

新疆尾亚地区石英二长闪长岩的岩浆混合成因*

王玉往^{1,2,3} 王京彬^{2,3} 王莉娟^{2,3} 方同辉³

WANG YuWang^{1,2,3}, WANG JingBin^{2,3}, Wang LiJuan^{2,3} and FANG TongHui³

1. 中国地质大学(北京); 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

2. 中国科学院地质与地球物理研究所中国科学院矿产资源研究重点实验室, 北京 100029

3. 北京矿产地质研究院, 北京 100012

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3. Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012, China

2006-08-04 收稿, 2006-11-16 改回.

Wang YW, Wang JB, Wang LJ and Fang TH. 2007. Magma-mixing genesis of quartz monzodiorite in the Weiya, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 23(4):733-746

Abstract There widely occurs magma mixing in the Weiya vanadium-bearing titanomagnetite ore district, which evidenced by not only lots of diorite enclaves in granitoid rocks, granitoid enclaves in diorite and dispersion each other, but also forming a mixing product in the contact zone of granite and diorite: magma mixed rocks. Based on comparison of field characteristics, lithology and mineralogy, it is found that the quartz monzodiorite rockbody in the middle part of the ore district is identical petrography with the magma mixed rocks and thus the rockbody might belong to magma-mixing genesis. All rock types present typical magma mixing characteristics in petrography and mineral chemistry. There are wide spread disequilibrium mineral textures in these rocks such as rapakivi texture of Kf (potassium feldspar), circum-phenocrast structure, acicular apatite texture, glomerogranular crumb structure by hornblende and biotite, plagioclase "crystalloblast" with a lot of capture crystals. Plot data of main oxides versus SiO₂ (wt %) from plagioclase and hornblende compose of well linearity similar to Hake diagram of bulk-rock analysis. Composition of essential rock-forming minerals and huge Kf phenocrast section indicate that exchange of the chemical compositions exist in magma mixing. It is suggested by composition of biotite that the magma mixing in this area is derived from crust-mantle mixing source.

Key words Magma mixing, Magma mixed rock, Diorite enclave, Mineral chemistry, Weiya

摘要 新疆东天山的尾亚钒钛磁铁矿矿区,在花岗岩中含有大量闪长岩包体,而且花岗岩与闪长岩相互包裹、渗透,并在花岗岩与闪长岩接触带形成二者混合的产物——岩浆混合岩。通过野外特征、岩相学和矿物成分对比,发现矿区中部的石英二长闪长(斑)岩体与岩浆混合岩完全相同,表明该岩体系岩浆混合成因。各类参与岩浆混合作用岩石的岩相学和矿物学表现出典型的岩浆混合作用特征。矿物不平衡组构主要有:钾长石的更长环斑结构、斑晶的环边结构、针状磷灰石发育、暗色矿物的聚晶团块、岩浆混合岩中出现钾长石“变晶”等等。各类岩石中斜长石和角闪石的主要氧化物成分对 SiO₂ (%) 表现出类似全岩哈克图解的线性关系。主要造岩矿物的化学成分以及钾长石巨晶的化学成分剖面,反映出本区岩浆混合作用有化学混合的参与。黑云母的化学成分表明,本区岩浆混合为以壳幔混源为基础的混合作用。

关键词 岩浆混合作用; 岩浆混合岩; 闪长岩包体; 矿物化学; 尾亚地区

中图法分类号 P588.125

* 本文由中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室开放课题(GPMR0523)和国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2001CB409806)资助。

第一作者简介:王玉往,男,1965年生,教授级高工,在读博士生;主要从事矿床学及有关岩石学方面研究;

