

# 铜陵地区中酸性侵入岩及其包体的成因 和矿物温压计的应用

雷敏<sup>1</sup>, 吴才来<sup>1</sup>, 高前明<sup>2</sup>, 国和平<sup>2</sup>, 刘良根<sup>2</sup>, 郭祥炎<sup>2</sup>, 郝源红<sup>1</sup>,  
陈其龙<sup>1</sup>, 秦海鹏<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 安徽地矿局 321地质队, 安徽铜陵 244033)

**摘要:** 铜陵地区中酸性侵入岩可划分为橄榄安粗岩系列和高钾钙碱性系列。前者岩石组合为辉石二长闪长岩 + 二长岩 + 石英二长岩, 后者为辉长闪长岩 + 石英二长闪长岩 + 花岗闪长岩。两个系列岩石的组成矿物种类相似, 但在不同岩石中的含量不同, 主要造岩矿物为斜长石、辉石、角闪石、黑云母、钾长石、石英。橄榄安粗岩系列岩石中含有大量的深源包体, 包括辉石堆积岩包体、角闪石堆积岩包体和角闪石辉长质堆积岩包体, 主要矿物为辉石、角闪石, 其次为尖晶石、斜长石、磷灰石、金云母; 高钾钙碱性系列岩石中含大量的微粒闪长质包体、镁铁质石英二长闪长质包体和富云母包体, 主要矿物为斜长石、角闪石、黑云母。在考虑温压计使用条件的前提下, 选择合适的温压计计算了两个系列侵入岩及包体形成的温压条件。结果表明, 橄榄安粗岩系列侵入岩侵位深度(4~6 km)略小于高钾钙碱性系列侵入岩(6~7 km), 各种堆积包体形成于45~65 km的深位岩浆房, 微粒闪长质包体形成于12~15 km的浅位岩浆房, 镁铁质石英二长闪长质包体是早期侵入岩的边缘相, 而富云母包体可能为地壳部分熔融的残余相。

**关键词:** 中酸性侵入岩, 包体, 矿物化学, 温压计, 铜陵

中图分类号: P588.12; P581

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2010)03-0271-18

## Petrogenesis of intermediate-acid intrusive rocks and enclaves in Tongling area and the application of mineral thermobarometry

LEI Min<sup>1</sup>, WU Cai-lai<sup>1</sup>, GAO Qian-ming<sup>2</sup>, GUO He-ping<sup>2</sup>, LIU Liang-gen<sup>2</sup>, GUO Xiang-yan<sup>2</sup>,  
GAO Yuan-hong<sup>1</sup>, CHEN Qi-long<sup>1</sup> and QIN Hai-peng<sup>1</sup>

(1. Institute of Geology, CAGS, Beijing 100037, China; 2. No. 321 Geological Party, Anhui Bureau of Geology and Mineral Resources, Tongling 244033, China)

**Abstract:** Mesozoic intermediate-acid intrusive rocks in Tongling area can be divided into two magmatic series, namely the shoshonitic series and the high-potassium (K) calc-alkaline series. The shoshonitic series is characterized by the association of pyroxene monzodiorites (PMD) + monzonites (Mz) + quartz monzonites (QM), whereas the high-potassium calc-alkaline series has the association of gabbro-diorite (GBD) + quartz monzodiorites (QMD) + granodiorites (GD). Rocks of these two series have a similar mineral association composed of feldspar, pyroxene, hornblende, biotite, potassium feldspar and quartz, but the content of these minerals is different. The cumulate enclaves such as pyroxene cumulate, hornblende cumulate and hornblende gabbro in the

收稿日期: 2009-07-23; 修订日期: 2010-01-17

基金项目: 国家财政部科学专项(140102); 国家自然科学基金资助项目(49772106, 40472034, 40672049); 中国地质调查局项目(1212010918007, 1212010818090, 1212010611803, 1212010711816)

作者简介: 雷敏(1980-), 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事岩石地球化学研究, E-mail: leiminlm@126.com; 通讯作者: 吴才来, 博士, 研究员, 博士生导师, 岩石学专业, 主要从事火成岩岩石学研究, E-mail: wucailai@yahoo.com, wucailai@hotmail.com.

shoshonitic series rocks are composed mainly of pyroxene and hornblende and subordinately of spinel, feldspar, apatite and phlogopite, while micro-diorite enclaves, mafic quartz monzodiorite enclaves and mica-enriched enclaves in the high-potassium calc-alkaline series are mainly comprised of feldspar, hornblende and biotite. Taking into account the preconditions for the application of thermobarometry, the authors calculated the pressure and temperature conditions for the formation of the intrusive rocks and enclaves. The calculated results of all enclaves and intrusive rocks show that their average temperatures and pressures are 1 357°C and 1.783 GPa for pyroxene cumulate, 1 228°C and 1.430 GPa for hornblende cumulate, 1 214°C and 1.300 GPa for hornblende gabbro cumulate, 889°C and 0.413 GPa for micro-diorite enclave, 887°C and 0.114 GPa for mafic quartz monzodiorite enclaves, 1 096~1 043°C and 0.167~0.115 GPa for shoshonitic series, and 844~784°C and 0.211~0.193 GPa for high-potassium (K) calc-alkaline series, respectively. If these pressure values are converted into the depth according to 3.3 kbar/km, their corresponding depths are 45~65 km for all cumulate enclaves, 12~15 km for micro-diorite enclaves and about 4 km for mafic quartz monzodiorite enclaves, 4~6 km for shoshonitic series and 6~7 km for high-potassium(K) calc-alkaline series, respectively. Combined with petrologic and geochemical studies of all enclaves and two series of intrusive rocks, the authors believe that all cumulate enclaves were derived from crystallization differentiation of the mafic magma in the deep magma chamber, the micro-diorite enclaves came from the mixing between evolved magma from the deep magma chamber and crustal partial melt in the shallow magma chamber, the mafic quartz monzodiorite enclaves might have been the marginal facies of early intrusive body, and the mica-enriched enclaves were probably relics of crustal partial melting.

**Key words:** intermediate-acid intrusive rocks; enclaves; mineral chemistry; thermobarometry; Tongling

铜陵地区位于长江中下游安徽境内(图 1)因盛产铜矿和开发历史悠久而被喻为中国的古铜都。区内的铜矿床与中酸性侵入岩的关系十分密切,因而许多研究者多年来对侵入岩及其成因开展了深入的研究(如常印佛等,1983;吴言昌,1986;周泰禧等,1987;毛建仁,1990;周珣若等,1993;邢凤鸣等,1995,1996;吴才来等,1996,2003,2008;Wu *et al.*,2000,2001;张旗等,2001;王强等,2003;狄永军等,2003;杜杨松等,2004,2007)。研究包括侵入岩年代学研究(吴才来等,1996,2008;徐夕生等,2004;王彦斌等,2004a,2004b,2004c;狄永军等,2005;张达等,2006;杨小男等,2007,2008;徐晓春等,2008)侵入岩中不同类型的包体岩石学及矿物学的研究(周珣若等,1993;邢凤鸣等,1995;杜杨松等,1997,2004;吴才来等,1997;田世洪等,2001;秦新龙等,2003;徐夕生等,2004),另外根据有关的矿物温压计计算了侵入岩结晶的温压条件,特别是根据部分包体的矿物化学研究,得出本区深位岩浆房的深度位于 22~32 km 的莫霍面附近(吴才来等,1997;杜杨松等,1997,2004;徐夕生等,2004)。然而,以往的研究在计算侵入岩及包体形成的温度和压力时,没有充分考虑温压计的使用条件,使得计算结果出现了较大的偏差,影响了人们对岩

浆作用深部过程的认识。另外,现代地球物理研究揭示,包括本区在内的长江中下游地区现代莫霍面深度约为 32 km,但这不能代表中生代区内的莫霍面深度。因此,本文对区内不同系列侵入岩及其中的包体矿物化学进行了系统的研究,并根据矿物化学成分,选择合适的温度计和压力计,考虑不同的温压计使用的前提条件,确定侵入岩及包体形成的条件,进而探讨岩浆的来源深度及岩浆作用过程。

## 1 地质背景

铜陵地区大地构造位置处于扬子板块东北缘下扬子地块的中部。围岩主要是志留纪至三叠纪浅海相碳酸盐岩,夹有深海相的硅质岩和海陆交互的碎屑岩。这些地层形成了一系列 NE 向的褶皱,并被 NE、NNE、NW 和 NNW 向断层切割。铜陵-戴家汇基底深大断裂控制了区内的岩浆活动和矿床的形成,使区内中酸性侵入岩及其相关的矿床分布在 EW 向宽约 20 km 的岩浆-构造-成矿带上(常印佛等,1991)。区内出露 70 多个侵入体(图 1),每个侵入体的露头面积较小,一般为 0.5~3 km<sup>2</sup>。岩体主要呈小岩株状和岩墙状产出,其次呈岩床和岩脉状产出。根据岩石地球化学和其中的包体特征,区内的侵入岩可划分为橄

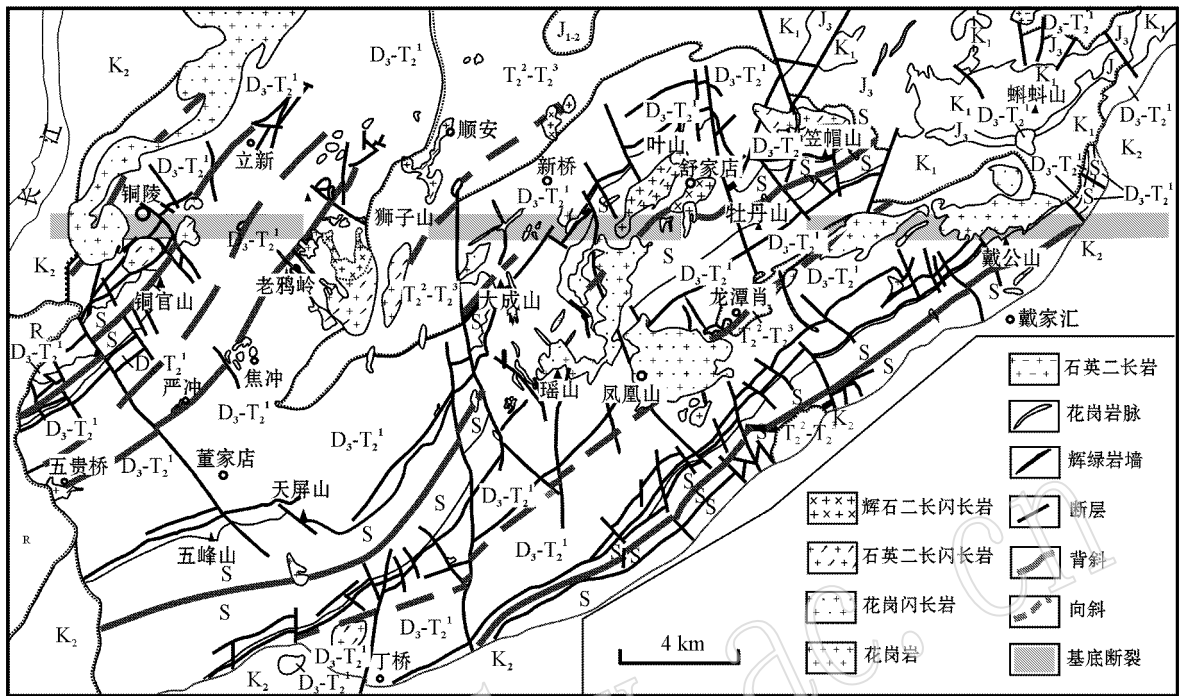


图 1 铜陵地区地质示意图

Fig. 1 Geological sketch map of Tongling area, Anhui Province

R—第三系；K<sub>2</sub>、K<sub>1</sub>—上、下白垩统；J<sub>3</sub>—上侏罗统；J<sub>1,2</sub>—中下侏罗统；T<sub>2</sub>—T<sub>3</sub>—中三叠统；D<sub>3</sub>-T<sub>1</sub>—上泥盆-中三叠统；S—志留系  
 R—Tertiary；K<sub>2</sub>、K<sub>1</sub>—Upper and Lower Cretaceous；J<sub>3</sub>—Upper Jurassic；J<sub>1,2</sub>—Middle and Lower Jurassic；T<sub>2</sub>-T<sub>3</sub>—Middle Triassic；D<sub>3</sub>-T<sub>1</sub>—Upper Devonian and Middle Triassic；S—Silurian

榄安粗岩系列和高钾钙碱性系列(吴才来等, 2003, 2008; 王强等, 2003; 狄永军等, 2003)。

橄榄安粗岩系列岩石约占全区侵入岩的 25% 左右, 岩体多呈 NW 和 NE 向的岩墙状, 与三叠纪碳酸盐岩呈明显的侵入接触关系。岩体边部的斜长石平行接触带分布。接触带地层主要发生大理岩化, 其次是方柱石化和矽卡岩化。该系列侵入岩中含有大量的尖晶石辉石堆积岩、角闪石堆积岩和角闪石辉长质堆积岩包体, 同时还含有角岩、大理岩和矽卡岩包体。这些岩体常伴随金、银、铅、锌等多金属矿化, 同位素年龄为 143~138 Ma (Wu *et al.*, 2000; 吴才来等, 2008)。

高钾钙碱性系列侵入岩占全区侵入岩的 75% 左右, 呈 NE 向岩株状侵入到石炭纪白云质灰岩、二叠纪和三叠纪碳酸盐岩中。这些围岩常发生强烈的矽卡岩化, 并伴随铜矿化(常印佛等, 1983)。岩体侵位于背斜的核部或核部附近的翼部, 有些岩体呈不规则状分布在两个不同方向断裂的交汇处。岩体中含有微粒闪长质包体、镁铁质石英二长闪长质包体

及富云母包体。该系列侵入岩的年龄变化于 148~138 Ma 之间, 其中, 花岗闪长岩、石英二长闪长岩和辉长闪长岩的年龄分别为 148~144 Ma、143~140 Ma 和 143 Ma (Wu *et al.*, 2000; 吴才来等, 2008), 表明该系列岩浆比橄榄安粗岩系列岩浆开始活动的时间早, 岩浆活动持续的时间长。

