

# 大兴安岭五岔沟地区中生代粗安岩中斜长石环带特征及其地质意义

牛之建<sup>1,2</sup>, 刘跃<sup>1</sup>, 狄永军<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037)

**摘要:** 大兴安岭五岔沟地区中生代粗安岩中的斜长石晶体具有多次熔蚀现象并发育环带结构。长石分类图表明斜长石主要是拉长石, 其次为更长石和中长石。通过探讨斜长石环带的成因, 认为微量元素含量的变化(Fe, Sr, Ba等)可用来判断斜长石反环带的形成机制。最后根据斜长石环带特征和电子探针成分分析, 做出斜长石环带间微量元素Fe和Sr随 $A_n$ 的变化曲线, 得出该区斜长石在其结晶过程中经历了3次岩浆混合作用的结论。

**关键词:** 斜长石环带; 电子探针; 岩浆混合; 五岔沟; 大兴安岭

中图分类号: P578.968; P588.14<sup>+4</sup>

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)01-0102-07

## Zoning characteristics of the plagioclase from the Mesozoic trachyandesite in Wuchagou area of the Da Hinggan Mountains and its geological implications

NIU Zhi-jian<sup>1,2</sup>, LIU Yue<sup>1</sup> and DI Yong-jun<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geo-Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; School of Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

**Abstract:** The plagioclase crystals in trachyandesite from the Late Jurassic Manitou Formation in Wuchagou of the Da Hinggan Mountains have obvious corrosion phenomenon and well-developed zoning texture. The feldspar nomenclature diagram shows that the plagioclases consist mainly of labrador and subordinated oligoclase and andesine. The variations of the minor elements (Fe, Sr, Ba, etc.) composition can determine the formation mechanisms of reverse zoning on the basis of investigating the causes of plagioclase zoning. According to the evidence from the electron microprobe analyses and textures of the plagioclase, the authors also analyzed the variation curves of trace elements Fe and Sr with  $A_n$  and, on such a basis, reached the conclusion that the zoning resulted from three magma mixing events in the process of plagioclase crystallization.

**Key words:** plagioclase zoning; electron microprobe analysis; magma mixing; Wuchagou; Da Hinggan Mountains

岩浆混合作用是许多酸性和中性火山岩的主要形成过程之一, 一直以来受到地质学者的关注(Ver-non, 1990; Anderson and Eklund, 1994; Anderson *et al.*, 2000; Cole *et al.*, 2001; Castro, 2001;

Janoušek *et al.*, 2004; Turner and Costa, 2007)。Wilcox(1999)认为, 岩浆混合作用以机械混合为主, 并伴随有不同程度的扩散混合。近年的研究表明, 岩浆混合过程并不是端员成分简单的一步作用, 而

收稿日期: 2011-11-01; 修订日期: 2013-07-29

基金项目: 中国地质调查局项目(1212010881204, 1212011085490)

作者简介: 牛之建(1989-), 男, 硕士生, 地球化学专业, E-mail: zhjniu@163.com; 通讯作者: 狄永军, E-mail: diyongjun@cugb.edu.cn

网络出版时间: 2013-08-23; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20130823.1538.002.html>

是多期混合演化,并伴随有不同程度的同化作用发生(狄永军等,2003;Ginibre and Wörner,2007),因此单从主量元素和同位素地球化学角度已不足以重建岩浆的混合过程。某些矿物(如斜长石、角闪石、辉石和黑云母等),尤其是矿物的结构和成分变化,完全可以反演岩浆混合演化过程(Kuscu,2001)。这是因为产生混合作用的端员岩浆组分的化学成分强烈的不平衡,且岩浆中已结晶的低温组分(如长英质岩浆)遇到高温组分(如基性岩浆)之后会发生热熔融或反应(Anderson and Eklund,1994),因此岩浆中矿物颗粒形成多种不同的结构是极其自然的,其中,又尤以斜长石成分与结构的变化受到周围岩浆影响最为明显(Hibbard,1981)。

