

# 辽西彰武大四家子地区中生代火山岩 锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征

肖高强<sup>1,3</sup>, 高山<sup>1,2,3</sup>, 黄华<sup>1,3</sup>, 谢士稳<sup>1,3</sup>, 张宏<sup>2</sup>

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 西北大学地质系大陆动力学国家重点实验室, 陕西西安 710069

3. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

**摘要:** 通过对辽西彰武县以东大四家子乡高城窝堡村义县组标准剖面中生代火山岩锆石 U-Pb 年代学研究表明, 其火山岩年龄为  $122.4 \pm 0.4$  Ma, 属早白垩世。对该区域 23 件典型火山岩样品的地球化学研究表明, 除 3 件流纹岩样品外, 其余样品具有高镁埃达克岩地球化学特征 ( $\text{SiO}_2 = 56.46\% \sim 65.14\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.60\% \sim 17.19\%$ ,  $\text{Mg}^\# = 50 \sim 59$ ,  $\text{Sr} = 501 \sim 700 \mu\text{g/g}$ ,  $\text{Yb} = 1.04 \sim 1.54 \mu\text{g/g}$ ,  $\text{Y} = 12.0 \sim 17.5 \mu\text{g/g}$ ,  $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.85 \sim 0.97$ ,  $\text{Sr}/\text{Y} = 29 \sim 46$ ,  $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 13 \sim 28$ ), 同位素上具有高的初始  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ( $0.705464 \sim 0.705812$ ) 比值, 低的  $\epsilon_{\text{Nd}}$  ( $122 \text{ Ma}$ ) ( $-6.12 \sim -12.80$ ) 值特征, 同时样品中存在具有反环带的辉石斑晶, 辉石中稀土元素含量分布存在着从核部到边部逐渐降低的趋势, 且存在负铕异常 ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.64 \sim 0.76$ )。结合前人对彰武义县组下部火山岩的研究, 笔者倾向认为该套火山岩的成因是拆沉作用与岩浆混合作用共同作用的结果, 即拆沉作用导致软流圈地幔物质上涌加热下地壳形成的长英质岩浆, 与来自地幔由拆沉作用形成的埃达克质高镁安山岩浆混合形成。

**关键词:** 高镁埃达克岩; 岩浆混合; 拆沉作用; 中生代火山岩; 辽西。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2008)02-0151-14

收稿日期: 2007-03-08

## Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry of Mesozoic Volcanic Rocks from Dasijiazi Area at Zhangwu, West Liaoning Province

XIAO Gao-qiang<sup>1,3</sup>, GAO Shan<sup>1,2,3</sup>, HUANG Hua<sup>1,3</sup>, XIE Shi-wen<sup>1,3</sup>, ZHANG Hong<sup>2</sup>

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** Zircon U-Pb dating by LA-ICPMS reveals that the age of Mesozoic volcanic rocks from the Zhangwu area in west Liaoning Province is  $122.4 \pm 0.4$  Ma, which belongs to Early Cretaceous. Geochemical compositions of 23 typical volcanic samples are studied. The results show that most samples except three rhyolites have similar geochemical characteristics of high-Mg adakite ( $\text{SiO}_2 = 56.46\% \sim 65.14\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.60\% \sim 17.19\%$ ,  $\text{Mg}^\# = 50 \sim 59$ ,  $\text{Sr} = 501 \sim 700 \mu\text{g/g}$ ,  $\text{Yb} = 1.04 \sim 1.54 \mu\text{g/g}$ ,  $\text{Y} = 12.0 \sim 17.5 \mu\text{g/g}$ ,  $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.85 \sim 0.97$ ,  $\text{Sr}/\text{Y} = 29 \sim 46$ ,  $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 13 \sim 28$ ). They also have high initial  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ( $0.70639 \sim 0.70647$ ) and low Nd ( $122 \text{ Ma}$ ) values ( $-6.43$  to  $-12.26$ ) that are inconsistent with the original ones from slab melting. Pyroxene phenocrysts are characterized by reversed compositional zoning. Rare earth element concentrations decrease from pyroxene core to rim and also show negative Eu anomalies ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.64 \sim 0.76$ ). Combined with the previous studies on volcanic rocks from the low part of Yixian Formation in Zhangwu area, we propose that our samples from Zhangwu area resulted from delamination and magma mixing. A crustally derived felsic magma resulted from

基金项目: 教育部创新团队研究计划项目 (No. IRT0441); 国家自然科学基金委创新研究群体科学基金项目 (No. 40521001); 高等学校学科创新引智计划项目 (No. B07039)。

作者简介: 肖高强 (1982-), 男, 在读硕士生, 分析地球化学专业。E-mail: gaoqiang4592@163.com

partial melting of the low crust, heated by asthenosphere upwelling and subsequently mixed with a mantle-derived high Mg adakitic melt during magma storage or ascent to surface to form the high Mg adakites in the Zhangwu area.

**Key words:** high-Mg adakites; magma mixing; delamination; Mesozoic volcanic rocks; West Liaoning Province.

华北克拉通中生代岩石圈地幔减薄作用是近年来国内外研究的热点 (Menzies *et al.*, 1993, 2007; Griffin *et al.*, 1998; Xu, 2001; Wiled *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2003; 郑建平等, 2003; Gao *et al.*, 2004; Wu *et al.*, 2005; Zhang, 2005; Xu *et al.*, 2006; Zheng *et al.*, 2006; 周新华和张宏福, 2006; Deng *et al.*, 2007; Zhai *et al.*, 2007). 近年来很多研究者对中国东部燕山期中酸性火山岩和侵入岩的研究发现, 许多样品具埃达克岩的地球化学特征, 被称为“埃达克质岩”或“C”型埃达克岩 (张旗等, 2001, 2003, 2006; Xiao and Clemens, 2006). 由于这种岩石的形成往往需要较高的压力条件 ( $> 1\ 000\ \text{MPa}$ ) (Wolf and Wyllie, 1994; Rapp and Watson, 1995), 以及它们可能暗示的重要深部过程信息 (如板片熔融、底侵玄武岩熔融、岩石圈拆沉等作用), 从而可能为华北岩石圈地幔减薄过程提供一个新的研究思路.

埃达克岩 (adakite) 是 Defant and Drummond (1990) 在研究阿留申群岛火山岩时提出来的, 其地球化学标志是:  $\text{SiO}_2 \geq 56\%$ 、高铝  $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$ 、 $\text{MgO} < 3\%$  (很少  $> 6\%$ )、贫 Y 和 Yb ( $\text{Y} \leq 18\ \mu\text{g/g}$ 、 $\text{Yb} \leq 1.9\ \mu\text{g/g}$ )、Sr 含量高 ( $> 400\ \mu\text{g/g}$ )、LREE 富集, 无 Eu 异常 (或有轻微的负 Eu 异常), 贫 Y 和 Yb, 暗示部分熔融时有石榴石稳定存在; 富 Sr、Eu (相对于 Ce 和 Nd) 具正异常, 说明熔融时斜长石在源区不稳定 (张旗等, 2003). 埃达克岩最初的含义为产于岛弧环境, 由年轻 ( $< 25\ \text{Ma}$ ) 且热的大洋板片部分熔融直接产生的火山岩, 而不同于源自被流体交代过的地幔楔的安山—英安质火山岩. 后来其形成环境被认为还有底侵玄武岩的部分熔融 (Atherton and Petford, 1993; Petford and Atherton, 1996; Petford and Kerry, 2001)、拆沉下地壳的部分熔融 (Kay and Key, 1991; Xu *et al.*, 2002a, 2002b, 2006; Gao *et al.*, 2004) 和俯冲陆壳的部分熔融 (Zhao *et al.*, 2007). 实验岩石学研究也表明镁铁质岩石在  $1.2\ \text{GPa}$  的压力下发生部分熔融能够产生具有埃达克质岩浆特征的熔体 (Rapp *et al.*, 1999, 2002), 然而位于大陆边缘或大陆碰撞带的下地壳是否能够部分熔融产生埃达克质岩浆还存在着

争议 (Xu *et al.*, 2006).

本文研究了位于华北克拉通北缘彰武地区东部的中酸性火山岩样品. 前人已对该地区火山岩进行了年代学和地球化学研究 (陈义贤等, 1997; 黄华等, 2007). 其中, 黄华等 (2007) 对彰武地区西部出露的中基性火山岩样品进行了研究. 本文将对彰武地区东部大面积出露的中酸性火山岩进行研究, 并结合黄华等发表的数据, 进一步讨论该区火山岩成因及其动力学意义.

## 1 地质背景和样品来源

辽西地区的北部以赤峰—开原断裂为界与内蒙古—兴安造山带和松辽盆地相邻, 向西与东西向延伸的燕山造山带相连, 东部以依兰—伊通断裂带为界与辽东隆起带相隔. 所处的构造部位属于华北陆块、辽东隆起带及内蒙古—兴安造山带三者的过渡地带 (陈义贤等, 1997).

本文研究区为辽西彰武地区 (图 1). 位于辽西北部, 该区域出露大量义县组火山岩, 《东北区域地层表辽宁分册》也将该火山岩系命名为“吐呼噜组”.

