

松辽盆地早白垩世火山岩地球化学特征及其构造意义*

宋立忠^{1,2} 赵泽辉^{3**} 焦贵浩³ 孙平³ 罗霞³ 姜晓华⁴ 王志宏³ 曾富英³ 缪卫东³
 SONG LiZhong^{1,2}, ZHAO ZeHui^{3**}, JIAO GuiHao³, SUN Ping³, LUO Xia³, JIANG XiaoHua⁴, WANG ZhiHong³, ZENG FuYing³ and MIAO WeiDong³

1. 中国石油大学(北京)资源与信息学院,北京 102249

2. 中国石油吉林油田公司,松原 138000

3. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院,廊坊 065007

4. 中国地质大学(北京)能源学院,北京 100083

1. Faculty of Natural Resource and Information Technology, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2. Petrochina Jilin Oilfield Company, Songyuan 138000, China

3. Langfang Branch of Petroleum Exploration and Development Research Institute, Petrochina, Langfang 065007, China

4. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

2008-12-19 收稿, 2009-09-02 改回.

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

Abstract Early Cretaceous volcanic rocks from Songliao basin, Northeast China, are characterized with basic rocks (BRS) which include dorgalite and basalt, intermediate rocks (IRS) which include basaltic andesite, andesite and trachyandesite, and acid rocks (ARS) include trachyte, trachydacite, dacite and rhyolite. The major element, trace element and isotopic data of the Early Cretaceous volcanic rocks are reported in this paper. All samples have distinct characteristics with enriched large ion lithophile elements (LILE) relative to high field strength elements (HFSE), enriched light rare earth element (LREE) relative to heavy rare earth element (HREE), relatively low in $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ and high in $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$. Additionally, BRS have $\text{Ce}/\text{Nb} = 1.92 \sim 8.31$, $\text{Th}/\text{Nb} = 0.08 \sim 0.44$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7031 \sim 0.7047$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = +1.7 \sim +5.2$. IRS have $\text{Ce}/\text{Nb} = 3.70 \sim 15.80$, $\text{Th}/\text{Nb} = 0.34 \sim 2.58$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7040 \sim 0.7054$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 0 \sim +3.0$ and ARS have $\text{Ce}/\text{Nb} = 4.29 \sim 15.80$, $\text{Th}/\text{Nb} = 0.11 \sim 1.02$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7038 \sim 0.7066$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = +1.0 \sim +3.3$, respectively. According to their geochemical characteristics, the magmas of BRS were generated partial melting of the depleted mantle which have been enriched, with little contaminated by crust. The generation of IRS magmas originated from melting of juvenile crust components underplated by upwelling of depleted mantle and the magmas of ARS derived from partial melting of juvenile crust components which originated from depleted mantle with contaminated by supracrust. Conclusionally, the dynamic model of stretch and extension in Late Jurassic-Early Cretaceous in Songliao basin was a result, from partial melting depleted mantle induced by delamination of thickened subcontinental mantle root induced by orogenesis with Okhotsk-Mongolia ocean closure. The rift-extensional tectonic setting of Songliao basin showed active rift characteristics.

Key words Songliao basin; Early Cretaceous; Volcanic rocks; Geochemical characteristics; Tectonic implications

摘要 松辽盆地早白垩世发育基性岩类的橄辉玄武岩、玄武岩, 中性岩类的玄武安山岩、安山岩、粗安岩, 酸性岩类的粗面岩、粗面英安岩、英安岩和流纹岩。早白垩世火山岩都具有大离子亲石元素(LILE)、轻稀土元素(LREE)相对富集的特征, 并具有较低的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值和较高的 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 值。基性岩类 $\text{Ce}/\text{Nb} = 1.92 \sim 8.31$, $\text{Th}/\text{Nb} = 0.08 \sim 0.44$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i =$

* 本文受国家科技重大专项(2008ZX05007-006)资助。

第一作者简介: 宋立忠, 男, 1967年生, 博士研究生, 高级工程师, 从事油气勘探综合研究, E-mail: songlz@petrochina.com.cn

** 通讯作者: 赵泽辉, 男, 1975年生, 主要从事构造地质、火山岩储层和火山岩地球化学方面研究, E-mail: zehuizhao@sina.com

0.7031 ~ 0.7047, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = +1.7 \sim +5.2$; 中性岩类 $\text{Ce}/\text{Nb} = 3.70 \sim 15.80$, $\text{Th}/\text{Nb} = 0.34 \sim 2.58$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7040 \sim 0.7054$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = 0 \sim +3.0$; 酸性岩类 $\text{Ce}/\text{Nb} = 4.29 \sim 15.80$, $\text{Th}/\text{Nb} = 0.11 \sim 1.02$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.7038 \sim 0.7066$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = +1.0 \sim +3.3$ 。基性岩类岩浆主要来自被富集了的亏损地幔源的部分熔融, 受混染程度很小; 中性岩类岩浆源于年轻地壳组分被来自亏损地幔岩浆的再次部分熔融; 酸性岩类浆岩可能主要来自源于亏损地幔的初生地壳部分熔融, 并受到了上地壳的混染。晚侏罗世-早白垩世, 由于蒙古-鄂霍次克洋关闭引发强烈的挤压造山后, 发生的岩石圈拆沉作用致使来自亏损地幔的岩浆熔融上涌导致岩石圈主动伸展拉张, 地表则表现出大规模的裂谷断陷作用和大范围的火山活动。这个阶段的伸展拉张以主动拉张为主。

关键词 松辽盆地; 早白垩世; 火山岩; 地球化学特征; 构造意义

中图分类号 P588.14

松辽盆地是我国东部大型的中生代含油气裂谷盆地, 具有下断上拗的双层结构。盆地油气资源丰富, 盆内与周边地区中生代火山岩广泛分布。随着近年来勘探和研究程度的不断深入, 尤其对火山岩储层深层气藏勘探获得重大突破后, 对盆地内火山岩的研究得到了更多的重视和关注。对于松辽盆地中生代火山岩的研究, 前人做了大量的工作。从目前的研究成果来看, 主要表现在围绕火山岩油气藏勘探开发(高瑞琪和萧德铭, 1995; 王璞珺等, 2003; Feng, 2008; 赵文智等, 2008)和火山岩定年(葛文春等, 2005; 花艳秋等, 2006; 舒萍等, 2007; 王兴光和王颖, 2007; 章凤奇等, 2007, 2008; 裴福萍等, 2008)方面的成果为多, 而中生代火山岩地球化学特征及深部动力学的研究相对较少(赵海玲等, 1996; 朱勤文等, 1997; 闫全人等, 2002)。

对于松辽盆地中生代裂谷和火山岩的成因机制和动力学认识, 目前还存在分歧: (1) 关于成盆机制, 有太平洋古板块俯冲作用的观点(刘德来等, 1996; 刘和甫等, 2000)和大陆岩石圈拆沉作用的观点(邓晋福等, 2000), 也有构造体制转变的观点(林强等, 1998; 张岳桥等, 2004; 赵越等, 2004)。李锦轶等(2004)提出侏罗纪至白垩纪初鄂霍茨克洋关闭及古太平洋俯冲有关的地块旋转和走滑的共同作用形成了NNE向的盆地雏形。葛肖虹等(2007)则认为随着鄂霍茨克洋的关闭, 盆地雏形为NEE向, 后期古太平洋板块斜向俯冲导致了现今NNE的裂谷盆地。对于中生代火山岩成因机制, 有和俯冲作用相关的弧火山岩观点(赵海玲等, 1996; 闫全人等, 2002), 也有不同认识(朱勤文等, 1997; 林强等, 1998; 章凤奇等, 2007)。基于目前研究的现状和存在的一些关键问题, 本文选择以松辽盆地早白垩世基性火山岩类、中性火山岩类和酸性火山岩类为研究对象, 利用岩心和野外样品, 结合其地球化学特征进行对比研究, 解释岩浆的形成机制、深部壳幔作用, 并提出其动力学模型。

1 地质背景

松辽盆地位于我国东北地区, 区域上位于天山-兴安造山带以东, 北为西伯利亚板块, 南以中朝板块为界(图1)(Wu *et al.*, 2003; 李锦轶等, 2004)。李锦轶等(2004)认为中国东北地区的地壳具有明显的基底和上叠双层结构特征。

其基底构造格局表现为, 南为中朝地块, 北为西伯利亚地台, 在两者之间, 自北而南依次为维吉姆-斯坦诺夫地块、蒙古-鄂霍茨克中生代缝合带、额尔古纳地块、中蒙古地块、天山-南蒙古-大兴安岭晚古生代缝合带、布列亚-佳木斯复合地块、索伦山-吉林缝合带, 松辽盆地以及中生代火山岩就是在这些基底构造单元发育起来的演化产物。刘和甫等(2000)则提出松辽盆地是在两个沟-弧-盆系叠置的基础上发展起来的观点: 一是古生代中亚-蒙古沟-弧-盆系, 另外一个中生代西太平洋沟-弧-盆系。不过目前基本一致地认为: 中国东北及邻区于侏罗纪晚期随着蒙古-鄂霍次克洋关闭, 中朝板块和西伯利亚板块之间的大陆碰撞造山作用结束, 随后东北地区进入了由汇聚碰撞的动力学体系转变为活动大陆边缘的动力学体系的构造体制转变, 即由强烈的造山和地壳增厚到陆内引张断陷和岩石圈减薄作用(张岳桥等, 2004; 赵越等, 2004)。

松辽盆地及邻区中生代火山岩广泛分布(图1), 主要以早白垩世的火山岩最为发育, 其他时代火山岩分布均十分局限, 仅分布于局部地区。松辽盆地周边邻区分布的中生代火山岩大致可分3个带(林强等, 1998): (1) 西部火山岩带, 分布于松辽盆地以西的大兴安岭地区, 主要为早白垩世的火山岩, 是整个东北地区中生代火山岩活动的全盛时期; (2) 东部火山岩带, 分布于松辽盆地以东张广才岭, 大体呈北北东向展布; (3) 南部火山岩带, 分布于松辽盆地以南向西至辽西地区, 呈北东东向展布。松辽盆地周边主要的火山岩熔岩岩石类型有: 玄武岩, 玄武安山岩, 安山岩, 粗安岩, 粗面岩或粗面英安岩、英安岩和流纹岩, 另外火山碎屑岩也大量发育。