斜长石的形貌和生长环带反映了斜长石晶体的生长(Lofgren,1974)或溶解(Tsuehchuyama,1985)的动力学机制。随着电子探针技术的发展,在20世纪60年代便可以在微米尺度上定量分析主量元素的含量。在岩石学上,通过研究晶体样品的核心和边缘定点分析及定量剖面分析来表征环带模式。后来,使用激光干涉仪制成2D构图,这种技术是基于晶体成分变化的扰动干扰模式。Nomarsky微分干涉对比(NDIC)通过增强侵蚀晶体表面与成分相关的微形貌来提供环带模式的高清晰度成像(但没有定量的成分信息)(Pearce and Kolisnik,1990)。晶体生长过程中微量元素的变化携带着结晶过程中岩浆成分和条件的重要信息,这个观点已经被证实。在上世纪90年代一些研究将NDIC成像技术和电子探针及离子探针(SIMS)微量元素分析结合起来,来辨认晶体的再循环(Blundy and Shimizu,1991)和对流(Singer et al.,1995)机制。Kuritani(1998)则率先使用电子探针对斜长石中微量元素(Mg、Fe)的分布进行了研究。

最近笔者在开展对大兴安岭五岔沟地区火山岩岩相学研究过程中发现了赋存于粗安岩中的具有复杂环带结构的斜长石,这种斜长石可能指示了本区复杂的岩浆结晶历史。大兴安岭地区发育大规模中生代火山-侵入岩,是中国东部中生代火成岩带的重要组成部分,同时也是亚洲大陆边缘火成岩带的组成部分。五岔沟地区位于大兴安岭中南段,是讨论大兴安岭火山岩带岩浆活动的一个不可或缺的重要组成部分,但在矿物学层面上对该区岩浆活动的研究资料极少。本文在野外观测的基础上结合斜长石岩相学研究和其成分特征的微区分析,探讨该区的

岩浆混合历史,希望能为该区的基础地质研究提供重要的参考信息。

## 1 地质背景

大兴安岭中南段是我国东部中生代巨型火山岩带的重要组成部分。该区火山岩的成因、形成和演化涉及区内众多的铜、金多金属矿床的形成,历来受到学者的关注(赵国龙等,1989;吕志成等,2004),但目前仍存在争议。研究发现该区火山岩的分布明显受本区中生代北东向断裂构造的控制,形成了数条北东向火山基底断隆带和断陷火山喷发带,包括杨树沟林场-明水河火山喷发带、吉日沟-乌兰毛都火山喷发带、罕达罕-宝石火山喷发带、乌兰浩特-林东火山喷发带和白音胡硕-天山火山喷发带(吕志成等,2004)。该区中生代火山岩按其成分及喷发特点可划分为4个火山喷发旋回及其4个相对应的火山-沉积岩系地层组,由下而上分别为:①晚侏罗世满克头鄂博组( $J_3mk$ )酸性火山喷发旋回,为一套酸性火山熔岩和火山碎屑岩;②玛尼吐组( $J_3mn$ )中酸性火山喷发旋回,主要岩石类型为安山岩、安山质角砾熔岩、流纹岩、安山质凝灰角砾岩和角砾凝灰岩等;③白音高老组( $J_3by$ )酸性火山旋回,主要由酸性熔岩、酸性火山角砾凝灰岩、凝灰角砾岩及少量安山质熔岩和英安质角砾凝灰岩组成;④梅勒图组( $K_1m$ )中基性火山旋回,岩性为一套中基性火山熔岩,含少量中酸性火山熔岩及火山碎屑岩(赵国龙等,1989)。本次研究的样品主要为采自五岔沟地区晚侏罗世玛尼吐组中的粗安岩。

## 2 样品岩相学特征

所采粗安岩样品呈灰色-灰绿色,具斑状结构,块状构造。斑晶主要为斜长石、黑云母和少量辉石,粒径为0.05~4 mm,斜长石主要为中-拉长石( $An=42\sim 63$ ),黑云母在岩石中含量变化为10%~15%,多已蚀变为绿泥石。辉石含量较低,为1%~5%,大多蚀变为绿泥石或绿帘石(赵国龙等,1989)。基质具玻晶交织结构。

## 3 分析方法

斜长石样品取自粗安岩中(粗安岩中的斜长石

绝大多数发生了熔蚀或无环带现象,所以样品数量极少)。对样品进行了偏光显微镜的观察,并取其中部分典型样品进行了电子探针背散射电子像观察,取典型的斑晶进行了电子探针成分分析。实验由核工业北京地质研究院 JXA-8100/EXL 电子探针分析仪完成,工作环境为:加速电压 20 kV,加速电流 10 nA,束斑直径 $<2\ \mu\text{m}$ ,分析方式为波谱分析,修正方式为 ZAF。电子探针波谱分析的检出限为大于  $15\ \mu\text{g/g}$  (Ginibre and Wörner, 2007),分析精度为 0.1%,完全能满足本文测试要求。为了突出显示斜长石的成分变化,本文选择从核心到边缘垂直于边界的方向做了一条剖面,进行系统的定量分析,点距