该组火山岩厚度大于  $1\ 580\ \text{m}$ , 以火山为主, 夹有沉积岩扁豆体. 火山岩多呈带状广泛分布, 岩性由基性到酸性. 下部主要为中基性火山岩, 以安山岩为主, 其次有少量玄武岩, 含有玛瑙, 夹火山角砾岩、凝灰岩及多层沉积岩, 靠上赋存有膨润土和粘土矿; 上部为中酸性火山岩, 以英安岩为主, 有少量流纹岩夹黑曜岩、珍珠岩等 (引自东北区域地层表辽宁分册). 本文样品采自彰武县以东大四家子乡高城窝堡村义县组标准剖面 (图 1). 该剖面岩石一般十分新鲜, 岩石组成主要为英安岩、流纹岩、黑曜岩. 斑晶含量不均匀, 一般在  $5\% \sim 15\%$  左右, 主要为橄榄石、单斜辉石、斜方辉石、斜长石. 本文采样地点与黄华等研究的样品采样地点相差  $80\ \text{km}$  左右 (图 1). 黄华等 (2007) 最近对彰武县以西哈儿套地区义县组火山岩进行了研究, 该地火山岩主要由高镁安山岩组成, 包括少量玄武岩. 而本研究样品主要为英安岩夹少量流纹岩、黑曜岩, 未见玄武岩. 上述岩性差异表明, 两地火山岩可能来自不同的层位.

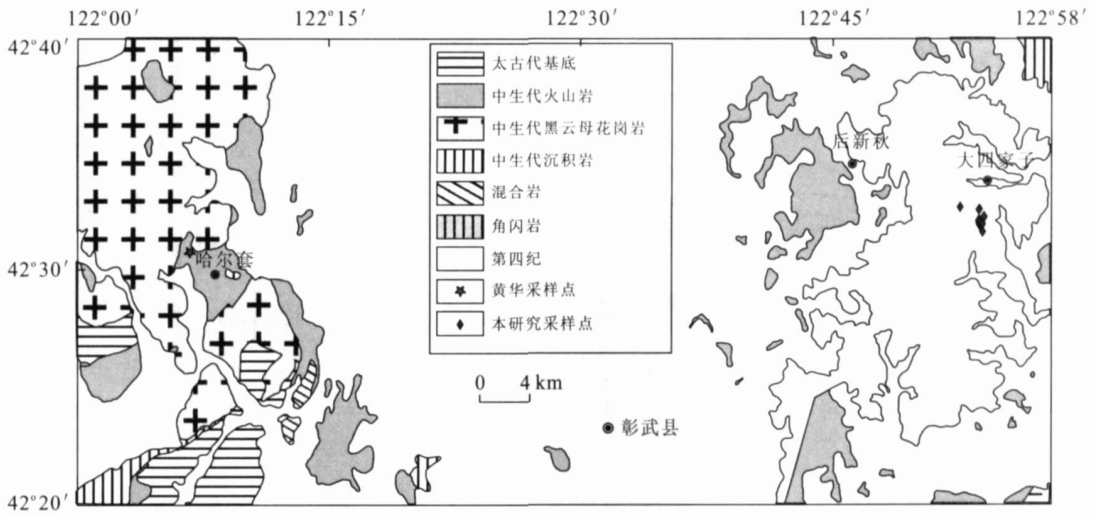


图 1 辽西彰武地区区域地质简图及采样点分布(地质简图据 1973 年辽宁省第一区域地质测量队所绘地质图绘制)

Fig. 1 Geological sketch map in Zhangwu area, West Liaoning Province and sampling points

## 2 分析方法

本研究分析的样品均为未风化蚀变的新鲜火山岩样品. 锆石分选采用人工重砂分选, 然后在双目镜下挑纯. 用于主量、微量元素和同位素分析的样品, 粗碎在刚玉颚板破碎机中进行, 细碎在日本 CMT 公司生产的 T1-100 型 WC 细碎机中最终碎至 200 目. 样品加工均在无污染设备中进行.

主量、微量元素、同位素以及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 原位定年分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行.

主量元素分析采用 XRF (Rigaku RIX 2100) 玻璃熔饼法完成. 微量元素采用 ICP-MS 法完成, 样品溶解在 Teflon 高压溶样弹中进行. 主量元素分析精度和准确度优于 4%, 微量元素分析精度和准确度一般优于 10%. 同位素分析采用多接收电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICPMS, Nu Plasma HR, Nu Instruments, Wrexham, UK) 测试. Nd 同位素标样 La Jolla 的测定值为  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511859 \pm 6 (2\sigma)$ , BCR-2 测定值为  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.704998 \pm 10 (2\sigma)$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512632 \pm 5 (2\sigma)$ ; 美国国家标准局 Sr 同位素国际标样 NIST SRM 987 测定值为  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710250 \pm 12 (2\sigma, n = 15)$ . Sr 和 Nd 的同位素组成分别用  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$  和  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$  校正仪器的质量分馏. 在测试过程中 Sr, Nd 的本底小于 50 ng/g.

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 原位定年分析所使用

的 ICP-MS 为 Agilent 7500 a, 激光剥蚀系统为德国 Lambda Physik 公司的 GeoLas 200 M 深紫外 (DUV) 193nm ArF 准分子 (excimer) 激光剥蚀系统. 分析中采用的激光斑束直径为 30  $\mu\text{m}$ , 以  $^{29}\text{Si}$  作为内标, 哈佛大学标准锆石 91500 作为外标校正. 同位素比值数据处理采用 GLITTER (4.0 版) 软件和 Yuan *et al.* (Yuan *et al.*, 2004) 的数据平滑方法进行, 年龄计算采用 ISOPLOT (3.23 版) 软件.

矿物主量元素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室电子探针 (JEOL Super probe JXA-8100) 上完成, 分析条件为加速电压 15 KV; 束流  $1 \times 10^{-8}$  A; 束斑 1  $\mu\text{m}$ ; 修正方法 PRZ; 标准样品采用美国 SPI 公司 53 种矿物. 矿物微量元素分析亦在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室 LA-ICP-MS 上完成, 剥蚀斑束为 24  $\mu\text{m}$ , 以 Ca 为内标, NIST610 为外标进行元素含量计算. 对 USGS 玄武岩玻璃标准 BHVO-2G 和 BCR-2G 分析结果表明分析的精度和准确度一般优于 10%.

## 3 锆石 U-Pb 年龄

流纹岩样品 ZW21 中的锆石形态大多自形, 未见有残留核部发育. 在阴极发光图像中, 锆石内部显示出典型的岩浆成因振荡环带结构 (图 2). 对该样品的 26 个锆石颗粒的 LA-ICPMS 分析结果见表 1 和图 2, 其中大部分点落在谐和线上或附近. 这些分

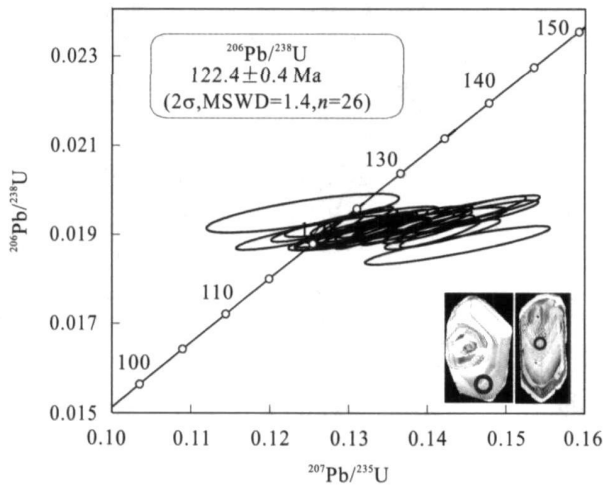


图 2 彰武流纹岩样品 ZW21 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄谐和图及阴极发光图像

Fig. 2 U-Pb concordant diagram of zircons from ZW21 and zircon CL image. Solid circle indicates location of analytical spot along with  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age

析点的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $122.4 \pm 0.4 \text{ Ma}$  ( $2\sigma$ ,  $\text{MSWD} = 1.4$ ,  $n = 26$ ), 它们的 Th/U 比值为  $0.59 \sim 1.73$ , 属典型岩浆锆石范围. 黄华等(2007)获得了彰武地区安山岩锆石有三组谐和年龄, 分别为  $253 \pm 5 \text{ Ma}$ ,  $172 \pm 2 \text{ Ma}$ ,  $126 \pm 2 \text{ Ma}$ , 尽管其中最年轻的第 3 组年龄亦属早白垩世, 但本次样品在误差范围内要年轻于黄华等样品的年龄, 表明本次样品可能来自黄华(2007)研究样品的上部层位.

## 4 地球化学特征

### 4.1 元素地球化学特征

所研究样品的主、微量元素分析数据见表 2. 在  $\text{SiO}_2\% - (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})\%$  (TAS) 图解中(图 3)、这些样品主要落在粗面安山岩、粗面岩、英安岩、流纹岩区域, 而黄华等研究的样品偏基性, 且具有更高的  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  含量. 主量元素方面, 本研究样品  $\text{SiO}_2 = 56.46\% \sim 73.25\%$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.32\% \sim 17.19\%$ ,  $\text{MgO} = 0.51\% \sim 5.12\%$ . 除流纹岩样品 ZW21、ZW22、ZW23 以及 ZW02、ZW13 外, 其他火山岩样品  $\text{Mg}^\# = 47 \sim 59$ ,  $\text{Na}_2\text{O} = 3.21\% \sim 4.58\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.01 \sim 2.57$ . 微量和稀土元素方面,  $\text{Sr} = 233 \sim 700 \mu\text{g/g}$ ,  $\text{Yb} = 0.97 \sim 1.54 \mu\text{g/g}$ ,  $\text{Y} = 11.3 \sim 17.7 \mu\text{g/g}$ ,  $\text{Sr}/\text{Y} = 20 \sim 46$ . 轻稀土与重稀土元素分异明显 ( $L_{\text{AN}}/\text{Yb}_\text{N} = 12 \sim 30$ ), 除 3 个流纹岩

