>3</sup> 崔岩<sup>4</sup>

MENG FanChao<sup>1</sup>, LU YuLin<sup>2</sup>, LIU JiaQi<sup>3</sup> and CUI Yan<sup>4</sup>

1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580

2. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

4. 中国石油大学胜利学院, 东营 257097

1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2. Development Research Center, China Geology Survey, Beijing 100037, China

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

4. Shengli College, China University of Petroleum, Dongying 257097, China

2011-11-07 收稿, 2012-08-19 改回.

**Meng FC, Lu YL, Liu JQ and Cui Y. 2013. Geochemical characteristics and petrogenesis of two types of acid volcanic rocks from Yingcheng Formation in Songliao Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 29(8):2731–2745**

**Abstract** The thick volcanic rocks are widely distributed in Yingcheng Formation of Songliao Basin. Core and thin section identification exhibit that volcanic rocks are mainly composed of rhyolite, dacite, rhyolitic tuff, ignimbrite and so on. Major, trace elements and isotopic geochemistry studies indicate that acid rocks are obviously classified as two types: high Ti acid volcanic rocks (HTAVR) and low Ti acid volcanic rocks (LTAVR). Many conclusions can be draw from the results of geochemical elements: (1) HTAVR have higher  $TiO_2$  ( $TiO_2 > 0.45\%$ ) but lower  $SiO_2$  (64.87% ~ 68.79%). LTAVR have lower  $TiO_2$  ( $TiO_2 < 0.4\%$ ) but higher  $SiO_2$  (68.93% ~ 76.69%). (2) Major and trace elements express continuous variation between HTAVR and sub-alkaline intermediate-basic rocks. They also have similar Sr-Nd isotopic elements. LTAVR are the main components in Yingcheng Formation with wide initial  $^{87}Sr/^{86}Sr$  ratios. (3) The two types of acid rocks were probably associated with the lithospheric thinning and asthenospheric mantle upwelling by subduction of the Pacific plate beneath eastern China. However, there are many different geochemical characteristics between the two types of acid rocks because of different magmas source, geochemistry process and crustal contamination. The magmas of HTAVR were generated partial melting of the depleted mantle which has been enriched but undergoing fractional crystallization. The generation of LTAVR originated from mixed melting of juvenile crust and low crust components with contaminated by supracrust.

**Key words** Songliao Basin; Yingcheng Formation; Acid volcanic rocks; Petrogenesis

**摘要** 松辽盆地断陷期营城组发育一套厚层火山岩, 钻井岩心及薄片观察发现, 火山岩以流纹岩、英安岩、流纹质凝灰岩及熔结凝灰岩等酸性火山岩为主, 中基性岩相对较少。在对样品精细挑选基础上, 开展了岩石主量元素、微量元素及 Sr-Nd 同位素测试分析。结果显示, 该套酸性火山岩依据  $TiO_2$  含量可明显分为两类, 其中高 Ti 酸性火山岩 ( $TiO_2 > 0.45\%$ ), 规模较小,  $SiO_2$  含量介于 64.87% ~ 68.79% 之间, 其主量元素、微量元素与亚碱性中基性岩呈连续变化趋势且具有相似的 Sr-Nd 同位素组成; 低 Ti 酸性火山岩 ( $TiO_2 < 0.4\%$ )  $SiO_2$  含量为 68.93% ~ 76.69%, 该类岩石为营城组酸性火山岩主体, 与碱性基性岩呈双峰式组合, 元素含量及同位素比值变化范围较大。研究表明, 两类酸性火山岩的形成都与晚中生代东北地区受古太平洋板

\* 本文受国家重点基础研究发展计划项目(2009CB219301)、山东省自然科学基金项目(ZR2012DL10)和中央高校基本科研业务费专项资金(11CX04007A)联合资助。

第一作者简介: 孟凡超, 男, 1982 年生, 博士, 讲师, 从事地球化学及火山岩油气藏相关教学与科研工作, E-mail: mfc1982@126.com

块俯冲引起的岩石圈拆沉减薄软流圈上涌有关。在板块俯冲影响下,被富集的亏损地幔源区发生部分熔融,在岩浆演化过程中经历了一定分离结晶作用形成了少量高Ti酸性火山岩岩浆。与此同时,在底侵作用下新生地壳与下地壳物质发生混合熔融,受上地壳不同程度混染后形成了大规模的低Ti酸性火山岩岩浆。

**关键词** 松辽盆地;营城组;酸性火山岩;岩石成因

**中图分类号** P588.141; P588.142

松辽盆地是我国较大的中生代陆相含油气盆地,具有断陷-拗陷双重结构的大型叠合盆地(高瑞祺和蔡希源,1997; Wang *et al.*, 2006; 赵文智等, 2008; 侯启军等, 2009)。盆地上部拗陷主要是沉积盖层,下部断陷为火山岩夹煤系地层(Wang *et al.*, 2002; 赵文智等, 2008)。上部拗陷层已发现大小油田几十个,油气资源相当丰富。随着勘探的深入,先后在徐家围子、长岭、德惠等断陷的火山岩储层内获得了5000亿方以上三级储量,展示了松辽盆地深层超万亿方的勘探潜力(Feng, 2008; 王璞珺和冯志强, 2008)。

松辽盆地深层火山岩气藏作为一种非常规的油气藏类型,在储层岩性岩相特征、岩石物理性质、储层物性、天然气成因及气藏形成机理等方面取得了重要进展(戴金星等, 2001; Li *et al.*, 2006; 王璞珺等, 2006; 王璞珺和冯志强, 2008; 冯子辉等, 2008, 2010; 赵文智等, 2008; 王先彬等, 2009),明显推进了火山岩气藏的勘探与开发。研究表明,营城组火山岩喷发时代为早白垩世,岩性以酸性火山熔岩及火山碎屑岩为主,中基性岩相对较少(Wang *et al.*, 2002; 章凤奇等, 2007; 王璞珺和冯志强, 2008)。目前对于营城组酸性火山岩成因仍存在分歧,部分学者认为酸性火山岩与中性火山岩具有相似源区,母岩浆来自被交代的岩石圈地幔,具有相对稍低的Nd而较高且变化较大的Sr比值,酸性火山岩经历了不同程度的地壳混染(Wang *et al.*, 2006; 章凤奇等, 2007),另一部分作者认为,基性岩岩浆来自被富集的亏损地幔源的部分熔融,酸性火山岩为亏损地幔初生地壳的部分熔融且受到上部地壳混染(高研, 2008; 陈井胜, 2009; 宋立忠等, 2010)。酸性火山岩是营城组火山岩储层的重要组成部分,因此弄清酸性火山岩成因对正确认识储层形成机理与分布规律具有重要意义。本文以盆地徐家围子、长岭、德惠等断陷营城组酸性火山岩为研究对象,通过系统地球化学分析测试,揭示酸性岩成因及形成环境。

## 1 区域地质背景和岩石学特征

我国东北地区位于中亚造山带的最东端(图1a),处于西伯利亚板块、华北板块和西太平洋板块交汇地带(Jahn *et al.*, 2000; 张兴洲等, 2006)。本区显生宙经历了复杂的演化历史,蛇绿岩套和深大断裂的发现表明本区由若干微板块拼接而成(Yan *et al.*, 1989; Li, 2006),一般认为东北地区古生代处于古亚洲洋构造域演化阶段,区内额尔古纳-兴安、松嫩-张广才岭和佳木斯等微板块拼合而成的古陆块分别与华北板块和西伯利亚板块完成拼贴,但对各微板块之间以及

板块之间的拼接碰撞时间和方式仍存在较大分歧(张贻侠等, 1998; Li *et al.*, 2004; 张兴洲等, 2006)。中生代开始受太平洋板块斜向俯冲作用,进入环太平洋构造域演化阶段,导致众多伸展断陷盆地和大规模火山爆发(刘嘉麒, 1999; Wu *et al.*, 2000)。

东北地区晚中生代发生了强烈的构造岩浆活动,产生了大规模的侵入岩和喷出岩,占东北地区60%左右(Zhang *et al.*, 2010)。岩石学及地球化学研究表明,火山岩以中酸性岩类为主,基性岩相对较少,近年来,大量高精度火山岩锆石U-Pb年龄显示大兴安岭晚中生代火山活动分为晚侏罗世和早白垩世两期,早白垩世活动较为强烈,年龄峰值集中在125Ma年左右(Zhang *et al.*, 2008a; Zhang *et al.*, 2010),其中大兴安岭南端火山活动在120Ma左右基本结束,而北部火山活动一直持续到105Ma左右(Zhang *et al.*, 2010)。钻孔揭示,在盆地基底、火石岭组、营城组、青山口组等中也见有大量火山岩(Wu *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2002; 王璞珺等, 2010),对这些火山岩成因研究是探讨松辽盆地形成与演化的重要途径之一。

本研究所选样品为松辽盆地徐家围子、长岭、德惠等断陷内营城组酸性火山岩(图1b, c)。最新数据显示,松辽盆地营城组火山岩年龄集中在115~109Ma,为早白垩世(章凤奇等, 2008; Zhang *et al.*, 2011)。火山岩沿主断层两侧呈串珠状分布,火山岩厚度从几米到几百米不等,岩性以流纹岩和流纹质火山碎屑岩为主。主要岩石类型如下:

**流纹岩** 流纹岩是松辽盆地钻井岩心揭示出的最多的岩石类型之一,岩心观察其颜色主要为灰白色、灰色,其次为灰绿色。流纹岩一般为斑状或隐晶质结构,可见明显的流纹构造,显微镜下,流纹岩呈斑状结构,斑晶含量一般维持在5%左右,最多不超过10%,主要为石英和碱性长石(5%),少量斜长石(1%),极少数云母、磷灰石和钛铁氧化物。基质大部分已经脱玻化,具有明显的球粒结构或霏细结构。