约为  $40\ \mu\text{m}$ 。

## 4 斜长石环带特征

### 4.1 形态和组成

在偏光显微镜下的照片(图 1a)显示出该斜长石斑晶至少分为 7 个环带,从中心的熔蚀核开始,向外依次出现明暗相间的 7 个环带。其中第 2 和第 3 环带前后均有熔蚀现象的发生。第 6 环带又由多个明暗相间的细小环带组成,其环带宽度约为  $15\ \mu\text{m}$ 。最边缘的第 7 环带与第 6 环带之间还发育了裂隙。各环带根据光学性质可以从干涉色上加以分辨。

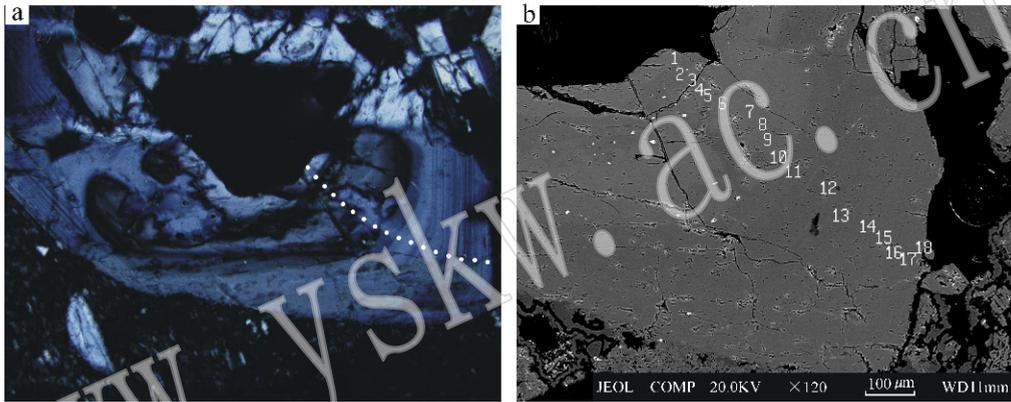


图 1 五岔沟粗安岩斜长石的环带(a)显微照片(正交偏光)和斜长石的背散射图像(b)

Fig. 1 Microphotographs of the zoning in plagioclase (a) and back-scattered electron images of the plagioclase phase (b) from trachyandesite at Wuchagou

### 4.2 分析结果

对粗安岩中的环带斜长石进行了背散射电子图像分析(图 1b),并由内至外进行了斜长石成分的电子探针分析,结果见表 1。图 1b 中数字表示探针测试点号,与表 1 相对应。根据电子探针分析所得的长石成分数据计算其端员组分 Or、Ab、An 值,并进行投图,得知样品中的斜长石主要是拉长石,其次为中长石和更长石(图 2)。

图 3a 为粗安岩中的斜长石斑晶沿探针扫描线的 An 含量变化曲线。它显示斜长石由不连续环带组成。这个晶体有 4 个边界分明的同心环带,总体上向外 An 是递减的,但环带之间 An 升降交替,其范围从 15~30。前两个环带既有正环带,也有反环带,是因为有成分的变化,每次成分迅速变化之后,紧接着都出现反环带的变化趋势,直至下一个不连续的阶梯出现为止。而第 3 个环带仅表现出正环带

倾向。在前两个环带中,伴随岩浆成分的变化,An 先增后减,依次出现正、反环带。反环带 An 的变化范围在 10~20 之间,其中在第 2 环中达到了最大值 57。

如图 3b 中,FeO 的含量从核部到边缘,表现为“3 谷 3 峰”的特征。从核部开始,含量不断下降,在距离中心  $30\ \mu\text{m}$  处降到第 1 个谷,随后开始上升,在  $60\ \mu\text{m}$  处出现第 1 个峰,与 An 峰一致,代表岩浆房有新的富 Fe 岩浆充填。接着,FeO 含量开始下降,并在  $100\ \mu\text{m}$  处出现第 2 个谷之后,曲线在整体上表现出先升后降的趋势,与 An 图中的峰谷值在同一打点位置。在距离中心  $160\ \mu\text{m}$  处 FeO 的含量出现一个小波动。接着含量继续上升,在  $240\ \mu\text{m}$  处升到最大值(0.34)。之后含量开始下降,直到  $540\ \mu\text{m}$  处达到最低谷(0.24)。之后在  $580\ \mu\text{m}$  处再次出现一个峰,峰值为 0.39,之后 FeO 含量直线下降。