## 2 侵入岩和包体岩相学特征

橄榄安粗岩系列侵入岩包括辉石二长闪长岩 (PMD)、二长岩 (Mz) 和石英二长岩 (QM)。所有这些岩石具有半自形-自形粒状结构, 主要造岩矿物为辉石、斜长石, 其次为黑云母、钾长石和石英, 矿物粒度变化于 1.5~2.2 mm 之间。同时, 岩石中还含有粒度为 0.01~0.5 mm 的副矿物(如磁铁矿、锆石、榍石和磷灰石)和硫化物矿物(如黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿和斑铜矿)。该系列岩石中含 3 种类型的堆积岩包体, 其中辉石堆积岩包体 (PCE) 主要产在辉石二长闪长岩中, 呈黑色块状, 大小 4~7 cm, 主要矿

物为辉石(90%~95%),其次为尖晶石(2%~3%)、角闪石(1%~2%)、黑云母(1%)和副矿物磷灰石、磁铁矿和黄铁矿。包体具有紧密堆积结构,部分为镶嵌结构(图 2a),包体与寄主岩具有明显的接触界线。角闪石堆积岩包体(HCE)主要产在二长岩和辉石二长闪长岩中,呈黑色、球形或椭球形,大小为 20~30 cm。主要矿物为角闪石(90%~95%),有少量的辉石(1%~2%)、黑云母(1%)和黄铁矿(1%~2%)。大多数具有堆积结构,少数为镶嵌结构(图 2b)。包体与寄主岩具有清楚的接触边界,寄主岩中斜长石平行接触带作定向排列(图 2c),包体周围还有一圈较薄的由细粒透辉石组成的反应边。角闪石辉长质堆积岩包体(HE)主要产在二长岩和石英二长岩中,呈黑色、球形,大小为 5~15 cm。主要组成矿物为角闪石(60%~70%),其次为斜长石(15%~27%)和少量的黑云母(1%~3%)、辉石和磷灰石。这些包体具有类似的辉长结构,与寄主岩之间没有截然的界线(图 2d),包体中的角闪石特征与其他堆积岩中的相似。

高钾钙碱性系列侵入岩包括辉长闪长岩(GBD)、石英二长闪长岩(QD)、花岗闪长岩(GD)和细晶花岗岩脉。大多数岩石具有半自形粒状结构,但辉长闪长岩具有辉长辉绿结构,部分花岗闪长岩和石英二长闪长岩具有似斑状结构。造岩矿物为斜长石、石英、角闪石、黑云母,矿物粒度变化于 1.2~2.2 mm 之间,在具有似斑状结构的岩石中,斜长石斑晶达 5~10 mm,而基质矿物粒度为 0.2~0.5 mm。部分斜长石中含有针状的磷灰石包裹体,部分

斜长石含有不透明矿物组成的核。部分碱性长石周围有一圈斜长石的净边,可能为岩浆混合所致(Hibbard, 1991)。该系列岩石中也存在 3 种类型的包体,其中镁铁质石英二长闪长质包体(MQME)主要产在花岗闪长岩中,其次分布在石英二长闪长岩中。包体呈浅灰色,棱角状,大小变化于 8 cm 到 30 cm 之间,与寄主岩具有明显的接触边界,通常分布在岩体的接触带附近,可能为岩体早期结晶的边缘相。包体的组成矿物与寄主岩中的相似(图 2e),为斜长石+角闪石+碱性长石+黑云母,但暗色矿物含量(如角闪石和黑云母)比寄主岩中的高。斜长石为半自形粒状,含量 50%~60%,角闪石呈自形晶,含量为 10%~15%,石英和钾长石均为他形粒状,含量分别为 5%~10%和 3%~5%,黑云母为片状,含量为 2%~3%。富云母包体(MEE)主要产在花岗闪长岩中,呈黑色、椭球形,大小变化于 5 cm 到 10 cm 之间。包体的主要组成矿物为黑云母(>80%),其次为斜长石(15%)和少量的堇青石和钙铝石榴石,部分较大颗粒的斜长石中镶嵌着众多分散的黑云母(图 2f)。微粒闪长质包体(MDE)主要分布在石英二长闪长(斑)岩中,其次分布在花岗闪长(斑)岩中,呈黑色,具有各种不同形状,如球形、椭球形、不规则的火焰状等,大小变化于 20 到 50 cm 之间,最大的达到 140 cm。它们主要分布在侵入体的中心位置,局部呈群产出,与寄主岩的接触关系既有突变型的,也有逐渐过渡型的。包体中含有来自寄主岩中的矿物晶体,其边缘还有一层反应边,表明两种岩浆的混合作用。包体的矿物为斜长石(40%~50%)、角闪石

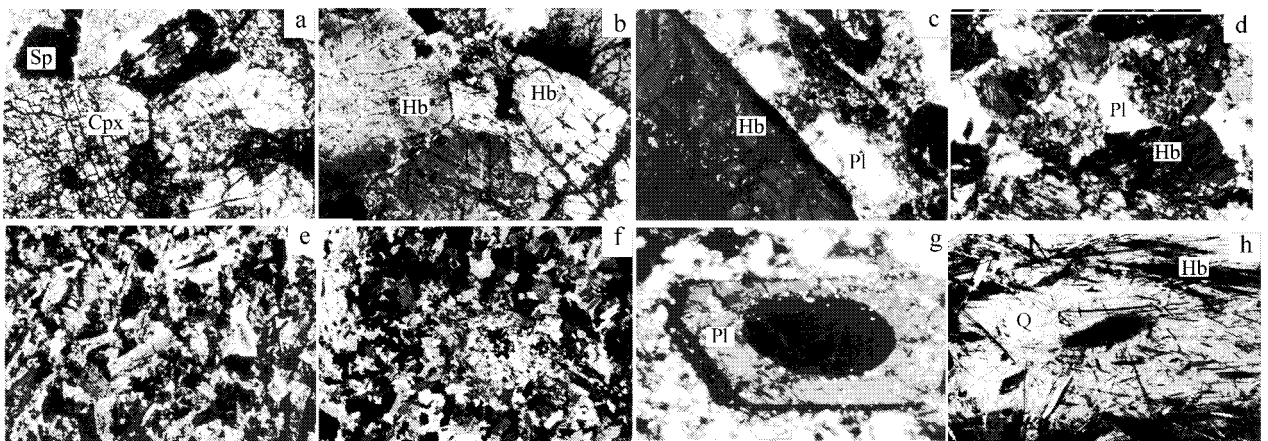


图 2 部分包体显微结构

Fig. 2 Photographs of microtexture of some enclaves

(20%~30%)黑云母(5%~8%)钾长石(3%~7%)和石英(3%~5%)以及副矿物磷灰石、榍石、锆石和磁铁矿、黄铁矿和黄铜矿。包体具有典型的微粒自形结构和斑状结构,斑晶为斜长石,矿物化学成分类似于寄主岩中的斜长石。部分斜长石横跨于包体和寄主岩的边界上,还有部分斜长石具有椭圆形的偏基性的斜长石核(图2g)。基质中的斜长石具有反环带结构,并包裹了大量的针状磷灰石,部分石英中含有大量的纤维状角闪石(图2h),这些结构特征表明了包体岩浆注入到寄主岩浆中快速冷却的结果(Rainer *et al.*, 2000; 狄永军等, 2003)。

### 3 分析方法

矿物化学成分在中国地质大学电子探针室完成,仪器型号为 Superprobe 733,加速电压 15 kV,电流为 0.02 mA。矿物阳离子系数计算以标准硅酸盐矿物氧原子数为准。

### 4 结果

区内侵入岩及包体的主要矿物包括斜长石、钾长石、角闪石、黑云母和辉石,它们的化学成分分别见表1、表2、表3、表4、表5。

#### 4.1 斜长石

斜长石是两个系列所有岩石中的主要造岩矿物,橄榄安粗岩系列岩石中的斜长石成分为  $An_{42-53}$ ,高钾钙碱性系列岩石中的一般为  $An_{25-35}$ ,辉长闪长岩中的为  $An_{42-82}$ (表1)。堆积岩包体、微粒闪长质包体、镁铁质石英二长闪长质包体中的斜长石成分为  $An_{43-32}$ (表1),但部分具有斑状结构的微粒闪长质包体中的斜长石斑晶( $An_{20}$ )比基质中的斜长石( $An_{35}$ )牌号更低,可能说明了斜长石斑晶来自早期较酸性的岩浆,后来发生了岩浆混合作用所致。

#### 4.2 钾长石

不同系列侵入岩中,钾长石的特征不同。二长岩和石英二长岩中的钾长石粒度较粗大,常包裹了较小的斜长石。部分花岗闪长岩中,较粗大的钾长石不但包裹了较小的斜长石,而且还包裹了角闪石。在各种岩石和包体中,他形粒状的钾长石主要呈填隙状。根据电子探针分析结果,大多数岩石中的钾长石均为正长石,但橄榄安粗岩系列辉石二长闪长岩中的却为钠正长石(表2)。

#### 4.3 角闪石

角闪石是各类型岩石中较丰富的镁铁质矿物,呈长柱状,常见一圈由非常细粒的(约0.05 mm)透辉石和磁铁矿组成的暗化边,部分角闪石被细粒的透辉石集合体所取代。特别有趣的是,高钾钙碱性系列的石英二长闪长岩和花岗闪长岩中,较粗的他形粒状石英中分布着毛发状的角闪石,可能反映了温度较高的镁铁质岩浆注入到温度较低的酸性岩浆中快速冷凝的结果。根据电子探针分析结果(表3),在角闪石的 Si-Mg/( $Fe^{2+} + Mg$ )分类图上投点(Leak *et al.*, 1997)得出,所有岩石和包体中的角闪石属钙质角闪石亚族 [ $Ca_B \geq 1.50$  ( $Na + K$ )  $\geq 0.5$ ,  $Ti < 0.5$ ]但不同岩石和包体中角闪石的种属名称不同,即两个系列侵入岩和微粒闪长质包体以及镁铁质石英二长闪长质包体中的角闪石属透闪石( $Si > 6.5$ )堆积岩中的角闪石为钙镁闪石,其中辉石堆积岩中的属韭闪石( $5.5 < Si < 6.5$ ,  $Al^{VI} \geq Fe^{3+}$ ),角闪石堆积岩包体和角闪石辉长质堆积包体中的既有韭闪石,又有镁绿钙闪石( $5.5 < Si < 6.5$ ,  $Al^{VI} \leq Fe^{3+}$ ) (表3)。根据角闪石温压计计算的温度和压力也一并列于表3中(Helz, 1979; Hammarstrom, 1986; Hollister *et al.*, 1987; Johnson and Rutherford, 1989; Schmidt, 1992; Anderson and Smith, 1995)。另外,从侵入岩和不同类型包体的角闪石成分来看, Si 和 Al 之间具有较好的相关性(图3),说明随着岩浆的演化,角闪石结晶于不同的深度。角闪石的  $Al_2O_3$  和  $TiO_2$  之间的关系表明,堆积岩包体和其橄榄安粗岩系列的寄主岩物源主要来自地幔,而微粒闪长质包体和镁铁质石英二长闪长质包体及其高钾钙碱性系列寄主岩的物源来自幔壳混合源(图4)。从它们在图4中的位置来看,微粒闪长质包体比镁铁质石英二长闪长质包体及寄主岩含有较多的幔源组成,而橄榄安粗岩系列岩石比高钾钙碱性系列岩石含有较多的幔源组分。马昌前等(1994)根据世界各种不同成因角闪石的 Si、Ti 含量,做出了角闪石成因的判别图解。结合本区角闪石的 Si、Ti 成分特点得出,高钾钙钾性系列侵入岩及其中的微粒闪长质包体和镁铁质石英二长闪长质包体中的角闪石是从中酸性侵入岩中结晶的,而橄榄安粗岩系列岩石及其中的堆积包体的角闪石类似于从基性超基性侵入岩中结晶的角闪石。