**英安岩** 岩石多呈深灰色,浅灰绿色,常见斑状结构,斑晶较少,低于5%,包括斜长石、石英或透长石等,极少见辉石、黑云母或角闪石,基质多为隐晶质-半晶质结构、霏细结构,有的可见流纹构造。

**流纹质晶屑(岩屑)凝灰岩** 晶屑凝灰岩中的晶屑以碱性长石、石英为主,石英多已被溶蚀成港湾状、浑圆状,岩屑主要是火山喷发过程中卷入的围岩物质。基质具凝灰结构,一般呈霏细状,部分基质发生重结晶,很难分清颗粒边界。

**流纹质角砾熔岩** 角砾成分复杂,有石英岩、泥岩、流纹岩和变质岩等,角砾大小不一,0.2~20mm不等,含量5%~

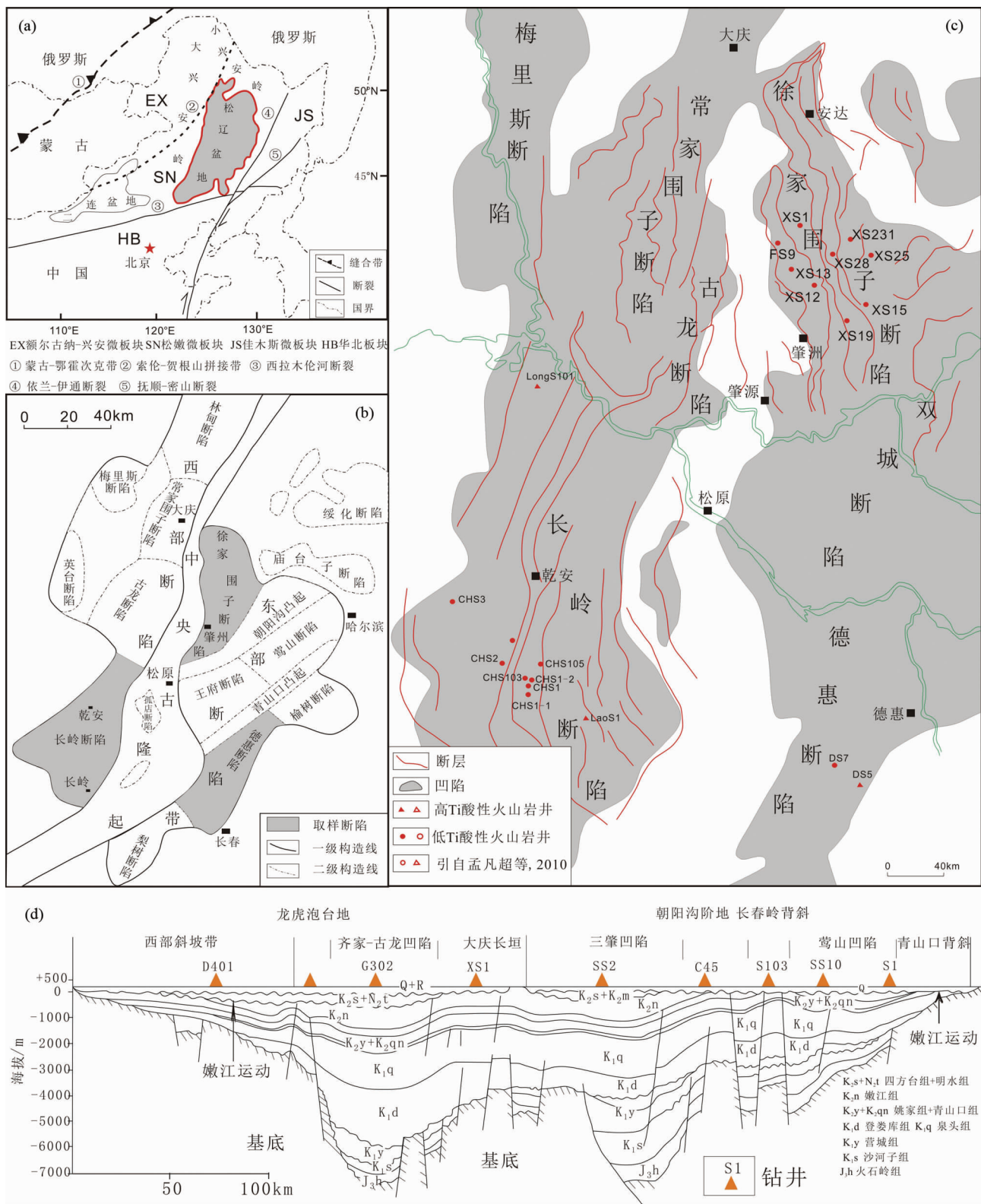


图1 松辽盆地构造位置与采样井分布图 (据 Meng, 2003; 赵文智等, 2008; 侯启军等, 2009)

(a)-区域位置;(b)-松辽盆地深层构造单元;(c)-取样井分布;(d)-松辽盆地东西向剖面

Fig.1 Simplified geological map of Songliao Basin and locations of sampling boreholes (modified after Meng, 2003; Zhao *et al.*, 2008; Hou *et al.*, 2009)

(a)-simplified geological map; (b)-tectonic units in deep of Songliao Basin; (c)-locations of sampling boreholes; (d)-EW section of Songliao Basin

20% ; 基质主要是流纹质, 具有凝灰结构。

熔结凝灰岩 颜色主要为肉红色, 其次为灰色、灰白色等, 部分含有长石、石英晶屑, 含量小于 30%, 基质中常含浆屑, 呈透镜状、撕裂状, 熔结结构, 常见假流纹构造。

## 2 实验样品选择与实验方法

采集样品过程中尽量挑选了新鲜未蚀变火山岩, 经过手标本粗选和薄片鉴定, 兼顾样品空间分布, 选择松辽盆地南部长岭及德惠断陷 9 口钻井内的 23 块样品进行主量、微量及 Sr-Nd-Pb 同位素测试 (图 1c), 样品粉碎过程中, 剔除明显的风化和蚀变岩屑及杏仁体, 尽量选其基质未发生过脱玻化或重结晶等作用的样品。但盆地火山岩埋深于 3000m 以下地层, 长期受热液活动、埋深变质、低温水合作用和长英质基质本身脱玻化作用等影响, 可能会导致某些元素含量的增加或减少, 稀土元素及高场强元素基本不受影响。

所有样品测试工作在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室完成。主量元素使用 X-射线荧光光谱仪 (XRF-1500) 采用外标法测定, 分析误差优于 5%。微量元素利用酸溶法制备样品, 使用 ICP-MS (Element II) 标准曲线法测试, 用国家标准参考物质 GRS1 (花岗岩) 进行质量监控, 绝大多数元素 RSD ≤ 10。Sr-Nd 同位素组成用德国 Finnigan 公司生产的 MAT262 热电离质谱仪测定。Sr 同位素比值采用  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$  进行质量分馏校正; Nd 同位素比值采用  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$  进行校正。

## 3 分析结果

### 3.1 主量元素

分析结果见表 1。为更全面了解松辽盆地营城组酸性火山岩特征, 除本次研究所测样品以外, 本文作图过程中引用了作者已发表的徐家围子营城组流纹岩 (孟凡超等, 2010) 和人对松辽盆地营城组火山岩地球化学测试结果 (郭军等, 2000; 杨峰平, 2005; Wang *et al.*, 2006; 章凤奇, 2007; 章凤奇等, 2007, 2009; 陈井胜, 2009; 宋立忠等, 2010)。

TAS 图上 (图 2), 本文自测样品主要投影在流纹岩、英安岩和粗面岩范围内。酸性岩普遍高硅 ( $\text{SiO}_2$  为 64.87% ~ 76.69%, 平均 70.96%)、高碱 ( $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 4.09\% \sim 10.43\%$ , 平均 7.76%),  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.64 \sim 38.64$ , 平均 5.09, 大部分样品显著富钾。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  为 7.42% ~ 17.03%, 平均 12.47%, 全铁 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ ) 为 1.86% ~ 4.74%, 低  $\text{MgO}$  (0.05% ~ 1.84%, 平均 0.58%)、 $\text{CaO}$  (0.05% ~ 3.88%, 平均 1.20%)、 $\text{P}_2\text{O}_5$  (0.01% ~ 0.19%, 平均 0.06%)。根据  $\text{TiO}_2$  含量, 营城组火山岩可以明显分为两组, 即高 Ti 酸性火山岩和低 Ti 酸性火山岩 (图 3)。高 Ti 酸性火山岩 ( $\text{TiO}_2 > 0.45\%$ ),  $\text{SiO}_2$  含量介于 64.87% ~ 68.79% 之间; 低 Ti 酸性

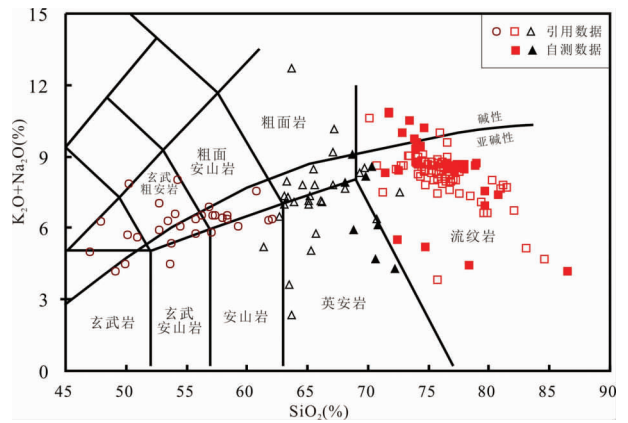


图 2 松辽盆地营城组酸性火山岩 TAS 图解 (据 Le Bas *et al.*, 1986; Le Maitre *et al.*, 1989)

碱性亚碱性系列界限据 Irvine and Baragar (1971)

Fig. 2 TAS diagram for the acid volcanic rocks from Yingcheng Formation in Songliao Basin (after Le Bas *et al.*, 1986; Le Maitre *et al.*, 1989)

The alkaline boundary in TAS diagram is after Irvine and Baragar (1971)

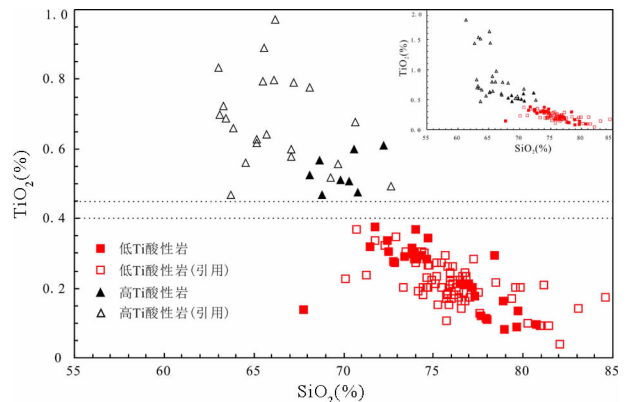


图 3 松辽盆地营城组酸性火山岩  $\text{SiO}_2$  与  $\text{TiO}_2$  相关图

Fig. 3  $\text{SiO}_2$  vs.  $\text{TiO}_2$  for the acid volcanic rocks from Yingcheng Formation in Songliao Basin

火山岩 ( $\text{TiO}_2 < 0.4\%$ ),  $\text{SiO}_2$  含量为 68.93% ~ 76.69%。综合前人所测该区数据, 在  $\text{SiO}_2$  与其它主量元素相关图上 (图 4), 高 Ti 酸性火山岩及亚碱性中基性岩的  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  与  $\text{SiO}_2$  呈明显正相关,  $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$  与  $\text{SiO}_2$  均呈负相相关, 暗示两者存在演化关系; 而低 Ti 酸性火山岩各主量元素与  $\text{SiO}_2$  相关性不明显, 缺少中性岩, 表明低 Ti 酸性岩与本区碱性基性岩不存在演化关系。

### 3.2 稀土元素

松辽盆地营城组低 Ti 酸性火山岩  $\Sigma \text{REE}$  介于  $129.7 \times 10^{-6} \sim 597.4 \times 10^{-6}$ , 平均  $416.9 \times 10^{-6}$ ; 轻稀土略富集, ( $\text{La}/$

表 1 松辽盆地营城组酸性火山岩主量元素(wt%)和微量元素( $\times 10^{-6}$ )含量

Table 1 Contents of major elements(wt%) and trace elements( $\times 10^{-6}$ ) of acid volcanic rocks from Yingcheng Formation in Songliao Basin