如图 3c 中,曲线在整体上显示出先升后降的趋

表 1 五岔沟粗安岩中斜长石电子探针成分

$w_B/\%$

Table 1 Electron microprobe analyses of plagioclase from trachyandesite at Wuchagou

点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
SiO <sub>2</sub>	52.41	55.61	54.42	53.58	59.81	53.92	54.75	55.15	55.92	59.28	60.95	60.92	61.1	60.33	59.7	61.28	60.76	61.52
TiO <sub>2</sub>	0.01	0.04	0	0.03	0.01	0	0.03	0	0	0	0.02	0	0	0	0.02	0.04	0.02	0.03
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	29.95	28.08	28.89	29.07	25.55	29.04	28.51	28.19	27.83	25.35	24.49	24.11	24.41	24.29	25.22	24.27	24.88	23.62
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0.04	0.03	0	0	0	0	0
FeO	0.33	0.29	0.34	0.32	0.26	0.32	0.32	0.34	0.31	0.31	0.3	0.27	0.27	0.23	0.39	0.35	0.3	0.27
MnO	0	0	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0	0
MgO	0.02	0.04	0.02	0	0	0.03	0.04	0	0.02	0	0.03	0.03	0.04	0	0	0.02	0	0.02
CaO	12.44	9.98	11.54	11.62	7.41	11.24	10.84	10.68	10.03	7.11	6.23	5.84	6.21	6.15	7.15	6.22	6.63	5.82
Na <sub>2</sub> O	3.64	5.23	4.56	4.61	7.37	4.8	5.2	5.32	5.49	7.22	7.66	7.81	7.69	7.47	7.46	7.48	7.5	7.72
K <sub>2</sub> O	0.24	0.37	0.28	0.3	0.66	0.27	0.31	0.34	0.36	0.7	0.81	0.89	0.83	0.82	0.69	0.87	0.82	1.06
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0.08	0	0.09	0.04	0.04	0	0.06	0	0	0	0
SrO	0.23	0.28	0.28	0.3	0.31	0.34	0.32	0.31	0.28	0.24	0.27	0.26	0.26	0.26	0.27	0.29	0.26	0.23
NiO	0	0	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01
BaO	0	0	0.05	0	0	0.04	0.12	0.05	0	0.09	0.08	0.08	0.04	0	0.1	0.13	0.05	0.07
总量	99.27	99.92	100.44	99.88	101.39	99.98	100.44	100.46	100.24	100.37	100.87	100.29	100.87	99.61	100.98	100.97	101.22	100.38

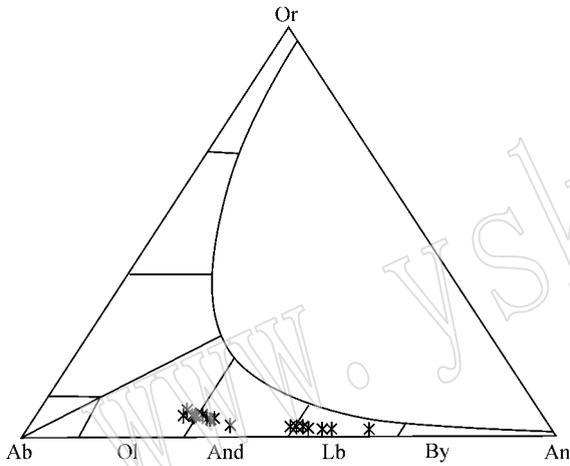


图 2 斜长石的 Or - Ab - An 成分图

Fig. 2 Or - Ab - An composition diagram of plagioclases

势 在距离中心 60  $\mu\text{m}$  处出现一个小波动。接着含量继续上升,在 140  $\mu\text{m}$  处,升到最大值(0.34),在此之前,该曲线的变化情况与 An、FeO 的含量变化曲线反相关,可能是温压对 Fe、Sr 影响不同造成的。之后,含量持续下降,直到 300  $\mu\text{m}$  处达到最低谷(0.24),再向外,随着距离增加,出现一个小的上升,然后是一个稳定的平台,平台长约 200  $\mu\text{m}$ ,平台过后,出现一个小的上升,含量值达到 0.29,之后不断下降。这一部分与 An、FeO 曲线变化一致。