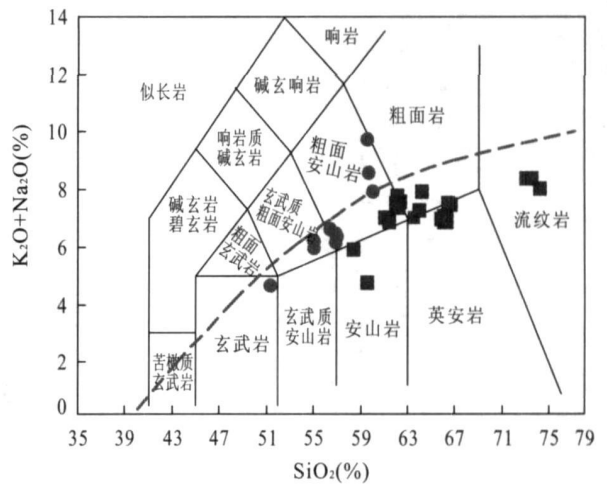


图 3 彰武地区火山岩  $\text{SiO}_2 - (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$  图解(据 Le Maitre *et al.*, 1989 绘制)

Fig. 3 TAS diagram of Zhangwu volcanic rocks 虚线代表碱性和亚碱性岩石系列的分界线, 引自 Irvine and Baragat 1971. ● 代表黄华等(2007)研究的样品; ■ 代表本研究的样品

样品有负钕异常外, 其余样品基本上无钕异常或轻度负钕异常 ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.85 \sim 0.97$ ) (图 4a), 在微量元素分布蛛网图(图 4b)上表现出富集大离子亲石元素, 具有 Nb、Ta、Ti 负异常、Pb 正异常, 而黄华等研究的样品还表现出 Sr 正异常. 在 Harker 图解上, 随着  $\text{SiO}_2$  含量的增加, 主量元素  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$  的含量呈降低的趋势. 微量元素 Cr、Ni、Sr、Y 的含量随着  $\text{SiO}_2$  含量的增加, 似乎有降低趋势, 但相关性不是很好. 从图中还可以看出, 本次研究的大多数样品  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{TFe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO}$ 、Cr、Sr、Y 含量低于黄华等(2007)研究的样品.

在 Y-Sr/Y 判别图上(图 5a), 除流纹岩外, 大多数火山岩样品落在埃达克岩范围内. 在  $\text{MgO}$  比  $\text{SiO}_2$  判别图上(图 5b), 除 ZW02 外, 其余大多数样品  $\text{MgO}$  含量与俯冲板片熔融成因且与地幔发生过交代的埃达克岩相似. 因此, 本次研究所采集的彰武地区中生代火山岩样品除流纹岩外, 绝大多数样品具有高镁埃达克岩的特征.

### 4.2 Sr-Nd 同位素

彰武地区中生代中性火山岩的初始  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  ( $122 \text{ Ma}$ ) 比值为  $0.705464 \sim 0.705812$  (表 3), 初始  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  比值范围为  $0.51182 \sim 0.51217$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}} (122 \text{ Ma})$  的范围为  $-6.12 \sim -12.80$ . 其同位素特征与俯冲板片熔融形成的埃达克岩明显不同 (Defant and Drummond, 1990), 而与大陆下地壳 (Pet

表 1 彰武流纹岩样品 ZW21 锆石 U-Pb 同位素分析结果  
Table 1 Zircon U-Pb LA-ICPMS data for ZW21

分析点	组成( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )				同位素比值				年龄(Ma)					
	Pb <sub>common</sub>	U	Th	U/Th	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$1\sigma$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$		
ZW21-02	1.28	332	317	1.05	0.054 18	0.001 12	0.145 94	0.002 71	0.019 53	0.000 14	0.000 06	0.000 06	124.7	0.9
ZW21-05	nd	118	68	1.73	0.046 24	0.001 91	0.124 19	0.005 00	0.019 48	0.000 18	0.000 11	0.000 11	124.0	1.0
ZW21-07	nd	223	215	1.04	0.050 95	0.001 74	0.135 08	0.004 39	0.019 23	0.000 17	0.000 08	0.000 08	123.0	1.0
ZW21-08	nd	677	843	0.8	0.050 96	0.000 86	0.135 28	0.001 96	0.019 25	0.000 13	0.000 20	0.000 04	122.9	0.8
ZW21-09	1.6	562	594	0.95	0.048 99	0.000 91	0.130 44	0.002 14	0.019 31	0.000 13	0.000 05	0.000 05	123.3	0.8
ZW21-11	0.92	192	158	1.21	0.053 89	0.001 53	0.144 92	0.003 85	0.019 50	0.000 16	0.000 08	0.000 08	124.0	1.0
ZW21-13	0.84	174	111	1.57	0.051 38	0.001 63	0.135 70	0.004 09	0.019 16	0.000 16	0.000 09	0.000 09	122.0	1.0
ZW21-14	nd	228	165	1.38	0.054 39	0.001 41	0.145 58	0.003 51	0.019 41	0.000 15	0.000 08	0.000 08	123.9	0.9
ZW21-15	0.73	449	398	1.13	0.049 50	0.001 55	0.131 66	0.004 01	0.019 29	0.000 14	0.000 03	0.000 03	123.2	0.9
ZW21-19	nd	514	566	0.91	0.050 52	0.000 92	0.133 53	0.002 14	0.019 17	0.000 13	0.000 22	0.000 05	122.4	0.8
ZW21-20	0.62	812	1 067	0.76	0.051 77	0.000 83	0.136 04	0.001 85	0.019 06	0.000 12	0.000 94	0.000 04	121.7	0.8
ZW21-24	nd	1 010	749	1.35	0.050 55	0.000 75	0.132 22	0.001 61	0.018 97	0.000 12	0.006 19	0.000 04	121.1	0.8
ZW21-25	nd	397	518	0.76	0.053 15	0.001 02	0.140 14	0.002 38	0.019 12	0.000 13	0.006 07	0.000 04	122.1	0.8
ZW21-27	nd	1 066	954	1.12	0.049 83	0.000 78	0.131 05	0.001 73	0.019 07	0.000 12	0.005 86	0.000 04	121.8	0.8
ZW21-28	1.1	758	855	0.89	0.053 98	0.000 93	0.141 64	0.002 10	0.019 03	0.000 13	0.005 84	0.000 04	121.5	0.8
ZW21-29	nd	291	277	1.05	0.048 43	0.001 33	0.128 22	0.003 29	0.019 20	0.000 15	0.005 76	0.000 06	122.6	0.9
ZW21-30	nd	195	265	0.74	0.055 60	0.001 96	0.143 84	0.004 82	0.018 76	0.000 18	0.005 79	0.000 07	120.0	1.0
ZW21-31	nd	285	480	0.59	0.050 27	0.001 44	0.131 84	0.003 56	0.019 02	0.000 15	0.005 91	0.000 05	121.5	0.9
ZW21-32	0.7	180	136	1.32	0.050 60	0.001 66	0.133 29	0.004 15	0.019 10	0.000 16	0.006 25	0.000 09	122.0	1.0
ZW21-33	nd	130	83	1.57	0.051 67	0.002 24	0.136 28	0.005 70	0.019 13	0.000 20	0.006 25	0.000 13	122.0	1.0
ZW21-34	nd	2 791	3 296	0.85	0.048 73	0.000 61	0.128 99	0.001 20	0.019 20	0.000 11	0.006 11	0.000 03	122.6	0.7
ZW21-35	nd	522	418	1.25	0.054 15	0.001 26	0.141 93	0.003 01	0.019 01	0.000 14	0.006 65	0.000 07	121.4	0.9
ZW21-36	nd	220	218	1.01	0.047 82	0.001 60	0.125 51	0.004 01	0.019 04	0.000 16	0.006 01	0.000 08	122.0	1.0
ZW21-38	1.16	919	760	1.21	0.050 29	0.000 85	0.133 30	0.001 92	0.019 22	0.000 12	0.006 31	0.000 05	122.7	0.8
ZW21-39	nd	751	1 172	0.64	0.049 97	0.000 88	0.130 73	0.002 01	0.018 97	0.000 12	0.006 13	0.000 04	121.1	0.8
ZW21-40	nd	911	1 416	0.64	0.050 83	0.000 75	0.134 33	0.001 63	0.019 16	0.000 12	0.006 30	0.000 04	122.3	0.8

表 2 彰武中生代火山岩样品主量元素(%)和微量元素( $\mu\text{g/g}$ )分析结果Table 2 The analyzed data of major elements (%) by XRF and trace elements ( $\mu\text{g/g}$ ) by ICP-MS