样品号	长岭断陷										德惠断陷										长岭断陷										德惠断陷									
	CHS 1-1-2	CHS 1-2	CHS 1-2-1	CHS 1-2-2	CHS 105-1	CHS 105-2	CHS 103-1	CHS 103-2	CHS 103-3	CHS 103-5	CHS 3-1	CHS 3-3	CHS 3-4	CHS 3-5	LS 101-4	DS 7-1	LS 101-4	LS 1-1	LS 1-2	LS 1-2	DS 5-1	DS 5-2	DS 5-3	DS 5-4																
SiO <sub>2</sub>	73.53	76.69	75.47	76.53	71.83	75.01	72.33	72.85	72.89	72.53	69.33	68.93	72.04	72.76	69.06	73.14	66.09	68.79	65.94	67.79	64.87	66.62	67.09																	
TiO <sub>2</sub>	0.28	0.2	0.21	0.21	0.33	0.28	0.29	0.29	0.3	0.31	0.31	0.29	0.27	0.29	0.32	0.28	0.45	0.58	0.56	0.49	0.50	0.55	0.49																	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.65	10.72	10.61	10.71	12.03	9.89	11.59	11.12	11.24	11.43	12.23	12.05	11.68	12.04	12.19	13.69	15.62	16.21	15.71	14.29	14.35	15.75	13.85																	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	3.67	3.09	3.34	3.19	4.21	3.29	4.12	4.1	4.43	4.09	4.7	4.42	4.73	3.35	4.11	1.86	4.11	2.48	2.74	2.76	3.00	3.09	2.76																	
MnO	0.09	0.03	0.06	0.07	0.12	0.12	0.09	0.09	0.1	0.07	0.21	0.14	0.05	0.05	0.06	0.03	0.04	0.01	0.02	0.04	0.08	0.03	0.06																	
MgO	0.10	0.09	0.05	0.06	0.88	0.59	0.25	0.27	0.28	0.17	0.1	0.12	0.07	0.09	1.47	0.37	1.55	1.57	1.84	0.78	0.87	0.97	0.73																	
CaO	0.11	0.25	0.26	0.2	1.74	2.28	0.08	0.05	0.05	0.05	2.04	1.09	0.13	0.1	2.81	0.73	2.43	1.28	2.04	1.92	3.88	1.04	3.14																	
Na <sub>2</sub> O	1.06	3.46	4.83	4.34	1.08	1.57	3.62	2.20	2.54	2.87	3.18	3.61	0.25	0.57	3.20	3.39	2.68	0.22	0.59	4.32	3.70	3.84	3.87																	
K <sub>2</sub> O	8.98	4.85	3.76	4.07	3.91	2.66	5.49	7.04	6.68	6.71	4.89	4.42	9.66	9.86	2.06	5.18	3.00	3.87	3.78	3.93	3.85	4.98	3.97																	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.08	0.06	0.10	0.19	0.18	0.14	0.13	0.15	0.13																	
LOI	0.94	0.64	0.78	0.84	3.98	3.81	1.90	1.42	1.62	1.28	2.44	1.72	1.08	1.28	4.12	1.60	4.23	5.09	6.07	3.00	4.81	2.64	3.98																	
Total	99.42	100.03	99.39	100.23	100.13	99.51	99.78	99.45	100.15	99.53	99.46	96.80	99.98	100.41	99.48	100.33	100.31	100.30	99.47	99.46	100.05	99.65	100.06																	
La	43.46	77.99	102.8	74.22	88.52	52.95	86.09	87.27	99.49	105.4	124.1	123.6	101.5	107.8	27.12	48.47	27.76	15.25	15.76	37.77	36.53	39.86	35.68																	
Ce	89.47	168.2	210.7	168.6	171.5	113.3	177.9	173.8	190.5	214.1	248.5	250.3	192.3	206.6	55.21	93.15	59.02	31.46	32.00	74.82	72.98	79.99	71.58																	
Pr	10.71	19.46	24.87	19.42	21.64	13.58	21.77	21.88	24.68	25.89	29.6	29.41	24.34	25.99	6.69	10.63	7.20	4.05	4.07	8.87	8.74	9.53	8.53																	
Nd	39.41	74.63	96.79	69.79	80.75	52.3	83.88	83.3	94.44	99.32	107.85	109.02	93.66	103.92	23.38	36.1	26.32	15.18	15.40	31.10	31.94	34.62	31.08																	
Sm	7.17	14.92	18.16	13.35	16.52	11.15	16.72	16.08	18.73	19.2	21	21.08	17.83	19.17	3.92	6.23	4.96	2.88	2.92	5.57	5.86	6.07	5.67																	
Eu	0.61	0.78	0.89	0.68	1.29	0.85	1.35	1.24	1.47	1.51	1.91	1.88	1.58	1.7	0.69	0.93	1.07	0.63	0.68	1.23	1.30	1.24	1.31																	
Gd	6.59	13.83	15.85	12.65	14.97	10.03	14.96	14.13	16.57	17.14	19.18	18.48	15.98	16.62	3.5	5.29	4.24	2.36	2.48	4.85	5.38	5.17	5.09																	
Tb	1.17	2.51	2.63	2.29	2.56	1.68	2.34	2.27	2.65	2.69	2.99	2.93	2.58	2.66	0.54	0.8	0.66	0.34	0.36	0.75	0.89	0.78	0.82																	
Dy	7.21	16.01	15.49	14.16	15.13	9.79	13.83	13.3	15.43	15.41	17.02	16.84	14.94	15.2	3.21	4.52	3.79	1.84	1.94	4.15	5.37	4.50	4.74																	
Ho	1.54	3.56	3.2	2.92	3.09	1.96	2.92	2.76	3.23	3.25	3.45	3.46	3.12	3.11	0.7	0.95	0.75	0.36	0.37	0.84	1.12	0.94	0.94																	

高位酸性岩

低位酸性岩

续表 1

Continued Table 1

样品号	长岭断陷												德惠断陷					长岭断陷					德惠断陷				
	CHS 1-1-2	CHS 1-2	CHS 1-2-1	CHS 1-2-2	CHS 105-1	CHS 105-2	CHS 103-1	CHS 103-2	CHS 103-3	CHS 103-5	CHS 3-1	CHS 3-3	CHS 3-4	CHS 3-5	LS 101-3	DS 7-1	LS 101-4	LS 1-1	LS 1-2	DS 5-1	DS 5-2	DS 5-3	DS 5-4				
采样井	长深	长深	长深	长深	长深	长深	长深	长深	长深	长深	长深	长深	长深	长深	长深	长深	老深	老深	老深	老深	老深	老深	老深	老深			
岩性	低盲酸性岩												高盲酸性岩														
Er	4.06	10.04	8.5	7.58	8.05	5.18	7.92	7.43	8.62	8.83	9.31	9.27	8.3	8.31	2.01	2.71	2.14	0.98	1.00	2.33	3.07	2.68	2.52				
Tm	0.61	1.52	1.23	1.11	1.12	0.76	1.16	1.06	1.22	1.27	1.35	1.36	1.17	1.21	0.31	0.43	0.33	0.15	0.15	0.35	0.46	0.41	0.37				
Yb	3.82	9.79	7.84	6.84	6.81	4.76	7.21	6.56	7.64	7.84	8.36	8.43	7.09	7.31	2.06	2.85	2.16	0.96	0.96	2.30	3.04	2.71	2.41				
Lu	0.6	1.5	1.18	1.02	1.03	0.72	1.13	1.01	1.2	1.19	1.3	1.31	1.08	1.11	0.31	0.45	0.33	0.14	0.14	0.35	0.45	0.42	0.36				
Sc	3.93	3.67	3.47	3.24	6.34	5.13	3.68	3.42	4.01	3.45	4.82	4.63	3.98	4.23	5.71	4.21	8.24	10.50	10.70	5.67	6.19	6.90	5.73				
V	3.22	2.79	2.77	2.41	6.2	10.77	3.86	3.21	3.32	2.66	1.13	1.3	2.82	2.34	32.07	19.55	47.37	83.93	89.43	32.02	37.24	38.88	31.22				
Cr	116.1	140.9	177.1	131.0	39.87	60.0	135.3	125.4	134.4	71.2	85.62	95.93	92.14	96.33	61.29	148.6	50.17	208.1	245.5	99.58	106.3	106.6	111.0				
Co	1.05	1.11	1.52	1.05	1.53	2.37	1.11	1.03	1.04	0.63	0.74	0.82	0.72	0.69	7.03	2.99	6.42	10.57	10.62	4.45	5.02	5.06	4.39				
Ni	3.61	4.02	5.85	3.09	6.07	6.73	4.25	3.94	3.58	2.35	2.48	2.55	5.85	2.43	3.36	5.75	3.47	86.19	76.02	5.13	5.41	4.01	4.58				
Cu	1.56	1.69	1.52	1.10	2.41	3.91	1.3	0.98	1.25	0.92	1.02	1.15	3.30	2.60	2.98	3.72	5.28	29.92	32.76	4.54	4.21	2.97	3.91				
Zn	89.02	202.5	148.3	166.6	152.9	100.2	162.8	187.4	187.0	133.2	220.7	210.0	144.8	137.9	65.54	36.26	66.18	44.13	44.32	51.58	45.17	44.64	48.65				
Ga	14.56	32.3	33	32.36	32.97	21.19	34.07	27.86	29.91	29.18	34.17	33.64	19.88	22.27	14.54	19.34	19.81	21.21	20.90	18.91	19.67	21.90	17.65				
Rb	216.1	134.4	99.74	110.1	181.4	129.6	126.8	163.9	157.0	150.1	118.1	107.2	287.9	296.3	74.1	166.1	110.1	71.46	71.68	115.0	114.9	147.4	108.1				
Sr	15.58	40.35	30.8	31.02	473.6	387.1	17.30	14.72	15.60	13.41	116.4	91.19	50.72	43.73	319.4	145.18	419.0	344.3	400.2	241.2	368.8	179.1	310.5				
Y	32.88	83.8	77.66	75.41	76.59	45.13	70.36	66.61	79.18	81.72	82.5	81.42	70.58	70.33	19.57	23.66	20.02	9.42	9.73	20.82	27.75	22.72	23.18				
Zr	464	984	1019	1024	688	592	701	684	824	808	1176	1161	1090	1171	160	173	229	134	130	185	186	209	171				
Nb	42.09	81.12	85.05	86.33	71.96	66.2	91.52	78.88	84.07	80.24	112.9	108.9	103.6	103.4	7.08	16.12	9.57	4.65	4.50	16.90	17.09	19.84	16.02				
Ba	72.3	84.8	38.1	41.8	166.0	128.3	75.3	25.6	41.9	36.0	70.6	61.8	148.0	150.1	323.6	700.7	560	192	220	674	642	845	730				
Hf	12.32	25.34	24.95	24.28	18.92	17.5	17.07	17.26	19.73	19.06	29.51	29.54	28.8	30.59	4.66	5.85	6.26	3.79	3.68	5.53	5.56	6.34	5.22				
Ta	3.22	6.39	5.79	5.96	5.08	5.30	5.04	5.26	5.32	5.22	7.72	7.69	7.27	7.94	0.56	1.83	0.69	0.31	0.30	1.44	1.43	1.63	1.36				
Pb	28.58	30.05	20.49	24.29	40.26	22.73	37.03	29.99	31.51	34.89	30.14	29.17	24.05	18.25	23.07	23.76	16.11	10.59	12.23	17.63	24.89	8.39	23.68				
Th	9.1	16.15	14.91	14.87	16.51	15.03	13.25	14.95	14.75	15.64	17.88	17.88	16.07	17.14	7.41	20.29	9.96	6.82	6.63	12.95	13.19	14.74	12.63				
U	2.16	3.82	2.53	3.09	2.83	3.34	1.52	1.37	1.60	1.66	4.31	4.08	3.87	4.56	1.65	4.7	2.33	1.86	1.81	3.21	3.84	4.31	3.11				
δEu	0.26	0.16	0.16	0.16	0.24	0.24	0.25	0.24	0.25	0.25	0.28	0.28	0.28	0.28	0.56	0.48	0.69	0.71	0.75	0.70	0.69	0.66	0.72				