#### 4.4 黑云母

黑云母是各岩石及包体中最丰富的镁铁质矿物

表1 电子探针分析的斜长石化学成分

 $w_B/\%$ 

Table 1 Electron microprobe analyses of plagioclase

岩石样品	GBD		QMDP		QMD						GD					
	HCJZK1		MJ1	SJC1	TEBD1	TGS1	JT4	QSJ1	BC1	ZC	WGQ	HC1	DTS2	FHS1	XQT4	STJ3
SiO <sub>2</sub>	47.07	56.09	57.76	57.26	60.35	61.48	58.03	58.93	58.98	60.78	59.62	60.7	58.66	60.77	59.73	62.22
TiO <sub>2</sub>	0.03	0.04	0.08	0.08	0.00	0.00	0.07	0.02	0.00	0.03	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	32.65	28.31	27.41	27.46	25.2	23.55	25.27	24.1	25.97	24.15	24.71	24.17	25.23	24.68	25.66	24.4
FeO <sup>T</sup>	0.59	0.33	0.4	0.5	0.1	0.16	0.32	0.22	0.27	0.13	0.12	0.35	0.15	0.24	0.17	0.14
MnO	0.03	0.04	0.09	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03	0.06	0.00
MgO	0.00	0.00	0.33	0.00	0.05	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.14	0.00	0.22
CaO	16.88	10.06	7.51	7.99	6	5.75	7.87	6.58	7.75	6.35	7.15	6.83	7.56	7.09	6.98	4.5
Na <sub>2</sub> O	2.01	5.63	4.96	5.95	6.65	7.64	6.58	7.35	6.9	7.7	7.34	7.53	6.73	6.87	6.6	7.64
K <sub>2</sub> O	0.03	0.28	0.5	0.32	0.52	0.21	0.41	0.58	0.50	0.21	0.42	0.51	0.53	0.26	0.46	0.54
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.00	0.04	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.12	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00
Σ	99.34	100.83	99.25	99.67	99.18	98.85	98.86	98.03	100.38	99.47	99.82	100.57	99.11	100.13	99.81	99.85
Si	2.183	2.505	2.590	2.570	2.697	2.755	2.631	2.685	2.630	2.717	2.670	2.669	2.648	2.699	2.664	2.752
Ti	0.001	0.001	0.003	0.003	0.000	0.000	0.003	0.001	0.000	0.001	0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.004
Al	1.784	1.490	1.448	1.452	1.330	1.244	1.350	1.294	1.365	1.273	1.304	1.303	1.342	1.293	1.349	1.272
Fe <sup>T</sup>	0.023	0.012	0.015	0.019	0.004	0.006	0.012	0.009	0.010	0.005	0.005	0.013	0.006	0.009	0.006	0.005
Mn	0.001	0.002	0.004	0.000	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.000
Mg	0.000	0.000	0.022	0.000	0.003	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.009	0.000	0.015
Ca	0.839	0.481	0.361	0.384	0.287	0.276	0.382	0.321	0.370	0.304	0.343	0.322	0.366	0.337	0.334	0.213
Na	0.181	0.487	0.431	0.518	0.576	0.664	0.579	0.649	0.596	0.667	0.637	0.642	0.589	0.592	0.571	0.655
K	0.002	0.016	0.029	0.018	0.030	0.012	0.024	0.034	0.028	0.012	0.024	0.029	0.030	0.015	0.026	0.030
P	0.000	0.002	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.004	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000
Σ	5.015	4.997	4.909	4.968	4.936	4.960	4.991	5.003	5.010	4.984	4.999	4.999	4.989	4.956	4.958	4.949
Or	0.16	1.64	3.49	1.99	3.30	1.24	2.44	3.38	2.85	1.20	2.41	2.87	3.09	1.58	2.83	3.37
Ab	17.70	49.48	52.54	56.26	64.52	69.77	58.75	64.65	59.93	67.87	63.43	64.71	59.80	62.67	61.33	72.92
An	82.14	48.88	43.97	41.75	32.18	28.99	38.81	31.97	37.22	30.93	34.16	32.42	37.11	35.75	35.84	23.71
岩石样品	GDP		PMD		Mz		QM		HGE		MDE		MQME		MEE	
	QTY1	JG6	SJD1	CS1	XSS	JC1	CSB1	TGS2-B	FHSB4	TEBDB6	FHSB7					
SiO <sub>2</sub>	63.1	55.8	55.93	54.4	57.3	55.08	56.23	62.21	57.77	58.35	59.66	63.33	59.67	61.02	47.45	45.94
TiO <sub>2</sub>	0.08	0.00	0.04	0.01	0.06	0.08	0.06	0.11	0.28	0.00	0.04	0.00	0.05	0.08	0.00	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.83	28.42	27.6	27.74	26.13	28.25	26.86	24.13	26.44	24.6	24.66	22.14	25.25	24.31	33.79	35.3
FeO <sup>T</sup>	0.15	0.41	0.07	0.42	0.29	0.35	0.62	0.21	0	0.13	0	0.18	0.14	0.28	0.05	0.31
MnO	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.21	0.00	0.01	0.08	0.01	0.12	0.04	0.36	0.00	0.04	0.00
MgO	0.21	0.03	0.00	0.00	0.14	0.16	0.15	0.26	0.22	0.12	0.28	0.12	0.00	0.22	0.25	0.00
CaO	4.04	9.47	10.08	10.72	8.55	9.87	9.93	6.08	8.75	7.12	6.88	3.9	6.99	5.72	17	17.85
Na <sub>2</sub> O	7.78	4.87	5.65	4.98	6.38	5.52	5.49	6.66	6.39	7.38	6.76	8.39	7.73	6.52	2.02	1.15
K <sub>2</sub> O	0.70	0.25	0.30	0.51	0.29	0.45	0.47	0.27	0.13	0.30	0.34	0.27	0.22	0.43	0.09	0.00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.00	0.00	0.00	0.05	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Σ	99.95	99.25	99.79	98.99	99.24	100.38	99.82	100.01	100.06	98.01	98.99	98.19	100.41	98.63	100.72	100.55
Si	2.785	2.518	2.522	2.485	2.588	2.483	2.541	2.748	2.582	2.653	2.676	2.836	2.658	2.735	2.157	2.100
Ti	0.003	0.000	0.001	0.000	0.002	0.003	0.002	0.004	0.009	0.000	0.001	0.000	0.002	0.003	0.000	0.000
Al	1.239	1.512	1.467	1.494	1.391	1.501	1.430	1.257	1.393	1.319	1.304	1.168	1.325	1.284	1.810	1.900
Fe <sup>T</sup>	0.006	0.016	0.003	0.016	0.011	0.013	0.023	0.008	0.000	0.005	0.000	0.007	0.005	0.011	0.002	0.012
Mn	0.000	0.000	0.000	0.006	0.000	0.008	0.000	0.000	0.003	0.000	0.005	0.002	0.014	0.000	0.002	0.000
Mg	0.014	0.002	0.000	0.000	0.010	0.011	0.010	0.017	0.015	0.008	0.019	0.008	0.000	0.015	0.017	0.000
Ca	0.191	0.458	0.487	0.525	0.414	0.477	0.481	0.288	0.419	0.347	0.331	0.187	0.334	0.275	0.828	0.876
Na	0.666	0.426	0.494	0.441	0.558	0.483	0.481	0.571	0.554	0.651	0.588	0.729	0.668	0.567	0.178	0.104
K	0.039	0.015	0.017	0.030	0.017	0.026	0.027	0.015	0.008	0.018	0.019	0.016	0.012	0.025	0.006	0.000
P	0.000	0.000	0.000	0.002	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Σ	4.944	4.946	4.996	4.999	4.997	5.019	4.996	4.912	4.983	5.001	4.852	4.952	5.018	4.915	5.018	4.992
Or	4.38	1.62	1.73	2.97	1.70	2.64	2.74	1.72	0.77	1.72	2.07	1.68	1.18	2.86	0.54	0.00
Ab	74.31	47.42	49.49	44.29	56.46	48.98	48.63	65.33	56.49	64.00	62.68	78.24	65.88	65.42	17.60	10.61
An	21.31	50.95	48.78	52.74	41.84	48.38	48.63	32.95	42.74	34.17	35.25	20.08	32.94	31.72	81.85	89.39

PMD—辉石二长闪长岩; Mz—二长岩; QM—石英二长岩; GBD—辉长闪长岩; QMD—石英二长闪长岩; QMDP—石英二长闪长斑岩; GD—花岗闪长岩; GDP—花岗闪长斑岩; HGE—角闪辉长质堆积包体; MDE—微粒闪长质包体; MQME—镁铁质石英二长闪长质包体; MEE—富云母包体; 下岩岩性符号与此相同。

表2 电子探针分析的碱性长石化学成分

 $w_B/\%$ 

Table 2 Electron microprobe analyses of alkaline feldspar

岩石样品	QM	QMD				GD	GDP	PMD	HGE	MDE	MQME	
	XS5	JGS2	TGS1	JT4	FHS1	XQT4	JG6	CSB1	FHSB4	TEBDB6		
SiO <sub>2</sub>	64.67	64.58	65.30	66.15	62.73	64.83	62.56	64.99	69.17	65.53	64.75	65.63
TiO <sub>2</sub>	0.02	0.33	0.00	0.04	0.38	0.26	0.84	0.28	0.00	0.15	0.21	0.00
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.45	19.04	17.52	17.90	18.42	17.97	18.85	19.19	18.75	18.41	17.95	17.85
FeO <sup>T</sup>	0.00	0.14	0.30	0.33	0.20	0.16	0.06	0.52	0.09	0.32	0.22	0.15
MnO	0.00	0.02	0.00	0.06	0.07	0.12	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.08	0.00	0.24	0.06	0.00
CaO	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00	0.01	0.00	0.15	0.21	0.02	0.03	0.00
Na <sub>2</sub> O	0.98	1.12	0.87	0.92	2.38	1.42	0.84	1.32	4.65	0.84	1.12	1.05
K <sub>2</sub> O	15.05	15.64	15.11	15.19	11.92	14.58	14.96	14.46	6.89	14.04	15.03	15.28
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03
Total	98.17	100.87	99.57	99.78	96.10	99.38	98.43	100.99	99.79	99.61	99.37	99.99
Si	3.030	2.961	3.023	3.033	2.974	3.002	2.936	2.962	3.062	3.007	2.998	3.020
Ti	0.001	0.011	0.000	0.001	0.014	0.009	0.030	0.010	0.000	0.005	0.007	0.000
Al	0.963	1.029	0.956	0.967	1.030	0.980	1.043	1.031	0.978	0.996	0.979	0.968
Fe <sup>T</sup>	0.000	0.005	0.012	0.013	0.008	0.006	0.002	0.020	0.004	0.012	0.009	0.006
Mn	0.000	0.001	0.000	0.002	0.003	0.005	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.006	0.000	0.017	0.004	0.000
Ca	0.000	0.000	0.013	0.000	0.000	0.001	0.000	0.007	0.010	0.001	0.001	0.000
Na	0.089	0.099	0.078	0.082	0.219	0.127	0.077	0.117	0.399	0.075	0.101	0.093
K	0.899	0.915	0.892	0.830	0.721	0.861	0.896	0.841	0.389	0.822	0.888	0.897
P	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Total	4.982	5.021	4.981	4.934	4.967	4.993	4.998	4.992	4.843	4.938	4.988	4.985
Or	91.00	90.17	90.72	91.05	76.71	87.06	92.11	87.14	48.75	91.54	89.69	90.61
Ab	9.00	9.83	7.92	8.95	23.29	12.88	7.89	12.09	50.02	8.35	10.17	9.39
An	0.00	0.00	1.36	0.00	0.00	0.06	0.00	0.77	1.23	0.11	0.14	0.00

之一。部分黑云母沿解理发生了绿泥石化和碳酸盐化,同时,也有部分黑云母交代了角闪石和辉石。比较罕见的是花岗闪长斑岩中的黑云母斑晶受熔蚀,周围被角闪石组成的细边所包围。富云母包体中的黑云母以富集 Al 和 Fe 为特征,堆积岩包体中的黑云母比其他包体中的都富集 Mg(表 4),在 Foster 等(1980)的 Mg-(Al<sup>IV</sup>+Fe<sup>3+</sup>+Ti)-(Fe<sup>2+</sup>+Mn)图解中,落入金云母区(图略)。黑云母的 MgO-FeO<sup>T</sup>/(FeO<sup>T</sup>+MgO)图解表明,产于高钾钙碱性系列侵入岩中的富云母包体来源于地壳,而堆积岩包体来源于地幔,微粒闪长质和镁铁质石英二长闪长质包体以及两个系列侵入岩来源于壳幔混合(图 5)。这与岩石及包体的 Sr 同位素研究结果一致(王强等,2003;杜杨松等,2004;杨小男等,2008)。

#### 4.5 辉石

辉石主要产于橄榄安粗岩系列的辉石二长闪长岩和二长岩中,其次产于高钾钙碱性系列的辉长闪长岩中。辉石有两种形态,一是自形的短柱状,另外一种为细粒状,常交代角闪石。常见到由阳起石组成的辉石斑晶假像与较小的新鲜辉石共生,暗示着

岩浆混合后共存的熔体与大的斑晶之间存在不平衡现象,或较小的辉石生长之前就发生了阳起石的交代作用。在辉石分类图上,所有的辉石均落入透辉石区域(Poldervaart and Hess, 1951; Morimoto *et al.*, 1988)(图略)。包体中辉石的化学成分与寄主岩中的类似,也属透辉石(表 5)。根据 Putirka 等(1996, 2003)的温压计计算,得出辉石结晶的温度和压力,一并列表 5 中。从辉石的化学成分来看,随 CaO 含量的增加,包体中辉石的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 几乎保持不变,但寄主岩中辉石的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 则减少,反映包体中的辉石形成于较高的压力下(图 6)(邱家骧等,1987)。包体和寄主岩中辉石的 Si 和四面体中的 Al<sup>VI</sup> 具有较好的线性关系,由寄主岩到堆积岩包体,辉石四面体中 Al 的含量随压力增加而增加(图 7)。

## 5 讨论

### 5.1 常用于中酸性火成岩的温压计

#### 5.1.1 角闪石-斜长石温度计

角闪石-斜长石温度计主要依据下列反应(Blundy

表 3 电子探针分析的角闪石化学成分

$w_B/\%$

Table 3 Electron microprobe analyses of hornblende

矿物定名 样品 岩石	浅闪石						韭闪石				MH			
	QMD		GD		PMD	Mz	PCE				HCE			
	TGSI	TEBDI	FHSI	JG6	CS1	BMS6					BMS2			
SiO <sub>2</sub>	46.75	50.36	47.15	50.08	47.74	49.29	47.46	49.72	42.19*	42.32*	40.52*	40.07	40.52	40.39
TiO <sub>2</sub>	1.52	0.90	1.07	1.04	1.25	1.44	1.66	0.96	0.56	0.50	2.40	3.09	3.66	2.76
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.82	5.16	5.58	5.73	6.74	5.80	7.17	5.40	14.24	14.51	13.11	13.08	13.43	13.55
FeO <sup>T</sup>	14.17	13.25	14.15	12.91	14.91	12.73	14.53	12.52	6.07	6.17	11.39	13.11	12.79	11.90
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.22	7.32	9.09	7.61	4.92	5.89	7.12	5.24	1.60	2.41	0.63	1.41	2.87	4.89
FeO	7.67	6.67	5.97	6.06	10.49	7.43	8.12	7.81	4.63	4.01	10.83	11.84	10.21	7.50
MnO	0.69	0.83	0.71	0.63	0.60	0.71	0.58	0.72	0.14	0.05	0.18	0.29	0.18	0.10
MgO	12.90	14.97	14.05	15.01	12.99	14.17	13.14	14.40	15.96	16.16	13.97	11.38	11.89	12.59
CaO	10.17	10.71	10.38	10.25	10.89	10.32	10.54	10.74	13.23	13.26	11.81	11.14	10.67	10.88
Na <sub>2</sub> O	1.73	1.60	1.53	1.75	1.86	1.48	1.47	1.29	2.28	2.03	2.47	3.03	3.26	2.57
K <sub>2</sub> O	0.77	0.48	0.59	0.78	0.73	0.68	0.68	0.60	1.39	1.53	1.11	1.01	0.99	1.08
∑	96.52	98.26	95.32	98.33	97.71	96.71	97.23	96.35	96.22	96.53	97.07	96.20	97.63	95.91
Si	6.846	7.177	6.966	7.120	6.976	7.147	6.902	7.233	6.164	6.141	6.017	6.058	5.996	6.014
Al <sup>IV</sup>	1.154	0.823	1.034	0.880	1.024	0.853	1.098	0.767	1.836	1.859	1.983	1.942	2.004	1.986
Al <sup>VI</sup>	0.196	0.044	-0.063	0.080	0.137	0.139	0.131	0.160	0.617	0.623	0.312	0.389	0.338	0.392
Ti	0.167	0.097	0.119	0.111	0.137	0.157	0.182	0.105	0.062	0.055	0.268	0.352	0.407	0.309
Al <sup>T</sup>	1.350	0.867	0.971	0.960	1.161	0.992	1.229	0.927	2.453	2.482	2.295	2.331	2.342	2.378
Fe <sup>T</sup>	1.735	1.579	1.748	1.535	1.822	1.544	1.767	1.524	0.742	0.749	1.414	1.658	1.582	1.482
Fe <sup>3+</sup>	0.796	0.785	1.010	0.815	0.541	0.642	0.779	0.573	0.175	0.263	0.070	0.160	0.319	0.548
Fe <sup>2+</sup>	0.940	0.794	0.738	0.720	1.281	0.901	0.988	0.950	0.566	0.486	1.344	1.497	1.263	0.934
Mn	0.085	0.100	0.089	0.076	0.075	0.087	0.072	0.088	0.018	0.006	0.022	0.037	0.022	0.013
Mg	2.816	3.180	3.095	3.181	2.830	3.063	2.849	3.123	3.476	3.497	3.093	2.565	2.623	2.795
Ca	1.596	1.636	1.643	1.561	1.705	1.603	1.642	1.674	2.071	2.062	1.879	1.804	1.692	1.736
Na	0.491	0.442	0.439	0.482	0.527	0.416	0.414	0.364	0.646	0.572	0.712	0.888	0.935	0.743
K	0.144	0.087	0.112	0.142	0.135	0.125	0.126	0.112	0.260	0.283	0.211	0.194	0.187	0.206
∑	15.23	15.17	15.19	15.17	15.37	15.13	15.18	15.15	15.89	15.85	15.91	15.89	15.79	15.68
Mg*	0.75	0.80	0.81	0.82	0.69	0.77	0.74	0.77	0.86	0.88	0.70	0.63	0.67	0.75
$p_1/10^8 Pa$	2.87	0.44	0.97	0.91	1.92	1.07	2.26	0.74	8.42	8.56	7.62	7.80	7.86	8.04
$p_2/10^8 Pa$	2.85	0.13	0.72	0.65	1.79	0.83	2.17	0.47	9.07	9.24	8.18	8.39	8.45	8.65
$p_3/10^8 Pa$	2.25	0.21	0.65	0.60	1.45	0.74	1.74	0.46	6.92	7.04	6.25	6.40	6.45	6.60
$p_4/10^8 Pa$	3.42	1.12	1.61	1.56	2.52	1.71	2.84	1.40	8.67	8.80	7.91	8.09	8.14	8.31
$p_5/10^8 Pa$	3.45	0.76	1.44	1.23	2.44	1.38	2.79	0.96	9.60	9.75	8.71	8.91	8.96	9.16
$t_1/°C$	927	792	844	929	867	935	940	944	1021	1107	911	818	794	889
$t_2/°C$	711	670	711	677	696	669	708	653	860	863	911	897	913	905
$t_3/°C$	819	870	914	772	885	683	852	767	873	897	1101	956	923	896