### 5 讨论

#### 5.1 不同斜长石环带成因

形成斜长石的复杂环带结构的根本原因是晶体

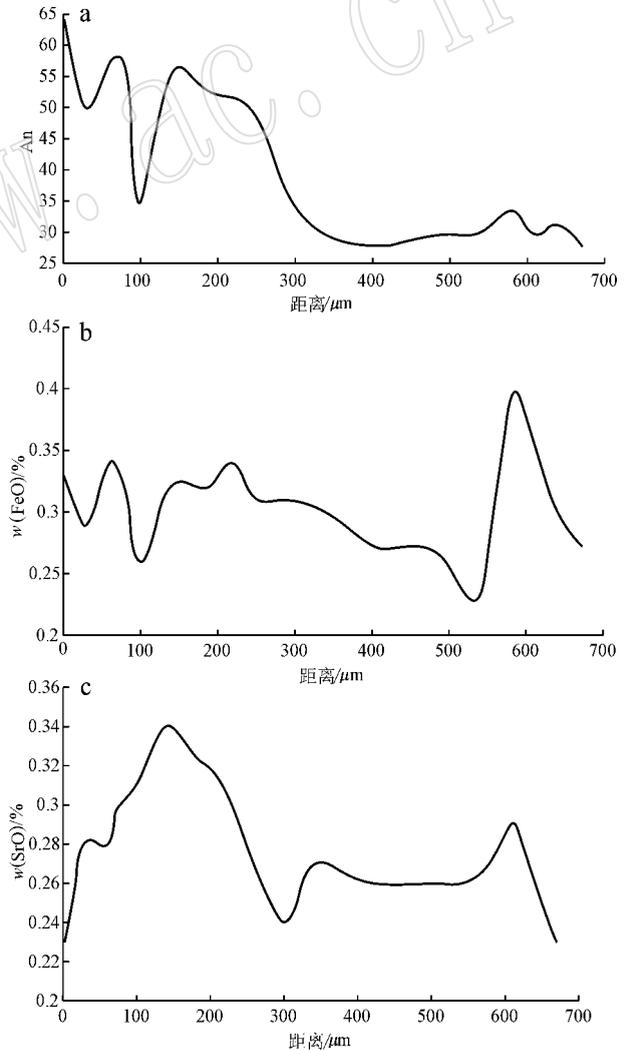


图 3 斜长石的 Ar(a)、FeO(b)、SrO(c) 的线扫描分析曲线

Fig. 3 Line analyses of Ar(a), FeO(b) and SrO(c) of plagioclase

生长时周围成分和温压环境的变化,由此可以通过各阶段不同环带的变化来推断出整个岩浆作用的演化过程(Ginibre and Wörner, 2007)。

具正常环带的斜长石表现为核部至边缘由基性斜长石向酸性斜长石的渐变。分析认为,该类斜长石是直接由岩浆结晶演化形成的。岩浆温度下降过快,不断晶出的斜长石晶体来不及与岩浆充分反应,就会被后来晶出的含 Ab 较高的斜长石所包裹。因此,如果初始熔体的成分偏向基性一侧,则斜长石的核部将肯定是以  $A_n$  组分为主,而随着结晶作用的发生,边部将越来越富 Ab 组分,从而形成中心为基性斜长石、边部为酸性斜长石的正常环带(谢磊等, 2004)。

反环带斜长石较为特殊,内部为富钠质斜长石,其外为富  $A_n$  的斜长石。这种类型的环带成因目前有多种解释。一种认为是热的基性岩浆对较冷的已结晶出偏酸性斜长石的岩浆加热,使偏酸性斜长石发生熔融,形成蚀蚀结构,并与之混合,使岩浆基性程度增高,结晶出偏基性斜长石。另一种解释认为岩浆房中温度与压力的迅速改变(同时伴有挥发分丢失)可以导致这种环带的产生,而且与温度变化相比,压力的变化可能更迅速,而足以导致这种界限分明的不连续环带的形成(Smith and Lofgren, 1983),或者岩浆在上升过程中同化灰岩造成反环带的形成。

利用实验确定的相关系,即与熔体平衡的矿物成分是压力、温度和水含量的函数,矿物组合的化学成分可以重建矿物的结晶条件,不平衡的矿物组合也可以反演结晶条件。在二元系中,如斜长石,主量元素不足以识别可能控制其成分的参数,因此,使用微量元素来反映熔体成分就很有效(如斜长石中的 Fe、Mg、Ba、Ti、Sr 主要反映熔体成分)。