通讯地址:100012 北京市安定门外大羊坊北京矿产地质研究院, E-mail: yuwangw@hotmail.com; Tel.: 010-84927642

岩浆混合作用与结晶分离作用和同化混染作用一样,作为一种重要的岩浆(演化)作用类型,是造成火成岩多样性的重要原因(邓晋福等,2004)。概括起来,岩浆混合的明显特征或证据标志主要有:大量具淬火特征的包体、复合的岩石组合、不平衡的岩石和矿物结构构造、直线型变异的岩石化学组成和过渡型地球化学特征(李昌年,2002b;莫宣学等,2002;邓晋福等,2004)。多年来,在研究岩浆混合作用中,人们关注最多的是对中性岩中微粒镁铁质包体(MME)的研究,这也是前人使用最广泛的野外地质证据(Vernon *et al.*, 1988; Vernon, 1999; Didier and Barbarin, 1991; Hibbarid, 1991; 周珣若,1994; 刘春华等,1997; 江万等,1999; Silva *et al.*, 2000; 莫宣学等,2002; Perugini *et al.*, 2002; 云平等,2003; Gagnevin *et al.*, 2004; Barbarin, 2005; 陈斌等,2006; 杨策等,2006; 周勇等,2006)。相对而言,对于端元岩浆混合而成的产物——岩浆混合岩的研究则相对较少,这可能是由于在大多数火成岩区很难见到包体与岩浆混合岩皆有保留的原因。近年来,人们在新疆东昆仑和东、西准噶尔等地区相继在花岗岩类中发现暗色微粒包体,证明了在其地质过程中经历过幔源基性岩浆与壳源酸性岩浆的混合(袁万明等,2000; 刘成东等,2002; 李宗怀等,2004),但在东天山地

区尚未见诸有关岩浆混合作用的报道。本次研究发现,在新疆东天山的尾亚钒钛磁铁矿矿区,不仅花岗岩中含有大量闪长岩包体,而且可见到二端元均匀混合的产物——岩浆混合岩。初步研究表明,矿区中部的石英二长闪长岩体的岩相学和矿物化学成分与该岩浆混合岩基本相同,因此该岩体很可能属岩浆混合成因。

1 地质背景

尾亚钒钛磁铁矿矿区地处东天山造山带东段的中天山地块(也称中天山古陆)。矿区南部为尾亚环形复式岩株(图1)。据李嵩龄和冯新昌(1997)研究,该复式岩株由内环和外环构成。内环为环形山超单元,面积77km²,由老至新为由石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、花岗岩4个单元组成,分别占总面积的22.1%、7.8%、62.3%和7.8%,同位素年龄255.4~228.7Ma。外环为尾亚超单元,总面积78km²,从早到晚由碱性辉长岩、石英二长闪长岩、石英正长岩、碱长花岗岩和斑状钾长花岗岩5个单元组成,其中石英正长岩单元构成主侵入体,占总面积的97%,其它单元所占