盆地中生代火山岩分布也非常广泛, 绝大多数深层钻井都钻遇了中生代火山岩(图1), 火山岩大多分布于断陷边部和大断裂附近。从钻井资料来看, 松辽盆地北部中生代火山岩主要发育在营城组三段(K_{1yc3})、营城组一段(K_{1yc1})和火石岭组二段(J_{3h2})(图2)。火石岭组(J_{3h2}): 火山岩岩性主要为橄榄玄武岩、玄武岩、玄武安山岩、安山岩、粗安岩、粗面岩、粗面英安岩、英安岩、流纹岩等火山熔岩及凝灰岩、角砾岩等火山碎屑岩类。营城组(K_{1yc}): 火山岩岩性主要为流纹岩, 粗面岩和粗面英安岩等酸性熔岩及凝灰岩、角砾岩等火山碎屑岩为主, 玄武岩, 玄武安山岩, 安山岩和粗面安山岩在不同地区也有不少发育。

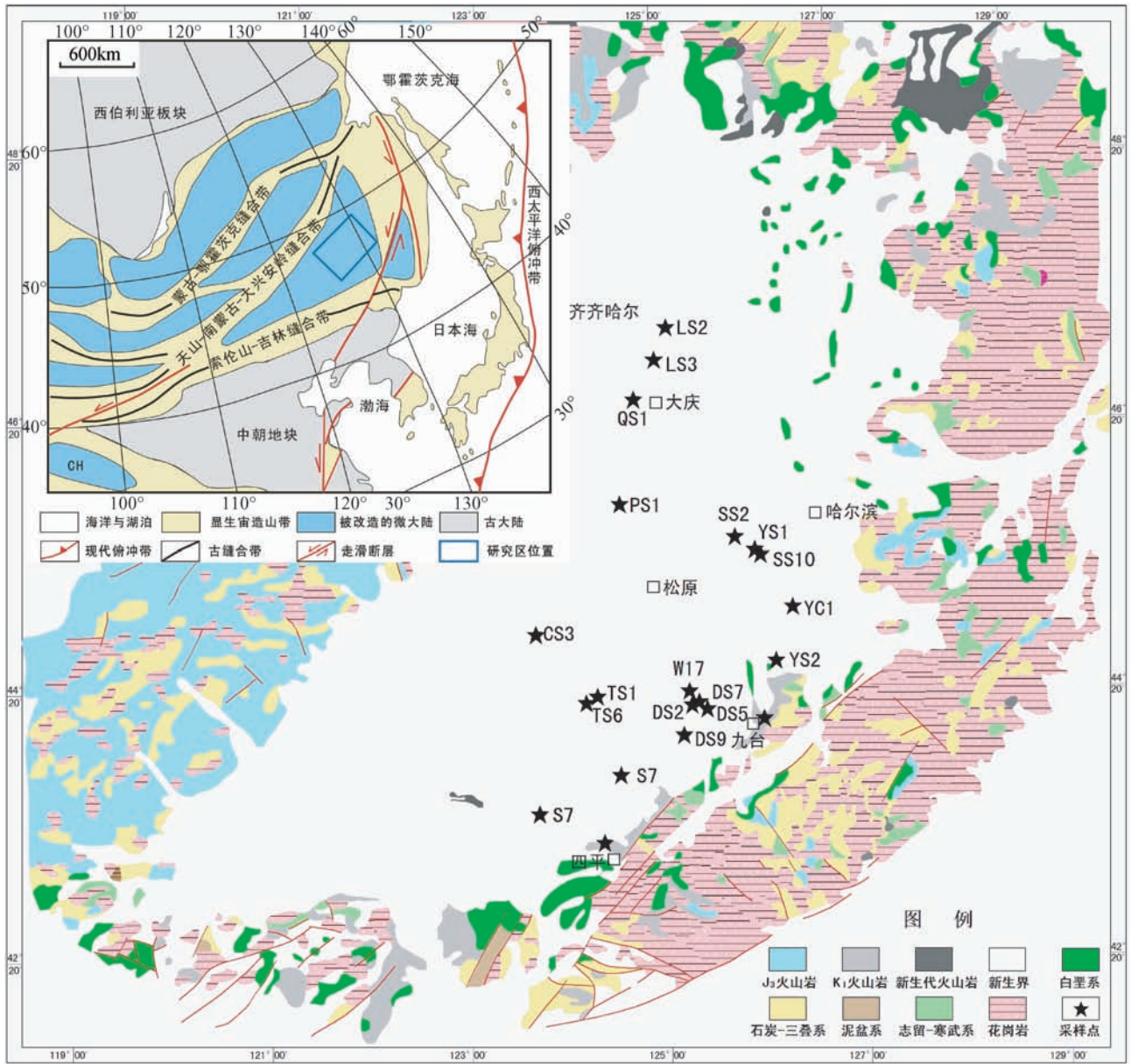


图1 松辽盆地构造地质简图(插图据李锦轶等, 2004)

Fig.1 Tectonic and geological sketch map of the Songliao basin (inset map modified from Li *et al.*, 2004)

2 岩石学特征

松辽盆地中生代火山岩主要发育岩性为橄榄玄武岩、玄武岩、玄武安山岩、安山岩、粗安岩、粗面岩、粗面英安岩、英安岩、流纹岩等火山熔岩及凝灰岩、角砾岩等火山碎屑岩类。所有的岩性盆地内钻井基本都钻遇过,中性岩类在盆地东南部的九台地区有出露,酸性岩类在盆地东南部的四平地区也有广泛分布(图1),代表性的火山岩岩石学特征描述如下:

玄武岩:呈紫色、灰紫色或黑色,具斑状结构;斑晶为斜长石,粒度在0.5mm左右,含量在5%~10%;基质主要为

条状斜长石微晶和一些辉石微粒组成,粒度小于0.1mm。

玄武安山岩:呈深紫色、灰绿色,块状构造,斑状结构;斑晶为斜长石、辉石,粒度0.1~0.3mm左右,含量在5%~10%;基质具玻晶交织结构,主要由火山玻璃和条状、针状斜长石微晶组成,斜长石微晶分布不定向,并具有少量微粒状磁铁矿,粒度多小于0.1mm。

安山岩:呈暗紫色、灰绿色或深灰色,块状构造,斑状结构;斑晶主要为斜长石,部分可见黑云母及角闪石斑晶,斜长石多呈板状,双晶不太发育,部分可见环带结构,粒度0.5~2.5mm,含量一般在5%~10%;基质由斜长石微晶、磁铁矿及玻璃质组成,基质具交织结构,部分岩石中斜长石具半定向排列,粒度多小于0.1mm。

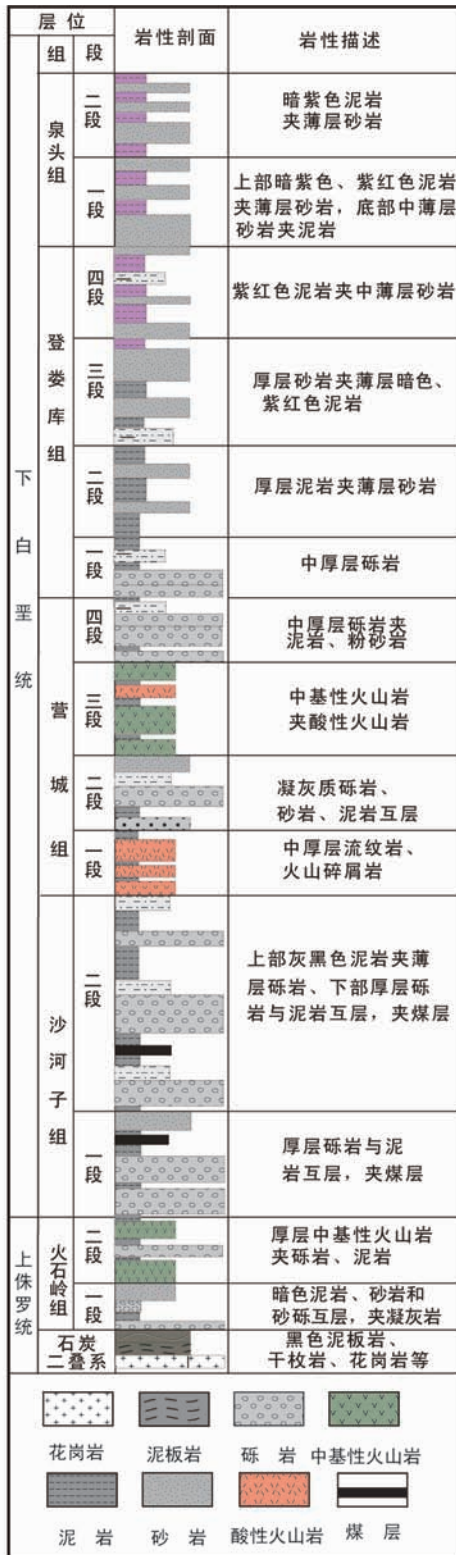


图2 松辽盆地侏罗系-白垩系柱状简图
Fig.2 Simplified stratigraphic column of Jurassic-Cretaceous in Songliao basin

~5%, 石英含量约5%; 基质具交织结构及霏细结构, 由斜长石微晶及长英质矿物组成, 粒度多小于0.1mm。

流纹岩: 呈灰白色、紫红色或灰绿色, 流纹构造, 气孔状、杏仁状构造, 斑状结构; 斑晶为石英、条纹长石, 部分见透长石; 石英呈粒状, 粒度0.1~2mm, 含量1%~5%; 条纹长石呈板状或不规则状, 具条纹结构, 粒度0.4~1.8mm, 含量1%~5%, 部分岩石中亦可见少量黑云母斑晶; 基质由微-隐晶长英质矿物组成, 粒度多小于0.1mm。

3 地质年代学

对于松辽盆地及邻区中生代岩浆作用, 前人做了大量的工作, 尤其近几年大量新锆石 SHRIMP 年龄数据的发表, 使松辽盆地中生代岩浆活动的地质年代方面争议越来越少。比较有代表性的如章凤奇等(2007, 2008)对松辽盆地北部营城组的流纹岩获得的锆石 SHRIMP 数据为113~111Ma; 舒萍等(2007)测定的营城组火山岩 SHRIMP 锆石年龄, 集中在115~111Ma; 裴福萍等(2008)测定了松辽盆地南部火山岩 SHRIMP 锆石年龄, 获得火石岭组火山岩锆石年龄为133~129Ma, 营城组火山岩锆石年龄为119~111Ma。从发表的最新的锆石年龄数据来看, 松辽盆地中生代火山作用主要集中在早白垩世。