晶体的微量元素含量与熔体成分及分配系数有关,该分配系数可由实验测量、计算或凭经验根据特定的平衡条件确定(Blundy and Wood, 2003)。例如,在斜长石和硅酸盐熔体之间, Sr 和 Ba 的分配强烈地依赖于斜长石中的钙含量(即钙长石牌号的数量)。运用分配系数,分析具环带结构的晶体微量元素变化可以重建它们生长时的熔体成分。这是因为这些元素是生长的晶体事件性地从相邻的熔体“俘虏”的。如果在斜长石中一个富  $A_n$  的峰是由熔体成分的重大变化引起的,那么这一生长带与相邻老的区域相比就会表现出不同的 Sr、Mg、Fe 含量。相

反,温度、压力和水压变化会影响斜长石  $A_n$  的含量,但不会造成 Sr、Mg、Fe 的变化。这是因为寄主岩浆总成分的变化对斜长石中 Sr、Mg、Fe 含量的影响大于随  $A_n$  牌号变化的分配系数对其的影响。同样,岩浆同化灰岩会使岩浆中 Ca 含量增加,造成  $A_n$  的变化,形成反环带,但微量元素(Fe、Sr、Ba 等)基本不会发生变化,且不会出现多次反环带现象。这是因为一次岩浆活动无法提供多次同化灰岩的热动力。国外学者采用 Nomarski DIC 技术已经揭示出单个斜长石极详尽的生长细节(例如 Pearce and Kolisnik, 1990),并把多次重复的熔蚀事件、向晶体边缘钙长石分子含量增加大于 10% 的现象解释为在不止一次岩浆混合作用过程中晶体的熔蚀-再沉淀作用(Pearce *et al.*, 1987; Stamatopoulou *et al.*, 1990)。例如在斜长石中,圆滑的熔蚀面与主要岩浆成分强烈的变化有关,微量元素含量也有明显变化。相比之下,一些斜长石晶体显示出高度复杂的熔蚀和生长形态,但微量元素含量(Sr、Mg、Fe)保持不变(Ginibre and Wörner, 2007)。所以分析火成岩中斜长石微量元素含量随  $A_n$  变化的情况,可以区别反环带形成的机制。在本实验里,如前文的描述,微量元素 Fe、Sr 等的含量变化基本与  $A_n$  变化一致或相关,可见第 1 种解释更合理。

## 5.2 斜长石示踪的岩浆混合

通过上述实验中斜长石环带的研究及其成因的探讨,表明斜长石的正常环带可以直接从演化的岩浆中结晶出来,而斜长石的反环带是由于寄主岩浆中有不同成分的岩浆反复充填并混合造成的。

综上所述,本次斜长石环带结构揭示本区玛尼吐组粗安岩中的斜长石在结晶过程中大致经历了以下 4 个阶段:

第 1 阶段,岩浆房中的基性岩浆随着温度的下降,斜长石斑晶不断结晶,形成正常的斜长石环带,包裹在核部周围,并不断扩散。随着早期斜长石的结晶,可能是由于当时温压的关系,进入晶体中的 FeO 的含量不断下降,而晶体中 SrO 的含量则不断上升。

第 2 阶段,在基性斜长石不断向中长石结晶过程中,另一高温的较基性岩浆充填到原来的寄主岩浆房中,并与其发生混合作用。于是在早期结晶的中长石边缘形成了蚀蚀边。随着混合岩浆的温度不断下降,在蚀蚀边部开始继续围绕晶体生长。所以在这一过程中,先出现反环带,随后出现正环带,趋

于形成酸性斜长石且  $Fe$ 、 $Sr$  含量明显先增后减。

第 3 阶段, 过程与第 2 阶段类似, 依然是较基性的岩浆充填, 只是混入的岩浆成分有所不同。

第 4 阶段, 在斜长石晶体生长过程中, 新的富  $FeO$ 、富  $SrO$  的岩浆混入, 在前期结晶的斜长石晶体外围开始生长。因为温度与原有的岩浆温度相仿, 故没有在第 3 阶段生长的晶体外围观察到明显的熔蚀现象。过程与前两阶段相似, 直至斜长石结晶结束。

## 6 结论

(1) 大兴安岭五岔沟地区的粗安岩中的斜长石反映了本区岩浆经历了多期充填演化过程, 源于基性岩浆已经结晶出的斑晶在生长过程中, 受其他岩浆充填混合的影响, 使其在成分温度都不尽相同的混合岩浆中继续生长, 形成复杂环带。因此, 斜长石可作为岩浆演化史的可靠证据。

(2) 混合岩浆的两个端员组分——酸性岩浆和基性岩浆所占的比例不同影响了其中矿物的化学成分, 基性和酸性岩浆之间反复的充填混合使得其中矿物成分有很大的变化, 本区整体上基性岩浆占主导地位, 酸性岩浆相对较少。

(3) 斜长石  $An$  以及  $Fe$  和  $Sr$  等微量元素的含量变化分析表明, 样品所在的中生代玛尼吐组经历了 3 次岩浆混合作用过程。

致谢 北京核工业地质研究所的葛祥坤工程师在实验过程中提供了指导和帮助, 硕士生金利在文章撰写过程中提供了建议, 审稿人和编辑同志对本文的完善提出了建设性的意见和帮助, 在此深表谢意。

## References

Anderson A T, Davis A M and Lu F. 2000. Evolution of Bishop tuff rhyolitic magma based on melt and magnetite inclusions and zoned phenocrysts[J]. *Journal of Petrology*, 41: 449~473.