样品号	ZW01	ZW02	ZW03	ZW04	ZW05	ZW06	ZW07	ZW08	ZW09	ZW10	ZW11	ZW12
SiO <sub>2</sub>	62.36	62.61	56.46	57.47	64.78	65.14	64.52	64.72	64.86	65.07	64.87	64.54
TiO <sub>2</sub>	0.65	0.79	0.88	0.92	0.47	0.47	0.48	0.49	0.48	0.48	0.48	0.48
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.31	17.19	14.60	15.25	14.79	14.82	14.99	14.80	14.84	14.99	14.91	15.05
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.63	3.61	6.97	7.20	3.97	3.83	3.95	3.98	3.88	3.87	3.99	4.02
MnO	0.09	0.06	0.10	0.11	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07
MgO	3.40	1.13	5.01	5.12	2.81	2.36	2.88	2.82	2.79	2.32	2.85	2.92
CaO	4.47	4.01	6.00	6.18	3.89	3.50	3.85	3.79	3.79	3.52	3.80	3.81
Na <sub>2</sub> O	4.14	3.96	3.21	3.51	4.58	3.64	3.87	4.36	4.18	3.77	4.22	3.87
K <sub>2</sub> O	2.71	3.73	1.25	2.28	2.08	3.61	2.80	2.37	2.61	3.57	2.66	2.94
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.25	0.30	0.22	0.23	0.16	0.16	0.17	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
LOI	1.61	2.18	4.83	1.45	2.33	2.02	1.95	2.04	1.90	1.73	1.81	1.69
总量	99.62	99.57	99.52	99.72	99.92	99.60	99.52	99.59	99.55	99.54	99.81	99.55
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	1.53	1.06	2.57	1.54	2.20	1.01	1.38	1.84	1.60	1.06	1.59	1.32
Mg <sup>#</sup>	59	38	59	58	58	55	59	58	59	54	59	59
Be	1.95	1.68	1.64	1.44	1.77	1.77	1.83	1.79	1.84	1.90	1.86	1.91
Sc	10.1	11.4	14.9	16.2	8.46	8.42	8.54	8.61	9.18	9.25	9.17	9.42
V	84.0	89.0	115	127	67.8	65.1	68.5	68.5	69.0	70.0	69.1	72.6
Cr	96.5	53.6	187.2	184.2	100.2	97.1	101.1	102.6	101.4	101.2	109.3	107.0
Co	33.6	40.5	39.8	34.5	42.5	25.6	35.7	37.4	44.4	25.9	49.7	47.5
Ni	77.5	83.8	117	115	66.8	70.8	68.0	69.0	53.2	55.9	57.4	56.0
Cu	17.9	24.4	33.3	30.6	20.8	17.9	19.7	21.2	21.1	28.9	22.3	18.7
Zn	58.9	75.2	73.1	76.1	54.1	55.3	55.5	54.8	55.8	62.0	55.9	58.3
Ga	19.0	20.5	17.9	18.5	18.1	18.1	18.3	18.4	18.3	18.6	18.3	18.7
Rb	109	106	65.4	56.7	120	102	85.2	130	116	99.5	126	104
Sr	636	674	533	503	548	501	546	546	541	530	537	545
Y	16.0	15.4	17.2	17.5	12.0	12.5	12.5	12.3	12.1	12.7	12.1	13.0
Zr	197	214	163	159	186	186	188	189	189	193	189	192
Nb	9.85	11.0	9.90	9.36	9.16	9.11	9.23	9.30	9.21	9.34	9.25	9.34
Cs	3.62	3.02	2.57	1.18	2.93	1.67	1.86	2.66	2.46	2.84	2.43	2.05
Ba	1064	1071	727	690	975	968	1007	988	969	1001	961	973
La	42.6	48.3	31.2	27.3	37.6	37.6	39.6	38.4	37.5	38.8	37.5	43.5
Ce	80.5	77.3	56.0	50.8	67.2	66.1	67.9	68.3	66.8	67.8	67.3	71.3
Pr	8.62	9.58	6.56	5.87	6.78	6.82	7.11	6.89	6.71	6.97	6.71	7.76
Nd	33.3	37.3	26.1	23.6	24.6	24.8	25.8	24.9	24.2	25.4	24.3	27.9
Sm	5.47	6.08	4.68	4.41	3.91	3.95	4.07	3.96	3.86	4.06	3.83	4.37
Eu	1.36	1.60	1.31	1.29	1.01	1.01	1.03	1.02	0.99	1.05	0.99	1.05
Gd	4.37	4.85	4.09	3.94	3.18	3.26	3.32	3.25	3.17	3.39	3.18	3.53
Tb	0.58	0.61	0.59	0.58	0.43	0.44	0.45	0.43	0.42	0.44	0.42	0.46
Dy	2.89	3.00	3.13	3.11	2.20	2.28	2.32	2.26	2.18	2.32	2.20	2.42
Ho	0.55	0.53	0.60	0.61	0.41	0.43	0.43	0.41	0.41	0.44	0.41	0.45
Er	1.49	1.34	1.67	1.67	1.12	1.18	1.16	1.15	1.11	1.19	1.14	1.20
Tm	0.22	0.19	0.25	0.25	0.17	0.18	0.18	0.18	0.17	0.18	0.17	0.18
Yb	1.37	1.08	1.51	1.54	1.06	1.11	1.10	1.05	1.03	1.07	1.04	1.08
Lu	0.20	0.15	0.22	0.23	0.16	0.16	0.16	0.16	0.15	0.16	0.15	0.16
Hf	4.85	5.05	3.87	3.76	4.44	4.36	4.41	4.47	4.29	4.41	4.37	4.35
Ta	0.81	0.82	0.72	0.68	0.76	0.71	0.73	0.76	0.72	0.72	0.74	0.73
Pb	21.0	18.6	14.5	12.0	20.1	19.3	19.9	20.0	19.0	19.3	19.1	19.5
Th	11.0	9.95	6.35	5.90	9.86	9.71	9.79	9.94	9.41	9.65	9.57	9.47
U	2.55	1.44	1.14	1.09	1.90	1.83	1.82	2.01	1.87	1.82	1.82	1.76
Sr/Y	40	44	31	29	46	40	44	44	45	42	44	42
La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	21	30	14	12	24	23	24	25	25	24	24	27
Eu/Eu*	0.88	0.95	0.93	0.96	0.91	0.89	0.88	0.90	0.90	0.91	0.91	0.85

续表 2

样品号	ZW13	ZW14	ZW15	ZW16	ZW17	ZW18	ZW19	ZW20	ZW21	ZW22	ZW23
SiO <sub>2</sub>	61.98	60.83	60.51	59.98	60.24	60.78	60.34	60.33	71.73	73.25	70.70
TiO <sub>2</sub>	0.70	0.76	0.74	0.76	0.76	0.74	0.75	0.75	0.23	0.22	0.22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.32	16.42	16.14	16.25	16.12	16.34	16.35	16.47	13.86	13.32	13.45
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.43	4.62	5.15	5.37	5.31	5.04	4.78	4.75	1.88	1.75	1.68
MnO	0.04	0.06	0.06	0.09	0.09	0.10	0.05	0.07	0.02	0.02	0.05
MgO	2.18	2.39	2.34	3.38	3.31	2.57	2.48	2.39	0.71	0.61	0.51
CaO	3.89	4.75	4.52	5.07	5.05	4.78	4.62	4.58	1.43	1.41	1.38
Na <sub>2</sub> O	3.18	3.88	3.83	3.95	4.04	3.93	3.82	3.83	3.59	3.59	3.96
K <sub>2</sub> O	3.87	3.48	3.73	2.93	2.67	3.41	3.29	3.30	4.59	4.30	4.06
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.26	0.29	0.28	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.08	0.08	0.07
LOI	2.76	2.11	2.20	1.45	1.66	1.57	2.75	2.78	1.75	1.06	4.03
总量	99.59	99.59	99.50	99.52	99.54	99.55	99.52	99.54	99.87	99.61	100.10
Na <sub>2</sub> O/K <sub>2</sub> O	0.82	1.11	1.03	1.35	1.51	1.15	1.16	1.16	0.78	0.83	0.98
Mg <sup>#</sup>	44	51	47	55	55	50	51	50	43	41	38
Be	1.91	1.90	1.83	1.91	1.98	1.89	1.81	1.91	2.47	2.42	2.40
Sc	11.6	12.4	11.9	12.2	12.2	12.0	12.6	12.2	3.04	2.81	2.61
V	76.7	97.4	93.4	101	100	96.4	96.8	95.5	21.7	19.9	18.9
Cr	54.2	54.5	56.0	55.6	60.7	56.4	60.9	55.0	13.8	16.1	11.1
Co	27.9	29.4	29.1	39.0	41.8	31.1	27.6	25.4	35.8	50.8	42.6
Ni	39.3	34.9	41.4	41.9	42.3	37.9	40.6	33.6	10.1	10.8	6.91
Cu	31.7	23.9	22.3	25.0	24.9	23.2	25.7	27.1	7.41	5.88	5.34
Zn	52.7	63.9	63.2	65.7	65.6	66.9	61.5	66.6	37.5	38.7	35.3
Ga	18.2	19.5	19.3	19.8	19.6	19.4	20.0	19.6	17.2	15.8	16.5
Rb	75.3	108	122	78.2	110	99.1	94.7	93.2	147	136	149
Sr	582	675	652	700	692	670	677	659	254	243	233
Y	15.1	16.0	16.4	17.7	17.6	16.7	16.9	15.6	11.9	12.3	11.3
Zr	186	205	201	205	204	203	209	205	170	147	161
Nb	9.74	10.4	10.2	10.5	10.3	10.3	10.6	10.4	12.4	11.5	12.3
Cs	0.49	3.65	4.37	3.82	3.40	3.73	2.54	2.48	3.30	3.41	4.93
Ba	1028	1012	997	1082	1066	1026	1006	999	757	719	683
La	37.7	39.7	41.4	42.7	43.2	40.2	40.4	37.6	37.6	37.1	38.0
Ce	64.8	74.3	73.4	81.0	77.0	75.8	75.3	68.7	63.8	57.7	64.9
Pr	8.23	8.12	8.63	8.69	8.60	8.25	8.31	7.85	6.08	6.20	6.15
Nd	32.1	31.5	33.8	33.5	33.5	31.9	32.4	30.6	20.4	21.4	20.7
Sm	5.59	5.43	5.80	5.80	5.72	5.51	5.55	5.29	3.05	3.26	3.08
Eu	1.36	1.48	1.49	1.49	1.48	1.47	1.47	1.45	0.59	0.66	0.55
Gd	4.37	4.43	4.74	4.81	4.76	4.56	4.52	4.29	2.41	2.50	2.39
Tb	0.56	0.58	0.61	0.62	0.62	0.59	0.59	0.56	0.34	0.36	0.34
Dy	2.89	3.00	3.14	3.27	3.25	3.09	3.08	2.88	1.79	1.89	1.76
Ho	0.53	0.56	0.57	0.61	0.59	0.58	0.57	0.53	0.35	0.38	0.35
Er	1.38	1.47	1.51	1.62	1.60	1.53	1.47	1.38	0.96	1.05	0.95
Tm	0.20	0.21	0.22	0.24	0.23	0.22	0.21	0.20	0.16	0.17	0.15
Yb	1.20	1.27	1.27	1.42	1.39	1.35	1.23	1.17	0.99	1.05	0.97
Lu	0.17	0.18	0.19	0.21	0.21	0.20	0.18	0.17	0.16	0.17	0.15
Hf	4.31	4.73	4.65	4.77	4.72	4.74	4.74	4.68	3.98	3.65	3.88
Ta	0.69	0.77	0.75	0.79	0.79	0.77	0.77	0.76	1.25	1.26	1.31
Pb	20.2	17.1	17.0	18.2	17.7	17.4	17.0	16.7	24.2	23.7	24.5
Th	8.50	9.40	9.13	9.77	9.30	9.42	9.22	9.22	13.7	13.4	14.4
U	1.29	1.84	1.86	2.03	2.00	1.99	1.66	1.59	2.29	2.49	3.37
Sr/Y	39	42	40	40	39	40	40	42	21	20	21
La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	21	21	22	20	21	20	22	22	26	24	27
Eu/Eu <sup>*</sup>	0.88	0.96	0.92	0.91	0.91	0.94	0.94	0.97	0.67	0.71	0.63

TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为全铁; Mg<sup>#</sup> = 100 Mg / (Mg + Fe) (原子数); Eu/Eu<sup>\*</sup> = Eu<sub>N</sub> / (Sm<sub>N</sub> × Gd<sub>N</sub>)<sup>1/2</sup>; LOI 为烧失量。

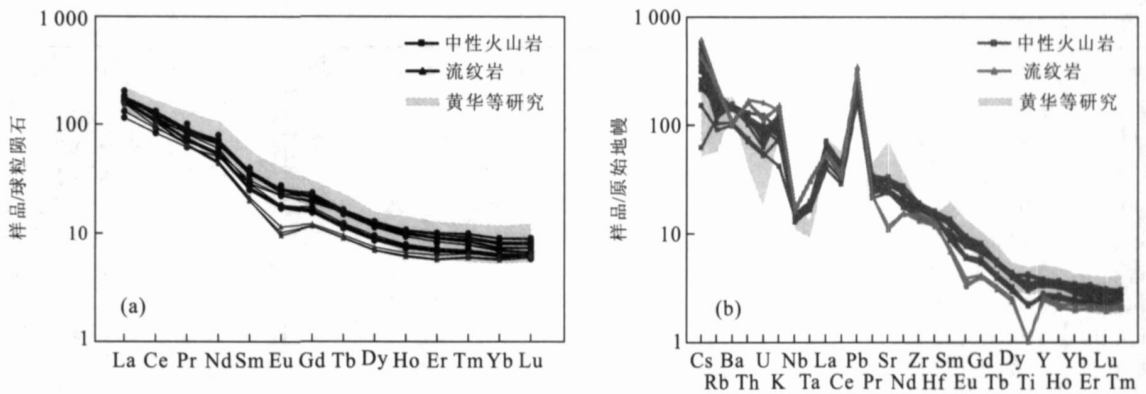


图 4 彰武地区火山岩稀土元素模式分配图(a)和微量元素蛛网图(b),灰色区域为黄华等(2007)研究的样品

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spider diagrams (b) of Zhangwu volcanic rocks. Gray area indicates range of samples studied by Huang *et al.* (2007)

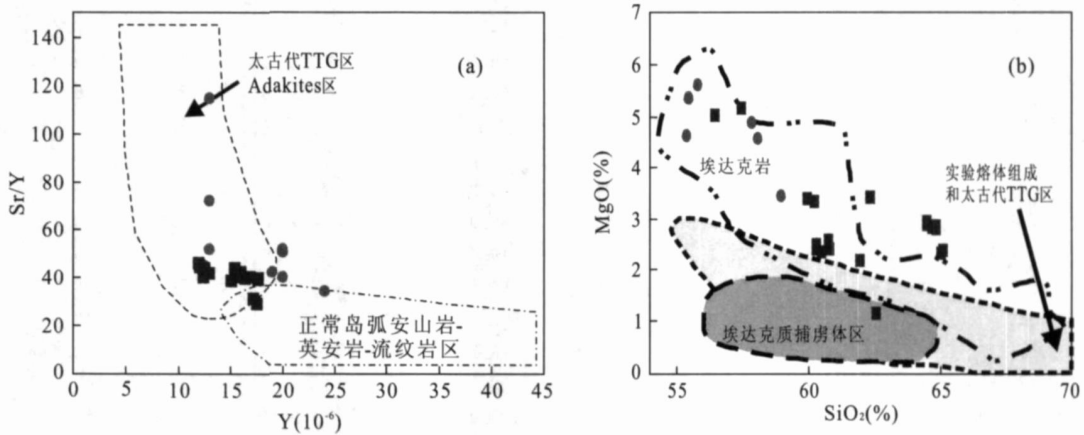


图 5 彰武火山岩 Y-Sr/Y (a)与 MgO-SiO<sub>2</sub> (b)判别图(Defant *et al.*, 2001, ●代表黄华等(2007)研究的样品, ■代表本研究的样品)

Fig. 5 Y vs. Sr/Y (a) and MgO vs. SiO<sub>2</sub> (b) diagrams for Zhangwu volcanic rocks

ford and Atherton, 1996) 以及拆沉下地壳部分熔融形成的埃达克岩相似(Xu *et al.*, 2002a, 2002b, 2006). 黄华等研究的彰武高镁安山岩, 其初始<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr(122 Ma)比值为 0.706 39~0.706 47, 比本次研究的样品初始<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr(122 Ma)比值高, 其初始<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 比值范围为 0.511 85~0.512 15,  $\epsilon_{\text{Nd}}$ (122 Ma)的范围为-6.43~-12.26, 与本次研究的样品相当. 根据 Sr-Nd 同位素组成, 大多数样品值与来自于华北克拉通北缘的中生代火山岩(陈义贤等, 1997; 周新华等, 2001; Zhang *et al.*, 2003)及徐怀地区埃达克质侵入岩(Xu *et al.*, 2006)相似. 该套火山岩相对高的初始<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr(122 Ma)比值及低的  $\epsilon_{\text{Nd}}$ (122 Ma)值表明岩浆中有地壳物质加入. 该地区伴生的流纹岩初始<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr(122 Ma)比值为 0.706 37~0.706 39, 高于中性火山岩的比值, 而两者的  $\epsilon_{\text{Nd}}$ (122 Ma)基本一致(表 3).

### 4.3 矿物学特征

电子探针结果表明本研究样品中的辉石斑晶具明显环带, 部分辉石显示出核部高铁( $\text{Mg}^{\#} = 71 \sim 77$ ), 幔部高镁( $\text{Mg}^{\#} = 81 \sim 84$ )反环带特征. 边部的高 Fe 可能代表了岩浆结晶分异产物. 在背散射电子图像上, 核部颜色较浅, 幔部颜色较深, 边部颜色又较浅(表 4, 图 6). 对具有反环带的一颗单斜辉石进行了 LA-ICP-MS 微量元素分析, 结果表明辉石中稀土元素分布存在着从核部到边部逐渐降低的趋势, 且存在负锕异常( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.64 \sim 0.76$ )(表 5, 图 7a).

## 5 讨论

本次研究的样品与黄华等(2007)研究的样品都来自于彰武地区, 但两者的地球化学及锆石 U-Pb



表 3 彰武中生代火山岩样品同位素分析结果  
Table 3 Isotopic date of Sr-Nd for Zhangwu volcanic rocks

样品号	Rb( $\mu\text{g/g}$ )	Sr( $\mu\text{g/g}$ )	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	Sm( $\mu\text{g/g}$ )	Nd( $\mu\text{g/g}$ )	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}(122 \text{ Ma})$	$T_{\text{DM}}$
ZW01	109	636	0.4955	0.706670 $\pm$ 10	0.705812	5.47	33.3	0.0994	0.512051 $\pm$ 06	0.51197	-9.88	1462
ZW03	65	533	0.3555	0.706266 $\pm$ 10	0.705650	4.68	26.1	0.1086	0.512051 $\pm$ 08	0.51196	-10.04	1591
ZW04	57	503	0.3262	0.706029 $\pm$ 12	0.705464	4.41	23.6	0.1129	0.512092 $\pm$ 09	0.51200	-9.30	1596
ZW08	130	546	0.6926	0.706917 $\pm$ 09	0.705717	3.96	24.9	0.0959	0.511921 $\pm$ 10	0.51185	-12.37	1586
ZW11	126	537	0.6817	0.706883 $\pm$ 10	0.705702	3.83	24.3	0.0952	0.511898 $\pm$ 09	0.51182	-12.80	1606
ZW14	108	675	0.4658	0.706555 $\pm$ 10	0.705748	5.43	31.5	0.1041	0.512225 $\pm$ 07	0.51214	-6.57	1285
ZW16	78	700	0.3239	0.706245 $\pm$ 11	0.705684	5.80	33.5	0.1045	0.512248 $\pm$ 06	0.51217	-6.12	1257
ZW21	147	254	1.6825	0.709284 $\pm$ 13	0.706367	3.05	20.4	0.0903	0.511956 $\pm$ 03	0.51188	-11.62	1473
ZW22	136	243	1.6296	0.709211 $\pm$ 13	0.706386	3.26	21.4	0.0920	0.5119722 $\pm$ 003	0.51190	-11.32	1473

用于计算的球粒陨石均一储库(CHUR)值( $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}=0.0847$ ,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.7045$ ,  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}=0.1967$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512638$ );  $\lambda_{\text{Rb}}=1.42 \times 10^{-11} \text{ year}^{-1}$  (Sterger and Jäger, 1977);  $\lambda_{\text{Sm}}=6.54 \times 10^{-12} \text{ year}^{-1}$  (Lugmair and Marti, 1978).