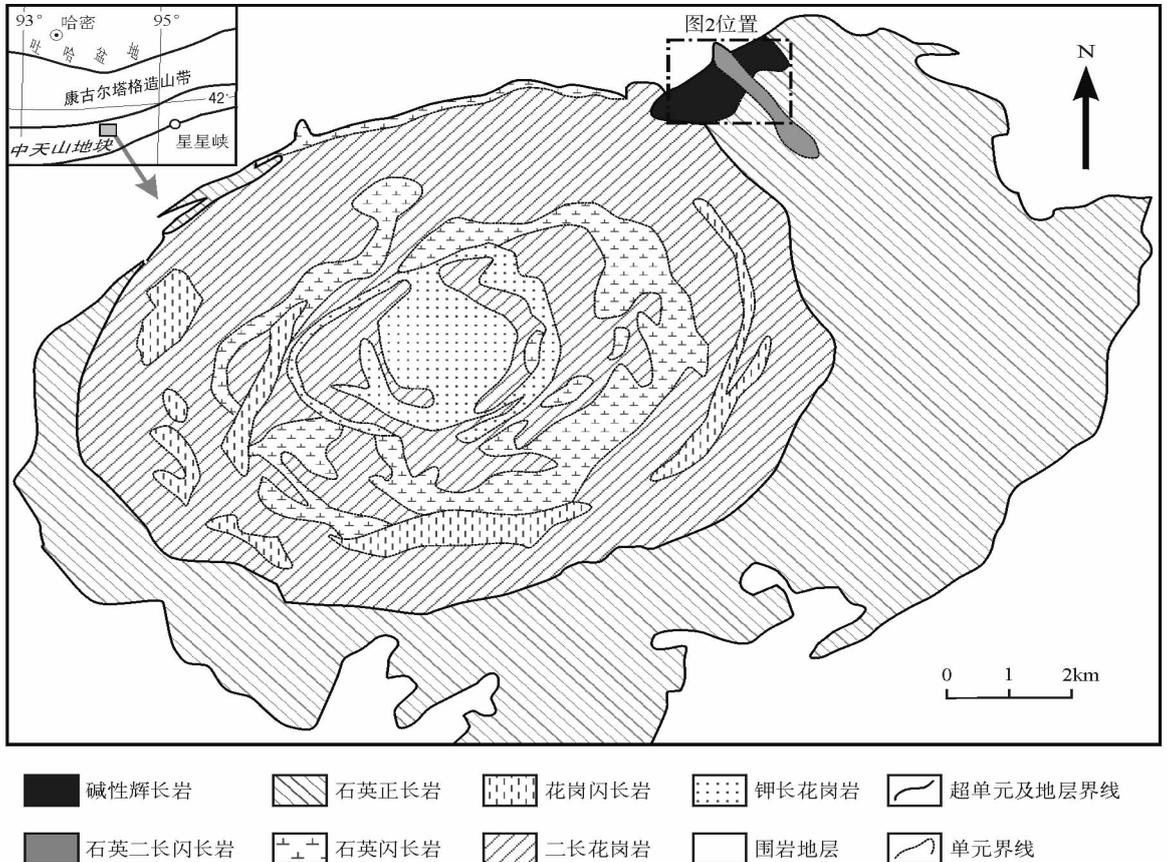


图1 尾亚复式岩体地质略图(据李嵩龄和冯新昌,1997 修改)

Fig.1 Geological sketch map of the Weiya complex rockbody (Modified after Li and Feng, 1997)

极少。Zhang *et al.* (2005) 对外环石英正长岩单颗粒锆石 SHRIMP 定年年龄为 $246 \pm 6\text{Ma}$; 笔者对矿区石英正长岩和花岗岩分别做单颗粒锆石 U-Pb 等时线年龄为 $257.4 \pm 5.2\text{Ma}$ 和 $253.9 \pm 0.5\text{Ma}$ (王京彬和王玉往, 2006)。

尾亚矿区位于尾亚环形复式岩株的北侧, 属尾亚超单元 (外环) 的一部分。矿区广泛发育主要五大类岩石 (图 2): 含钽钛磁铁矿的镁铁~超镁铁杂岩、矿区外围的肉红色花岗岩和石英正长岩、呈脉状产出的闪长岩, 以及矿区中央的石英二长闪长 (斑) 岩。矿区范围内未见大规模的闪长岩体。

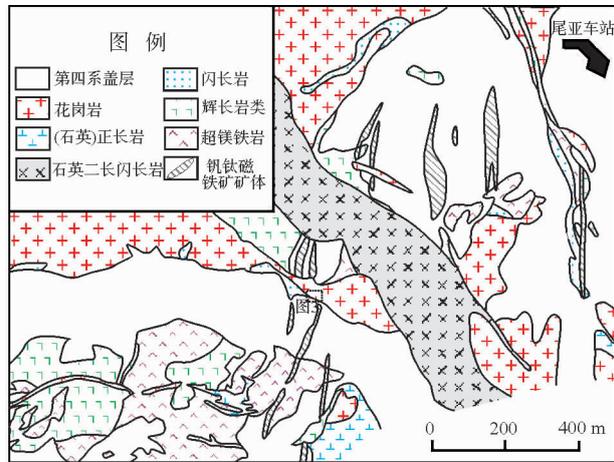


图 2 尾亚矿区地质略图 (据王玉往等, 2005 修改)