4 地球化学特征

4.1 分析方法

挑选了松辽盆地36个(其中岩心样品31个, 周边露头样品5个)新鲜的火山岩样品(采样位置见图1)进行了主量元素、微量和稀土元素地球化学分析, 并对其中的16个火山岩样品进行了Rb-Sr和Sm-Nd同位素地球化学分析。所有样品的地球化学分析由核工业北京地质研究院完成(表1, 表2)。主要元素数据用X荧光光谱方法分析, 分析误差小于3%; 微量稀土元素数据用ICP-MS方法分析(闫欣和许荣华, 2001), 分析误差小于6%; Rb-Sr和Sm-Nd同位素数据用双稀释剂法在VG354热离子质谱仪上测定, Rb-Sr和Sm-Nd同位素质量分馏分别用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 进行标准化, 其详细的分析技术和分析流程参阅文献(Qiao, 1988)。

4.2 主量元素特征

松辽盆地早白垩世火山岩基性岩类样品主要落入玄武岩和粗面玄武岩区, 个别样品落入苦橄玄武岩范围; 中性岩类主要分布在粗面安山岩和粗面英安岩范围内, 个别落入玄武粗面安山岩范围; 酸性岩类主要落入流纹岩和粗面英安岩区域, 个别为英安岩(图3a)。

松辽盆地早白垩世火山岩具有中K到高K的特征(图3b):

英安岩: 呈浅黄绿色, 块状构造, 斑状结构; 斑晶为斜长石和石英, 斜长石半自形, 聚片双晶发育, An = 28, 含量3%

表1 松辽盆地早白垩世火山岩主量元素 (wt%) 和微量元素 ($\times 10^{-6}$) 含量表Table 1 Major element (wt%) and trace element ($\times 10^{-6}$) composition and some ratios of Early Cretaceous volcanic rocks from

Songliao basin

岩石类型	酸性岩类												
	样品号	SS2-1	PS1-7	YS1-1	CS3-1	CS3-2	DS2-2	DS7-1	DS5-1	YS2-1	YS2-3	SP-1	S7-1
SiO ₂	82.62	69.01	76.71	70.00	69.33	69.27	71.33	66.92	78.58	78.41	75.74	48.59	
TiO ₂	0.14	0.66	0.21	0.33	0.36	0.47	0.27	0.50	0.20	0.20	0.16	1.52	
Al ₂ O ₃	8.99	15.10	10.63	12.48	12.95	13.14	14.27	15.27	10.65	10.45	12.11	15.28	
Fe ₂ O ₃ ^T	2.26	4.23	1.64	4.03	5.24	2.31	2.59	2.82	2.41	2.00	1.85	7.54	
MnO	0.03	0.09	0.06	0.05	0.18	0.06	0.04	0.04	0.05	0.07	0.01	0.12	
MgO	0.05	1.04	0.08	0.01	0.05	0.69	0.48	0.82	0.07	0.06	0.01	8.79	
CaO	0.25	1.14	1.25	0.11	1.45	2.12	0.55	2.04	0.23	0.42	0.10	7.61	
Na ₂ O	3.61	3.00	2.21	0.31	3.58	3.67	3.00	3.99	3.52	3.57	4.17	3.25	
K ₂ O	1.52	3.24	4.97	10.22	4.88	3.50	5.45	4.05	3.03	2.96	4.73	2.10	
P ₂ O ₅	0.02	0.13	0.02	0.02	0.02	0.13	0.07	0.13	0.02	0.02	0.02	0.65	
LOI	0.51	2.34	2.18	1.74	1.89	4.03	1.93	3.41	1.22	1.83	1.10	4.26	
TOTAL	99.99	99.98	99.96	99.31	99.93	99.39	99.97	99.99	99.98	99.99	100.0	99.71	
Mg*	0.04	0.35	0.10	0.01	0.02	0.40	0.29	0.39	0.06	0.07	0.01	0.72	
Cr	1.05	25.0	1.30	0.61	2.01	4.26	2.02	2.40	1.30	1.41	0.59	295	
Ni	0.02	9.80	1.45	0.19	0.43	3.91	1.54	1.94	1.43	0.11	0.01	151	
Rb	66.7	103	189	315.	112	84.0	181	115	115	118	206	46.8	
Sr	86.6	365	43.8	46.6	91.2	181	149	250	39.7	43.2	6.67	1034	
Y	50.8	21.8	46.6	81.0	89.3	19.9	25.6	23.3	66.3	66.3	63.3	24.9	
Zr	903	280	954	1883	2151	253	271	241	1278	1297	1472	479	
Nb	37.60	15.20	41.40	131.00	134.00	15.80	18.40	18.40	54.40	54.70	58.70	26.80	
Ba	77.7	648	158	149	62.1	603	808	669	35.9	39.8	15.5	869	
La	69.10	29.90	40.40	104.0	122.0	37.40	42.30	38.20	70.20	68.40	52.30	55.90	
Ce	143.0	60.80	79.50	192.0	234.0	67.80	76.30	69.90	138.0	132.0	111.0	102.0	
Pr	18.20	8.05	10.20	26.30	29.10	8.18	8.98	8.47	17.10	16.80	13.10	13.20	
Nd	68.00	29.10	37.80	100.0	108.0	28.60	29.90	30.00	61.60	62.30	47.60	47.80	
Sm	13.10	5.72	8.51	10.90	20.50	5.04	5.23	5.42	12.60	12.10	10.70	8.13	
Eu	0.47	1.62	0.78	1.86	1.97	1.08	1.03	1.50	0.77	0.74	0.15	2.85	
Gd	11.90	5.10	7.95	15.80	17.80	4.24	4.45	4.73	10.90	10.40	9.95	6.93	
Tb	1.77	0.80	1.42	2.57	2.88	0.62	0.71	0.74	1.87	1.88	1.82	0.95	
Dy	9.54	4.15	8.14	14.00	15.60	3.41	4.00	3.86	10.80	10.80	10.50	4.69	
Ho	1.95	0.79	1.67	2.78	3.13	0.64	0.82	0.75	2.17	2.20	2.14	0.86	
Er	5.87	2.40	5.02	7.92	8.87	1.93	2.55	2.15	6.55	6.49	6.34	2.44	
Tm	0.84	0.33	0.77	1.09	1.25	0.28	0.40	0.31	0.93	0.96	0.97	0.32	
Yb	5.66	2.16	4.97	7.27	8.54	1.88	2.59	2.11	6.68	6.44	6.72	2.00	
Lu	0.82	0.32	0.76	1.01	1.20	0.29	0.42	0.32	0.95	0.98	1.04	0.29	
Hf	21.00	7.69	22.10	47.20	47.10	6.80	7.60	6.84	29.50	30.20	31.20	9.59	
Ta	2.38	1.11	2.74	7.68	7.92	1.31	1.74	1.46	3.61	3.54	3.87	1.54	
Pb	20.20	20.70	21.40	26.70	25.00	14.10	27.80	15.20	28.20	28.50	15.30	9.37	
Th	13.30	8.48	15.10	14.20	15.90	10.80	18.70	12.30	18.80	19.00	23.40	7.06	
U	3.43	1.96	5.85	3.81	3.71	1.94	3.99	2.94	5.08	5.09	2.86	1.28	
Ce/Nb	3.80	4.00	1.92	1.47	1.75	4.29	4.15	3.80	2.54	2.41	1.89	3.81	
Th/Nb	0.35	0.56	0.36	0.11	0.12	0.68	1.02	0.67	0.35	0.35	0.40	0.26	
La/Yb	12.21	13.84	8.13	14.31	14.29	19.89	16.33	18.10	10.51	10.62	7.78	27.95	
(La/Yb) _N	8.76	9.93	5.83	10.3	10.3	14.3	11.7	13.0	12.5	7.62	5.58	20.1	
岩石类型	基性岩类											中性岩类	
样品号	S7-2	SI7-2	W17-1	YC-5	SP-8	LS3-5	LS3-6	QS1-1	SI7-3	YC-7	PS1-1	TS1-1	
SiO ₂	50.17	49.51	49.93	49.81	53.86	42.41	47.08	46.71	40.43	45.11	56.34	58.52	
TiO ₂	1.55	0.86	1.30	1.65	1.42	2.37	2.79	3.56	0.81	1.44	0.92	0.75	
Al ₂ O ₃	16.09	15.90	15.49	16.92	15.93	13.86	14.12	17.22	14.85	14.42	14.76	17.20	
Fe ₂ O ₃ ^T	7.40	6.62	8.85	10.98	7.35	11.90	10.86	10.93	6.59	14.02	5.86	5.00	
MnO	0.13	0.09	0.15	0.14	0.10	0.12	0.20	0.14	0.17	0.28	0.13	0.07	
MgO	6.28	4.21	6.88	2.95	3.85	5.42	9.07	1.75	6.79	5.20	1.14	0.99	
CaO	7.29	5.54	4.90	4.84	6.50	8.94	5.17	2.44	9.07	7.13	6.34	5.31	
Na ₂ O	3.41	4.81	3.67	3.81	3.92	2.93	3.70	2.88	4.15	3.17	4.60	4.29	
K ₂ O	2.20	0.87	3.01	1.14	2.33	1.56	0.51	1.04	1.16	0.68	2.38	1.71	
P ₂ O ₅	0.64	0.39	0.48	0.37	0.44	0.68	0.72	0.48	0.34	0.31	0.28	0.47	