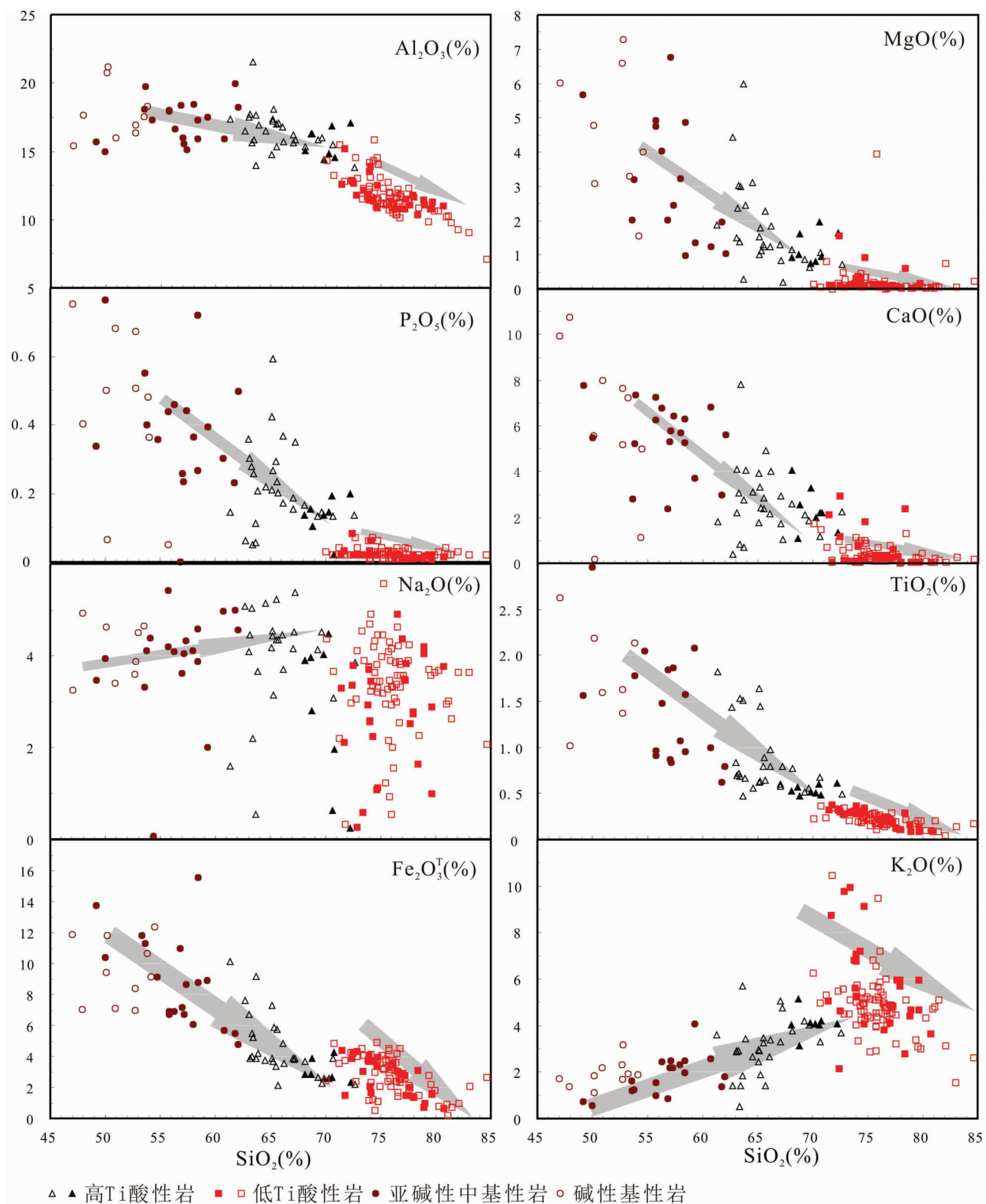


图4 松辽盆地营城组火山岩主量协变图

图7、图9-图12图例同此图

Fig.4 Major elements vs. SiO<sub>2</sub> diagrams for acid volcanic rocks from Yingcheng Formation in Songliao Basin

Symbols in Fig.7, Fig.9-Fig.12 as same as those in this figure

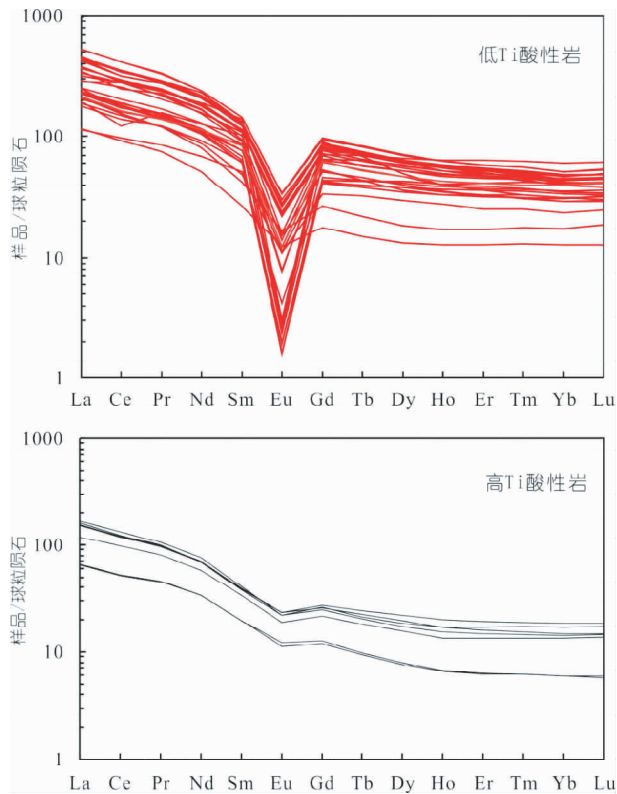


图5 松辽盆地营城组酸性火山岩球粒陨石标准化稀土配分图(标准化值据 Anders and Grevesse, 1989)

Fig.5 Chondrite-normalized rare earth element pattern of acid volcanic rocks from Yingcheng Formation in Songliao Basin (normalized values after Anders and Grevesse, 1989)

$(Yb)_N = 5.51 \sim 11.77$ , 平均 9.00; 重稀土内部分馏不明显,  $(Dy/Yb)_N = 1.04 \sim 1.49$ ; 强烈的负铕异常,  $\delta Eu$  为 0.16 ~ 0.56。高 Ti 酸性火山岩  $\Sigma REE$  为  $76.57 \times 10^{-6} \sim 188.9 \times 10^{-6}$ , 明显低于低 Ti 酸性火山岩稀土总量, 轻稀土富集,  $(La/Yb)_N = 8.33 \sim 11.35$ , 平均 10.20, 比高 Ti 酸性火山岩富集明显。弱铕负异常,  $\delta Eu$  为 0.66 ~ 0.75。在稀土元素配分曲线图(图5)上, 高 Ti 及低 Ti 酸性火山岩均表现出稀土元素轻微右倾, 低 Ti 酸性火山岩 Eu 负异常程度明显高于高 Ti 酸性火山岩, 低 Ti 酸性火山岩 MREE 和 HREE 平缓, 无明显分馏, 高 Ti 酸性火山岩 MREE 略向下凹, 而 HREE 略有上凸。

### 3.3 微量元素

蛛网图(图6)上, 松辽盆地酸性火山岩均表现出强不相容元素 K、Rb、Th、U、Pb 正异常, Nb、Ta 等高场强元素弱亏损。但是低 Ti 酸性火山岩的 Zr、Y、Th、Rb、Nb 明显高于高 Ti 酸性火山岩, 而 Sr 含量远远低于高 Ti 酸性火山岩(表2)。低 Ti 酸性火山岩具有较明显的 Sr、P、Ti 负异常, 该特点与大兴安岭地区 A 型花岗岩及 A 型流纹岩特征极为相似(葛文春等, 2000; Wu *et al.*, 2002), 表明该类岩石经历了较强的斜长石、磷灰石、钛铁矿分离结晶或者熔融源区残留上述物

表2 松辽盆地营城组低 Ti 和高 Ti 酸性火山岩典型地球化学对比

Table 2 Geochemical characteristics of the high- and low-Ti groups of acid volcanic rocks from Yingcheng Formation in Songliao Basin

类别	低-Ti 酸性火山岩	高 Ti 酸性火山岩
SiO <sub>2</sub>	68.93 ~ 76.69(72.81)	64.87 ~ 68.79(66.74)
TiO <sub>2</sub>	0.20 ~ 0.33(0.28)	0.45 ~ 0.58(0.52)
Nb	23.38 ~ 109.0(157.03)	4.5 ~ 19.8(12.7)
Rb	74.1 ~ 296.3(157.4)	71.5 ~ 147.4(105.5)
Sr	13.4 ~ 473.6(112.9)	179.1 ~ 419(323.3)
Th	7.4 ~ 20.29(15.11)	6.6 ~ 14.7(11)
Y	19.6 ~ 83.8(64.8)	9.4 ~ 27.7(19.1)
Zr	159.5 ~ 1176(794.8)	129.1 ~ 228.6(177.5)
Ba	25.6 ~ 700.7(135.3)	192.4 ~ 845.2(551.8)
$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$	0.703940 ~ 0.705245	0.704270 ~ 0.706025
$\epsilon_{Nd}$	-6.19 ~ 3.38	-1.21 ~ 2.57

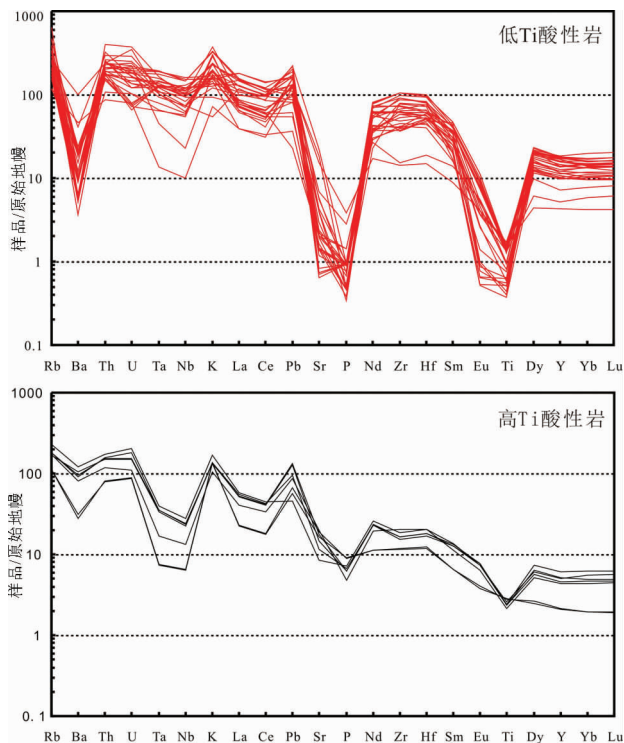


图6 松辽盆地营城组酸性火山岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.6 Primitive mantle-normalized trace element pattern of acid volcanic rocks from Yingcheng Formation in Songliao Basin (normalized values after Sun and McDonough, 1989)

质。微量元素变异图解上, 高 Ti 酸性火山岩和钙碱性中基性岩 SiO<sub>2</sub> 与强不相容元素 Ba、Rb、Th、U 呈明显正相关, 而与 Sr、La、Nb、Zr 呈明显负相关(图7), 低 Ti 酸性火山岩与钙碱性中基性岩及高 Ti 酸性岩相关性不明显, 此外 Sr 与  $Eu/Eu^*$  (即  $\delta Eu$ ) 相关图上(图8), 高 Ti 与低 Ti 酸性火山岩无明显



表 3 松辽盆地营城组酸性火山岩 Sr-Nd 分析结果

Table 3 Sr-Nd analysis results of acid volcanic rocks from Yingcheng Formation in Songliao Basin