表 4 辉石反环带主量元素分析结果

Table 4 The analyzed date of major elements(%) of reversely zoned pyroxene phenocrysts by electron microprobe

点号	ZW01-C		ZW01-M		ZW02-C		ZW02-M		ZW11-1C		ZW11-1M		ZW11-2C		ZW11-2M		ZW14-C		ZW14-M		ZW14-R	
	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx	Opx	Opx	Opx	Opx	Opx	Opx	Opx	Opx	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx	Cpx
SiO <sub>2</sub>	52.33	52.45	52.15	53.94	52.57	51.96	53.24	53.35	54.64	54.00	55.93	55.74	53.80	54.05	55.26	54.94	51.00	51.66	52.88	52.54	52.82	52.24
TiO <sub>2</sub>	0.54	0.46	0.52	0.25	0.66	0.74	0.42	0.42	0.15	0.20	0.17	0.12	0.19	0.18	0.13	0.20	0.64	0.61	0.44	0.38	0.63	0.63
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.07	1.96	1.62	1.51	1.82	2.00	2.23	2.16	2.41	2.11	1.06	1.01	2.29	2.10	1.10	1.18	1.98	1.91	2.01	2.03	1.33	1.33
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.00	0.11	0.31	0.06	0.09	0.07	0.02	0.05	0.04	0.10	0.14	0.05	0.08	0.23	0.16	0.02	0.04	0.09	0.13	0.06	0.06
TFeO	11.41	11.13	7.85	6.08	10.83	11.01	6.54	6.93	14.05	14.72	12.11	12.19	14.51	14.40	11.84	12.19	10.34	10.25	6.81	6.85	10.43	10.43
MnO	0.30	0.30	0.21	0.19	0.25	0.24	0.18	0.16	0.30	0.34	0.30	0.31	0.30	0.32	0.27	0.31	0.24	0.25	0.24	0.17	0.32	0.32
MgO	13.66	13.88	15.63	17.23	15.17	14.95	17.21	17.36	27.58	27.20	29.33	29.50	27.40	27.54	29.91	29.51	15.03	15.15	17.38	17.30	16.28	16.28
CaO	19.21	18.52	19.83	19.62	18.71	18.60	19.53	19.26	1.48	1.79	1.50	1.47	1.53	1.64	1.46	1.51	18.40	18.25	19.23	19.05	17.55	17.55
Na <sub>2</sub> O	0.66	0.62	0.36	0.31	0.53	0.48	0.36	0.39	0.10	0.06	0.08	0.07	0.04	0.05	0.03	0.06	0.46	0.48	0.33	0.29	0.29	0.29
K <sub>2</sub> O	nd	nd	nd	nd	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.05	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Total	100.21	99.31	98.28	99.43	100.63	100.07	99.79	100.06	100.79	100.45	100.60	100.56	100.10	100.37	100.24	100.09	98.11	98.60	99.40	98.75	99.12	99.12
Mg#	68	69	78	84	72	71	83	82	78	77	81	81	77	77	82	81	72	73	82	82	82	74

Cpx代表单斜辉石; Opx代表斜方辉石; C代表辉石核部; M代表辉石幔部; R代表辉石核部; TFeO为全铁; Mg# = 100Mg/(Mg+Fe)(原子数).

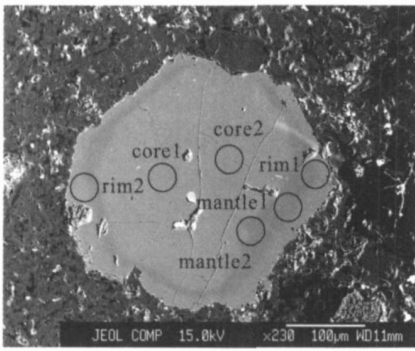


图 6 彰武火山岩中单斜辉石反环带背散射照片(圆圈表示分析点位置; core mantle rim 分别指核部、幔部、边部)

Fig. 6 Representative back-scattered electron image of one reversely zoned clinopyroxene phenocryst from Zhangwu volcanic rocks

年龄有明显差别. 主量元素方面, 黄华等(2007)研究的样品偏中基性, 而本次的样品偏中酸性. 微量元素方面, 黄华等(2007)研究的样品稀土元素含量比本次的样品要高, 且存在明显 Sr 正异常. 同位素方面, 黄华等(2007)研究的样品初始  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (122 Ma) 比值比本次研究的样品要高, 但初始  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  比值及  $\epsilon_{\text{Nd}}$  (122 Ma) 值与本次的样品相当. 矿物学方面, 黄华等(2007)研究样品中单斜辉石  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量变化很大, 核部最高值可达 5%, 表明它们在地幔深度形成 (Streck *et al.*, 2007), 而本次研究样品中的单斜辉石  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量均小于 2.3%, 且存在负锶异常, 表明它们在地壳深度形成 (Streck *et al.*, 2007). 黄华等(2007)研究的火山岩锆石年龄有三组谐和年龄, 分别为  $253 \pm 5$  Ma、 $172 \pm 2$  Ma、 $126 \pm 2$  Ma, 而本次研究的样品锆石只有一组谐和年龄, 加权平均为  $122.4 \pm 0.4$  Ma, 尽管这些年龄均属早白垩世, 但本次的样品在误差范围内要年轻于黄华等(2007)研究样品. 因此本次采集的样品应来自于彰武中生代火山岩的上部, 而黄华等(2007)研究的样品可能位于下部, 两者可能具有不同的成因.

关于高镁埃达克岩的成因主要有以下几种方式: (1)俯冲洋壳熔体并与上覆的地幔楔发生相互作用 (Defant and Drummond, 1990); (2)含水条件下地幔橄榄岩的部分熔融 (Stern and Hanson, 1991); (3)拆沉下地壳的部分熔融 (Xu *et al.*, 2002a, 2002b, 2006; Kay and Key, 1991; Gao *et al.*, 2004). (4)岩浆混合作用 (Kawabata and Shuto, 2005; Guo *et al.*, 2007; Streck *et al.*, 2007).

彰武火山岩高的初始  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  (122 Ma) 比值

表 5 ZW14 中单斜辉石反环带微量元素分析结果

Table 5 The analyzed date of trace elements ( $\mu\text{g/g}$ ) of reversely zoned clinopyroxene phenocryst from ZW14 by LA-ICPMS

分析点	ZW14-C	ZW14-C	ZW14-M	ZW14-M	ZW14-R	ZW14-R
Sc	83.2	83.7	76.4	78.2	55.7	67.8
V	292	310	322	327	201	283
Cr	220	185	690	495	581	525
Co	63.1	58.9	62.2	61.1	51.4	54.5
Ni	261	238	261	258	198	219
Cu	2.47	1.58	4.68	2.24	1.56	1.24
Zn	108	105	85.3	89.1	56.4	78.1
Ga	7.43	7.09	7.01	6.78	5.3	6.06
Sr	50.3	51.5	51.4	51.5	48.8	47.2
Y	32.1	32.7	28.4	29.3	14.3	23.7
Zr	43.7	48.0	41.7	43.9	19.4	35.7
Nb	0.08	0.14	0.05	0.05	0.04	0.10
Sn	1.32	1.61	1.44	1.42	1.02	1.04
La	10.5	10.8	8.56	8.91	3.41	6.78
Ce	39.0	39.2	32.3	34.0	13.4	27.0
Pr	6.55	7.01	5.46	5.86	2.373	4.74
Nd	36.4	36.9	30.4	33.4	14.1	26.3
Sm	10.2	10.8	8.66	9.41	4.40	8.06
Eu	2.28	2.41	1.76	1.99	1.03	1.52
Gd	8.45	9.12	6.85	8.00	3.93	6.49
Tb	1.17	1.33	1.06	1.19	0.50	0.99
Dy	6.86	7.37	6.01	6.21	2.88	4.99
Ho	1.29	1.27	1.17	1.16	0.58	0.99
Er	3.09	3.24	2.95	2.93	1.30	2.32
Tm	0.37	0.45	0.36	0.40	0.19	0.36
Yb	2.57	2.79	2.61	2.65	1.01	2.04
Lu	0.40	0.38	0.31	0.39	0.15	0.31
Hf	1.99	2.01	1.60	1.83	0.74	1.37
Pb	0.29	0.37	0.29	0.35	0.13	0.31
Th	0.10	0.12	0.09	0.07	0.03	0.06
Sr/Y	1.57	1.58	1.81	1.76	3.42	1.99
Eu/Eu*	0.75	0.74	0.70	0.70	0.76	0.64
Nd <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	5.16	4.81	4.24	4.59	5.08	4.69

C 代表辉石核部; M 代表辉石幔部; R 代表辉石边部  $\text{Eu}/\text{Eu}^* = \text{Eu}_N / (\text{Sm}_N + \text{Gd}_N)^{0.5}$ .