Anderson U B and Eklund O. 1994. Cellular plagioclase intergrowths as a result of crystal-magma mixing in the Proterozoic Iland rapakivi batholith, SW Finland[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 117: 124~136.

Blundy J and Wood B. 2003. Partitioning of trace elements between

crystals and melts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 210: 383~397.

Blundy J D and Shimizu N. 1991. Trace element evidence for plagioclase recycling in calcalkaline magmas[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 102: 178~197.

Castro A. 2001. Plagioclase morphologies in assimilation experiments. Implications for disequilibrium melting in the generation of granodiorite rocks[J]. *Mineralogy and Petrology*, 71: 31~49.

Cole J W, Gamble J A, Burta R M, et al. 2001. Mixing and mingling in the evolution of andesite-dacite magmas; evidence from co-magmatic plutonic enclaves, Taupo Volcanic Zone, New Zealand[J]. *Lithos*, 59: 25~46.

Di Yongjun, Zhao Hailing, Zhang Yiquan, et al. 2003. Petrographic evidences for magma mixing in the granitoids from Tongling area, Anhui Province[J]. *Beijing Geology*, 15(1): 12~16 (in Chinese with English abstract).

Ginibre C and Wörner G. 2007. Variable parent magmas and recharge regimes of the Paríacota magma system (N. Chile) revealed by Fe, Mg and Sr zoning in plagioclase[J]. *Lithos*, 98(1): 118~140.

Hibbard M J. 1981. The magma mixing origin of mantled feldspars[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 76(2): 158~170.

Janoušek V, Braithwaite C J R, Bowes D R, et al. 2004. Magma-mixing in the genesis of Hercynian calc-alkaline granitoids: an integrated petrographic and geochemical study of the Sázava intrusion, Central Bohemian Pluton, Czech Republic[J]. *Lithos*, 78: 67~99.

Kuritani T. 1998. Boundary layer crystallization in a basaltic magma chamber: Evidence from Rishiri Volcano, northern Japan[J]. *Journal of Petrology*, 39: 1619~1640.

Kucu G G. 2001. Mineral compositional and textural evidence for magma mingling in the Saraykent volcanic[J]. *Lithos*, 56: 207~230.

Lofgren G E. 1974. An experimental study of plagioclase crystal morphology: isothermal crystallization[J]. *American Journal of Science*, 274: 243~273.

Lü Zhicheng, Duan Guozheng, Hao Libo, et al. 2004. Petrological and Geochemical Studies on the Intermediate-Basic Volcanic Rocks from the Middle-South Part of the Da Hinggan Mountains[J]. *Geological Journal of China Universities*, 10(2): 186~198 (in Chinese with English abstract).

Pearce T H and Kolisnik A M. 1990. Observations of plagioclase zoning using interference imaging[J]. *Earth Science Reviews*, 29: 9~26.

Pearce T H, Russe J K and Wolfson I. 1987. Laser interference and Nomarski interference imaging of zoning profiles in plagioclase phenocrysts from the May 18, 1980, eruption of Mount St Helens, Washington[J]. *American Mineralogist*, 72: 1131~1143.