样品号	采样断陷	采样井	岩性	$\frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}}$	$\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}$	$2\sigma$	$\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}}$	$\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}$	$2\sigma$	$\left(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}\right)_i$	$\left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}\right)_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}$
CHS1-2		长深 1	低 Ti 酸性火山岩	9.6474	0.721012	0.000010	0.1209	0.512691	0.000010	0.705245	0.512600	2.15
CHS105-1		长深 105		1.1077	0.70679	0.000012	0.1237	0.512699	0.000012	0.704980	0.512606	2.26
CHS105-2	长岭断陷	长深 105		0.9688	0.706763	0.000011	0.1289	0.51227	0.000011	0.705180	0.512173	-6.19
CHS3-1		长深 3		2.9366	0.708907	0.000012	0.1178	0.512744	0.000013	0.704108	0.512655	3.23
CHS3-3		长深 3		3.4023	0.709501	0.000019	0.1170	0.512751	0.000014	0.703940	0.512663	3.38
LS101-3		龙深 101		0.6712	0.706071	0.000011	0.1014	0.512674	0.000012	0.704974	0.512598	2.10
LS1-1		老深 1	0.6006	0.707007	0.000011	0.1147	0.512521	0.000012	0.706025	0.512435	-1.08	
LS1-2		老深 1	0.5183	0.706719	0.000011	0.1145	0.512514	0.000012	0.705872	0.512428	-1.21	
LS101-4		龙深 101	0.7601	0.706236	0.000013	0.1141	0.512666	0.000011	0.704994	0.512580	1.76	
DSS-1	德惠断陷	德深 5	高 Ti 酸性火山岩	1.3797	0.707019	0.000012	0.1083	0.512703	0.000012	0.704764	0.512622	2.57
DSS-2		德深 5		0.9008	0.706389	0.000011	0.1110	0.512673	0.000014	0.704917	0.512590	1.94
DSS-3		德深 5		2.3817	0.708162	0.000011	0.1061	0.512687	0.000012	0.704270	0.512607	2.29
DSS-4		德深 5		1.0072	0.706578	0.000013	0.1104	0.512695	0.000013	0.704932	0.512612	2.38
DS7-1		德深 7		3.3110	0.709869	0.000011	0.1043	0.512664	0.000013	0.704458	0.512586	1.86

注: 初始 Sr、Nd 同位素比值校正时, 酸性岩年龄采用 115Ma,  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ ,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  初始值计算均采用 ICP-MS 分析所得 Rb、Sr、Sm、Nd

相关性, 表明两者不存在斜长石分离结晶作用。

### 3.4 Sr-Nd 同位素

Sr-Nd 同位素测试结果列于表 3, 本文选择 115Ma 进行了酸性火山岩 Sr-Nd 同位素值校正。

松辽盆地营城组酸性火山岩的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值依据岩石  $\text{TiO}_2$  含量也分为两组, 低 Ti 酸性火山岩的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值变化较大, 介于 0.703940 ~ 0.705245, 平均 0.704738, 高 Ti 酸性火山岩的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值相对集中, 介于 0.704270 ~ 0.706025, 平均 0.705029。酸性火山岩的  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$  变化范围较窄 (CHS105-2 除外,  $\epsilon_{\text{Nd}} = -6.19$ ),  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  介于 -1.21 ~ 3.38, 大部分为正值。Sr-Nd 相关图 (图 9) 上, 样品落在地幔序列的右侧, 松辽盆地酸性火山岩正的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值特点与东北地区显生宙造山带花岗岩、大兴安岭地区酸性岩十分类似 (Wu *et al.*, 2000; 葛文春等, 2000; Wu *et al.*, 2002; Guo *et al.*, 2007, 2009)。值得一提的是, 低 Ti 酸性火山岩  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值与  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  相对较广,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值具有向地壳方向演化的趋势。高 Ti 酸性火山岩的初始 Sr、Nd 值变化范围较小, 相对集中且与中基性火山岩投点相似。

## 4 讨论

酸性火山岩是岩浆演化最后阶段的产物, 是活动大陆边缘、大陆裂谷、大火山岩省等大陆火成作用的重要组成部分 (McCulloch *et al.*, 1994; Feeley and Dungan, 1996; Pankhurst *et al.*, 2000; Riley *et al.*, 2001; Miller and Harris, 2007), 其成因研究对认识大陆地壳火成作用及壳幔关系具有重要意义 (Annen *et al.*, 2006)。目前认为酸性岩成因主要有两种模式: 一种是中基性岩浆的分离结晶, 通常基性母岩浆经过

90% 的分离结晶作用才可以产生一定量的酸性岩浆 (Wilson, 1993), 常用来解释规模较小的酸性岩浆成因 (Shinjo and Kato, 2000); 另一种是玄武质岩浆底侵导致地壳岩石部分熔融, 以中酸性岩为主的分布面积广的酸性岩一般认为与地壳熔融有关 (Bryan *et al.*, 2002; Yamamoto, 2007), 但无论哪种成因酸性岩受地壳混染是不可避免的 (Mingram *et al.*, 2000)。

### 4.1 松辽盆地营城组酸性岩源区特征

对于松辽盆地营城组火山岩源区, 前人早有论述, 部分学者认为火山岩源区与洋壳俯冲引起幔源物质熔融有关, 包括蒙古-鄂霍次克海闭合和古太平洋板块俯冲两种机制 (闫全人等, 2002; Wang *et al.*, 2006)。另一部分学者认为, 火山岩源区与晚中生代岩石圈拆沉减薄软流圈上涌导致的岩石圈新生物质熔融有关, 包括亏损地幔和新生地壳物质 (章凤奇等, 2009; 陈井胜, 2009; 宋立忠等, 2010)。松辽盆地中基性火山岩 Sr、Nd 同位素比值位于地幔演化序列上,  $\epsilon_{\text{Nd}}$  低于亏损地幔 (图 9)。中基性岩富集大离子亲石元素和轻稀土元素, 亏损高场强及重稀土元素, Nb、Ti、P 负异常, 其源区可能与早期板块俯冲有关 (Wang *et al.*, 2006), 也可能是来自被富集的亏损地幔 (宋立忠等, 2010), 与这些中基性岩具有连续演化趋势的高 Ti 酸性火山岩所占比例较小, 并不是本区岩浆活动的主体, 高 Ti 酸性火山岩与本区中基性火山岩岩浆具有一定演化关系。低 Ti 酸性火山岩分布面积广、体积大, 是营城组火山岩的主体部分, 与少量碱性基性岩呈双峰式产出 (图 2), 缺失中性岩, 与碱性基性岩不存在演化关系。这类酸性岩具有较低的 Ba、Sr、P、Ti, 极低的 MgO、MnO、CaO, 以及 HFSEs (Nb、Ta、Zr、Hf) 相对弱亏损, 但硅、钾和放射性 Pb 同位素值高 (孟凡超等, 2010), 不相容元素 (K、

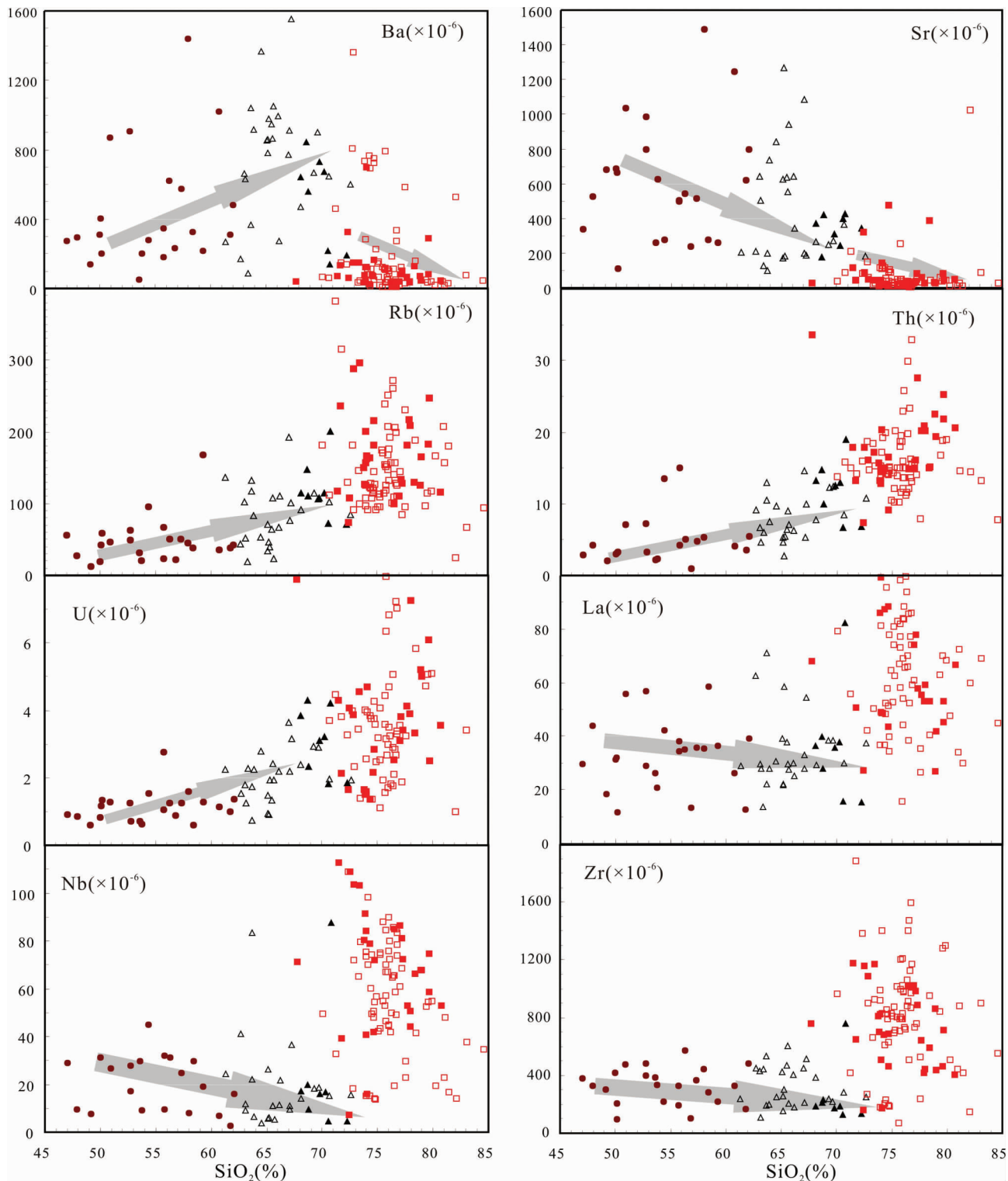
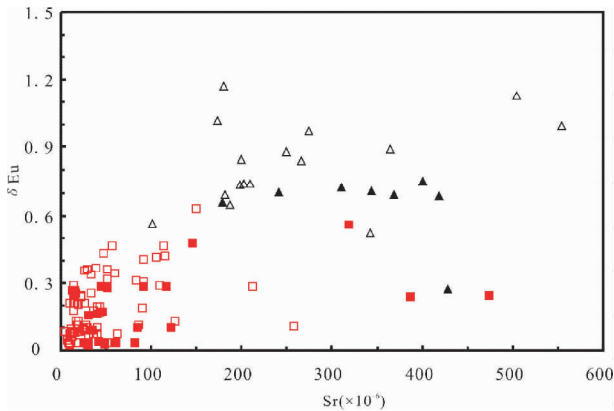


图7 松辽盆地营城组火山岩微量元素协变图

Fig.7 Trace elements vs.  $\text{SiO}_2$  diagrams for acid volcanic rocks from Yingcheng Formation in Songliao Basin

Rb、Th、U、Pb) 强烈富集, 类似于地壳熔融产生的流纹岩。然而一般正常的上、下地壳熔融产生的酸性火山岩, 均具有较高的 Sr 比值及负的  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值 (Ben *et al.*, 1984; Plank and Langmuir, 1998), 本区低 Ti 酸性火山岩总体具有相对低 Sr