Fig. 2 Geological sketch map of the Weiya area (Modified after Wang *et al.*, 2005)

2 岩浆混合的野外地质证据

岩浆混合作用发现于尾亚矿区, 与之有关的岩石有为花岗岩、闪长岩和石英二长闪长岩。

2.1 花岗岩与闪长岩的接触关系

闪长岩一般呈不规则脉状产于花岗岩中, 但也有被花岗岩枝穿插现象。二者的接触关系表现为以下几种形式:

(1) 肉红色花岗岩中含有暗色闪长质微粒包体, 见于矿区中部石英二长闪长岩体的南侧。闪长岩包体呈 2~20cm 的球状、不规则椭球状, 最大可见 60cm, 多与寄主岩石呈明显截然界线 (图 3a, 下部)。

(2) 闪长岩中包裹肉红色花岗岩 (图 3a, 上部)。花岗岩包体亦呈 2~20cm 的球状、不规则椭球状, 与寄主岩石呈明显截然界线。

(3) 暗色闪长质岩石与花岗岩呈相互穿插和过渡 (图 3b), 并互相渗透, 界线模糊, 具不均匀的结构构造。有时二者之间可形成 0.5~1m 宽的“过渡带”, 岩石的结构构造均匀, 近乎均一, 称“岩浆混合岩” (图 3c, 3d), 成分相当于石英二长闪长岩。

2.2 石英二长闪长岩体的特征

石英二长闪长岩体呈北西走向横亘于矿区中央, 长约 2km, 宽 0.30~0.5km, 地表呈不规则椭圆形。该岩体可切穿矿区其他所有岩浆岩体, 为矿区最晚形成。岩体基本由斑状石英二长闪长岩组成, 岩体边部粒度稍细, 并可见闪长岩微粒包体。包体呈几~几十 cm 的不规则椭球或枕状, 粒度较寄主岩石细的多。包体可发生塑性变形; 部分边部变细具淬火特征; 局部与寄主岩石呈过渡和相互渗透, 界线可从明显到模糊, 包体解体后可呈云雾状散布于花岗岩中。

值得注意的是, 该岩体含有较多的肉红色碱性长石斑晶, 斑晶周围常有白色的斜长石环边发育。基质总体呈灰白色, 含较多暗色矿物 (角闪石和黑云母为主) 组成的聚晶团块 (团斑)。这种结构构造与前述岩浆混合岩极为相似 (图 4), 矿物成分和镜下结构也基本相同 (详见后述), 表明二者可能为同一岩石类型。

3 岩相学特征

3.1 花岗岩

岩石为肉红色, 中-粗粒似斑状结构。“斑晶”可占 10%~40%, 一般 3~10mm, 钾长石可呈“巨斑” (最大可达 20mm), 半自型~他型, 主要是微斜条纹长石, 常具更长环斑结构 (图 3 标本 W4916-22), 沿环边有条片状黑云母分布; 其次有少量石英及更长石斑晶。“基质”呈小于 3mm 的连续不等粒状, 角闪石、黑云母等常局部形成聚晶团块 (团斑) (图 5a), 表明受到过偏基性岩石的渗透。总体矿物成分为: 条纹长石 30%~40%; 石英 15%~30%; 更长石 (An₁₃~30) 20%~25%, 常具环带 (内核偏基性, An 在 22~30, 边缘 An 多 < 15); 褐红色黑云母 (5%~10%)、绿色普通角闪石 (5%~10%) 和暗色矿物 (磁铁矿为主, < 5%), 另有数量不等 (< 5%) 的微量副矿物榍石、磷灰石、锆石等。