and Holland, 1990; Holland and Blundy, 1994) 4 石英 + 浅闪石 = 钠长岩 + 透闪石, 浅闪石 + 钠长石 = 碱镁闪石 + 钙长石。根据上面的反应, Blundy 和 Holland (1990) 首先提出了一个实验温度计, 主要用于含石英的中酸性火成岩, 且岩石中的斜长石  $An \leq 92$ , 角闪石的  $Si \leq 7.8$ 。该温度计的校正区间是  $500 \sim 1100^\circ C$ 。然而, 角闪石的 Al 含量不仅取决于温度, 而且也取决于压力。因此, 校正后的温度计(误差为  $\pm 311 K$ )为:

$$T = (0.677 p - 48.98) / (-0.0429 - 0.0083144 \ln \{ [(Si - 4) / (8 - Si)] X_{Ab}^{Plag} \}) \quad (1)$$

式中,  $S_i$  是角闪石中硅原子数,  $X_{Ab}^{Plag}$  是斜长石中的钠长石含量。

由于公式(1)计算出的温度太高(Poli and Schmidt, 1992), 所以, Holland 和 Blundy (1994) 又重新校正了角闪石-斜长石温度计(误差为  $\pm 311 K$ ), 使其适用于所有的含石英的准基性岩石:

$$T = [ -76.95 + 0.79 p + 39.4 X_{Na}^A + 22.4 X_K^A + (41.5 - 2.89 p) X_{Al}^{M2} ] / \{ -0.0650 - 0.0083144 \ln [ (27 X_{vac}^A X_{Si}^{Ti} X_{Ab}^{Plag}) / (256 X_{Na}^A X_{Al}^{Ti}) ] \} \quad (2)$$

另外, 依据浅闪石-碱镁闪石的反应, 对温度计又进行了校正(误差为  $\pm 311 K$ ) (Holland and Blundy, 1994), 使其适用于不含石英的火成岩:

$$T = [ 81.44 - 33.6 X_{Na}^M4 - (66.88 - 2.92 p) X_{Al}^{M2} + 78.5 X_{Al}^{Ti} + 9.4 X_{Na}^A ] / \{ 0.0721 - 0.0083144 \ln [ (27 X_{Na}^M4 X_{Si}^{Ti} X_{An}^{Plag}) / (64 X_{Ca}^M4 X_{Al}^{Ti} X_{Ab}^{Plag}) ] \} \quad (3)$$



续表 3  
Continued Table 3

矿物定名 岩石 样品	MH			韭闪石				MH		浅闪石				
	HCE			HGE						MDE		MQME		
	BMS2	BMS2*	BMS2*	BMS2	CSBI	CSBI*	CSBI*	CSBI	CSBI*	FHSB4*	TEBD6*			
SiO <sub>2</sub>	39.37	39.78	38.98	41.05	40.55	43.67	41.64	43.00	41.58	44.90	44.23	50.58	50.33	48.70
TiO <sub>2</sub>	3.24	2.95	3.00	4.19	2.22	0.27	2.85	2.15	2.34	1.48	1.63	0.89	1.21	0.89
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.45	13.12	13.58	12.64	12.68	12.63	12.06	11.02	11.16	7.97	9.13	5.27	5.18	4.89
FeO <sup>T</sup>	13.01	11.89	12.99	13.62	10.46	11.86	11.45	15.44	15.22	15.99	16.20	12.07	12.71	13.29
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.25	0.58	0.55	1.76	1.77	0.77	2.24	6.93	2.60	4.14	7.98	4.64	2.70	0.50
FeO	9.18	11.37	12.50	12.04	8.87	11.17	9.44	9.20	12.88	12.26	9.02	7.89	10.28	12.84
MnO	0.06	0.15	0.19	0.22	0.13	0.50	0.12	0.39	0.28	0.61	0.60	0.48	0.52	0.66
MgO	11.86	12.95	12.78	11.21	14.19	14.01	13.58	11.21	11.18	11.61	11.66	15.60	14.92	15.23
CaO	10.96	11.85	11.51	10.79	11.66	11.74	11.63	10.02	11.06	11.23	10.09	11.07	11.25	11.07
Na <sub>2</sub> O	2.72	2.45	2.92	2.54	2.12	2.53	2.52	2.44	2.79	1.71	2.28	1.91	2.04	1.35
K <sub>2</sub> O	1.02	1.08	1.04	1.40	1.17	1.01	1.55	0.86	1.19	0.91	0.96	0.57	0.48	0.50
Σ	95.69	96.23	97.25	97.70	92.96	98.24	97.40	96.61	97.30	96.41	96.68	98.49	98.75	96.58
Si	5.932	5.994	5.868	6.104	6.103	6.386	6.157	6.380	6.268	6.734	6.547	7.205	7.218	7.206
Al <sup>IV</sup>	2.068	2.006	2.132	1.896	1.897	1.614	1.843	1.620	1.732	1.266	1.453	0.795	0.782	0.794
Al <sup>VI</sup>	0.321	0.324	0.277	0.320	0.352	0.563	0.259	0.307	0.252	0.143	0.139	0.090	0.093	0.060
Ti	0.368	0.334	0.339	0.468	0.251	0.030	0.317	0.240	0.265	0.167	0.181	0.095	0.130	0.099
Al <sup>F</sup>	2.389	2.330	2.409	2.216	2.250	2.177	2.102	1.927	1.984	1.409	1.592	0.885	0.875	0.854
Fe <sup>T</sup>	1.640	1.499	1.635	1.694	1.317	1.451	1.416	1.916	1.919	2.006	2.006	1.438	1.524	1.645
Fe <sup>3+</sup>	0.483	0.066	0.062	0.197	0.200	0.085	0.249	0.774	0.295	0.468	0.889	0.498	0.292	0.056
Fe <sup>2+</sup>	1.157	1.433	1.573	1.497	1.117	1.366	1.167	1.142	1.623	1.538	1.116	0.940	1.233	1.589
Mn	0.007	0.019	0.025	0.028	0.016	0.062	0.015	0.049	0.035	0.078	0.076	0.058	0.063	0.083
Mg	2.665	2.909	2.868	2.485	3.184	3.054	2.993	2.479	2.513	2.569	2.573	3.313	3.190	3.360
Ca	1.769	1.913	1.856	1.719	1.880	1.839	1.843	1.593	1.786	1.805	1.600	1.690	1.728	1.755
Na	0.795	0.715	0.852	0.733	0.619	0.717	0.723	0.703	0.815	0.497	0.655	0.527	0.567	0.388
K	0.196	0.208	0.199	0.266	0.224	0.188	0.293	0.162	0.228	0.175	0.181	0.104	0.088	0.094
Σ	15.76	15.92	16.08	15.71	15.84	15.91	15.86	15.45	15.84	15.44	15.42	15.32	15.40	15.48
Mg*	0.70	0.67	0.65	0.62	0.74	0.69	0.72	0.68	0.61	0.63	0.70	0.78	0.72	0.68
$p_1/10^8\text{Pa}$	8.10	7.80	8.20	7.23	7.40	7.03	6.65	5.77	6.06	3.17	4.09	0.53	0.48	0.38
$p_2/10^8\text{Pa}$	8.71	8.38	8.83	7.74	7.93	7.52	7.10	6.11	6.43	3.19	4.22	0.23	0.18	0.06
$p_3/10^8\text{Pa}$	6.65	6.40	6.73	5.91	6.06	5.75	5.43	4.69	4.93	2.50	3.27	0.28	0.24	0.15
$p_4/10^8\text{Pa}$	8.36	8.08	8.46	7.54	7.70	7.35	7.00	6.16	6.43	3.70	4.57	1.20	1.16	1.06
$p_5/10^8\text{Pa}$	9.21	8.90	9.31	8.29	8.49	8.09	7.68	6.71	7.05	3.86	4.82	0.80	0.74	0.65
$t_1/^\circ\text{C}$	853	984	908	904	937	807	941	701	825	968	886	805	744	864
$t_2/^\circ\text{C}$	926	914	935	895	815	823	885	782	867	750	735	671	670	674
$t_3/^\circ\text{C}$	934	1066		910	875	830	979	859	931	897	882	884	886	897

注：Mg\* = Mg / (Mg + Fe<sup>2+</sup>)，PCE—辉石堆积岩包体，HCE—角闪石堆积岩包体，MH—镁绿钙闪石，下文岩石符号与此相同， $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ 、 $p_4$ 、 $p_5$  是分别根据 Hammarstrom 和 Zen (1986)、Hollister 等 (1987)、Johnson & Rutherford (1989)、Schmidt (1992) 和 Anderson & Smith (1995) 计算的压强； $t_1$ 、 $t_2$  和  $t_3$  为分别根据 Helz (1979)、Blundy & Holland (1990) 和 Blundy & Holland (1994) 计算的压强；\* 据吴才来等 (1997)。

(1)、(2) 和 (3) 式中的压力单位为 0.1 GPa。虽然温度计 (2) 和 (3) 可以用于许多岩石，但成分较多，有时会影响计算的精度。然而，目前还没有比它更好的地质温度计可应用于钙碱性火成岩，所以，在获得压力数据的前提下，这种温度计得出的温度还是比较可靠的，且与石榴石-黑云母温度计得出的变质岩温度的结果具有非常好的相关性 (Stein and Dietl, 2001)。该温度计的压力数据一般来自角闪石压力计。

### 5.1.2 角闪石温度-压力计

该温压计主要依据角闪石中 Al 的含量来计算

温度和压力 (Hammarström, 1986; Hollister *et al.*, 1987; Johnson and Rutherford, 1989; Thomas and Ernst, 1990; Schmidt, 1992; Anderson and Smith, 1995)，且在较大的温度 (400~1150℃)、压力 (0.1~2.3 GPa) 范围内，该温压计都比较稳定 (Blundy and Holland, 1990)。因而，它被广泛地应用于火成岩。

Hammarström (1986) 首先提出了角闪石 Al 的总量 (Al<sub>tot</sub>) 与其结晶时围压的关系，并根据花岗岩类角闪石的电子探针分析结果和岩体侵位时的压力分别为 0.2 GPa 和 0.8 GPa 得出第 1 个压力计公式误

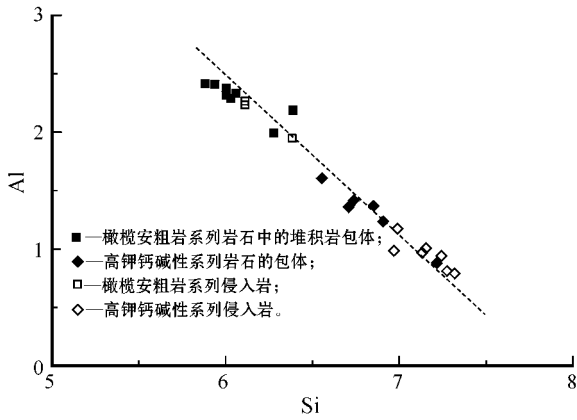


图 3 侵入岩及包体的角闪石 Si - Al 相关图  
Fig. 3 Si - Al correlagram of hornblendes in intrusive rocks and enclaves

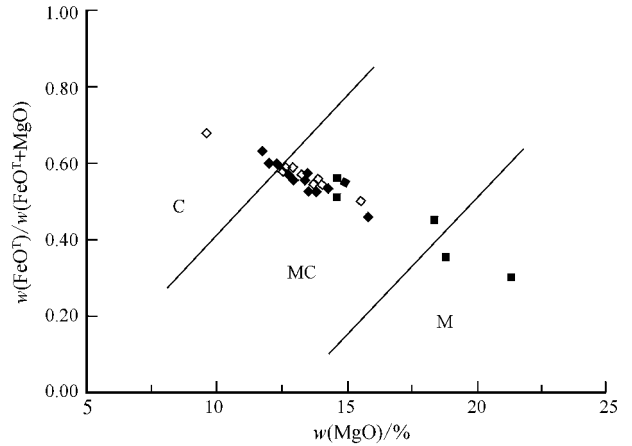


图 5 黑云母的  $FeO^T/(FeO^T + MgO) - MgO$  图解  
[据周作侠(1986),图例同图 3]  
Fig. 5 Diagram of  $FeO^T/(FeO^T + MgO) - MgO$  (after Zhou Zuoxia, 1986, symbols as for Fig. 3)