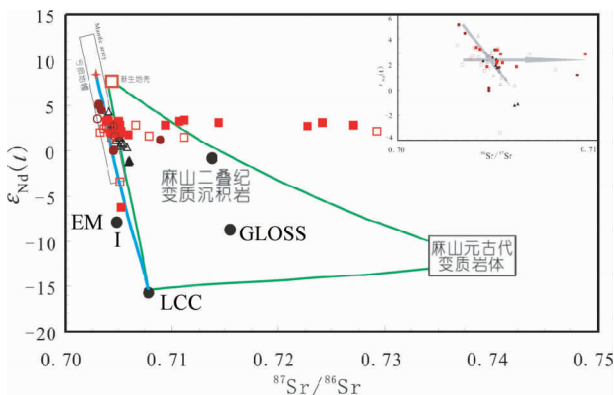
比值、正的  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值 (个别受混染样品除外), 年轻的 Nd 模式年龄 (631 ~ 979Ma, CHS105-2, 1580Ma 除外), 表明其源区与幔源物质或新生地壳有密切关系。然而源区直接来自亏损地幔且伴随少量地壳物质混染的假设很难解释如此大规模的

图 8 Sr- $\delta$ Eu 相关图

图例同图 3

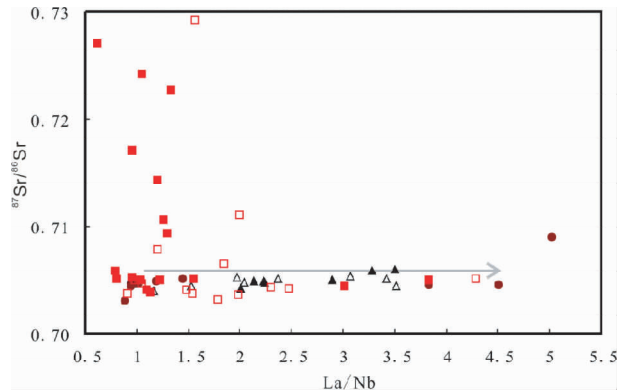
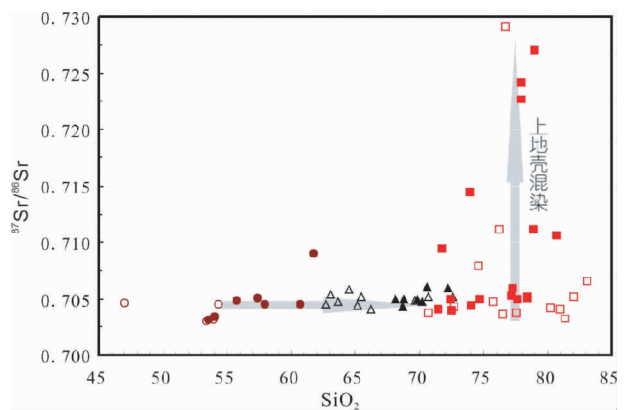
Fig. 8 plot of Sr vs.  $\delta$ Eu

Symbols as same as in Fig. 3

图 9 松辽盆地营城组火山岩  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  图 (据 Wu *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2006; Haapala *et al.*, 2007)Fig. 9  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  vs.  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  diagram for acid volcanic rocks from Yingcheng Formation in Songliao Basin (after Wu *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2006; Haapala *et al.*, 2007)

酸性岩浆作用。另一种可能是低 Ti 酸性火山岩来源于刚从地幔分异出来的新的地壳物质。Sr-Nd 图上 (图 9), 低 Ti 酸性火山岩主要分布在东北地区新生地壳与下地壳之间, 靠近新生地壳端元, 暗示其源区为大比例新生地壳与部分下地壳混合的部分熔融。

原始岩浆在上升过程中完全不受地壳混染是不可能的, 研究表明地壳混染可导致 Sr 含量降低, Pb 及 La/Nb 增大 (Riley *et al.*, 2001)。La/Nb- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  相关图上 (图 10), Sr 比值在很小范围内波动, 而 La/Nb 变化范围较大, 暗示岩浆遭受不同程度地壳混染, 高 Ti 酸性火山岩 Nb、Ta 亏损即可能是地壳混染所致。中国东北地区岩石圈普遍存在低 Sr、正  $\epsilon_{\text{Nd}}$  的新生地壳物质 (Jahn *et al.*, 1999; Wu *et al.*, 2002), 可能参与了高 Ti 酸性火山岩源区演化过程。另外低 Ti 酸性火

图 10 La/Nb- $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  相关图Fig. 10 La/Nb vs.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 图 11  $\text{SiO}_2$  与  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  相关图Fig. 11  $\text{SiO}_2$  vs.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 

山岩的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值范围变化较大 (0.703940 ~ 0.705245), 部分样品 Sr 比值与黑龙江麻山二叠纪变质沉积岩接近 (图 9), 表明局部地区火山岩的岩浆在演化过程中受上地壳强烈混染 (Wang *et al.*, 2006), 但由于松辽盆地不存在大规模前寒武基底或规模较小 (Wu *et al.*, 2001), 因此本区岩浆基本未受到老地壳混染或混染规模很小。

#### 4.2 分离结晶与部分熔融

松辽盆地营城组高 Ti 酸性火山岩的主量元素、微量元素与盆地内同时期亚碱性中基性岩具有连续的演化趋势 (图 2、图 4、图 7), 以及高 Ti 酸性火山岩与亚碱性中基性岩具有相似的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  值 (图 11), 表明两者具有同源岩浆演化关系, 高 Ti 酸性火山岩由亚碱性中基性岩浆分离结晶形成。一般认为, 由地幔部分熔融直接生成酸性岩浆的可能性极小 (Martin, 1999), 岩浆演化早期阶段玄武岩→玄武安山岩→安山岩中橄榄石、辉石逐渐消失, 出现角闪石, 从英安岩→流纹岩, 斑晶中斜长石、黑云母含量减少, 而钾长石和石英含量逐渐增加。从玄武岩→玄武安山岩→粗面安山岩→高 Ti 酸性岩, 随着  $\text{SiO}_2$  含量增加,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、

$\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$  含量逐渐降低,  $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  含量增高, 以及 Ba、Sr、P、Eu、Ti 等负异常, 暗示高 Ti 酸性火山岩经历了斜长石、角闪石、磷灰石、钛铁矿等分离结晶作用。轻微负 Eu 异常变化表明流纹岩可能经历了斜长石分离结晶作用, 同时由于斜长石的 Ca 离子半径与 Sr 相近, 斜长石的分离结晶还可能导致 Sr 的亏损和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的降低, 强不相容元素 Rb 在斜长石分离结晶过程中倾向于残留在熔体相导致 Rb 的含量有所增加 (Han *et al.*, 1997) (图 7)。 $\text{SiO}_2$  和  $\text{P}_2\text{O}_5$  呈负相相关及 P 的亏损暗示高 Ti 酸性火山岩存在磷灰石分离结晶作用。Ti 在岩浆中易形成独立矿物相, 高 Ti 酸性火山岩中 Ti 弱亏损可能主要受控于钛铁氧化物类的轻度分离结晶。

在缺少含水相和碱性长石的简单玄武岩浆分离结晶过程中, Rb 和 Ba 的地球化学行为是相同的, 其比值保持稳定, 而在云母不一致熔融的地壳岩石部分熔融时发生明显分馏 (Harris and Inger, 1992), 因此 Rb/Ba 值特征可能为辨别分离结晶与部分熔融提供较好的地球化学指标。松辽盆地营城组高 Ti 酸性火山岩 Rb/Ba 比值基本保持恒定 (0.15 ~ 0.37, 平均 0.22), 而低 Ti 酸性火山岩 Rb/Ba 比值变化较大 (0.23 ~ 6.41, 平均 2.36), 表明前者起源于基性岩分离结晶而后者起源于地壳部分熔融。同时本区低 Ti 酸性火山岩规模远远大于高 Ti 酸性岩, 与前文所述分离结晶形成酸性岩一般规模较小, 而部分熔融形成的酸性岩规模较大相吻合。低 Ti 酸性火山岩 Ba、Sr、P、Ti 等微量元素强烈亏损, 且微量协变图解上 (图 7) 并未表现出与基性岩的明显岩浆演化趋势, 相反, 不相容元素丰度范围变化较大 (图 7)。这些都说明低 Ti 酸性火山岩源区经历了不同程度的部分熔融, 推测其源区残留相中含有斜长石、磷灰石和钛铁矿, 可能是源区低程度部分熔融结果, 与低 Ti 酸性火山岩中多见碱性长石和石英斑晶而缺少斜长石斑晶相吻合。

#### 4.3 成因模式

东北地区晚中生代受古太平洋板块俯冲影响, 处于岩石

圈拆沉减薄的伸展环境, 伴随一系列构造-岩浆事件 (Wu *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2008a, 2010; Zhang *et al.*, 2011)。该区中生代花岗岩和流纹岩相似性以及基性岩之间的相关性表明, 它们是统一构造-岩浆体系的产物, 共同制约于古亚洲洋闭合后大陆伸展及古太平洋板块俯冲的构造环境 (林强等, 2000; Fan *et al.*, 2003; 林强等, 2004; Zhang *et al.*, 2008b)。研究表明古亚洲洋闭合过程中, 整个兴蒙造山带通过板块俯冲、碰撞不断形成由幔源物质组成的新地壳, 东北地区作为兴蒙造山带东端部分, 大部分花岗岩 Nd 模式年龄小于 1000Ma, 以年轻地壳为主 (Wu *et al.*, 2000)。不同岩石地球化学的差异性反映壳-幔物质不同地球化学过程。

松辽盆地营城组酸性火山岩成因始终存在分歧, 一方面由于酸性火山岩经历了高度分异, 不易反映源区特征; 另一方面不同学者各自集中几个钻孔岩芯, 难免具有局限性。从而出现了不同观点, 部分学者认为酸性火山岩来自被富集了的亏损地幔部分熔融 (Wang *et al.*, 2006; Zhang *et al.*, 2011), 但这很难解释研究区缺少基性岩而有大规模酸性岩, 地幔物质直接部分熔融很难形成如此规模的酸性岩浆; 另一部分学者认为这些酸性岩来自区域岩石圈新生地壳部分熔融 (宋立忠等, 2010), 这又无法解释局部地区酸性火山岩的分离结晶过程。由此可见, 本区酸性火山岩成因十分复杂。

本文在详细分析松辽盆地徐家围子、长岭、德惠、古龙等断陷酸性火山岩地球化学数据基础上, 且综合了前人对该区火山岩的测试数据, 系统探讨盆地营城组酸性火山岩成因。将这些酸性火山岩分为高 Ti 和低 Ti 两类, 对研究其成因和形成环境具有重要意义。本区早白垩世晚期营城组两类酸性火山岩同样具有正的 Nd 同位素值和年轻的 Nd 模式年龄, 意味着这两种成因的酸性火山岩源区均较为年轻。酸性岩类构造判别图解上 (图 12), 营城组低 Ti 流纹岩均投影在板内伸展环境 (WPG) 而高 Ti 酸性火山岩主要投影在同碰撞或火山弧范围内。但是, 构造判别图上的差异反映的是源岩的

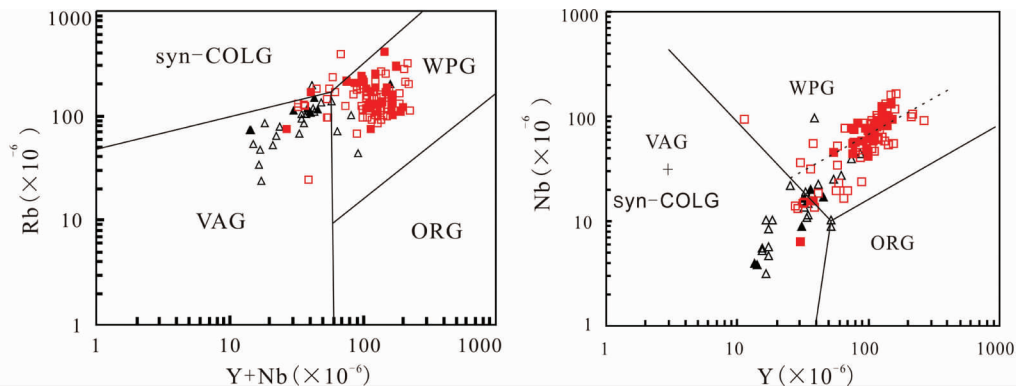


图 12 松辽盆地营城组酸性火山岩构造判别图 (据 Pearce *et al.*, 1984)