Singer B S, Dungan M A and Layne G D. 1995. Textures and Sr, Ba,

- Mg, Fe, K and Ti compositional profiles in volcanic plagioclase : Clues to the dynamics of calc-alkaline magma chambers [ J ]. *American Mineralogist*, 80 : 776~798.
- Smith R K and Lofgren G E. 1983. An analytical and experimental study of zoning in plagioclase [ J ]. *Lithos*, 16( 2 ): 153~168.
- Stamatelopoulos-Seymour K, Vlassopoulos D, Pearce T H, *et al.* 1990. The record of magma chamber processes in plagioclase phenocrysts at Thera Volcano, Aegean Volcanic Arc, Greece [ J ]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 104( 1 ): 73~84.
- Tsuchiyama A. 1985. Dissolution kinetics of plagioclase in the melt of the system diopside-albite-anorthite, and origin of dusty plagioclase in andesite [ J ]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 89 : 1~16.
- Turner S and Costa F. 2007. Measuring timescales of magmatic evolution [ J ]. *Elements*, 3 : 267~272.
- Vernon R H. 1990. Crystallisation and hybridism in microgranitoid enclave magmas- microstructural evidence [ J ]. *Journal of Geophysical Research-solid Earth and Planets*, 95( B11 ): 17 849~17 859.
- Wilcox R E. 1999. The idea of magma mixing : History of a struggle for acceptance [ J ]. *Journal of Geology*, 107 : 421~432.
- Xie Lei, Wang Dezi and Wang Rucheng. 2004. Complex zoning texture in plagioclases from the quartz diorite enclave in the Putuo granitic complex, Zhejiang Province : record of magma mixing [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 20( 6 ): 1 397~1 408( in Chinese with English abstract ).
- Zhao Guolong, Yang Guilin, Wang Zhong, *et al.* 1989. Mesozoic Volcanic Rocks in Middle-south Da-Hinggan Mountains [ M ]. Beijing : Beijing Science and Technology Press, 1~20( in Chinese ).

### 附中文参考文献

- 狄永军, 赵海玲, 张贻全, 等. 2003. 安徽铜陵地区燕山期花岗岩类岩石中的岩浆混合结构 [ J ]. *北京地质*, 15( 1 ): 12~16.
- 吕志成, 段国正, 郝立波, 等. 2004. 大兴安岭中南段中生代中基性火山岩岩石学地球化学研究 [ J ]. *高校地质学报*, 10( 2 ): 186~198.
- 谢磊, 王德滋, 王汝成. 2004. 浙江普陀花岗岩杂岩体中的石英闪长质包体 : 斜长石内部复杂环带研究与岩浆混合史记录 [ J ]. *岩石学报*, 20( 6 ): 1 937~1 408.
- 赵国龙, 杨桂林, 王忠, 等. 1989. 大兴安岭中南段中生代火山岩 [ M ]. 北京 : 北京科学技术出版社, 1~20.

### 致 谢

2013 年度,许多地质学及相关学科的专家在百忙之中抽出时间,接受编辑部邀请为本刊评审了稿件,为提高刊物质量做出了贡献。没有这些专家的辛勤劳动,本刊是不可能多方面取得进步的。为此,编辑部特代表主编及主办单位,向他们表示衷心的感谢!这些专家有(以姓氏笔画为序):

于炳松 马万红 马昌前 马海州 丰成友 方维萱 牛树银 牛漫兰 王涛 王强 王勤  
 王长秋 王立本 王岳军 王治华 王彦斌 王晓霞 冯雄汉 史仁灯 叶霖 田世洪 申俊峰  
 乔秀夫 任留东 刘立 刘羽 刘永顺 刘招君 刘显凡 刘钦甫 刘晓春 刘桂建 孙祥  
 孙庆峰 安成邦 曲晓明 朱光 朱永峰 朱建喜 朱润良 朱筱敏 江思宏 许文良 闫俊  
 何江涛 何宏平 吴平霄 吴宏海 吴春明 宋玉财 宋忠宝 张旗 张术根 张永生 张刚生  
 张华锋 张作衡 张宏福 张连昌 张建新 张招崇 张泽明 张春华 旷红伟 李卫 李永军  
 李怀坤 李国武 李金洪 李厚民 杜利林 杨天南 杨晓志 汪灵 沈敢富 沈渭洲 肖渊甫  
 苏庆平 邱检生 邱隆伟 陆现彩 陈文 陈涛 陈天虎 陈衍景 陈能松 周涛发 孟恺  
 孟凡巍 罗照华 英基丰 范宏瑞 郑寿荣 郑远川 郑建平 郑荣才 姚建新 姜耀辉 施光海  
 洪汉烈 胡作维 贺行良 赵子福 赵省民 钟宏 钟大康 饶竹 倪怀玮 夏举佩 夏群科  
 徐九华 徐义刚 徐夕生 柴凤梅 秦善 郭锋 钱一雄 陶琰 高阳 高翔 高林志  
 章凤奇 章军锋 黄小龙 黄思静 彭润民 董英 葛文春 董发勤 董永胜 蒋引珊 谢冰  
 韩宝福 韩春明 鲁安怀 楼章华 赖绍聪 廖立兵 裴先治 樊祺诚 潘小菲 薛传东 魏存弟