续表 1

Continued Table 1

岩石类型	基性岩类										中性岩类	
	样品号	S7-2	SI7-2	W17-1	YC-5	SP-8	LS3-5	LS3-6	QS1-1	SI7-3	YC-7	PS1-1
LOI	4.28	10.82	4.79	6.94	3.70	9.38	5.55	12.33	15.54	8.08	7.17	5.18
TOTAL	99.44	99.62	99.45	99.55	99.40	99.57	99.77	99.48	99.90	99.84	99.92	99.49
Mg*	0.65	0.59	0.63	0.37	0.54	0.50	0.65	0.26	0.70	0.45	0.30	0.31
Cr	277	318	289	187	63.2	43.7	46.3	138	308	163	32.6	17.9
Ni	152	139	148	60.9	42.6	24.1	22.2	63.3	131	82.2	17.5	11.5
Rb	49.2	22.6	62.8	19.9	50.1	56.6	19.5	30.9	26.8	12.6	35.5	42.1
Sr	987	497	796	625	543	339	687	261	524	680	1244	799
Y	25.3	16.8	24.9	21.1	28.9	25.8	29.8	21.4	17.7	17.8	15.5	22.1
Zr	480	331	397	333	573	377	417	385	328	304	325	483
Nb	27.7	9.47	17.2	9.20	31.4	29.1	31.3	29.7	9.69	7.61	6.82	16.1
Ba	904	345	1646	200	623	276	311	49.7	293	141	1022	481
La	56.90	34.30	28.80	20.70	35.00	29.60	31.40	26.20	44.00	18.40	26.10	39.20
Ce	107.0	65.90	56.60	44.80	67.70	64.40	69.50	57.00	80.50	38.20	56.80	79.20
Pr	13.50	8.25	7.47	6.54	8.87	8.88	9.79	8.00	9.92	5.59	7.72	10.10
Nd	50.30	32.50	29.90	29.00	33.90	35.70	40.10	32.30	36.70	23.60	28.50	38.30
Sm	8.58	6.10	5.81	6.05	6.25	7.77	8.61	7.29	6.09	5.11	5.58	6.85
Eu	2.80	2.37	2.46	2.01	2.15	3.18	3.55	2.66	1.80	1.79	2.29	2.25
Gd	7.33	4.92	5.26	5.21	5.94	7.22	8.34	6.67	4.99	4.37	5.11	5.88
Tb	0.93	0.61	0.78	0.80	0.94	1.11	1.27	1.00	0.65	0.65	0.67	0.86
Dy	4.75	3.01	4.42	4.06	5.05	5.63	6.33	4.94	3.16	3.31	3.34	4.24
Ho	0.91	0.54	0.86	0.76	0.95	1.08	1.18	0.89	0.59	0.65	0.57	0.82
Er	2.47	1.55	2.49	2.01	2.82	2.75	3.03	2.24	1.65	1.80	1.71	2.34
Tm	0.33	0.21	0.34	0.26	0.39	0.37	0.40	0.31	0.23	0.26	0.23	0.33
Yb	2.08	1.47	2.31	1.77	2.76	2.23	2.53	1.77	1.63	1.60	1.43	2.20
Lu	0.31	0.23	0.34	0.23	0.39	0.31	0.34	0.25	0.22	0.24	0.21	0.34
Hf	9.50	6.75	7.99	7.54	11.20	9.23	10.20	9.11	6.86	6.48	7.39	10.80
Ta	1.56	0.50	0.92	0.54	1.72	1.97	2.18	2.14	0.54	0.47	0.40	0.90
Pb	9.86	16.40	7.09	8.53	8.16	6.84	4.25	4.91	16.20	7.49	9.06	13.60
Th	7.27	4.21	3.26	2.35	5.07	2.82	3.04	2.25	4.21	2.08	4.09	5.45
U	1.24	1.04	0.70	0.63	1.26	0.92	0.83	0.71	0.85	0.60	1.13	1.38
Ce/Nb	3.86	6.96	3.29	4.87	2.16	2.21	2.22	1.92	8.31	5.02	8.33	4.92
Th/Nb	0.26	0.44	0.19	0.26	0.16	0.10	0.10	0.08	0.43	0.27	0.60	0.34
La/Yb	27.36	23.33	12.47	11.69	12.68	13.27	12.41	14.80	26.99	11.50	18.25	17.82
(La/Yb) _N	19.6	16.7	8.94	8.39	9.10	9.52	8.90	10.6	19.4	8.25	13.1	12.8

岩石类型	中岩类											
	样品号	DS5-4	PS1-3	LS2-1	LS3-3	SS10-1	H12-2	DS9-1	TS6-3	TS6-5	JT15-1	JT15-2
SiO ₂	67.57	55.75	59.06	60.44	63.43	62.05	62.58	59.67	63.11	65.82	65.91	64.22
TiO ₂	0.54	1.03	0.59	0.67	0.61	0.54	0.76	0.79	0.76	0.59	0.75	0.87
Al ₂ O ₃	15.49	17.69	19.10	16.93	16.85	15.84	16.23	16.57	16.03	15.31	14.85	15.04
Fe ₂ O ₃ ^T	2.45	6.48	5.80	4.11	3.98	3.97	3.56	7.09	5.11	4.20	3.96	6.28
MnO	0.09	0.08	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.06	0.08	0.11	0.09
MgO	0.62	3.11	1.86	2.27	1.74	2.98	1.24	1.41	1.18	1.27	1.10	1.21
CaO	1.79	5.47	2.86	3.92	3.24	3.00	2.72	2.10	2.06	1.71	2.51	2.34
Na ₂ O	4.37	3.95	4.77	4.26	4.32	4.95	5.00	3.87	4.25	4.07	3.76	4.25
K ₂ O	3.91	2.24	1.30	2.79	2.82	2.54	3.10	2.73	2.55	4.96	3.63	3.40
P ₂ O ₅	0.14	0.35	0.22	0.29	0.26	0.21	0.28	0.34	0.35	0.15	0.16	0.23
LOI	3.02	3.32	3.89	3.66	2.68	3.80	3.89	4.81	3.96	1.83	3.24	2.05
TOTAL	99.99	99.47	99.51	99.40	99.98	99.94	99.41	99.44	99.42	99.99	99.98	99.98
Mg*	0.36	0.52	0.42	0.55	0.49	0.63	0.44	0.31	0.34	0.40	0.38	0.30
Cr	3.24	7.45	7.96	4.68	17.70	50.80	19.80	4.54	3.82	9.48	31.20	2.00
Ni	2.34	24.30	5.80	3.94	20.40	34.90	6.73	3.15	2.59	3.81	13.20	2.50
Rb	106	44.6	38.3	52.4	46.8	53.2	63.9	103	67.3	192.0	91.8	108
Sr	274	1492	622	504	1268	842	635	640	643	198	266	554

续表 1

Continued Table 1

岩石类型	中岩类											
	样品号	DS5-4	PS1-3	LS2-1	LS3-3	SS10-1	H12-2	DS9-1	TS6-3	TS6-5	JT15-1	JT15-2
Y	21.1	23.8	9.99	11.8	10.6	11.2	11.3	22.0	21.5	31.6	20.5	31.8
Zr	219	442	166	109	257	253	472	431	403	451	389	605
Nb	18.8	7.85	2.53	9.05	6.20	3.74	11.0	11.9	11.4	9.65	14.0	10.9
Ba	899	1438	312	633	862	1367	950	665	992	769	469	863
La	38.40	35.40	12.70	27.80	21.80	30.50	37.60	29.60	29.90	32.90	29.30	29.60
Ce	69.60	78.20	26.90	56.60	44.90	59.10	72.80	56.60	56.30	65.80	53.00	59.80
Pr	8.38	10.80	3.56	6.99	5.81	7.64	9.14	7.32	7.22	8.53	6.45	8.24
Nd	30.10	41.60	13.80	24.90	22.00	29.50	33.10	28.30	27.80	32.90	23.30	33.20
Sm	5.41	7.65	2.60	4.43	3.81	5.30	5.36	5.56	5.26	6.74	4.37	6.75
Eu	1.63	3.32	1.17	1.54	1.65	2.09	1.84	1.70	1.69	1.56	1.14	2.13
Gd	4.50	6.70	2.50	3.64	3.14	4.09	4.14	4.77	4.53	5.86	3.65	6.03
Tb	0.67	0.95	0.35	0.49	0.43	0.50	0.52	0.73	0.69	0.96	0.58	0.97
Dy	3.66	4.92	1.86	2.42	2.14	2.17	2.09	3.72	3.64	5.23	3.32	5.24
Ho	0.70	0.93	0.38	0.44	0.40	0.38	0.39	0.77	0.71	1.07	0.67	1.04
Er	2.12	2.56	1.06	1.18	1.13	0.96	0.92	2.24	2.07	3.09	2.02	3.07
Tm	0.29	0.36	0.17	0.16	0.15	0.13	0.13	0.32	0.30	0.42	0.30	0.45
Yb	1.97	2.19	1.02	1.04	1.10	0.93	0.79	2.05	2.16	2.97	2.11	2.91
Lu	0.29	0.34	0.15	0.16	0.16	0.14	0.11	0.34	0.31	0.43	0.32	0.44
Hf	6.39	10.10	4.30	3.56	6.57	5.90	10.40	9.24	8.82	11.90	8.69	13.40
Ta	1.53	0.52	0.16	0.65	0.41	0.26	0.60	0.72	0.68	0.72	1.09	0.72
Pb	15.10	11.60	8.13	16.90	14.80	24.30	20.60	7.91	11.50	27.90	14.50	16.50
Th	12.40	5.32	3.53	4.62	2.68	9.65	6.48	6.63	6.25	14.60	7.80	8.98
U	2.90	1.60	1.01	1.24	0.90	2.79	1.34	1.79	2.18	3.63	2.39	2.41
Ce/Nb	3.70	9.96	10.63	6.25	7.24	15.80	6.62	4.76	4.94	6.82	3.79	5.49
Th/Nb	0.66	0.68	1.40	0.51	0.43	2.58	0.59	0.56	0.55	1.51	0.56	0.82
La/Yb	19.49	16.16	12.45	26.73	19.82	32.76	47.53	14.44	13.84	11.08	13.89	10.17
(La/Yb) _N	14.0	11.6	8.93	19.2	14.2	23.5	34.1	10.4	9.93	7.95	9.96	7.30

注: Fe_2O_3^T 表示全铁; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为球粒陨石标准化; $\text{Mg}^\# = \text{Mg}^{2+}/(\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+})$

表 2 松辽盆地代表性早白垩世火山岩 Sr-Nd 同位素含量表

Table 2 Representative Sr-Nd isotope compositions for Early Cretaceous volcanic rocks from Songliao basin