ORG-洋中脊花岗岩; syn-COLG-同碰撞花岗岩; VAG-火山弧花岗岩; WPG-板内花岗岩; A1-非造山环境; A2-造山后环境

Fig. 12 Tectonic setting diagrams for acid volcanic rocks from Yingcheng Formation in Songliao Basin (after Pearce *et al.*, 1984)

ORG-oceanic ridge granite; syn-COLG-syn-collision granite; VAG-volcanic arc granite; WPG-within plate granite; A1-anorogenic environment; A2-post-orogenic tectonic setting

形成环境而非岩石形成的构造环境,即微量元素和同位素资料对源区性质的反映程度要高于作用于这些物质的各种构造作用反映程度(Roberts and Clemens, 1993)。由此可见,高 Ti 酸性火山岩源区形成类似于相对亏损的岛弧玄武岩源区,源区的形成与早期大陆边缘或岛弧的岩浆作用有关。前中生代古亚洲洋闭合过程中,俯冲大洋板块与地幔物质相互作用形成了相对弱亏损的源区,晚中生代东北受古太平洋板块俯冲影响,源区部分熔融后,在岩浆演化过程中受地壳同化混染(AFC)形成高 Ti 酸性火山岩。与此同时,受岩石圈减薄软流圈上涌影响,新生地壳与下地壳物质发生混合熔融,岩浆在上升过程中受上地壳不同程度混染形成了大规模的低 Ti 酸性火山岩。

## 5 结论

(1) 松辽盆地营城组酸性火山岩分为低 Ti 酸性火山岩和高 Ti 酸性火山岩两类,低 Ti 酸性火山岩( $\text{TiO}_2 < 0.4\%$ )  $\text{SiO}_2$  含量为 68.93% ~ 76.69%,高 Ti 酸性火山岩( $\text{TiO}_2 > 0.45\%$ )  $\text{SiO}_2$  含量介于 64.87% ~ 68.79% 之间。

(2) 高 Ti 酸性火山岩规模较小,在主量元素、微量元素、矿物组成上与亚碱性中性岩呈连续变化趋势且具有相似的 Sr-Nd 同位素组成,其岩浆主要来自于被富集的亏损地幔部分熔融后分离结晶形成。低 Ti 酸性火山岩与碱性基性岩呈双峰式组合,规模巨大,主量、微量元素及同位素离散性强,其岩浆主要来自区域岩石圈新生地壳部分熔融,在上升过程中经历了不同程度地壳混染。

(3) 两类酸性火山岩均与古太平洋板块俯冲引起岩石圈拆沉减薄软流圈上涌有关,地球化学的区别表明两者在源区形成、岩浆演化及上下地壳混染方面存在差异性。晚中生代东北地区受古太平洋板块俯冲影响,被富集的亏损地幔源区部分熔融,在岩浆演化过程中经历了一定分离结晶作用形成高 Ti 酸性火山岩岩浆。与此同时,新生地壳与下地壳物质发生混合熔融,受地壳不同程度混染后形成了大规模的低 Ti 酸性火山岩岩浆。

## References

Anders E and Grevesse N. 1989. Abundances of the elements; Meteoritic and solar. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 53(1): 197-214

Annen C, Yblundy JD and Sparks RSJ. 2006. The Genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones. *Journal of Petrology*, 47(3): 505-539

Ben OD, Polve M and Allegre CJ. 1984. Nd-Sr isotopic composition of granulites and constraints on the evolution of the lower continental crust. *Nature*, 362(5951): 144-146

Bryan SE, Riley TR, Jerram DA, Stephens CJ and Leat PT. 2002. Silicic volcanism: An undervalued component of large igneous provinces and volcanic rifted margins. *Geological Society of America*, 362: 90-120

Chen JS. 2009. The genesis of volcanic rocks of Yingcheng Group in southern Songliao Basin. Master Degree Thesis. Changchun: Jilin

University (in Chinese with English summary)

Dai JX, Shi X and Wei YZ. 2001. Summary of the abiogenic origin theory and the abiogenic gas pools (fields). *Acta Petrolei Sinica*, 22(6): 5-10 (in Chinese with English abstract)

Fan WM, Guo F, Wang YJ and Lin G. 2003. Late Mesozoic calc-alkaline volcanism of post-orogenic extension in the northern Da Hinggan Mountains, northeastern China. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 121(1-2): 115-135

Feeley TC and Dungan MA. 1996. Compositional and dynamic controls on mafic-silicic magma interactions at continental arc volcanoes: Evidence from cordon El Guadal, Tatara-San Pedro Comple, Chile. *Journal of Petrology*, 37(6): 1547-1577

Feng ZH, Shao HM and Tong Y. 2008. Controlling factors of volcanic gas reservoir property in Qingshen gas field, Songliao Basin. *Acta Geologica Sinica*, 82(6): 760-769 (in Chinese with English abstract)

Feng ZH, Yin CH, Qi JS and Dong JH. 2010. Main factors controlling hydrocarbon accumulation in large volcanic gas fields; A case study of the Qingshen gas field in the Songliao Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 26(1): 21-32 (in Chinese with English abstract)

Feng ZQ. 2008. Volcanic rocks as prolific gas reservoir; A case study from the Qingshen gas field in the Songliao Basin, NE China. *Marine and Petroleum Geology*, 25(4-5): 416-432

Gao RQ and Cai XY. 1997. Formation Condition and Distribution of Oil Field in Songliao Basin. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese)

Gao Y. 2008. Chronology and geochemistry of Mesozoic volcanic rocks in southeastern Songliao Basin. Master Degree Thesis. Changchun: Jilin University (in Chinese with English summary)

Ge WC, Lin Q, Sun DY, Wu FY and Li XH. 2000. Geochemical research into origins of two types of Mesozoic rhyolites in Daxing'an Ling. *Earth Science*, 25(2): 172-178 (in Chinese with English abstract)

Guo F, Nakamura E, Fan WM, Kobayashi K and Li CW. 2007. Generation of Palaeocene adakitic andesites by magma mixing, Yanji Area, NE China. *Journal of Petrology*, 48: 661-692

Guo F, Fan WM, Li C, Gao X and Miao L. 2009. Early Cretaceous highly positive  $\epsilon_{\text{Nd}}$  felsic volcanic rocks from the Hinggan Mountains, NE China; Origin and implications for Phanerozoic crustal growth. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1395-1411

Guo J, Chen ST and Wang WL. 2000. The lithochemistry feature of volcanic rock in Xujiaweizi fault-depression, Songliao Basin. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 30(3): 243-245 (in Chinese with English abstract)

Haapala I, Frindt S and Kandara J. 2007. Cretaceous gross spitzkoppe and klein spitzkoppe stocks in Namibia; Topaz-bearing a-type granites related to continental rifting and mantle plume. *Lithos*, 97(1-2): 174-192

Han BF, Wang SG, Jahn BM, Hong DW, Kagami H and Sun YL. 1997. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: Geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. *Chemical Geology*, 138(3-4): 135-159

Harris NBW and Inger S. 1992. Trace element modelling of pelite-derived granites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110(1): 46-56

Hou QJ, Zhao ZK and Wang LW. 2009. Volcanic Gas Reservoirs Principle and Exploration; Examples from Southern Songliao Basin. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract)

Irvine TN and Baragar BWR. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523-548

Jahn BM, Wu FY, Lo CH and Tsai CH. 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust; Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China. *Chemical Geology*, 157(1-2): 119-146

Jahn BM, Wu FY and Chen B. 2000. Massive granitoid generation in

- central Asia: Nd isopic evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23: 82–92
- Le Bas MJ, Le Maitre RW, Streckeisen A and Zanettin B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27(3): 745–750
- Le Maitre RW, Streckeisen A, Zanettin B, Le Bas MJ, Bonin B and Bateman P. 1989. A Classification of Igneous Rocks and A Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics Igneous Rocks. Oxford, UK; Blackwell Scientific Publications
- Li CQ, Pang YM, Chen HL and Chen HH. 2006. Gas charging history of the Yingcheng Formation igneous reservoir in the Xujiaweizi rift, Songliao Basin, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 89(1–2): 210–213
- Li JY, Mo SG and He ZJ. 2004. The timing of crustal sinistral strike-slip movement in the northern Great Xing' an Ranges and its constraint on reconstruction of the crustal tectonic evolution of NE China and adjacent areas since the Mesozoic. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 157–168
- Li JY. 2006. Permian geodynamic setting of Northeast China and adjacent regions: Closure of the Paleo-Asian Ocean and subduction of the Paleo-Pacific Plate. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(3–4): 207–224
- Lin Q, Ge WC, Sun DY, Wu FY, Won CK, Lee MW, Yun SH, Min KD, Jin MS, Min KD and Kwon CS. 1998. Genetic relationships between two types of Mesozoic rhyolites and basalts in Great Xing' an Ridge. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 30(4): 322–328 (in Chinese with English abstract)
- Lin Q, Ge WC, Wu FY, Sun DY and Cao L. 2004. Geochemistry of Mesozoic granites in Da Hinggan Ling ranges. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 403–412 (in Chinese with English abstract)
- Liu JQ. 1999. *Volcano in China*. Beijing: Science Publishing House (in Chinese)
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46(3): 411–429
- McCulloch MT, Kyser TK, Woodhead JD and Kinsley L. 1994. Pb-Sr-Nd-O isotopic constraints on the origin of rhyolites from the Taupo volcanic zone of New Zealand: Evidence for assimilation followed by fractionation from basalt. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 115(3): 303–312
- Meng FC, Liu JQ, Li M, Liu X, Yin CH, Lu JM and Cui Y. 2010. Geochemistry and tectonic implications of rhyolites from Yingcheng Formation in Xujiaweizi, Songliao Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 26(1): 227–241 (in Chinese with English abstract)
- Meng QR. 2003. What drove Late Mesozoic extension of the northern China-Mongolia tract? *Tectonophysics*, 369(3–4): 155–174
- Miller JA and Harris C. 2007. Petrogenesis of the Swaziland and northern Natal rhyolites of the Lebombo rifted volcanic margin, South East Africa. *Journal of Petrology*, 48(1): 185–218
- Mingram B, Trumbull RB, Littman S and Gerstenberger H. 2000. A petrogenetic study of anorogenic felsic magmatism in the Cretaceous Paresis ring complex, Namibia: Evidence for mixing of crust and mantle-derived components. *Lithos*, 54(1–2): 1–22
- Pankhurst RJ, Riley TR, Fanning CM and Kelley SP. 2000. Episodic silicic volcanism in Patagonia and the Antarctic Peninsula: Chronology of magmatism associated with the break-up of Gondwana. *Journal of Petrology*, 41(1): 605–625
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983
- Plank T and Langmuir CH. 1998. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. *Chemical Geology*, 145(3–4): 325–394
- Riley TR, Leat PT, Pankhurst RJ and Harris C. 2001. Origins of large volume rhyolitic volcanism in the Antarctic Peninsula and Patagonia by crustal melting. *Journal of Petrology*, 42(6): 1043–1065
- Roberts MP and Clemens JD. 1993. Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-type granitoids. *Geology*, 21(9): 825–828
- Shinjo R and Kato Y. 2000. Geochemical constraints on the origin of bimodal magmatism at the Okinawa Trough, an incipient back-arc basin. *Lithos*, 54(3–4): 117–137
- Song LZ, Zhao ZH, Jiao GH, Sun P, Luo X, Jiang XH, Wang ZH, Zeng FY and Miao WD. 2010. Geochemical characteristics of Early Cretaceous volcanic rocks from Songliao Basin, Northeast China, and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1182–1194 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345
- Wang PJ, Liu WZ and Wang SX. 2002.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  and K/Ar dating on the volcanic rocks in the Songliao basin, NE China: Constraints on stratigraphy and basin dynamics. *International Journal of Earth Sciences*, 91(2): 12–23
- Wang PJ, Chen FK, Chen SM, Wolfgang S and Satir MH. 2006. Geochemical and Nd-Sr-Pb isotopic composition of Mesozoic volcanic rocks in the Songliao basin, NE, China. *Geochemical Journal*, 40(2): 149–159
- Wang PJ, Wu HY, Pang YM, Men GT, Ren YG, Liu WZ and Bian WH. 2006. Volcanic facies of the Songliao Basin: Sequence, model and the quantitative relationship with porosity and permeability of the volcanic reservoir. *Journal of Jilin University*, 36(5): 805–812 (in Chinese with English abstract)
- Wang PJ and Feng ZQ. 2008. *Volcanic Rocks in Petroliferous Basin: Petrography, Facies, Reservoir, Pool, Exploration*. Beijing: Science Press (in Chinese)
- Wang PJ, Chen SM, Li WZ, Chen HL and Liang YQ. 2010. Chronology, petrology and geochemistry of the Cretaceous cryotexolusive breccia-bearing volcanic rocks: Implications for volcanic reservoir and tectonics of the Songliao Basin, NE China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(1): 33–46 (in Chinese with English abstract)
- Wang XB, Guo ZQ, Tuo JC, Guo HY, Li ZX, Zhuo SG, Jiang, HL, Zeng LW, Zhang MJ, Wang LS, Liu CX, Yan H, Li LW, Zhou XF, Wang YL, Yang H and Wang G. 2009. Abiogenic hydrocarbons in commercial gases from the Songliao Basin, China. *Science in China (Series D)*, 52(2): 213–226
- Wilson M. 1993. Magmatism and the Geodynamics of basin formation. *Sedimentary Geology*, 86(1–2): 5–29
- Wu FY, Jahn BM, Wilde S and Sun DY. 2000. Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China. *Tectonophysics*, 328(1–2): 89–113
- Wu FY, Sun DY, Li HM and Wang XL. 2001. The nature of basement beneath the Songliao Basin in NE China: Geochemical and isotopic constraints. *Physics and Chemistry of the Earth Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26(9–10): 793–803
- Wu FY, Sun DY, Li HM, Jahn BM and Wilde S. 2002. A-type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis. *Chemical Geology*, 187(1–2): 143–173
- Yamamoto T. 2007. A rhyolite to dacite sequence of volcanism directly from the heated lower crust: Late Pleistocene to Holocene Numazawa volcano, NE Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 167(1–4): 119–133
- Yan JY, Tang KD, Bai JW and Mo YC. 1989. High pressure metamorphic rocks and their tectonic environment in northeastern China. *Journal of Southeastern Asian Earth Sciences*, 3(1–4): 303–313
- Yan QR, Gao SL, Wang ZQ, Hao J, Xiao WJ and Li JL. 2002. Geochronology and geochemistry of volcanic rocks from the Songliao Basin and their implications. *Geochimica*, 31(2): 169–179 (in Chinese with English abstract)
- Yang FP. 2005. The study on volcanic rocks and their natural gas accumulation of Xujiaweizi fault depression in Songliao Basin. Ph. D. Dissertation. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese)