低的  $\epsilon_{\text{Nd}}$  (122 Ma) 值, 并不支持源于俯冲板片部分熔融形成的埃达克岩这一模型. 如果是由洋壳板片俯冲部分熔融形成的话, 这种火山岩应具有与 MORB 相近的 Sr-Nd 同位素组成 (如  $\epsilon_{\text{Nd}} > +5$ ), 而本次研究的高镁埃达克岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}$  值均小于 -6, 因而不应为洋壳熔融产物. 彰武高镁埃达克岩具有高的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、Sr/Y 和 La/Yb 值、高 Sr 低 Y、重稀土元素亏损、Nb-Ta 显著亏损. 同时, 与中酸性火山岩伴生的玄武质岩浆占的量比较少, 因此由幔源玄武质岩浆结晶分异形成的可能性不大 (Castillo *et al.*, 1999). 此外, 样品具有反环带的辉石斑晶排除了高

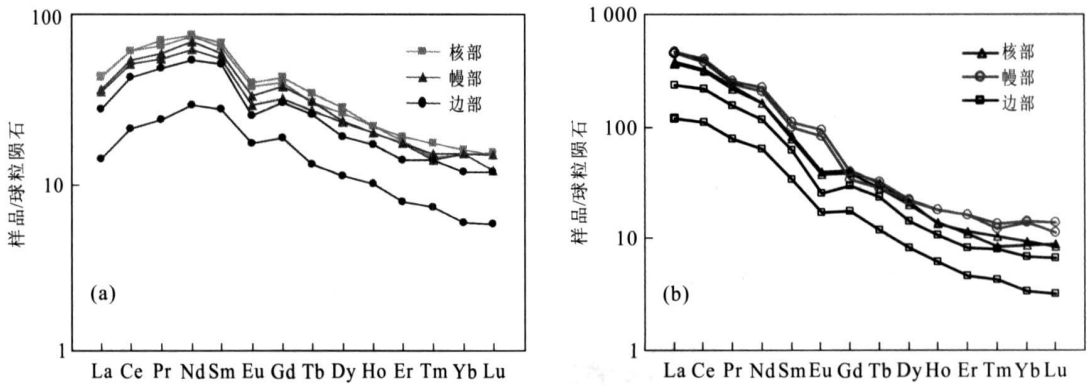


图 7 彰武安山岩样品 ZW14 中单斜辉石不同环带的稀土元素分布(a)与计算出与不同环带平衡的岩浆稀土元素分布(b). 计算中核部和边部采用稀土元素在单斜辉石与长英质岩浆之间的分配系数(Barth *et al.*, 2002), 幔部采用稀土元素在单斜辉石与玄武质岩浆之间的分配系数(McDade *et al.*, 2003)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE pattern of one reversely zoned clinopyroxene phenocryst from ZW 14 (a) and calculated REE pattern of melts in equilibrium with different zones (b). The calculation uses REE partition coefficients between clinopyroxene and felsic melt (Barth *et al.*, 2002) for the core and rim and those between clinopyroxene and basaltic melt (McDade *et al.*, 2003) for the mantle

镁埃达克岩由含水地幔部分熔融形成的可能性, 因为含水地幔部分熔融形成的熔体在岩浆结晶过程中应向酸性方向演化, 形成正环带. 高镁埃达克岩也可由拆沉的下地壳发生部分熔融, 然后与地幔岩石发生相互作用形成, 从而形成具有高的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Mg}^\#$ 、 $\text{Sr}/\text{Y}$  和  $\text{La}/\text{Yb}$  值、高 Sr 低 Y、重稀土元素和 Nb-Ta 亏损, 同位素上具有演化的特征, 矿物学上具有反环带的辉石斑晶岩浆. 但是对具有反环带特征的单斜辉石微量元素分析结果表明, 存在负铕异常 ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.64 \sim 0.76$ ), 进一步根据稀土元素在单斜辉石与长英质岩浆(对应单斜辉石核部和边部)或玄武岩浆(对应单斜辉石幔部)之间的分配系数可计算出与单斜辉石不同环带平衡的岩浆的稀土元素组成(图 7b), 结果表明核部和边部均具 Eu 负异常, 即它们应是在  $< 40 \text{ km}$  长石稳定的地壳深度形成的. 而幔部不具 Eu 异常.

Streck *et al.* (2007)通过对 Mount Shasta 地区高镁安山岩中的辉石斑晶研究发现, 这些辉石不仅具有反环带的特征, 还表现出低的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量(斜方辉石  $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 2\%$ , 单斜辉石  $\text{Al}_2\text{O}_3 \leq 3\%$ ), 认为这些辉石不是在地幔深度结晶出来的, 而是代表了基性和酸性岩浆在地壳深度混合形成的. Guo *et al.* (2007)对中国东北延吉地区的古新世高镁安山岩进行了深入研究. 该套火山岩具有正的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值 ( $3.8 \sim 6.3$ ), 其中单斜辉石亦具有低的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\leq 3\%$ )的特征, 并具反环带, 反环带核部具 Eu 负

异常, 表明岩浆混合是在斜长石稳定的地壳深度发生的, 并认为单斜辉石斑晶及斜长石的矿物学特征源于具有高 Y 和 HREE, 低  $\text{Sr}$ 、 $\text{Sr}/\text{Y}$ 、 $\text{Nd}_\text{N}/\text{Yb}_\text{N}$  的长英质壳源岩浆和具有高  $\text{Mg}^\#$  的埃达克质幔源岩浆混合而成, 在混合岩浆的储存及上升到地表的过程中又受到地壳物质的混染, 最终形成具有类似于现代岛弧特征的高镁埃达克岩. 在本次研究的样品中亦发现有大量的辉石反环带. 电子探针结果表明, 单斜辉石  $\text{Al}_2\text{O}_3 < 3\%$ , 还表现出 Eu 负异常, 表明岩浆混合是在斜长石稳定的地壳深度发生的. 因此, 笔者认为本研究的彰武大四家子地区高镁埃达克岩的成因可能是由岩浆混合作用形成. 而黄华等 (2007) 认为, 他们研究的彰武县以西哈儿套地区高镁埃达克岩样品是由玄武质岩浆底侵形成的加厚下地壳, 相变为榴辉岩, 然后拆沉至软流圈, 发生部分熔融, 产生的熔体在上升过程中与地幔橄辉岩反应, 最终形成的. 因此彰武这两个地区高镁安山岩成因不同, 但两者可能存在一定的成因联系.

从彰武地区发现的玄武岩 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(122 \text{ Ma}) = 0.70624$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(122 \text{ Ma}) = -9.17$ ) (黄华等, 2007) 及本文研究中的流纹岩 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(122 \text{ Ma}) = 0.70637 \sim 0.70639$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(122 \text{ Ma}) = -11.32 \sim -11.62$ ) 同位素特征来看, 两者简单地混合不能形成大四家子地区高镁埃达克岩的同位素特征 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}(122 \text{ Ma}) = 0.705464 \sim 0.705812$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(122 \text{ Ma}) = -6.12 \sim -12.80$ ),

笔者认为彰武大四家子地区高镁火山岩与延吉地区高镁安山岩的成因相似,但由于其同位素不具有大洋中脊玄武岩同位素特征,结合黄华等(2007)对彰武西哈儿套地区火山岩的研究,笔者倾向于认为,它们是拆沉作用与岩浆混合作用共同作用的结果,即拆沉作用导致软流圈地幔物质上涌加热下地壳形成长英质岩浆,然后与来自地幔由拆沉作用形成的埃达克质高镁安山岩浆混合形成。

## 6 结论

辽西彰武县大四家子乡高城窝堡村义县组火山岩主要由埃达克质高镁中酸性火山岩和流纹岩组成。其中流纹岩年龄为  $122.4 \pm 0.4$  Ma, 属早白垩世。它们具有高的初始  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  比值, 低的  $\epsilon_{\text{Nd}}(122\text{ Ma})$  值。其中单斜辉石反环带核部和幔部所指示的岩浆分别具有明显 Eu 负异常和无 Eu 异常。结合前人对彰武义县组下部火山岩的研究, 本次认为该套火山岩的成因是拆沉作用与岩浆混合作用共同作用的结果, 即拆沉作用导致软流圈地幔物质上涌加热下地壳形成的长英质岩浆(对应与单斜辉石核部), 与来自地幔由拆沉作用形成的埃达克质高镁安山岩浆(对应与单斜辉石幔部)混合形成。

致谢: 样品的处理和测试工作在西北大学大陆动力学国家重点实验室和中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。期间得到了王建其、袁洪林、刘晔、柳小明、戴梦宁、宗春雷、郑曙、胡兆初等老师的帮助, 同时也非常感谢与汪方跃、王冬兵、孟繁雪等的有益交流。

## References

Atherton, M. P., Petford, N., 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature* 4, 596–600.

Barth, M. G., Foley, S. F., Horn, I., 2002. Partial melting in Archean subduction zones: Constraints from experimentally determined trace element partition coefficients between eclogitic minerals and tonalitic melts under upper mantle conditions. *Precambrian Research*, 113, 323–340.

Castillo, P. R., Janney, P. E., Solidum, R. U., 1999. Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: Insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134, 33–51.

Chen, Y. X., Chen, W. J., Zhou, X. H., et al., 1997. Mesozoic volcanic rocks in western Liaoning Province and surrounding area: geochronology, geochemistry and tectonic environment. *Seis. Publ. House, Beijing*, 1–279 (in Chinese).

Defant, M. J., Drummond, M. S., 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature* 347, 662–665.

Defant, M. J., Kepezhinskas, P., 2001. Evidence suggests slab melting in arc magmas. *EOS (Transactions, American Geophysical Union)*, 82, 65–69.