样品号	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	$\frac{87\text{Rb}}{86\text{Sr}}$	$\left(\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}\right)_m$	2σ	$\left(\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}\right)_i$	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$\frac{147\text{Sm}}{144\text{Nd}}$	$\left(\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}\right)_m$	2σ	t_{Ma}	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
PS1-1	36.10	1248.0	0.08370	0.704675	14	0.7045442	4.00	28.20	0.085600	0.512580	4		0.2
PS1-3	42.80	1519.0	0.08150	0.704693	14	0.7045656	5.17	37.20	0.084000	0.512571	5		0.0
PS1-7	105.00	355.0	0.85810	0.706538	12	0.7051966	3.96	27.10	0.088200	0.512624	6		1.0
SS2-1	67.60	82.8	2.36140	0.710298	11	0.7066066	9.04	63.00	0.086800	0.512722	5		2.9
SS10-1	46.60	1325.0	0.10180	0.704571	11	0.7044119	2.38	19.70	0.073100	0.512713	9		3.0
LS3-5	54.70	315.0	0.50250	0.705439	27	0.7046535	5.61	32.50	0.104200	0.512673	5		1.7
LS3-3	62.70	601.0	0.30220	0.705881	11	0.7054086	3.40	25.70	0.080000	0.512611	12		0.9
QS1-1	5.37	531.0	0.02930	0.703128	7	0.7030822	1.22	6.86	0.107600	0.512853	7		5.2
LS2-1	35.50	642.0	0.16000	0.704231	9	0.7039809	1.83	12.40	0.089200	0.512632	6	115	1.2
YS1-1	183.00	40.3	13.09430	0.725480	14	0.7050107	6.00	35.80	0.101400	0.512753	4		3.3
CS3-2	115.00	90.6	3.67430	0.709521	11	0.7037773	15.70	109.00	0.087500	0.512711	4		2.7
DS2-2	82.30	168.0	1.42130	0.707333	14	0.7051112	3.54	28.20	0.076000	0.512639	7		1.5
DS5-4	102.00	257.0	1.15110	0.706594	18	0.7047946	3.74	28.20	0.080300	0.512630	9		1.2
DS7-1	167.00	134.0	3.61200	0.709981	10	0.7043346	3.72	28.40	0.079300	0.512641	8		1.5
DS9-1	59.00	708.0	0.24120	0.705520	15	0.7051430	3.86	30.50	0.076600	0.512587	6		0.5
H12-2	51.50	871.0	0.17110	0.706123	8	0.7058555	3.93	28.20	0.084300	0.512591	9		0.4

注: $\epsilon_{\text{Nd}} = [(\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}})_m / (\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}})_{\text{CHUR}} - 1] \times 10000$; $(\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}})_{\text{CHUR}} = 0.512638$, $(\frac{147\text{Sm}}{144\text{Nd}})_{\text{CHUR}} = 0.1967$; M 为样品的测试比值, i 为样品的初始比值; 假定松辽盆地早白垩世火山岩喷发年龄为 115Ma

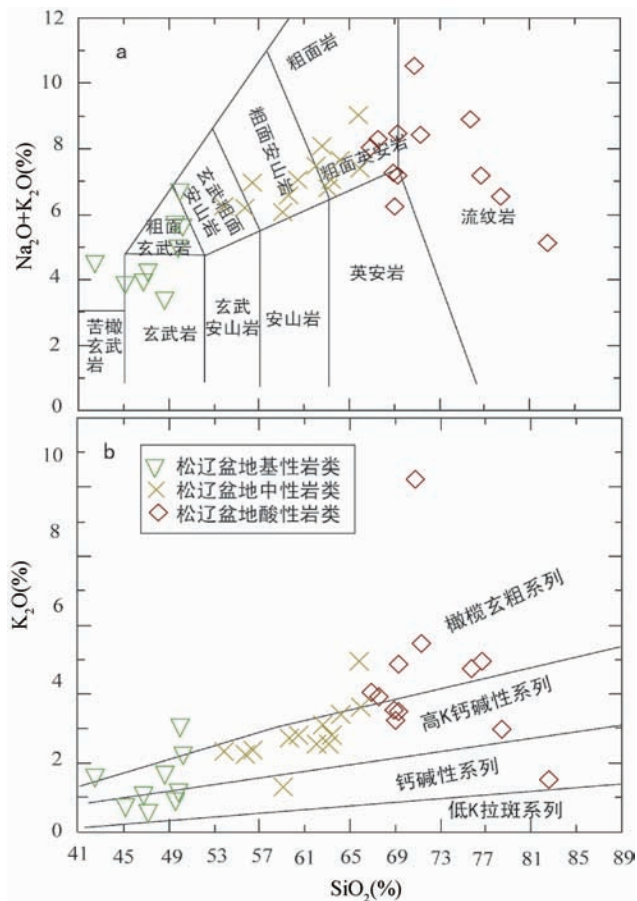


图3 松辽盆地火山岩岩石化学分类图
(a)-全碱对 SiO₂ 图解, 岩石类型边界据 Le Bas *et al.* (1986);
(b)-K₂O对 SiO₂ 图解, 岩石类型边界据 Rickwood(1989)

Fig.3 Geochemical diagrams for volcanic rocks from Songliao basin

(a)-Total alkalis vs. SiO₂, rock type boundaries are from Le Bas *et al.* (1986); (b)-K₂O vs. SiO₂, rock type boundaries are from Rickwood(1989)

基性岩类主要为钙碱性-高 K 钙碱性系列, 中性岩类主要表现为高 K 钙碱性系列, 酸性岩类则主要分布在高 K 钙碱性-橄辉玄粗系列范围。基性岩类 $Mg^{\#}$ 值为 0.26 ~ 0.72, TiO₂ 的含量为 0.81% ~ 3.56%, Fe₂O₃^T 的含量范围为 6.59% ~ 14.02%; 中性岩类 $Mg^{\#}$ 值为 0.30 ~ 0.63, TiO₂ 的含量为 0.54% ~ 1.03%, Fe₂O₃^T 的含量范围为 2.45% ~ 7.09%; 酸性岩类 $Mg^{\#}$ 值为 0.01 ~ 0.40, TiO₂ 的含量为 0.14% ~ 0.66%, Fe₂O₃^T 的含量范围为 1.64% ~ 5.24%。

随着 SiO₂ 含量的增高, 对于中性岩类和酸性岩类, Al₂O₃、P₂O₅、Fe₂O₃、TiO₂、MgO 和 CaO 的含量明显减少, 而 Na₂O 含量无明显的线性变化 (图 4)。对于基性岩类, 随着 SiO₂ 含量的增高, 其他常量元素的含量变化趋势不明显。对于 K₂O 随 SiO₂ 含量的变化特征而言, 基性-中性岩类具有相对线性递增的特点, 但酸性岩类比较分散, 表现了含量降低的趋势 (图 4)。

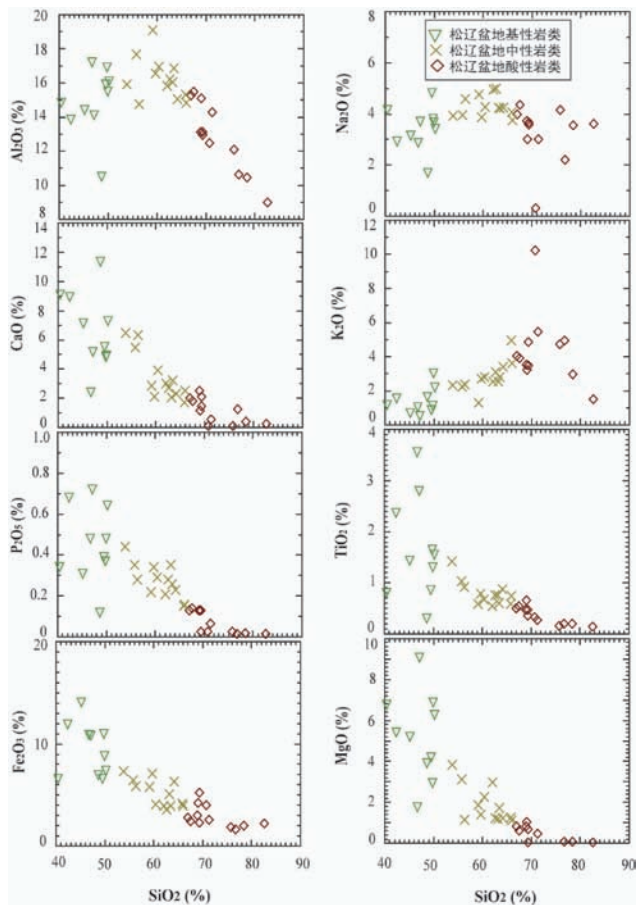


图4 松辽盆地火山岩主要元素对 SiO₂ 变化图解

Fig.4 Variation diagrams of major elements vs. SiO₂ for volcanic rocks from Songliao basin

4.3 微量、稀土元素特征

对于基性岩类, 随着 SiO₂ 含量的增高, 相容元素 Cr、Ni 浓度明显降低, 大离子亲石元素 Sr 也表现了降低的趋势, 但是 Rb 和 Ba 表现为先增加后降低; 高场强元素 Zr、Hf 从玄武岩到英安岩的变化趋势不明显, 而流纹岩中这些高场强元素明显富集。(图 5)。

N-MORB 标准化的多元素图解显示 (图 6), 所有的样品基本都具有大离子亲石元素 (LILE) 相对富集, Th 和 Ti 相对亏损的特征。相比较而言, 从基性-中性-酸性岩类, Ti 的负异常明显强烈; 酸性岩类具有基性-中性岩类没有的 Sr 和 P 负异常; 基性岩类 Nb 和 Ta 负异常不是很明显, 而中性岩类具有较为明显的负异常特征; 酸性岩类还具有弱的 Ba 负异常的特征。所有样品都表现为轻稀土元素 (LREE) 相对富集, 重稀土元素 (HREE) 相对亏损的特征 (图 7)。基性岩类 (La/Yb)_N = 8.39 ~ 20.1, 中性岩类 (La/Yb)_N = 7.30 ~ 34.1, 酸性岩类 (La/Yb)_N = 5.58 ~ 14.3。基性和中性岩类无明显的 Eu 负异常, 酸性岩类 Eu 负异常特征明显。