- Zhang FQ. 2007. Early Cretaceous volcanic events in the northern Songliao Basin and its geodynamics. Ph. D. Dissertation. Hangzhou: Zhejiang University (in Chinese)
- Zhang FQ, Pang YM, Yang SF, Dong CW, Chen HL and Shu P. 2007. Geochronology of zircon SHRIMP, geochemistry and its implication of the volcanic rocks from Yingcheng Formation in depression area, the northern Songliao Basin. *Acta Geologica Sinica*, 81(9): 1248 - 1258 (in Chinese with English abstract)
- Zhang FQ, Chen HL, Dong CW, Pang YM, Shu P, Wang YL and Yang SF. 2008. Shrimp zircon U-Pb geochronology of volcanic rocks and discussion on the geological time of the Yingcheng Formation of the northern Songliao Basin. *Journal of Stratigraphy*, 32(1): 15 - 20 (in Chinese with English abstract)
- Zhang FQ, Cheng XG, Chen HL, Dong CW, Yu X, Xiao J, Pang YM and Shu P. 2009. Zircon chronological and geochemical constraints on the Late Mesozoic volcanic events in the southeastern margin of the Songliao Basin, NE China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 39 - 54 (in Chinese with English abstract)
- Zhang FQ, Chen HL, Yu X, Dong CW, Yang SF, Pang YM and Batt GE. 2011. Early Cretaceous volcanism in the northern Songliao Basin, NE China, and its geodynamic implication. *Gondwana Research*, 19(1): 163 - 176
- Zhang JH, Ge WC, Wu FY, Wilde SA, Yang JH and Liu XM. 2008a. Large-scale Early Cretaceous volcanic events in the northern Great Xing'an Range, northeastern China. *Lithos*, 102(1-2): 138 - 157
- Zhang JH, Gao S, Ge WC, Wu FY, Yang JH, Wilde S and Li M. 2010. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, northeastern China; Implications for subduction-induced delamination. *Chemical Geology*, 276(3-4): 144 - 165
- Zhang LC, Zhou XH, Ying JF, Wang F, Guo F, Wan B and Chen ZG. 2008b. Geochemistry and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes of Early Cretaceous basalts from the Great Xing'an Range, NE China; Implications for their origin and mantle source characteristics. *Chemical Geology*, 256(1-2): 12 - 23
- Zhang XZ, Yang BJ, Wu FY and Liu GX. 2006. The lithosphere structure in the Hinggan-Jihei (Hinggan-Mongolia-Jilin-Heilongjiang) region, northeastern China. *Geology in China*, 33(4): 816 - 823 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YX, Sun YS and Zhang XZ. 1998. *Manzhouli-Suifenghe Geoscience Transect, China*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Zhao WZ, Zou CN, Feng ZQ, Hu SY, Zhang Y, Li M, Wang YH, Yang T and Yang H. 2008. Geological features and evaluation techniques of deep-seated volcanics gas reservoirs, Songliao Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 35(2): 129 - 132 (in Chinese with English abstract)
- 孟凡超等. 2000. 松辽盆地徐家围子断陷火山岩岩石学特征及其构造环境. *长春科技大学学报*, 30(3): 243 - 245
- 侯启军, 赵志魁, 王立武. 2009. 火山岩气藏——松辽盆地南部大型火山岩气藏勘探理论与实践. 北京: 科学出版社
- 林强, 葛文春, 孙德有, 吴福元, 元钟宽, 李文远, 尹成孝, 陈明植, 闵庚德, 权致纯. 2000. 大兴安岭中生代两类流纹岩与玄武岩的成因联系. *长春科技大学学报*, 30(4): 322 - 328
- 林强, 葛文春, 吴福元, 孙德有, 曹林. 2004. 大兴安岭中生代花岗岩类的地球化学. *岩石学报*, 20(3): 403 - 412
- 刘嘉麒. 1999. *中国火山*. 北京: 科学出版社
- 孟凡超, 刘嘉麒, 李明, 刘晓, 印长海, 陆加敏, 崔岩. 2010. 松辽盆地徐家围子营城组流纹岩地球化学特征及构造指示意义. *岩石学报*, 26(1): 227 - 241
- 宋立忠, 赵泽辉, 焦贵浩, 孙平, 罗霞, 姜晓华, 王志宏, 曾富英, 廖卫东. 2010. 松辽盆地早白垩世火山岩地球化学特征及其构造意义. *岩石学报*, 26(4): 1182 - 1194
- 王璞珺, 吴河勇, 颜颇明, 门广田, 任延广, 刘万洙, 边伟华. 2006. 松辽盆地火山岩相: 相序、相模式与储层物性的定量关系. *吉林大学学报(地球科学版)*, 36(5): 805 - 812
- 王璞珺, 冯志强. 2008. *盆地火山岩: 岩性、岩相、储层、气藏、勘探*. 北京: 科学出版社
- 王璞珺, 陈树民, 李伍志, 陈汉林, 郎元强. 2010. 松辽盆地白垩纪火山期后热液活动的岩石地球化学和年代学及其地质意义. *岩石学报*, 26(1): 33 - 46
- 王先彬, 郭占谦, 妥进才, 郭洪岩, 李振西, 卓胜广, 蒋鸿亮, 曾龙伟, 张铭杰, 王连生, 柳春雪, 闫宏, 李立武, 周晓峰, 王永莉, 杨辉, 王广. 2009. 中国松辽盆地商业天然气的非生物成因烷烃气体. *中国科学(D辑)*, 39(5): 602 - 614
- 闫全人, 高山林, 王宗起, 郝杰, 肖文交, 李继亮. 2002. 松辽盆地火山岩的同位素年代、地球化学特征及意义. *地球化学*, 31(2): 169 - 179
- 杨峰平. 2005. 松辽盆地徐家围子断陷火山岩及天然气成藏研究. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学
- 章凤奇. 2007. 松辽盆地北部早白至世火山事件与地球动力学. 博士学位论文. 杭州: 浙江大学
- 章凤奇, 庞彦明, 杨树锋, 董传万, 陈汉林, 舒萍. 2007. 松辽盆地北部断陷区营城组火山岩锆石 SHRIMP 年代学、地球化学及其意义. *地质学报*, 81(9): 1248 - 1258
- 章凤奇, 陈汉林, 董传万, 庞彦明, 舒萍, 王岩楼, 杨树锋. 2008. 松辽盆地北部火山岩锆石 SHRIMP 测年与营城组时代探讨. *地层学杂志*, 32(1): 15 - 20
- 章凤奇, 程晓敢, 陈汉林, 董传万, 余星, 肖骏, 徐岩, 庞彦明, 舒萍. 2009. 松辽盆地东南缘晚中生代火山事件的锆石年代学与地球化学制约. *岩石学报*, 25(1): 39 - 54
- 张兴洲, 杨宝俊, 吴福元, 刘国兴. 2006. 中国内蒙-吉黑地区岩石圈结构基本特征. *中国地质*, 33(4): 816 - 823
- 张贻侠, 孙运生, 张兴洲. 1998. *中国满洲里-绥芬河地学断面*. 北京: 地质出版社
- 赵文智, 邹才能, 冯志强, 胡素云, 张研, 李明, 王玉华, 杨涛, 杨辉. 2008. 松辽盆地深层火山岩气藏地质特征及评价技术. *石油勘探与开发*, 35(2): 129 - 132

## 附中文参考文献

- 陈井胜. 2009. 松辽盆地南部营城组火山岩成因. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学
- 戴金星, 石昕, 卫延召. 2001. 无机成因油气论和无机成因的气田(藏)概略. *石油学报*, 22(6): 5 - 10
- 冯子辉, 邵红梅, 童英. 2008. 松辽盆地庆深气田深层火山岩储层聚集性控制因素研究. *地质学报*, 82(6): 760 - 769
- 冯子辉, 印长海, 齐景顺, 董景海. 2010. 大型火山岩气田成藏控制因素研究——以松辽盆地庆深气田为例. *岩石学报*, 26(1): 21 - 32
- 高瑞祺, 蔡希源. 1997. 松辽盆地油气田形成条件与分布规律. 北京: 石油工业出版社
- 高研. 2008. 松辽盆地东南缘中生代火山岩的年代学和地球化学特征. 硕士学位论文. 长春: 吉林大学
- 葛文春, 林强, 孙德有, 吴福元, 李献华. 2000. 大兴安岭中生代两