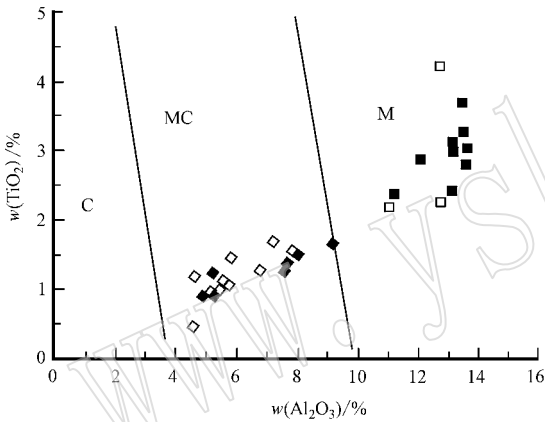


图 4 角闪石  $TiO_2 - Al_2O_3$  图解 [据姜常义等(1988),图例同图 3]

Fig. 4  $TiO_2 - Al_2O_3$  diagram of hornblendes (after Jiang Changyi *et al.*, 1988, symbols as for Fig. 3)

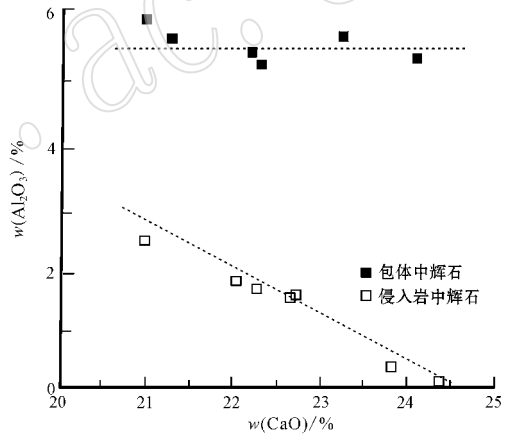


图 6 侵入岩及包体中辉石的  $Al_2O_3 - CaO$  关系图  
Fig. 6  $Al_2O_3 - CaO$  diagram of pyroxene in the intrusive rocks and enclaves from Tongling

差为  $\pm 0.3$  GPa):

$$p = -3.92 + 5.03 Al_{tot} \quad (4)$$

Hollister 等(1987)证实了这种关系,把该压力计应用到压力为  $0.4 \sim 0.6$  GPa 结晶的花岗岩类,同时,减少了压力误差,提出如下压力计公式(误差为  $\pm 0.1$  GPa):

$$p = -4.76 + 5.46 Al_{tot} \quad (5)$$

Johnson 和 Rutherford(1989)在温度为  $720^\circ C$  和  $780^\circ C$  条件下,用两种不同组成的  $CO_2 - H_2O$  混合物 ( $CO_2:H_2O = 50:50$  和  $75:25$ )作为液相,压力达到  $0.2 \sim 0.8$  GPa,第一次用实验的方法完成了该压力计的校正,得出如下计算公式(误差为  $\pm 0.5$  GPa):

$$p = -3.46 + 4.23 Al_{tot} \quad (6)$$

Thomas 和 Erns(1990)用纯水在温度为  $750^\circ C$ 、压力为  $0.6 \sim 1.2$  GPa 的范围内完成了进一步的实验,得到了与 Johnson 和 Rutherford(1989)相类似的结果。Schmidt(1992)在水饱和、温度介于  $655^\circ C$  和  $700^\circ C$  之间、压力为  $0.25 \sim 1.3$  GPa 的条件下校正了 Thomas 和 Erns(1990)的实验压力计,得出的 Al 角闪石压力计(误差为  $\pm 0.6$  GPa)是:

$$p = -3.01 + 4.76 Al_{tot} \quad (7)$$

由于温度对角闪石 Al 的含量也起着非常重要的作用(Blundy and Holland, 1990),所以 Anderson 和 Smith(1995)提出了一个新的角闪石 Al 压力计。该压力计考虑了控制角闪石 Al 含量的 3 个重要因素:压力、温度和氧逸度。

表 4 电子探针分析的黑云母化学成分  
Table 4 Electron microprobe analyses of biotite

$\omega_B/\%$

岩石 样品	QMD			QM		GD		GDP	PMD	PCE	HCE	HGE	MDE	MQME		MEE					
	TGS1	TEBD1	JT4	JC1	HC1	FHS1	STJ3	YS1	JG6	MBS6*	BMS2*	CSB1*	FHSB4*	TEBDB6*	FHSB7*						
SiO <sub>2</sub>	37.13	36.44	39.14	37.03	37.54	37.31	38.12	35.51	37.54	40.25	37.99	42.04	38.18	34.06	37.09	37.01	36.63	36.17	36.43	36.55	36.01
TiO <sub>2</sub>	4.73	5.59	2.78	4.92	5.30	4.57	3.87	3.57	4.72	1.47	1.42	1.49	5.43	3.39	5.54	4.17	4.23	3.62	3.07	4.06	5.04
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.40	13.51	12.12	13.62	13.69	12.76	13.52	15.15	12.77	13.19	12.68	11.45	13.06	14.22	13.76	12.81	13.27	13.91	16.65	16.16	13.60
FeO <sup>T</sup>	17.74	17.87	15.72	18.26	16.98	16.96	17.78	20.58	15.83	10.40	15.16	9.39	15.66	18.76	15.90	18.14	17.98	18.59	16.60	17.07	20.49
MnO	0.35	0.53	0.15	0.22	0.30	0.50	0.46	0.44	0.45	0.00	0.25	0.13	0.22	1.15	0.28	0.15	0.21	0.47	0.55	0.42	0.44
MgO	13.23	11.94	15.50	12.64	13.79	12.53	13.85	9.54	13.77	18.77	18.30	21.27	14.54	14.56	13.66	13.57	13.51	14.83	12.96	13.35	11.69
CaO	0.08	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00	0.21	0.00	0.00	0.41	0.18	0.18	0.16	0.00	0.17	0.15	0.22	0.00	0.00	0.00
Na <sub>2</sub> O	0.13	0.23	0.24	0.30	0.33	0.17	0.36	0.18	0.38	0.43	0.40	0.52	0.51	0.10	0.76	0.50	0.62	0.62	0.37	0.74	0.73
K <sub>2</sub> O	9.09	9.00	8.63	8.78	9.10	9.30	8.89	8.11	9.28	9.57	5.06	9.06	9.44	5.60	9.43	9.30	9.48	7.24	9.73	10.02	8.67
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	96.06	95.11	94.28	95.79	97.31	94.35	96.94	93.30	94.92	94.22	91.67	95.60	97.38	92.41	96.50	96.42	96.94	95.82	96.36	98.57	96.67
Si	2.872	2.867	3.030	2.879	2.856	2.942	2.905	2.876	2.916	2.958	2.980	3.082	2.882	2.742	2.828	2.882	2.803	2.779	2.761	2.719	2.780
Ti	0.275	0.331	0.162	0.288	0.303	0.271	0.222	0.218	0.276	0.081	0.084	0.082	0.308	0.205	0.318	0.240	0.243	0.209	0.175	0.227	0.293
Al	1.222	1.253	1.106	1.248	1.228	1.185	1.214	1.446	1.169	1.143	1.172	0.989	1.162	1.350	1.236	1.157	1.197	1.259	1.487	1.417	1.238
Fe <sup>3+</sup>	0.409	0.311	0.417	0.353	0.403	0.368	0.460	0.255	0.430	0.141	0.056	0.358	0.222	0.250	0.288	0.366	0.498	0.343	0.748	0.522	0.467
Fe <sup>2+</sup>	0.739	0.864	0.600	0.834	0.678	0.751	0.674	1.138	0.599	0.498	0.939	0.191	0.767	1.013	0.726	0.797	0.652	0.851	0.304	0.540	0.856
Mn	0.023	0.036	0.010	0.015	0.019	0.033	0.030	0.030	0.029	0.000	0.017	0.008	0.014	0.078	0.018	0.010	0.014	0.031	0.036	0.026	0.029
Mg	1.526	1.400	1.788	1.465	1.564	1.473	1.573	1.152	1.595	2.057	2.140	2.324	1.636	1.748	1.552	1.550	1.541	1.698	1.465	1.480	1.345
Ca	0.007	0.000	0.000	0.002	0.002	0.000	0.000	0.018	0.000	0.000	0.034	0.014	0.015	0.014	0.000	0.014	0.012	0.018	0.000	0.000	0.000
Na	0.020	0.035	0.036	0.045	0.049	0.027	0.053	0.028	0.057	0.061	0.061	0.074	0.075	0.016	0.112	0.074	0.092	0.092	0.055	0.107	0.109
K	0.897	0.903	0.852	0.871	0.883	0.935	0.865	0.838	0.919	0.987	0.506	0.847	0.909	0.576	0.917	0.909	0.925	0.710	0.941	0.951	0.853
P	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total	7.999	8.000	7.999	8.000	8.000	7.999	8.001	7.999	7.999	7.845	7.989	7.996	7.990	7.992	7.995	7.999	7.978	7.990	7.972	7.989	7.941
Fe <sup>3+</sup>	15.28	12.08	14.86	13.33	15.22	14.19	16.98	10.03	16.38	5.23	1.78	13.26	8.45	8.30	11.22	13.48	18.51	11.86	29.72	20.54	17.50
Fe <sup>2+</sup>	27.64	33.56	21.39	31.44	25.63	28.97	24.89	44.72	22.82	18.47	29.94	6.57	29.21	33.64	28.28	29.37	24.24	29.43	12.08	21.24	32.08
Mg	57.08	54.36	63.74	55.23	59.15	56.84	58.13	45.25	60.80	76.30	68.27	80.15	62.34	58.06	60.50	57.15	57.25	58.71	58.20	58.22	50.41

注：岩性代号同表 1、2；\* 据吴才来等(1997)。

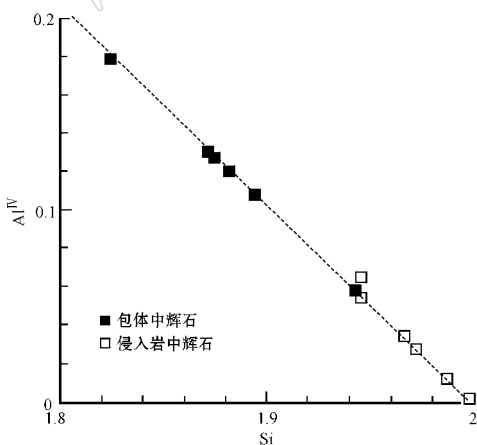


图 7 侵入岩及包体中辉石的 Al<sup>IV</sup>- Si 关系图

Fig. 7 Al<sup>IV</sup>- Si diagram of pyroxene in the intrusive rocks and enclaves from Tongling

Anderson 和 Smith (1995) 根据 Johnson 和 Rutherford (1989) 以及 Schmidt (1992) 的压力计公式又重新进行了校正, 得出新的压力计公式(误差为

± 0.6 GPa) 如下:

$$p = -3.01 + 4.76 Al_{tot} - [(t - 675) \vee 85] [0.53 Al_{tot} + 0.005294(t - 675)] \quad (8)$$

可见, 该压力计引入 1 个温度修正项, 就能应用于花岗岩类非固相线附近结晶的角闪石, 因为氧逸度是该压力计的 1 个新的限制因素, 因此, 它们仅限于应用于高的  $f_{O_2}$  条件下结晶的角闪石。总之, 只有  $Fe^{\#} \leq 0.65$  和  $Fe^{3+} / (Fe^{2+} + Fe^{3+}) \geq 0.25$  的角闪石才能用作压力计, 因为所有实验均是在中等到高氧逸度条件下完成的。

### 5.1.3 辉石温度-压力计

Putirka 等(1996) 用单斜辉石及其共生的岩浆成分来确定平衡时的温度和压力, 依据的反应如下:  
 $2 SiO_2^{liq} + NaO_{1/2}^{liq} + AlO_{3/2}^{liq} = NaAlSi_2O_6^x (Jd),$   
 $CaFmSi_2O_6^x (Di) + NaO_{1/2}^{liq} + AlO_{3/2}^{liq} = NaAlSi_2O_6^x (Jd) + CaO^{liq} + FmO^{liq}.$  这里的 Jd 和 Di 是硬玉和透辉石分子,  $Ca^{liq}$  表示岩浆岩氧化物的阳离子分数。根据标准