Deng, J. F., Su, S., Niu, Y., et al., 2007. A possible model for the lithospheric thinning of North China craton: Evidence from the Yanshanian (Jura-Cretaceous) magmatism and tectonism. *Lithos* 96, 22–35.

Gao, S., Rudnick, R., Yuan, H. L., et al., 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton. *Nature* 432, 892–897.

Griffin, W. L., Zhang, A. D., O'Reilly, S. Y., 1998. Phanerozoic evolution of the lithosphere beneath the Sino-Korean craton. In: Flower, M. F. J., Chung, S. L., Lo, C. H., et al., eds., *Mantle Washington D C, Dynamics and Plate Interactions in East Asia*. American Geophysical Union, 107–126.

Guo, F., Nakamura, E., Fan, W. M., et al., 2007. Generation of Palaeocene adakitic andesites by magma mixing, Yanji area, NE China. *Journal of Petrology*, 80, 1–32.

Huang, H., Gao, S., Hu, Z. C., et al., 2007. Geochemistry of the high-Mg andesites at Zhangwu, western Liaoning: Implication for delamination of newly formed lower crust. *Science in China (Series D)*, 37 (10): 1287–1300.

Irvine, A. J., Baragar, W. R. A., 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canada Journal of Earth Sciences*, 8, 523–548.

Kay, R. W., Key, S. M., 1991. Creation and destruction of lower continental crust. *Geologische Rundschau*, 80, 259–278.

Kawabata, H., Shuto, K., 2005. Magma mixing recorded in intermediate rocks associated with high-Mg andesites from the Setouchi volcanic belt, Japan: Implications for Archean TTG formation. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 140, 241–271.

Le Maitre, R. W., Bateman, P., Dudek, A., et al., 1989. A classification of igneous rocks and glossary of terms. Blackwell Oxford.

- Lugmair, G. W., Marti, K., 1978. Lunar initial  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ : Differential evolution of the lunar crust and mantle. *Earth Planetary Science Letters*, 39: 349–357.
- McDade, P., Blundy, J. D., Wood, B. J., 2003. Trace element partitioning on the Tinaquillo lherzolite solidus at 1.5 GPa. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 139: 129–147.
- Menzies, A., Fan, W. M., Zhang, M., 1993. Paleozoic and Cenozoic lithoprobes and loss of > 120 km of Archean lithosphere, Sino-Korean craton, China. In: Prichard H. M., Alabaster, H. M., Harris, T., et al., eds., *Magmatic Processes and Plate Tectonics*. Geol. Soc. London, London, 73–81.
- Menzies, M., Xu Y. G., Zhang, H. F., et al., 2007. Integration of geology, geophysics and geochemistry: A key to understanding the North China craton. *Lithos*, 96: 1–21.
- Petford, N., Atherton, M., 1996. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: The Cordillera Blanca batholith, Peru. *Journal of Petrology*, 37: 1491–1521.
- Petford, N., Kerry, G., 2001. Partial melting of mafic (amphibolitic) lower crust by periodic influx of basaltic magma. *Earth and Planetary Science Letters*, 193(3–4): 483–499.
- Rapp, R. P., Long, X., Shimizu, N., 2002. Experimental constraints on the origin of potassium-rich adakites in eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 18: 293–302.
- Rapp, R. P., Shimizu, N., Norman, M. D., et al., 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160: 335–356.
- Rapp, R. P., Watson, E. B., 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36: 891–931.
- Sterner, R. H., Jäger, E., 1977. Subcommission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geochronology and cosmochronology. *Earth Planetary Science Letters*, 36: 359–362.
- Stern, R. A., Hanson, G. N., 1991. Archean high-Mg granodiorite: A derivative of light rare earth element enriched monzodiorite of mantle origin. *Journal of Petrology*, 32: 201–238.
- Streck, M. J., Leeman, W. P., Chesley, J., 2007. High-magnesian andesite from Mount Shasta: A product of magma mixing and contamination, not a primitive mantle melt. *Geology*, 35: 351–354.
- Wilde, S. A., Zhou, X. H., Nemchin, A. A., et al., 2003. Mesozoic crust-mantle interaction beneath the North China craton: A consequence of the dispersal of Gondwanaland and accretion of Asia. *Geology*, 31: 817–820.
- Wolf, M. B., Wyllie, P. J., 1994. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: Effects of temperature and time. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 115: 369–388.
- Xiao, L., Clemens, J. D., 2006. Origin of potassic (C-type) adakite magmas: Experimental and field constraints. *Lithos* doi: 10.1016/j.lithos.2006.09.002.
- Wu, F. Y., Lin, J. Q., Wilde, S. A., et al., 2005. Nature and significance of the Early Cretaceous giant igneous event in eastern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 233: 103–119.
- Xu, W. L., Gao, S., Wang, Q. H., et al., 2006. Mesozoic crustal thickening of the eastern North China craton: Evidence from eclogite xenoliths and petrologic implications. *Geology*, 34: 721–724.
- Xu, J. F., Shinjo, R., Defant, M. J., et al., 2002a. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust? *Geology*, 30(12): 1111–1114.
- Xu, W. L., Wang, D. Y., Liu, X. C., et al., 2002b. Discovery of eclogite inclusion and its geological significance in Early Jurassic intrusive complex in Xuzhou-northern Anhui, eastern China. *Chinese Science Bulletin*, 47: 1212–1216.
- Xu, W. L., Wang, Q. H., Wang, D. Y., et al., 2006. Mesozoic adakitic rocks from the Xuzhou-Suzhou area, eastern China: Evidence for partial melting of delaminated lower continental crust. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27: 230–240.
- Xu, Y. G., 2001. Thermo-tectonic destruction of the archaean lithospheric keel beneath the Sino-Korean craton in China: Evidence, timing and mechanism. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 26: 747–757.
- Yuan, H. L., Gao, S., Liu, X. M., et al., 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Geostandard and Geoanalytical Research*, 28: 353–370.
- Zhai, M. G., Fan, Q., Zhang, H. F., et al., 2007. Lower crustal processes leading to Mesozoic lithospheric thinning beneath eastern North China: Underplating, replacement and delamination. *Lithos*, 96: 36–54.

- Zhang, H. F., 2005. Transformation of lithospheric mantle through peridotite melt reaction: A case of Sino-Korean craton. *Earth and Planetary Science Letters*, 237: 768–780.
- Zhang, H. F., Sun, M., Zhou, X. H., et al., 2003. Secular evolution of the lithosphere beneath the eastern North China craton: Evidence from Mesozoic basalts and high-Mg andesites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67: 4373–4387.
- Zhang, Q., Jin, W. J., Wang, Y. L., et al., 2006. A model of delamination of continental lower crust. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 265–276 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Qian, Q., Wang, E. Q., et al., 2001. An east China plateau in mid-late Yanshanian period: Implication from adakites. *Scientia Geologica Sinica*, 36(2): 248–255 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Wang, Y., Liu, H. T., et al., 2003. On the space-time distribution and geodynamic environments of adakites in China annex: Controversies over differing opinions for adakites in China. *Earth Science Frontiers*, 10(4): 385–400 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. F., Zheng, Y. F., Wei, C. S., et al., 2007. Post-collisional granitoids from the Dabie orogen in China: Zircon U-Pb age, element and O isotope evidence for recycling of subducted continental crust. *Lithos*, 93: 248–272.
- Zheng, J. P., Griffin, W. L., O' Reilly, S. Y., 2006. Mineral chemistry of garnet peridotites from Paleozoic Mesozoic and Cenozoic lithosphere: Constraints on mantle evolution beneath Eastern China. *Journal of Petrology*, 47: 2233–2256.
- Zheng, J. P., Lu, F. X., Yu, C. M., et al., 2003. Mantle replacement: Evidence from comparison in trace elements between peridotite and diopside from refractory and fertile mantle, North China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28(3): 235–240 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. H., Zhang, G. H., Yang, J. H., et al., 2001. Sr-Nd-Pb isotope mapping of Late Mesozoic volcanic rocks across northern margin of North China craton and implications to geodynamic processes. *Geochimica*, 30(1): 10–23 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. H., Zhang, H. F., 2006. Highly chemical heterogeneity of subcontinental lithosphere mantle beneath North China and its major transformation. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(1): 8–13 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 陈义贤, 陈文寄, 周新华, 等, 1997. 辽西及邻区中生代火山岩年代学地球化学和构造背景. 北京: 地震出版社, 1–279.
- 黄华, 高山, 胡兆初, 等, 2007. 辽西彰武地区中生代高镁火山岩地球化学及其对新生下地壳拆沉作用的指示. 中国科学(D辑), 37(10): 1287–1300.
- 张旗, 金惟俊, 王元龙, 等, 2006. 大陆下地壳拆沉模式初探. 岩石学报, 22(2): 265–276.
- 张旗, 钱青, 王二七, 等, 2001. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示. 地质科学, 36(2): 248–255.
- 张旗, 王焰, 刘红涛, 等, 2003. 中国埃达克岩的时空分布及其形成背景. 附:《国内关于埃达克岩的争论》. 地学前缘, 10(4): 385–400.
- 郑建平, 路凤香, 余淳梅, 等, 2003. 地幔置换作用: 华北两类橄榄岩及其透辉石微量元素对比证据. 地球科学——中国地质大学学报, 28(3): 235–240.
- 周新华, 张国辉, 杨进辉, 等, 2001. 华北克拉通北缘晚中生代火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素填图及其构造意义. 地球化学, 30(1): 10–23.
- 周新华, 张宏福, 2006. 中生代华北岩石圈地幔高度化学不均一性与大陆岩石圈转型. 地球科学——中国地质大学学报, 31(1): 8–13.