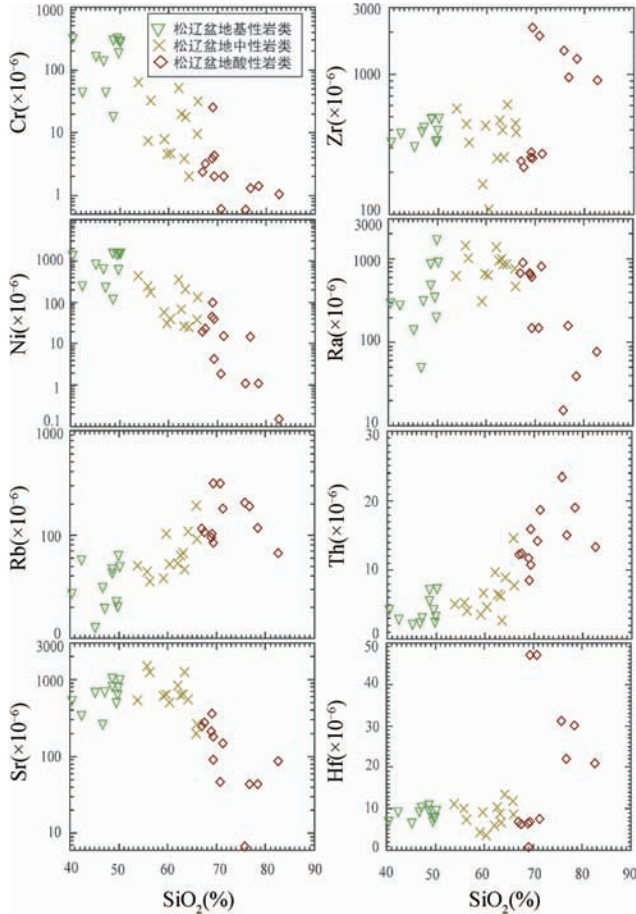


图5 松辽盆地火山岩微量元素对 SiO_2 变化图解

Fig. 5 Variation diagrams of trace elements vs. SiO_2 for volcanic rocks from Songliao basin

4.4 Sr-Nd 同位素特征

代表性火山岩样品的 Sr 和 Nd 同位素分析结果见表 2。与全硅酸盐地球相比,绝大多数样品具有低的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值和高的($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i 值(初始年龄值为 115Ma):基性岩类的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i = 0.7031 ~ 0.7047, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +1.7 \sim +5.2$;中性岩类的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i = 0.7040 ~ 0.7054, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = 0 \sim +3.0$;酸性岩类的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i = 0.7038 ~ 0.7066, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +1.0 \sim +3.3$ 。绝大部分样品都落在 OIB 的区域内(图 8)。

5 岩浆成因

松辽盆地早白垩世火山岩具有大离子亲石元素(LILE)(图 6)和轻稀土元素(LREE)相对富集(图 7)的特征,并具有较低的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值和较高的($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i 值,指示火山岩岩浆应与亏损地幔相关。在 Sr-Nd 同位素初始值图中(图 8),绝大部分样品落入 OIB(洋岛玄武岩)或是与 CFB(大陆溢流玄武岩)分界的区域附近,说明火山岩岩浆很可能来自类似 OIB-CFB 的地幔源。在 Th/Nb-Ce/Nb 变化图解中

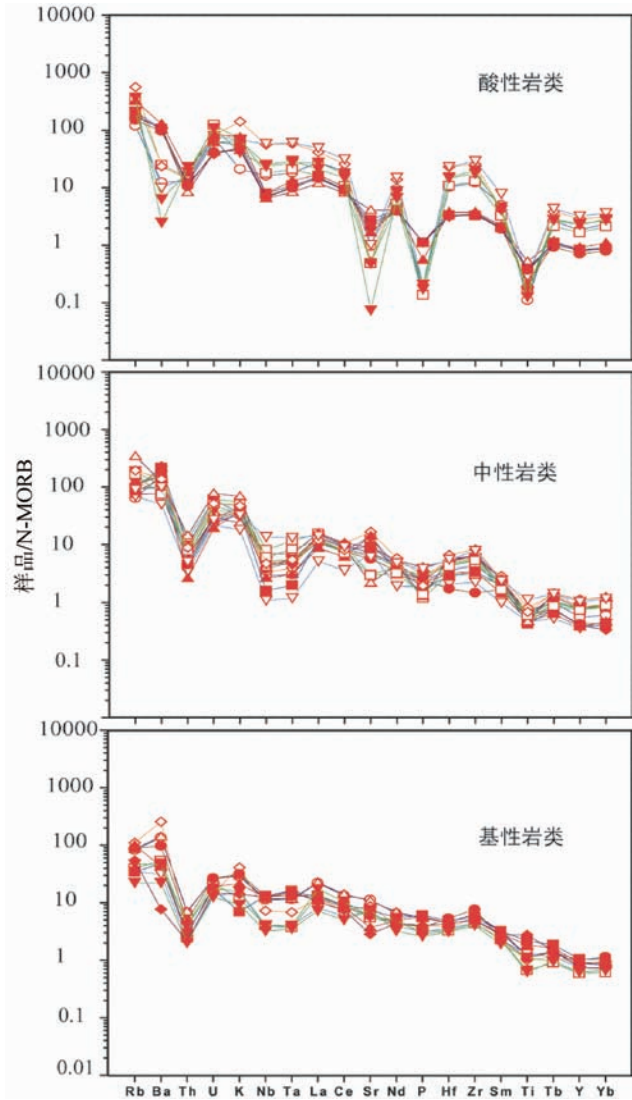


图6 松辽盆地火山岩 N-MORB 标准化的多元素图解(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 N-MORB normalized spidergrams for volcanic rocks from Songliao basin (normalization values are from Sun and McDonough, 1989)

(图 9),基性岩类主要落入 OIB 和 CFB 范围内,个别落入弧相关岩浆范围内,同样也说明岩浆可能主要来自类似 OIB-CFB 的地幔源;基性岩类岩浆受混染程度很小,只有个别可能受到年轻地壳(熔融后具有弧相关岩浆特征,赵泽辉等, 2006)的混染,个别样品也具有 Ta 和 Nb 高场强元素相对于稀土元素轻度亏损的特征,可能就是这种混染所致。另外和原始玄武岩相比($\text{Ni} > 200 \times 10^{-6}$, $\text{Cr} > 400 \times 10^{-6}$; Hess, 1992; Tatsumi and Eggins, 1995),基性岩类具有 $\text{Mg}^\#$ 值低, Cr 和 Ni 含量较低的特点,可能和岩浆熔融程度和结晶分异过程有关。因此,基性岩岩浆可能来自被富集了的亏损地幔源的部分熔融。

中性岩类则主要分布在弧相关岩浆范围内,个别落入

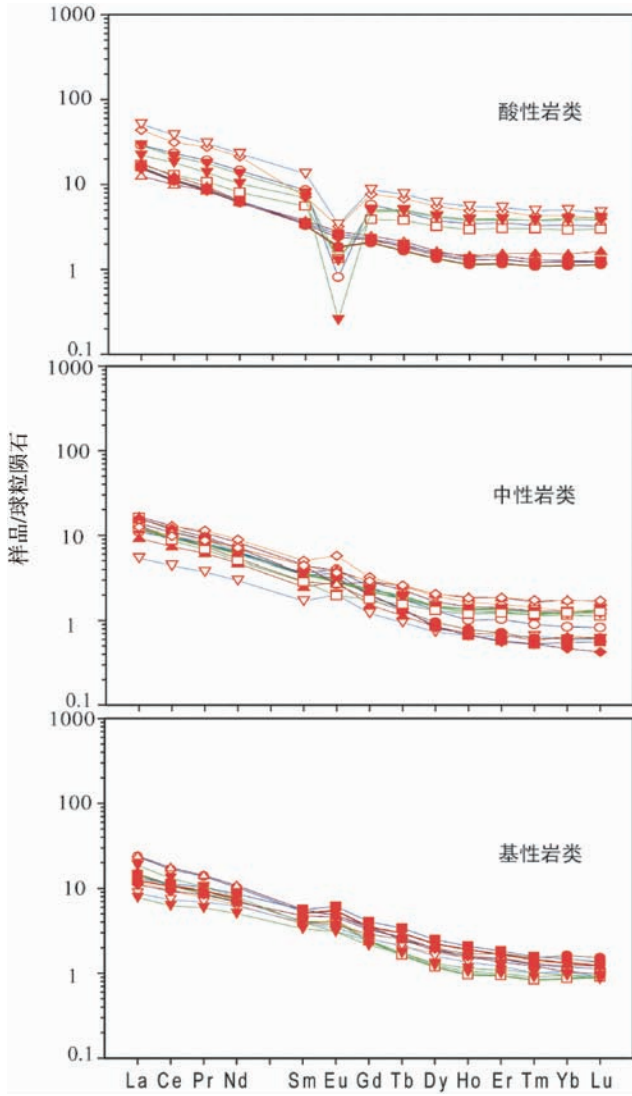


图7 松辽盆地火山岩球粒陨石标准化的 REE 图解(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns for volcanic rocks from Songliao basin (normalization values are from Sun and McDonough, 1989)

CFB 区域,基本是沿着 OIB-CFB 和弧相关岩浆-俯冲组分的连线分布(图9)。对于中性岩类,虽然具有大离子亲石元素富集, Ta 和 Nb 高场强元素相对于稀土元素亏损(图6),类似与俯冲带相关岩浆的地球化学特征(Gill, 1981; Kelemen, 1995; Pearce and Peate, 1995; Santo *et al.*, 2004),并且主要样品在 Th/Nb-Ce/Nb 变化图解(图9)中也分布在弧相关岩浆范围内,但这仍不是真实弧岩浆的特征,理由有二:一是如果中性岩类是弧相关岩浆,那么和中性岩类基本同时喷发的基性岩类和酸性岩类为什么没有明显的弧岩浆特征,它们在 Th/Nb-Ce/Nb 变化图解(图9)中也不落在弧相关岩浆的范围之内;二是正常的弧岩浆是源于俯冲流体进入亏损地幔后熔融的岩浆,如果中性岩类是真正的弧岩浆的话,那么它们

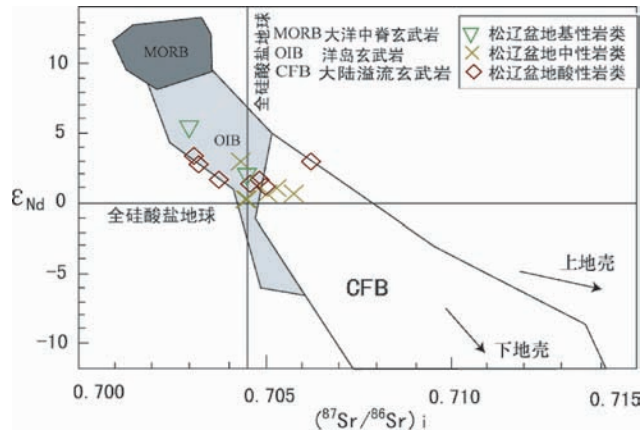


图8 松辽盆地火山岩 Nd-Sr 初始比值图解(据 Zindler and Hart, 1986; Hofmann, 1997)