表 5 电子探针分析的辉石化学成分  
Table 5 Electron microprobe analyses of pyroxene

 $w_B/\%$ 

岩石样品	PMD		Mz		PCE		HCE		HGE		
	JG6*		CSI		BMS6		BMS2		CSBI*		
SiO <sub>2</sub>	52.04	52.66	52.96	52.91	52.04	48.29	50.14	49.74	49.5	48.91	49.06
TiO <sub>2</sub>	0.79	0.59	0.70	0.30	0.79	1.59	0.53	0.86	1.12	0.84	0.76
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.48	1.56	1.39	1.59	1.68	5.83	5.51	5.11	5.30	5.55	5.20
FeO <sup>T</sup>	6.70	8.34	8.00	10.69	6.70	8.67	8.80	7.41	7.29	7.45	8.25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.26	0.12	0.88	0.00	0.28	2.53	0.00	1.89	1.60	2.88	1.12
FeO	5.56	8.23	7.21	10.69	6.45	6.39	8.80	5.71	5.85	4.86	7.24
MnO	0.29	0.85	0.83	0.90	0.29	0.22	0.25	0.22	0.29	0.21	0.29
MgO	13.91	12.94	12.63	12.08	13.91	12.06	11.13	13.23	12.26	12.53	10.78
CaO	22.70	22.25	22.61	19.78	22.01	20.95	21.25	22.26	22.16	23.21	24.06
Na <sub>2</sub> O	0.67	0.56	0.87	0.68	0.67	0.91	0.27	0.43	0.80	0.42	0.36
K <sub>2</sub> O	0.00	0.04	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.02	0.00	0.00	0.00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.16	0.00	0.00	0.16	0.16	0.06	0.09	0.00	0.01	0.01	0.06
NiO	0.08	0.11	0.00	0.00	0.08	0.00	0.06	0.27	0.02	0.12	0.10
Σ	99.02	99.9	100.12	99.09	98.33	98.83	98.17	99.74	98.93	99.54	99.03
Si	1.945	1.966	1.972	1.999	1.935	1.822	1.942	1.873	1.893	1.870	1.880
Ti	0.022	0.017	0.020	0.009	0.022	0.045	0.015	0.024	0.031	0.024	0.022
Al	0.074	0.069	0.061	0.071	0.074	0.259	0.160	0.182	0.144	0.160	0.190
Fe <sup>T</sup>	0.210	0.260	0.249	0.338	0.210	0.274	0.285	0.233	0.255	0.238	0.264
Fe <sup>3+</sup>	0.036	0.003	0.025	0.000	0.008	0.072	0.000	0.053	0.045	0.081	0.032
Fe <sup>2+</sup>	0.174	0.258	0.224	0.338	0.203	0.202	0.279	0.178	0.184	0.152	0.229
Mn	0.009	0.027	0.026	0.029	0.009	0.007	0.008	0.007	0.009	0.007	0.010
Mg	0.775	0.720	0.702	0.680	0.775	0.678	0.643	0.743	0.728	0.714	0.616
Ca	0.909	0.890	0.902	0.800	0.909	0.847	0.882	0.898	0.875	0.951	0.988
Na	0.049	0.040	0.063	0.050	0.049	0.067	0.021	0.031	0.057	0.031	0.027
K	0.000	0.020	0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
P	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.001	0.000	0.000	0.000
Cr	0.005	0.000	0.000	0.005	0.005	0.002	0.003	0.000	0.004	0.001	0.002
Ni	0.003	0.003	0.000	0.000	0.003	0.000	0.002	0.008	0.004	0.004	0.003
Σ	3.995	4.004	4.001	3.980	4.001	4.001	3.966	4.000	4.001	4.000	4.002
W <sub>O</sub>	48	48	49	44	48	47	49	48	47	50	53
En	41	39	38	37	41	38	36	40	39	38	33
Fs	11	14	13	19	11	15	16	12	14	13	14
$t_1/^\circ\text{C}$	1084	1104	1101	1056	1029	1455	1386	1231	1230	1226	1214
$p_1/10^8\text{Pa}$	0.10	0.60	2.30	2.00	0.30	23.70	15.50	14.30	14.60	14.00	13.00
$t_2/^\circ\text{C}$	1118	1149	1145	1115	1098	1521	1380	1253	1256	1250	1236
$p_2/10^8\text{Pa}$	2.55	6.23	5.82	5.20	2.59	35.03	20.74	14.23	15.97	13.99	12.59
$t_3/^\circ\text{C}$	1102	1128	1124	1099	1087	1417	1333	1218	1224	1214	1203
$p_3/10^8\text{Pa}$	1.95	5.40	5.01	4.58	2.17	29.87	18.63	12.69	14.57	12.45	11.17

$t_1$  和  $p_1$  据 Putirka 等(2003),  $t_2$  和  $p_2$ ,  $t_3$  和  $p_3$  据 Putirka 等(1996); \* 据吴才来等(1997)

矿物计算辉石的组成如  $Jd_{px}$ , 其中  $Fm = FeO + MgO$  (Putirka *et al.*, 1996), 岩石中的 FeO 按  $0.9 \times Fe_2O_3$  计算。

此外, 阳离子分配按 Putirka 等(1996)的方法。下列方程同样适用于辉石的计算:  $Fe^{3+} = Na + Al^{IV} - Al^{VI} - 2Ti - Cr$ ,  $Fe^{2+} = Fe - Fe^{3+}$ , 按 6 个氧原子计算辉石的阳离子系数。所有用来计算的数据均来自侵入岩和辉石的化学成分。

上述生成  $Jd$  的反应对温度和压力非常敏感, Putirka 等(1996)得到计算辉石结晶时的温压计为:

$$p = -5430 + 2.99T + 0.364 \ln \left\{ \frac{[Jd^{px} / (Si^{liq} Na^{liq} Al^{liq})]}{36700} \right\} - 36700 \ln \left( \frac{Na^{liq} Al^{liq}}{Ca^{liq} Fm^{liq} / DiHd^{px}} \right) \quad (9)$$

$$10^4/T = 6.73 - 0.26 \ln \left\{ \frac{[Jd^{px} / (Si^{liq} Na^{liq} Al^{liq})]}{36700} \right\} - 0.86 \ln \left[ \frac{Mg^{liq}}{Mg^{liq} + Fe^{liq}} \right] + 0.52 \ln Ca^{liq} \quad (10)$$

然而, 上述单斜辉石-熔体温压计只能用于玄武质熔体来校正。为了纠正这个缺陷, Putirka 等(2003)用新的实验包括含水(水不饱和)和富  $SiO_2$  熔体 ( $SiO_2$  质量分数可达到 71.3%) 来校正新的温压计。根据硬玉-透辉石 + 铁钙辉石的交换平衡反应得出

校正后的温压计为:

$$p = -88.3 + 2.82 \cdot 10^{-3} T \ln \{Jd^{Cpx} [Na^{liq} Al^{liq} (Si^{liq})^2]\} + 2.19 \cdot 10^{-2} T - 25.1 \ln(Ca^{liq} Si^{liq}) + 7.03(Mg^{liq}) + 12.4 \ln(Ca^{liq}) \quad (11)$$

$$10^{-4}/T = 4.60 - 0.437 \ln [Jd^{Cpx} Ca^{liq} Fm^{liq} / (DiHd^{Cpx} Na^{liq} Al^{liq})] - 0.654 \ln(Mg^{liq}) - 0.326 \ln(Na^{liq}) - 6.32(10^{-3} p - 0.92 \ln(Si^{liq}) + 2.74 \times 10^{-1} \ln(Jd^{Cpx})) \quad (12)$$

这里的温度单位是 K, 压力单位是 0.1 GPa。Jd<sup>Cpx</sup>是单斜辉石中硬玉的摩尔分数, 辉石阳离子计算以 6 个氧原子为准, 并且 Jd 是少于 Na 或<sup>VI</sup>Al, 剩余的 Al 用来形成 CaTs。DiHd<sup>Cpx</sup>是单斜辉石中透辉石 + 铁钙辉石的摩尔分数, 作为形成 CaTs (= <sup>VI</sup>Al - Jd) CaTiAl<sub>2</sub>O<sub>6</sub> (= (<sup>IV</sup>Al - CaTs)/2 和 CaCr<sub>2</sub>SiO<sub>6</sub> (= Cr/2) 后剩余 Ca 的分数计算, Al<sup>liq</sup>是指液体中 AlO<sub>1.5</sub> 的阳离子分数, Fm<sup>liq</sup>是总的 FeO<sup>liq</sup> + MgO<sup>liq</sup>, 而 Mg<sup>liq</sup>是阳离子分数比值 MgO<sup>liq</sup>/(MgO<sup>liq</sup> + FeO<sup>liq</sup>)。公式 (11) 和 (12) 估计的标准误差分别是 0.17 GPa 和 33 K (Putirka *et al.*, 2003)。

## 5.2 角闪石温压计使用的条件

### 5.2.1 影响角闪石 Al 含量的因素

温度、压力、氧逸度和共生的其他矿物都会影响角闪石中 Al 的含量。Hollister 等 (1987) 认为, 契尔马克分子替代  $Si + R^{2+} = Al^{IV} + Al^{VI}$  对压力非常敏感, 随着压力的增加, 角闪石晶格中 Al 的含量也增加。此外, 浅闪石的替代  $Si + vac^A = Al^{IV} + (K + Na)^A$  和 Ti 的反应  $Ti + R^{2+} = 2 Al^{VI}$  及  $Ti + Al^{IV} = Al^{VI} + Si$  也受温度和压力的控制 (Anderson and Smith, 1995), 温度越高, 浅闪石的替代就越有效, 结果导致角闪石中 Al 含量的增加。

除上述重要的替代外, 氧逸度也起着决定性的作用, 它控制了  $Fe/(Mg + Fe) (X = Fe^{\#})$  和  $Fe^{3+}/(Fe^{2+} + Fe^{3+})$  比值, 氧逸度越低, 进入角闪石晶格的  $Fe^{2+}$  就越高, 而高的  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  比值有助于 Al 对 Mg 的替代。因此, 低的氧逸度导致角闪石中 Al 含量的提高 (Spear, 1981; Anderson and Smith, 1995)。另一方面, 高的氧逸度导致  $Fe^{3+}$  优先进入晶格替代 Al, 所以, 角闪石的 Al 含量会降低。因此, Anderson 和 Smith (1995) 建议应用  $Fe^{3+}/(Fe^{2+} + Fe^{3+})$  比值  $\geq 0.25$  的角闪石作为压力计, 而 Anderson (1997) 建议把  $Fe^{\#} \leq 0.65$  的角闪石用作压力计。一般认为, 在高的  $f_{O_2}$  条件下结晶的角闪石用作压力计更为可靠。

### 5.2.2 角闪石温压计使用的先决条件

应用角闪石温压计时, 必须严格满足压力计的使用先决条件 (Stein and Dietl, 2001): ① 石英、斜长石、钾长石、角闪石、黑云母和磁铁矿/钛铁矿必须在岩石中同时存在; ② 压力计只能应用于在 0.2~13 GPa 压力范围内结晶的岩石; ③ 与角闪石共生的斜长石成分应该在 An<sub>25</sub> 和 An<sub>35</sub> 之间; ④ 角闪石应该在花岗岩的固相线附近结晶; ⑤ 熔体中 Si 的活度必须  $\geq 1$ , 也就是说, 熔体中的 SiO<sub>2</sub> 必须是饱和的, 因为角闪石 Al 的含量直接与熔体中 Si 的含量有关; ⑥ 角闪石应该与钾长石共存, 因为钾长石的活度也影响着角闪石 Al 的含量; ⑦ 应用公式 (6) (7) (8), 必须测定与石英/钾长石接触的角闪石边缘成分。考虑了上述的先决条件, 角闪石 Al 压力计仅受取决于契尔马克分子替代时的压力控制, 这时可作为一个非常好的压力计使用。

## 5.3 侵入岩和包体的结晶条件

本区两个系列侵入岩及岩浆型包体的温度、压力估算, 分别使用了上述角闪石的 Al 压力计 (Hammarstrom, 1986; Hollister *et al.*, 1987; Johnson and Rutherford, 1989; Schmidt, 1992; Anderson and Smith, 1995), 角闪石-斜长石温压计 (Spear, 1981; Blundy and Holland, 1990; Holland and Blundy, 1994) 和单斜辉石-熔体温压计 (Putirka *et al.*, 1996, 2003; Putirka, 2005) 结果分别列于表 3、4、5 中。

虽然各种角闪石 Al 压力计提供的压力数据相似, 但本文仍以 Schmidt (1992) 的压力计估算, 我们使用 Blundy 和 Holland (1994) 角闪石-斜长石温度计来估算岩浆的结晶温度。然而, 使用角闪石压力计和角闪石-斜长石温度计时, 必须严格地满足上述的条件, 即含角闪石的寄主岩必须是 SiO<sub>2</sub> 达到饱和状态, 与角闪石共生的斜长石必须是 An<sub>25-35</sub> (Thomas and Ernst, 1990; Anderson and Smith, 1995; Stein and Dietl, 2001)。因此, 我们用 Putirka 等 (2003) 的辉石温压计来估算橄榄安粗岩系列侵入岩和堆积包体的形成温度和压力。因为 橄榄安粗岩系列侵入岩的斜长石大多是 An<sub>>35</sub>, 而形成堆积岩包体的寄主岩浆 SiO<sub>2</sub> 不饱和。在以往发表的成果中, 使用角闪石温压计估算岩体结晶时的温度和压力时, 没有考虑这些温压计使用的条件, 因而, 得出的数据误差较大。

压力估算结果表明, 橄榄安粗岩系列侵入岩形成的压力低于高钾钙碱性系列侵入岩, 前者的辉石-二长闪长岩形成的压力平均为 0.167 GPa (0.01~0.26 GPa), 二长岩为 0.115 GPa (0.03~0.20 GPa);

后者的石英二长闪长岩形成的压力平均为 0.193 GPa (0.112~0.342 GPa), 花岗闪长岩为 0.211 GPa (0.171~0.252 GPa)。然而, 橄榄安粗岩系列侵入岩形成的温度高于高钾钙碱性系列侵入岩, 前者的辉石二长闪长岩形成的温度平均为 1096°C (1084~1106°C), 二长岩为 1043°C (1029~1056°C), 后者的石英二长闪长岩的形成温度为 844°C (722~914°C), 花岗闪长岩为 784°C (683~885°C)。

与寄主岩相比, 镁铁质石英二长闪长质包体具有较低的压力 (平均 0.114 GPa, 0.106~0.120 GPa) 和较高的温度 (平均 887°C, 884~897°C), 而微粒闪长质包体具有较高的温度 (平均 889°C, 882~897°C) 和压力 (平均 0.413 GPa, 0.370~0.457 GPa)。各种堆积岩包体比其他包体和寄主岩的形成温度和压力高, 即辉石堆积岩包体形成的温度、压力平均分别为 1357°C (1231~1455°C), 1.783 GPa (1.431~2.370 GPa), 角闪石堆积岩包体为 1228°C (1226~1230°C), 1.430 GPa (1.400~1.460 GPa), 角闪石辉长质堆积岩包体为 1214°C 和 1.300 GPa。

如果按 33 km/GPa 估算, 本区橄榄安粗岩系列侵入岩的侵位深度约为 4~6 km, 小于高钾钙碱性系列侵入岩的侵位深度 (约为 6~7 km)。由辉石堆积岩包体→角闪石堆积岩包体/角闪石辉长质堆积岩包体→微粒闪长质包体→镁铁质石英二长闪长质包体, 温度和压力由高到低, 对应的形成深度平均分别为 60 km (47~78 km), 47 km (46~48 km), 14 km (12~15 km) 和 3.8 km (3.5~4.0 km)。

#### 5.4 本区中生代地壳的厚度

张旗等 (2001, 2008) 研究中国东部中生代埃达克岩后认为, 中国东部在中生代存在一个高原, 因为埃达克岩起源于厚度大于 50 km 的下地壳, 并对高原的范围、形成和演化作了详细的论述 (张旗等, 2008)。在高原演化过程中, 下地壳的折沉导致地壳的减薄, 所以, 现在中国东部的地壳厚度只有 30 km 左右。铜陵地区中生代中酸性侵入岩的一部分确实具有埃达克质岩石的地球化学特征, 但是否是下地壳部分熔融形成的? 作者通过侵入岩及其包体岩石学、矿物学、锆石 SHRIMP 定年研究认为, 本区在壳幔边界附近存在一个深位岩浆房, 岩浆应来源于更深的上地幔, 也就是说, 上地幔部分熔融形成的岩浆上升、汇聚到莫霍面附近, 达到岩浆密度与周围岩石密度上的平衡, 这个深位岩浆房的深度在 65~45 km。众所周知, 上地幔部分熔融形成的碱性玄武质

岩浆, 其密度比地幔岩小, 只要有微细裂隙存在, 便沿裂隙上升。而下地壳岩石的密度比地幔岩的小, 略大于碱性玄武质岩浆, 所以, 玄武质岩浆容易在下地壳的底部发生聚集, 形成岩浆房。由此看来, 铜陵地区中生代的地壳厚度应大于 50 km。

#### 5.5 岩石及包体的成因

根据两个系列侵入岩及其包体的岩石化学、矿物化学和岩相学研究 (吴才来等, 2003), 结合橄榄安粗岩系列侵入岩中存在大量的堆积包体和高钾钙碱性系列侵入岩中存在大量的微粒闪长质包体、镁铁质石英二长闪长质包体和富云母包体的事实, 我们认为, 橄榄安粗岩系列侵入岩的形成以岩浆分异作用为主, 而高钾钙碱性系列侵入岩的形成以岩浆混合作用为主。以辉长闪长质岩浆为母岩浆, 以堆积岩包体为早期结晶的堆积相, 按瑞利方程 (Neumann *et al.*, 1954) 模拟计算, 得出辉长闪长质岩浆通过 53%~78% 的分离结晶作用可形成橄榄安粗岩系列岩浆 (吴才来等, 2003)。再以高钾钙碱性系列花岗闪长质岩浆为地壳部分熔融的岩浆, 其中的富云母包体为残余相 (Wu Cailai *et al.*, 2000), 计算得出地壳部分熔融程度为 63%~78% (吴才来等, 2003)。花岗质侵入岩中微粒闪长质包体被认为是基性岩浆注入到酸性岩浆中的有力证据 (Didier & Barbarin, 1991)。本区高钾钙碱性系列岩石中存在大量的微粒闪长包体, 同时存在大量的岩浆混合作用的岩相学及矿物学证据, 表明该系列岩浆在形成过程中岩浆混合作用起了举足轻重的作用。我们选择分异的辉石二长闪长质岩浆和花岗闪长质岩浆分别作为岩浆混合的基性端员和酸性端员, 以石英二长闪长质岩浆作为混合后的岩浆, 按质量平衡计算的方法 (Ugidos and Recio, 1993) 估算幔源岩浆约占 60%, 壳源岩浆约占 40%, 与邢凤鸣等 (1996) 根据同位素成分计算的结果类似。

矿物温压计计算结果表明, 橄榄安粗岩系列岩浆的温度大于 1000°C, 特别是形成堆积岩包体的岩浆温度高于 1200°C, 这样高的温度足以使上部的地壳发生部分熔融。实验和计算表明, 1 g 1200°C 的玄武质岩浆冷凝到 775°C 时, 产生的热量可以使周围的岩石熔化, 产生 3.5 g 含熔体 80% 的花岗质岩浆 (Wiebe *et al.*, 2004)。因此, 我们认为, 幔源碱性玄武质岩浆在深度约 60 km 处聚集形成一个巨大的岩浆房 (图 8), 随着岩浆的分异, 辉石先结晶, 接着是角闪石结晶, 岩浆房的热和结晶潜热引起中上地壳发生部分熔融, 形

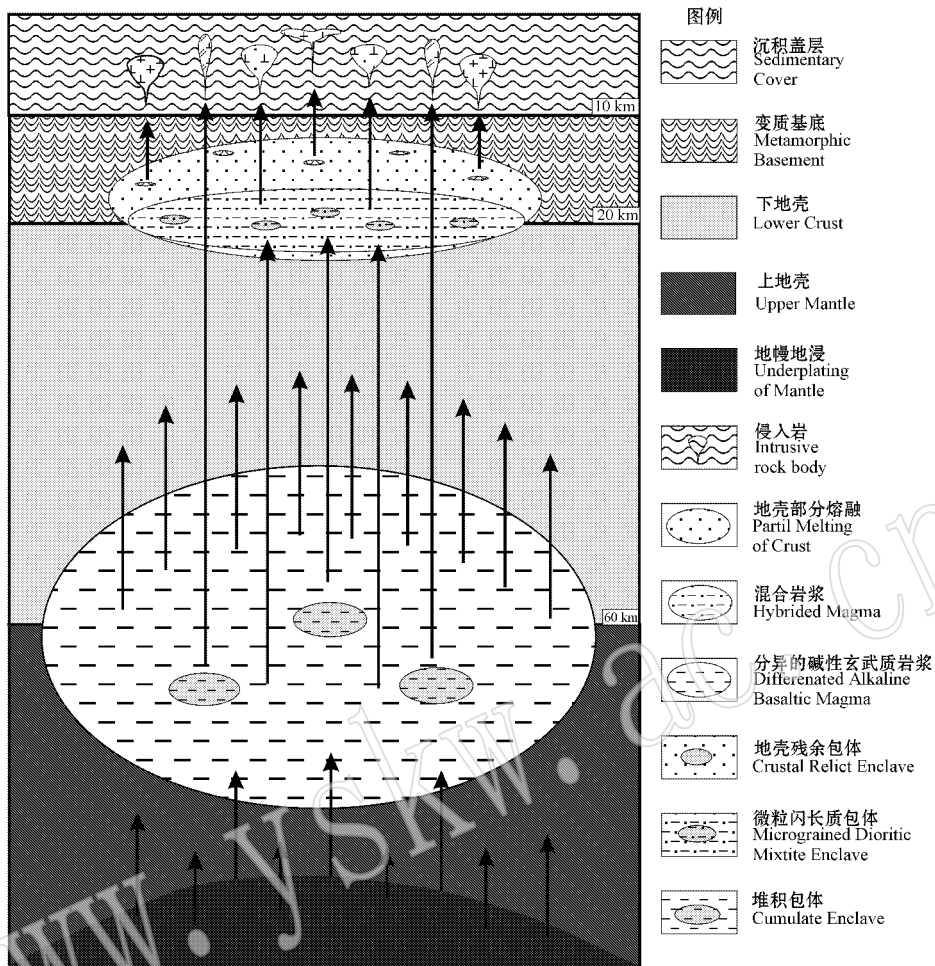


图 8 铜陵地区岩浆作用过程模式图

Fig. 8 Model showing magmatism in Tongling area

成花岗闪长质浅位岩浆房,这里同时发生着同化混染和岩浆分异结晶作用。含有富云母包体的花岗闪长质岩浆首先侵位到上地壳,形成花岗闪长斑岩(侵位年龄约为 146 Ma)(吴才来等 2008),接着是含有堆积包体的辉石二长闪长质岩浆上升侵位到上地壳(142 Ma)(吴才来等 2008),同时,部分辉石二长闪长质岩浆注入到花岗闪长质浅位岩浆房,发生岩浆混合作用,形成石英二长闪长质岩浆(大约 140 Ma)(吴才来等 2008),含有大量的微粒闪长质包体的石英二长闪长质岩浆开始大规模地上升侵位,形成本区岩浆活动的高峰,大规模的岩浆活动结束后,仍有少量的辉石二长闪长质岩浆上升侵位(138 Ma)(吴才来等 2008),岩浆作用的过程可用图 8 表示。

## 6 结论

(1) 铜陵地区中酸性侵入岩中包体和寄主岩中

的造岩矿物相似,但矿物含量具有较大的差别,同时,同一种矿物的化学成分差别也较大,反映它们的来源和形成环境有差异。温压计计算结果表明,辉石堆积岩包体、角闪石堆积岩包体和角闪石辉长质堆积岩包体形成的平均温度、压力分别为 1 357℃、1.783 GPa, 1 228℃、1.430 GPa 和 1 214℃、1.300 GPa,微粒闪长质包体、镁铁质石英二长闪长质包体形成的平均温度和压力为 889℃、0.413 GPa 和 887℃、0.114 GPa,橄榄安粗岩系列和高钾钙碱性系列岩石形成的温度、压力分别为 1 096~1 043℃、0.167~0.115 GPa 和 844~784℃、0.211~0.193 GPa。

(2) 包体及其寄主岩的矿物化学成分表明,高钾钙碱性系列岩浆来自壳幔混合源,而橄榄安粗岩系列岩浆以幔源为主,混染了少量的壳源成分。结合温压计计算结果,我们认为橄榄安粗岩系列岩浆是碱性玄武质岩浆分异后形成的残余岩浆,而高钾钙碱性系列侵入岩岩浆为幔源分异的岩浆与地壳部分

熔融的岩浆混合后形成。

(3) 根据上述研究,本区岩浆作用过程为:起源于富集地幔的碱性玄武质岩浆在地下壳约 60 km 处聚集,并不断地同化地壳成分而形成深位岩浆房。深位岩浆房岩浆的分异结晶作用形成堆积岩包体。巨大岩浆房本身产生的热及其结晶潜热使中上地壳发生部分熔融,形成含富云母包体(残留体)的浅位岩浆房。由于断裂作用,浅位岩浆房中的花岗闪长质岩浆首先侵位,然后是深位岩浆房分异的橄榄安粗质岩浆的上升,一部分含有堆积包体的岩浆直接上升到地壳浅部就位,另一部分注入到浅位岩浆房,发生岩浆混合作用,形成石英二长闪长质岩浆,同时尚未完全混合的基性岩浆团块呈微粒闪长质包体的形式存在,最后,混合后的岩浆上升侵位,岩浆活动晚期,仍有少量来自深部岩浆房的岩浆上升侵位。

## References

- Anderson J L. 1997. Status of thermobarometry in granitic batholiths [J]. *Trans. Roy. Soc. Edinb. Earth Sci.*, 87: 125~138.
- Anderson J L and Smith D R. 1995. The Effects of Temperature and  $f_{O_2}$  on the Al-in-Hornblende Barometer [J]. *American Mineralogist*, 80: 549~559.
- Blundy J D and Holland T J B. 1990. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 104: 208~224.
- Chang Yingfu and Liu Xuegui. 1983. Stratabound skarn type deposits—a case study of Lower Yangtze depression within Anhui province [J]. *Mineral Deposits*, 2(1): 11~20 (in Chinese).
- Chang Yingfu, Liu Xiangpei and Wu Yanchang. 1991. The Iron-Copper Ore-Forming Belt of Middle-Lower Yangtze River [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract).
- Di Yongjun, Wu Ganguo, Zhang Da, *et al.* 2005. Zircon SHRIMP U-Pb Geochronology of Xiaotongguanshan and Shatanjiao intrusive rocks from Tongling and their petrological significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 6: 804 (in Chinese with English abstract).
- Di Yongjun, Zhao Hailin, Zhang Yiquan, *et al.* 2003. Petrographic evidences for magma mixing in the granitoids from Tongling area, Anhui Province [J]. *Beijing Geology*, 15: 12~17 (in Chinese with English abstract).
- Didier J & Barbarin B. 1991. Enclaves and Granite Petrology [M]. Amsterdam: Elsevier.
- Du Yangsong, Li Shunting, Cao Yi, *et al.* 2007. UAFc-related origin of the Late Jurassic to Early Cretaceous intrusions in the Tongguan-shan ore field, Tongling, Anhui Province, East China [J]. *Geoscience*, 21(1): 71~77 (in Chinese with English abstract).
- Du Yangsong and Li Xuejun. 1997. Enclaves in the typical mining districts of Tongling, Anhui and their implicaton to the process of magmatism-metallogeny [J]. *Geological Journal of China Universi-*
- ties, 32): 171~183 (in Chinese with English abstract).
- Du Yangsong, Qin Xinlong, Li Xuanju, *et al.* 2004. Mesozoic mantle-derived magma underplating in Tongling, Anhui Province: evidence from megacrysts and xenoliths [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23(2): 109~116 (in Chinese with English abstract).
- Foster M D. 1980. Interpretation of the composition of trioctahedral mica [A]. U. S. Geol. Survey Prof. Paper [C]. 4 345-B.
- Hammarstran J M. 1986. Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer [J]. *American Mineralogist*, 71: 1 297~1 313.
- Helz R T. 1979. Alkali exchange between hornblende and melt: a temperature-sensitive reaction [J]. *American Mineralogist*, 64(9~10): 953~965.
- Hibbard M J. 1991. Textural anatomy of twelve magma-mixed granitoid system [A]. Didier J and Barbarin B. Enclaves and Granite Petrology [C]. Amsterdam: Elsevier, 431~444.
- Holland T and Blundy J. 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 116(4): 433~447.
- Hollister L S, Grissom G C, Peters E K, *et al.* 1987. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons [J]. *American Mineralogist*, 72: 231~239.
- Jiang Changyi and An Sanyuan. 1988. On chemical characteristics of calcic amphiboles from igneous rocks and their petrogenesis significances [J]. *Minerals and Rocks*, 4(3): 1~9 (in Chinese with English abstract).
- Johnson M C and Rutherford M J. 1989. Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley Caldera (California) volcanic rock [J]. *Geology*, 17: 837~841.
- Leake B E, Wooley A R, Arps C E S, *et al.* 1997. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names [J]. *Canadian Mineralogist*, 35(1): 219~246.
- Mao Jianren. 1990. Intermediate-acid Intrusive Rocks of Middle-lower Yangtze River and Ore-forming [M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Morimoto N, Fabrie J, Ferguson A K, *et al.* 1988. Nomenclature of pyroxenes [J]. *Mineralogical Magazine*, 52(4): 535~550.
- Neumann H, Mead J and Vitaliano C J. 1954. Trace element variations during gracial crystallization as calculated from the distribution law [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 6: 90~99.
- Poldervaart A and Hess H H. 1951. Pyroxenes in the crystallization of basaltic magma [J]. *J. Geol.*, 59: 472~489.
- Poli S and Schmidt M W. 1992. A comment on "Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer" by Blundy JD and Holland TJB (Contrib Mineral Petrol 1990, vol 104, pp 208~224) [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 111: 273~282.
- Putirka K, Johnson M, Kinzler R, *et al.* 1996. Thermobarometry of mafic igneous rocks based on clinopyroxene-liquid equilibria, 0~30 kH [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 123: 92~108.
- Putirka K, Mikaelian H, Ryerson F J, *et al.* 2003. New clinopyroxene-liquid thermobarometers for mafic, evolved and volatile-bearing lava compositions, with applications to lavas from Tibet and the Snake