Fig.8 Initial Nd-Sr isotopic diagram for volcanic rocks from Songliao basin (after Zindler and Hart, 1986; Hofmann, 1997)

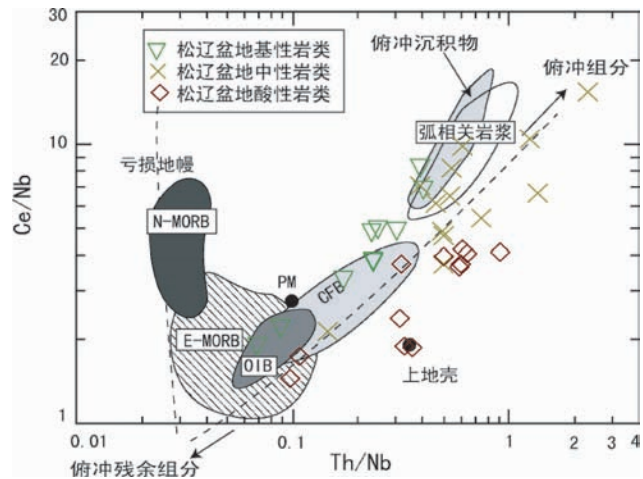


图9 松辽盆地火山岩 Th/Nb-Ce/Nb 图解(据 Song *et al.*, 2004)

Fig.9 Th/Nb vs. Ce/Nb diagram for volcanic rocks from Songliao basin (after Song *et al.*, 2004)

应该位于亏损地幔和俯冲组分演化的连线上。赵泽辉等(2006)通过对新疆三塘湖盆地火山岩的研究提出前造山组分的再次熔融喷出的火山岩同样具有类似与俯冲带相关岩浆的地球化学特征,因此本文认为中性岩类可能是年轻地壳组分被来自亏损地幔岩浆的再次熔融喷发所致。

对于酸性岩类,主要分布于 OIB-CFB,弧相关岩浆以及上地壳三个端元范围内(图9),指示其岩浆可能主要来自亏损地幔的初生地壳岩石在中低压条件下部分熔融,长石、磷灰石和别的铁镁质矿物作为残留相,这个部分熔融的岩浆受到了上部地壳物质的混染所致,因此才表现出 K 含量变化较大、Zr 和 Hf 随随着 SiO₂ 含量的增高具有分类现象以及 Eu

的负异常等特征。从所有早白垩世火山岩较低的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i值和较高的($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i值来看,岩浆基本没有受到老地壳的混染,或者说松辽盆地不存在前寒武纪结晶基底或是规模较小(吴福元等, 2000; 王兴光和王颖, 2007; 余星等, 2008)。

从上述讨论来看,松辽盆地中生代火山作用虽然活动时间相近,但不同岩类岩浆端元组分存在差异。

6 构造意义

众多学者都认为松辽盆地早白垩世进入了伸展拉张的构造背景,响应的特征就是盆地内众多断陷的形成以及大规模的岩浆活动(高瑞琪和萧德铭, 1995; 刘德来等, 1996; 刘和甫等, 2000; 王璞珺等, 2003; 李锦轶等, 2004; 葛肖虹等, 2007)。但对于伸展拉张的动力学机制,目前还有不同的观点:有太平洋古板块俯冲作用的观点(刘德来等, 1996; 刘和甫等, 2000)和大陆岩石圈拆沉作用的观点(邓晋福等, 2000)。从以上对松辽盆地早白垩世火山岩的地球化学特征总体分析来看,应该说中生代的火山作用和俯冲带的关系不大。从本文基性岩类的特征来看,基性岩类的岩浆是来自被富集了的亏损地幔源的部分熔融,没有明显火山弧的特征,应该说它不是俯冲作用直接带来的岩浆产物。如果认为是直接和俯冲作用相关的火山作用,那么区域上表现的应该是一种挤压的构造背景;如果作为弧后裂谷,那么弧的位置又在哪里?李锦轶等(2004)也提出白垩纪中晚期,中国东北及邻区才大规模受到了古太平洋板块俯冲的影响。既然和古太平洋板块俯冲作用无关或是影响较小,那么对于松辽盆地大规模的伸展作用和岩浆活动的动力学机制又如何解释?目前众多学者都认为中国东北及邻区境内的蒙古-鄂霍次克洋于侏罗纪晚期关闭,那么中朝板块和西伯利亚板块之间的大陆拼贴、造山作用在侏罗纪晚期基本完成。强烈的造山作用造成岩石圈缩短增厚,增厚的岩石圈在重力作用下底部易发生拆沉作用。岩石圈的拆沉作用会导致莫霍面上移,造成岩石圈伸展拉张减薄,地表表现为大范围的张性裂谷和岩浆作用,新疆三塘湖盆地就是造山后拆沉作用导致的伸展拉张和大规模岩浆作用的典型代表(赵泽辉等, 2006)。

基于松辽盆地中生代火山岩的地球化学特征及区域构造背景,结合以上的讨论,本文提出松辽盆地晚侏罗世-早白垩世火山作用的深部动力学模型如下(图 10)。晚侏罗世,随着松辽盆地邻近的蒙古-鄂霍次克洋关闭,在中国东北地区发生了强烈的挤压造山作用。强烈的挤压造山作用造成岩石圈的缩短和增厚,增厚的岩石圈底部由于重力作用发生拆沉作用。拆沉后的岩石圈块体向下运动,致使其周围的地幔岩向上补充。向上补充的地幔岩由于压力的减小,降低其固相线而发生部分熔融。岩浆熔体的出现更进一步降低周围地幔岩的固相线而是部分熔融范围增大,致使周围的地幔岩上涌补充。熔融上涌的地幔岩岩浆底侵致使岩石圈主动

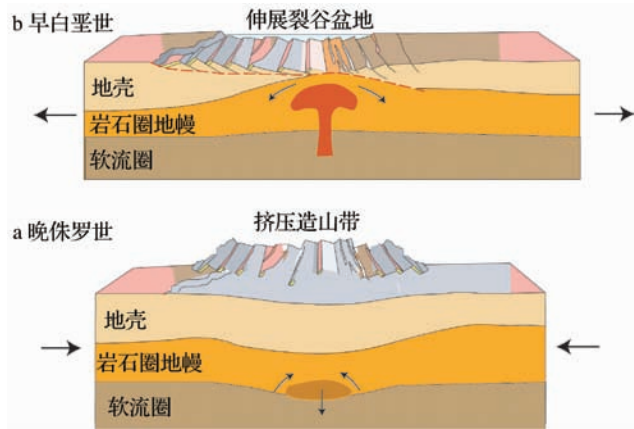


图 10 松辽盆地晚侏罗世-早白垩世深部动力学演化模型图

Fig. 10 The Late Jurassic-Early Cretaceous dynamic and evolutionary model of Songliao basin

伸展拉张,当上部岩石圈伸展薄到一定程度时,地表发生大规模的裂谷断陷作用,同时伴有大规模的火山活动,这次事件在松辽盆地大约发生在早白垩世。因此松辽盆地早白垩世的伸展拉张主要以主动拉张为主,后期由于太平洋板块俯冲作用的共同影响,可能是主动和被动相结合的拉张机制。

7 主要结论和认识

通过对松辽盆地早白垩世基性岩类、中性岩类和酸性岩类的地球化学特征对比分析研究,对松辽盆地早白垩世火山作用成因机制以及构造意义提出以下认识:

(1) 松辽盆地早白垩世火山岩具有大离子亲石元素(LILE)、轻稀土元素(LREE)相对富集的特征,并具有较低的($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i值和较高的($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$)_i值。基性岩类岩浆主要来自被富集了的亏损地幔源的部分熔融,受混染程度很小,中性岩类岩浆源于年轻地壳组分被来自亏损地幔岩浆的再次部分熔融,酸性岩类岩浆可能主要来源于亏损地幔的初生地壳部分熔融,并受到了上地壳的混染。松辽盆地中生代火山作用虽然活动时间相近,但不同岩类岩浆端元组分存在差异。

(2) 晚侏罗世-早白垩世,由于蒙古-鄂霍次克洋关闭引发强烈的挤压造山作用,后发生的岩石圈拆沉作用致使来自亏损地幔的岩浆熔融上涌导致岩石圈主动伸展拉张,地表则表现出大规模的裂谷断陷作用和大范围的火山活动,这个阶段的伸展拉张主要以主动拉张为主。

致谢 感谢中国石油大庆油田研究院和吉林油田研究院对于本研究提供的帮助! 对于两位审稿人提出诸多的宝贵意见和建议,表示感谢!