- River Plain, III [ J ]. *American Mineralogist*, 88: 1542~1554.
- Putirka K. 2005. Igneous thermometers and barometers based on plagioclase + liquid equilibria: Test of some existing models and new calibrations [ J ]. *American Mineralogist*, 90: 336~346.
- Qin Xinlong, Du Yangsong, Li Yin Jingwu, et al. 2003. Exsolved metal oxides and sulfides in hornblends cumulate crystals from Tongling, Anhui [ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 48(18): 182~189 (in Chinese).
- Qiu Jiexiang and Zeng Guangce. 1987. The main characteristics and petrological significance of low-pressure clinopyroxenes in the Cenozoic basalts from eastern China [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 3(3): 1~9 (in Chinese with English abstract).
- Rainer A, Albert H, Elbert H, et al. 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany) [ J ]. *Lithos*, 50: 51~73.
- Schmidt M W. 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-Hornblende barometer [ J ]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 110: 304~310.
- Spear F S. 1981. Amphibole-plagioclase equilibria: an empirical model for the reaction albite + tremolite = edenite + 4 quartz [ J ]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 77: 355~364.
- Stein C and Dietl C. 2001. Hornblende thermobarometry of granitoids from the Central Odenwald (Germany) and their implications for the geotectonic development of the Odenwald [ J ]. *Mineral and Petrology*, 72: 185~207.
- Thomas W M and Ernst W G. 1990. The aluminium content of hornblende in calc-alkaline granitic rocks: a mineralogic barometer calibrated experimentally to 12 kbar [ A ]. Spencer R J and Chou I M. *Fluid-Mineral Interactions: A Tribute to HP Eugster* [ C ]. *Geochem. Soc. Spec. Publ.*, 2: 59~63.
- Tian Shihong, Du Yangsong, Qin Xinlong, et al. 2001. Mineral inclusion studies of the intermediate-acid intrusive rocks and their rock enclaves in Tongling area, Anhui province [ J ]. *Earth Science Frontiers*, 8(4): 422~428 (in Chinese with English abstract).
- Ugidos J M and Recio C. 1993. Origin of cordierite-bearing granites by assimilation in the Central Iberian Massif, Spain [ J ]. *Chemical Geology*, 103: 27~43.
- Wang Xiang, Xu Jifeng and Zhao Zhenhua. 2003. Petrogenesis of the Mesozoic intrusive rocks in the Tongling area, Anhui Province, China and their constraint to geodynamic process [ J ]. *Science in China (Series D)*, 33(4): 323~334 (in Chinese).
- Wang Yanbin, Liu Dunyi, Meng Yifeng, et al. 2004c. SHRIMP U-Pb geochronology of the Xinqiao Cu-S-Fe-Au deposit in the Tongling ore district, Anhui [ J ]. *Geology in China*, 31(2): 169~173 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yanbin, Liu Dunyi, Zeng Pusheng, et al. 2004a. SHRIMP U-Pb geochronology of Xiaotongguanshan quartz-dioritic intrusions in Tongling district and its petrogenetic implications [ J ]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23(4): 298~304 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yangbin, Liu Dunyi, Zeng Pusheng, et al. 2004b. SHRIMP U-Pb geochronology of gabbro-diorite in the Chaoshan Gold Deposit and its geological significance [ J ]. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(4): 423~427 (in Chinese with English abstract).
- Wiebe R A, Manon M R, Hawkins D P, et al. 2004. Late-Stage Mafic Injection and Thermal Rejuvenation of the Vinalhaven Granite, Coastal Maine [ J ]. *Journal of Petrology*, 45(11): 2133~2153.
- Wu Cailai, Chen Songyong, Hao Meiyong, et al. 2001. The origin and Features of the two intermediate-acid intrusive series in Tongling area, Anhui, China [ J ]. *Continental Dynamics*, 6(1): 1~12.
- Wu Cailai, Chen Songyong, Shi Rendeng, et al. 2003. Origin and features of the Mesozoic intermediate-acid intrusive in Tongling area, Anhui, China [ J ]. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(1): 41~48 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Dong Shouwen, Guo Hoping, et al. 2008. Zircon SHRIMP U-Pb dating of intrusive rocks and hypomagmatic process from Shizishan, Tongling [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(8): 1801~1812 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Wang Zhihong, Qiao Dewu, et al. 2000. Types of enclaves and their features and origins in intermediate-acid intrusive rocks from Tongling district, Anhui, China [ J ]. *Acta Geologica Sinica*, 74(1): 54~67.
- Wu Cailai, Zhou Xunruo, Huang Xuchen, et al. 1996.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  chronology of intermediate-acid intrusive rocks from Tongling [ J ]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 15(4): 299~307 (in Chinese with English abstract).
- Wu Cailai, Zhou Xunruo, Huang Xuchen, et al. 1997. Enclave petrology of intermediate-acid intrusive rocks in Tongling district, Anhui [ J ]. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(2): 182~191 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yanchang. 1986. A preliminary study on the Middle-Lower Yangtze River rift valley [ J ]. *Geochemistry*, 5(4): 358~368 (in Chinese with English abstract).
- Xing Fengming and Xu Xiang. 1995. Cumulus-quenched inclusions in the Jiguanshan pluton of Tongling, Anhui province [ J ]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 14(1): 19~25 (in Chinese with English abstract).
- Xing Fengming and Xu Xiang. 1996. High-potassium calc-alkaline intrusive rocks in Tongling area, Anhui province [ J ]. *Geochemica*, 25(1): 29~38 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xiaochun, Chen Sanming, Xie Qiaolin, et al. 2008. SHRIMP Zircon U-Pb dating for the magmatic rocks in Shizishan ore-field of Tongling, Anhui Province, and its geological implication [ J ]. *Acta Geologica Sinica*, 62(4): 500~509 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xisheng, Fan Qincheng, O'Reilly S Y, et al. 2004. Zircon U-Pb dating of the quartz diorite and its enclaves in Tongguanshan, Anhui province: Discussion on the petrologic genesis [ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 49(18): 1883~1891 (in Chinese).
- Yang Xiaonan, Xu Zhaowen, Xu Xisheng, et al. 2008. Zircon U-Pb geochronology and its implication for the temperature of Yanshanian magma in Tongling, Anhui Province [ J ]. *Acta Geologica Sinica*, 62(4): 510~516 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaonan, Xu Zhaowen, Zhang Jun, et al. 2007. Geochronology and origin of Nanhongchong pluton in Shizishan ore-field, Anhui Province [ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1543~1551 (in Chinese with English abstract).

Zhang Da, Wu Ganguo, Di Yongjun, *et al.* 2006. Emplacement dynamics of Fenghuangshan pluton ( Tongling, Anhui Province ): Constraints from U-Pb SHRIMP dating of zircons and structural deformation[ J ]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 31( 6 ): 823~829 ( in Chinese with English abstract ).

Zhang Qi, Wang Yan and Qian Qing. 2001. The characteristics and tectonic - metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China[ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 17( 2 ): 236~244 ( in Chinese with English abstract ).

Zhang Qi, Wang Yuanlong, Jin Weijun, *et al.* 2008. Eastern China Plateau during the Late Mesozoic : evidence, problem and implication[ J ]. *Geological Bulletin of China*, 27( 9 ): 1 404~1 430( in Chinese with English abstract ).

Zhou Taixi, Li Xueming, Zhao Junshen, *et al.* 1987. Geochronology of igneous rocks from the Tongguanshan ore area of Anhui Province [ J ]. *Journal of China University of Science and Technology*, 17 ( 3 ): 403~407( in Chinese with English abstract ).

Zhou Xunruo, Wu Cailai, Huang Xuchen, *et al.* 1993. Characteristics of cognate inclusions in intermediate-acid intrusive rocks of Tongling area and their magmatic dynamics[ J ]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 12( 1 ): 20~31( in Chinese with English abstract ).

Zhou Zuoxia. 1986. The origin of intrusive mass in fengshandong, Hubei province[ J ]. *Acta Petrologica Sinica*, 2( 1 ): 59~70( in Chinese with English abstract ).

## 附中文参考文献

常印佛, 刘湘培, 吴言昌. 1991. 长江中下游铁铜成矿带 [ M ]. 北京: 地质出版社.

常印佛, 刘学圭. 1983. 铜陵地区层控砂卡岩矿床研究 [ J ]. *矿床地质*, 2( 1 ): 11~20.

狄永军, 吴淦国, 张 达, 等. 2005. 铜陵地区小铜官山和沙滩脚岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究及其岩石学意义 [ J ]. *地质学报*, 6: 804.

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 ): 12~17.

杜杨松, 秦新龙, 李铉具. 2004. 安徽铜陵地区中生代幔源岩浆底侵作用——来自矿物巨晶和岩石包体的证据 [ J ]. *岩石矿物学杂志*, 23( 2 ): 109~116.

杜杨松, 李顺庭, 曹 毅, 等. 2007. 安徽铜陵铜官山矿区中生代侵入岩的形成过程——岩浆底侵、同化混染和分离结晶 [ J ]. *现代地质*, 21( 1 ): 71~77.

杜杨松, 李学军. 1997. 安徽铜陵典型矿区岩石包体研究及其岩浆-成矿作用过程探讨 [ J ]. *高校地质学报*, 3( 2 ): 171~182.

姜常义, 安三元. 1988. 火成岩中钙质角闪石化学特征和它们的成因意义 [ J ]. *矿物岩石*, 4( 3 ): 1~9.

马昌前, 杨坤光, 唐仲华, 等. 1994. 花岗岩类岩浆动力学 [ M ]. 中国地质大学出版社.

毛建仁. 1990. 长江中下游中酸性侵入岩与成矿 [ M ]. 地质出版社.

秦新龙, 杜杨松, 李铉具, 等. 2003. 安徽铜陵角闪石堆晶体中的出溶金属氧化物和硫化物 [ J ]. *科学通报*, 48( 18 ): 182~189.

邱家镶, 曾广策. 1987. 中国东部新生代玄武岩中低压单斜辉石主要

特征及岩石学意义 [ J ]. *岩石学报*, 3( 3 ): 1~9.

田世洪, 杜杨松, 秦新龙, 等. 2001. 安徽铜陵地区中酸性侵入岩及其岩石包体中的矿物包裹体研究 [ J ]. *地学前缘*, 8( 4 ): 422~428.

王 强, 许继峰, 赵振华, 等. 2003. 安徽铜陵地区燕山期侵入岩的成因及其对深部动力学过程的制约 [ J ]. *中国科学( D 辑 )*, 33( 4 ): 323~334.

王彦斌, 刘敦一, 蒙义峰, 等. 2004c. 安徽铜陵新桥铜-硫-铁-金矿床中石英闪长岩和辉绿岩锆石 SHRIMP 年代学及其意义 [ J ]. *中国地质*, 33( 2 ): 169~173.

王彦斌, 刘敦一, 曾普胜, 等. 2004a. 安徽铜陵地区幔源岩浆底侵作用的时期——朝山辉石闪长岩锆石 SHRIMP 定年 [ J ]. *地球学报*, 25( 4 ): 423~427.

王彦斌, 刘敦一, 曾普胜, 等. 2004b. 铜陵地区小铜官山石英闪长岩锆石 SHRIMP 的年龄及其成因指示 [ J ]. *岩石矿物学杂志*, 23( 4 ): 298~304.

吴才来, 陈松永, 史仁灯, 等. 2003. 铜陵中生代中酸性侵入岩特征及成因 [ J ]. *地球学报*, 24( 1 ): 41~48.

吴才来, 董树文, 国和平, 等. 2008. 铜陵狮子山地区中酸性侵入岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及岩浆作用的深部过程 [ J ]. *岩石学报*, 24( 8 ): 1 801~1 812.

吴才来, 周珣若, 黄许成, 等. 1996. 铜陵地区中酸性侵入岩年代学研究 [ J ]. *岩石矿物学杂志*, 15( 4 ): 299~306.

吴才来, 周珣若, 黄许成, 等. 1997. 安徽铜陵地区中酸性侵入岩中包体岩石学研究 [ J ]. *地球学报*, 18( 2 ): 182~191.

吴言昌. 1986. 长江中下游裂谷初步研究 [ J ]. *地球化学*, 5( 4 ): 358~368.

邢凤鸣, 徐 祥. 1995. 铜陵鸡冠山岩体中的堆晶淬冷包体 [ J ]. *岩石矿物学杂志*, 14( 1 ): 19~25.

邢凤鸣, 徐 祥. 1996. 安徽铜陵地区高钾钙碱性侵入岩 [ J ]. *地球化学*, 25( 1 ): 29~38.

徐夕生, 范钦成, O'Reilly S Y, 等. 2004. 安徽铜官山石英闪长岩及其包体锆石 U-Pb 定年与成因探讨 [ J ]. *科学通报*, 49( 18 ): 1 883~1 891.

徐晓春, 陈三明, 谢巧勤, 等. 2008. 安徽铜陵狮子山矿田岩浆岩锆石 SHRIMP 定年及其成因意义 [ J ]. *地质学报*, 82( 4 ): 500~509.

杨小男, 徐兆文, 徐夕生, 等. 2008. 安徽铜陵狮子山矿田岩浆岩锆石 U-Pb 年龄意义 [ J ]. *地质学报*, 82( 4 ): 510~516.

杨小男, 徐兆文, 张 军, 等. 2007. 安徽狮子山矿田南洪冲岩体形成时代及成因机制研究 [ J ]. *岩石学报*, 23( 6 ): 1 543~1 551.

张 达, 吴淦国, 狄永军, 等. 2006. 铜陵凤凰山岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄与构造变形及其对岩体侵位动力学背景的制约 [ J ]. *地球科学*, 31( 6 ): 823~829.

张 旗, 王 焰, 钱 青, 等. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义 [ J ]. *岩石学报*, 17( 2 ): 236~244.

张 旗, 王元龙, 金惟俊, 等. 2008. 晚中生代的中国东部高原: 证据、问题和启示 [ J ]. *地质通报*, 27( 09 ): 1 404~1 430.

周泰禧, 李学明, 赵俊深, 等. 1987. 安徽铜陵铜官山矿田火成岩的同位素地质年龄 [ J ]. *中国科学技术大学学报*, 17( 3 ): 403~407.

周珣若, 吴才来, 黄许成, 等. 1993. 铜陵中酸性侵入岩中同源包体及岩浆动力学 [ J ]. *岩石矿物学杂志*, 12( 1 ): 20~31.

周作侠. 1986. 湖北丰山洞岩体成因探讨 [ J ]. *岩石学报*, 2( 1 ): 59~70.