References

- Deng JF, Zhao GC, Zhao HL, Luo ZH, Dai SQ and Li KM. 2000. Yanshanian igneous petroectonic assemblage and orogenic-deep processes in East China. *Geological Review*, 46(1): 41 – 48 (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: 416 – 432
- Gao RQ and Xiao DM. 1995. Programs and Gas Explorations in the Songliao Basin and Its Adjacent Basins. Beijing: Petroleum Industry Publishing House, 1 – 229 (in Chinese with English abstract)
- Ge WC, Wu FY, Zhou CY and Zhang JH. 2005. Zircon U-Pb ages and its significance of the Mesozoic granites in the Wulanhaote region, central Da Hinggan Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 749 – 762 (in Chinese with English abstract)
- Ge XH and Ma WP. 2007. Mesozoic-Cenozoic tectonic framework of southern Northeast Asia. *Geology in China*, 34(2): 212 – 228 (in Chinese with English abstract)
- Gill J. 1981. *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*. Heidelberg, New York, Berlin: Springer, 1 – 390
- Hess PC. 1992. Phase equilibria constraints on the origin of ocean floor basalts. *Geophys. Monogr.*, 71: 67 – 102
- Hofmann AW. 1997. Mantle geochemistry: The message from oceanic volcanism. *Nature*, 385: 219 – 229
- Hua YQ, Sun G, Ding SY and Peng YJ. 2006. Geodynamic significance of Late Cretaceous basalt in Jilin and its relation with oil and gas accumulation. *Global Geology*, 25(4): 385 – 389 (in Chinese with English abstract)
- Kelemen PB. 1995. Genesis of high Mg[#] andesites and the continental crust. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 120: 1 – 19
- 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: 745 – 750
- Li JY, Mo SG, He ZJ, Sun GH and Chen W. 2004. The timing of crustal sinistral strike-slip movement in the northern Great Khing' 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 (in Chinese with English abstract)
- Lin Q, Ge WC, Sun DY, Wu FY, Chong KW, Kyung DM, Myung SJ, Moon W, Chi SK and Sung HY. 1998. Tectonic significance of Mesozoic volcanic rocks in Northeastern China. *Scientia Geologica Sinica*, 33(2): 129 – 139 (in Chinese with English abstract)
- Liu DL, Chen FJ, Guan DF, Tang JR and Liu CR. 1996. A study on lithospheric dynamics of the origin and evolution in the Songliao Basin. *Scientia geologica sinica*, 31(4): 397 – 408 (in Chinese with English abstract)
- Liu HF, Liang HS, Li XQ, Yin JY, Zhu DF and Liu LQ. 2000. The coupling mechanisms of Mesozoic-Cenozoic rift basins and extensional mountain system in Eastern China. *Earth Science Frontiers*, 7(4): 477 – 485 (in Chinese with English abstract)
- Pearce JA and Peate DW. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 23: 251 – 285
- Pei FP, Xu WL, Yang DB, Ji WQ, Yu Y and Zhang XZ. 2008. Mesozoic volcanic rocks in the southern Songliao basin: Zircon U-Pb ages and their constraints on the nature of basin basement. *Earth Science*, 33(5): 603 – 617 (in Chinese with English abstract)
- Qiao GS. 1988. Normalization of isotopic dilution analysis. *Science in China (Series A)*, 31: 1263 – 1268
- Rickwood PC. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22: 247 – 263
- Santo AP, Jacobsen SB and Baker J. 2004. Evolution and genesis of calc-alkaline magmas at Filicudi Volcano, Aeolian Arc (Southern Tyrrhenian Sea, Italy). *Lithos*, 72: 73 – 96
- Shu P, Ding RX, Ji XY and Qu YM. 2007. SHRIMP zircon geochronology of reservoir volcanic rocks in the Qingshen gas field, Songliao Basin. *Acta petrologica Et Mineralogical*, 26(3): 239 – 246 (in Chinese with English abstract)
- Song XY, Zhou MF, Cao ZM and Robinson PT. 2004. Late Permian rifting of the South China Craton caused by the Emeishan mantle plume? *Journal of the Geological Society, London*, 161: 773 – 781
- 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 Ocean Basins*. *Geol. Soc. London Spec. Pub.*, 42: 313 – 345
- Tatsumi Y and Eggins S. 1995. *Subduction Zone Magmatism*. Boston, MA: Blackwell Science, 1 – 211
- Wang PJ, Chen SM, Liu WZ, Shan XL, Cheng RH, Zhang Y, Wu HB and Qi JS. 2003. Relationship between volcanic facies and volcanic reservoirs in the Songliao Basin. *Oil and Gas Geology*, 24(1): 18 – 27 (in Chinese with English abstract)
- Wang XG and Wang Y. 2007. Zircon SHRIMP U-Pb dating of igneous rocks from the basement of North belt of the South Songliao basin and its geological significance. *Geological Science and Technology Information*, 26(1): 23 – 27 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Sun DY, Li HM and Wang XL. 2000. Zircon U-Pb ages for the basement rocks of the Songliao Basin. *Chinese Science Bulletin*, 45(6): 656 – 660 (in Chinese)
- Wu FY, Jahn BM, Wilde SA, Lo CH, Yui TF, Lin Q, Ge WC and Sun DY. 2003. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): Geochronology and petrogenesis. *Lithos*, 66: 241 – 273
- 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)
- Yan X and Xu RH. 2001. Determination of Zr, Hf, Nb, Ta in rocks by ICP-MS. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(4): 458 – 460 (in Chinese with English abstract)
- Yu X, Xiao J, Chen HL, Zhang FQ, Xu Y, Dong CW and Pang YM. 2008. Phanerozoic magmatic events in the basement of Songliao basin: SHRIMP dating of captured zircons from Yingcheng Formation volcanic rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 1123 – 1130 (in Chinese with English abstract)
- 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, North of 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 YQ, Zhao Y, Dong SW and Yang N. 2004. Tectonic evolution stages of the Early Cretaceous rift basins in Eastern China and adjacent areas and their geodynamic background. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 123 – 133 (in Chinese with English abstract)
- Zhao HL, Deng JF, Chen FJ, Liu HX, Hu Q and Di YJ. 1996. Petrology and tectonic setting of Mesozoic volcanic rocks along southeastern margin of Songliao Basin. *Earth Science*, 21(4): 421 – 427 (in Chinese with English abstract)
- 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 volcanic gas reservoirs, Songliao basin. *Petroleum Exploration and Development*, 35(2): 129 – 142 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Y, Xu G, Zhang SH, Yang ZY, Zhang YQ and Hu JM. 2004. Yanshanian movement and conversion of tectonic regimes in East Asia. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 319 – 328 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZH, Guo ZJ, Han BF and Wang Y. 2006. The geochemical

- characteristics and tectonic-magmatic implications of the latest-Paleozoic volcanic rocks from Santanghu basin, eastern Xinjiang, Northwest China. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (1): 199 – 214 (in Chinese with English abstract)
- Zhu QW, Lu FX, Xie YH and Zheng JP. 1997. Volcanic rocks assemblages in active belt of spreading type in continental margin: Study on Mesozoic volcanic rocks around Songliao Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 13 (4): 551 – 562 (in Chinese with English abstract)
- Zindler A and Hart SR. 1986. Chemical geodynamics. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 14: 493 – 571
- ### 附中文参考文献
- 邓晋福, 赵国春, 赵海玲, 罗照华, 戴圣潜, 李凯明. 2000. 中国东部燕山期火成岩构造组合与造山-深部过程. *地质评论*, 46(1): 41 – 48
- 高瑞琪, 萧德铭. 1995. 松辽盆地及其外围盆地油气勘探新进展. 北京: 石油工业出版社, 1 – 229
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, 张吉衡. 2005. 大兴安岭中部乌兰浩特地区中生代花岗岩的锆石 U-Pb 年龄及地质意义. *岩石学报*, 21 (3): 749 – 762
- 葛肖虹, 马文璞. 2007. 东北亚南中-新生代大地构造轮廓. *中国地质*, 34(2): 212 – 228
- 花艳秋, 孙罡, 丁淑燕, 彭玉鲸. 2006. 吉林省晚白垩世玄武岩地球动力学意义及油气成藏. *地质世界*, 25(4): 385 – 389
- 李锦轶, 莫申国, 和政军, 孙桂华, 陈文. 2004. 大兴安岭北段地壳左形走滑运动的时代及其对中国东北及邻区中生代以来地壳构造演化重建的制约. *地学前缘*, 11(3): 157 – 168
- 林强, 葛文春, 孙德有, 吴福元, 元钟宽, 闵庚德, 陈明植, 李文远, 权致纯, 尹成孝. 1998. 中国东北地区中生代火山岩的大地构造意义. *地质科学*, 33(2): 129 – 139
- 刘德来, 陈发景, 关德范, 唐建人, 刘翠荣. 1996. 松辽盆地形成、发展与岩石圈动力学. *地质科学*, 31(4): 397 – 408
- 刘和甫, 梁慧社, 李晓清, 殷进垠, 朱德丰, 刘立群. 2000. 中国东部中生代裂陷盆地与伸展山岭耦合机制. *地学前缘*, 7(4): 477 – 485
- 裴福萍, 许文良, 杨德彬, 纪伟强, 于洋, 张兴洲. 2008. 松辽盆地南部中生代火山岩: 锆石 U-Pb 年代学及其对基底性质的制约. *地球科学*, 33(5): 603 – 617
- 舒萍, 丁日新, 纪学雁, 曲延明. 2007. 松辽盆地庆深气田储层火山岩锆石地质年代学研究. *岩石矿物学杂志*, 32(1): 15 – 20
- 王璞珺, 陈树民, 刘万洙, 单玄龙, 程日辉, 张艳, 吴海波, 齐井顺. 2003. 松辽盆地火山岩相与火山岩储集层的关系. *石油与天然气地质*, 23(1): 18 – 26
- 王兴光, 王颖. 2007. 松辽盆地南部北带基底岩浆岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地质科技情报*, 26(1): 23 – 27
- 吴福元 孙德有 李惠民 汪筱林. 2000. 松辽盆地基底岩石的锆石 U-Pb 年龄. *科学通报*, 45(6): 656 – 660
- 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
- 闫欣, 许荣华. 2001. 等离子体质谱法测定岩石中的锆、铪、铌、钽. *矿物岩石地球化学通报*, 20(4): 458 – 460
- 余星, 肖骏, 陈汉林, 章凤奇, 徐岩, 董传万, 庞彦明. 2008. 松辽盆地基底显生宙岩浆热事件: 来自营城组火山岩捕获锆石的 SHRIMP 定年证据. *岩石学报*, 24(5): 1123 – 1130
- 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
- 张岳桥, 赵越, 董树文, 杨农. 2004. 中国东部及邻区早白垩世裂陷盆地构造演化特征. *地学前缘*, 11(3): 123 – 133
- 赵海玲, 邓晋福, 陈发景, 刘厚祥, 胡泉, 狄永军. 1996. 松辽盆地东南缘中生代火山岩及其盆地形成的构造背景. *地球科学*, 21(4): 421 – 427
- 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 – 142
- 赵越, 徐刚, 张拴宏, 杨振宇, 张岳桥, 胡健民. 2004. 燕山运动与东亚构造体制的转变. *地学前缘*, 11(3): 319 – 328
- 赵泽辉, 郭召杰, 韩宝福, 王毅. 2006. 新疆三塘湖盆地古生代晚期火山岩地球化学特征及其构造-岩浆演化意义. *岩石学报*, 22(1): 199 – 214
- 朱勤文, 路凤香, 谢意红, 郑建平. 1997. 大陆边缘扩张型活动带火山岩组合——松辽盆地周边中生代火山岩研究. *岩石学报*, 13(4): 551 – 562