3.2 闪长岩

由于多呈微粒包体或与花岗岩接触, 亦常具混杂结构。较新鲜部位岩石为浅灰色细粒结构, 一般 < 1mm, 且多 < 0.5mm, 呈似交织状或似辉绿到间粒结构。近接触带含斑晶, 可达 2~5mm, 成分由角闪石集合体、浑圆状溶蚀石英 (捕虏晶, 外围有时具黑云母鳞片状镶边) 组成, 可含少量的条纹长石斑晶 (外围具钠更长石环边, 与花岗岩相似)。有时还见一种钾长石“变”斑晶, 呈不规则外形, 含有大量黑云母、角闪石和中长石微细包晶 (图 5b), 应为岩浆混合时后期生长形成。“基质”中亦常见类似花岗岩的角闪石、黑云母等聚晶团块。主要矿物为: 更长~中长石 40%~45%, 绿色普通角闪石 30%~35%, 黑云母 10%~15%, 石英 5%~10%, 板钛矿 5%±。少~微量矿物有钾长石、铁矿物、锆石、磷灰石 (常呈针状

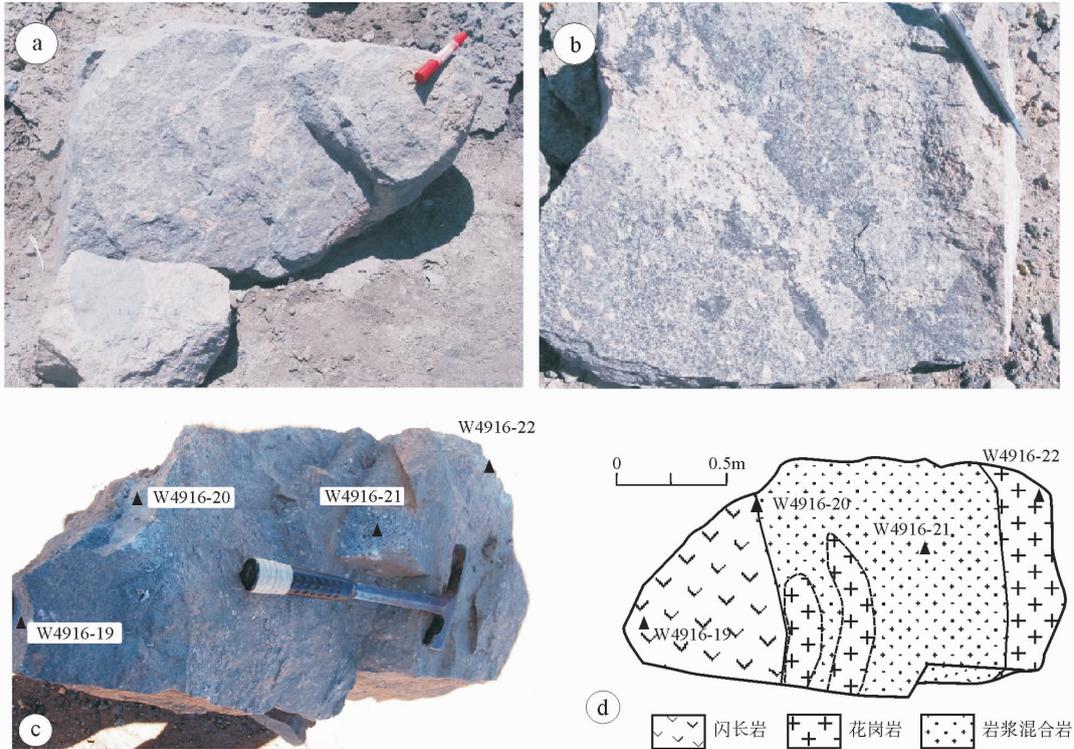


图3 花岗岩与闪长岩接触的照片和素描

a-闪长岩(灰色)中包裹肉红色花岗岩(上部标本)与花岗岩包裹闪长岩(下部标本); b-花岗岩(肉红色~灰白色)与闪长岩(灰色)呈不规则边缘接触,互相渗透,界线模糊; c-闪长岩(左侧灰色)、花岗岩(肉红色,右侧)之间形成约0.7m宽的“过渡带”(即岩浆混合岩); d为照片c的素描图。

Fig. 3 Photographs showing contact and hybrid between granite and diorite

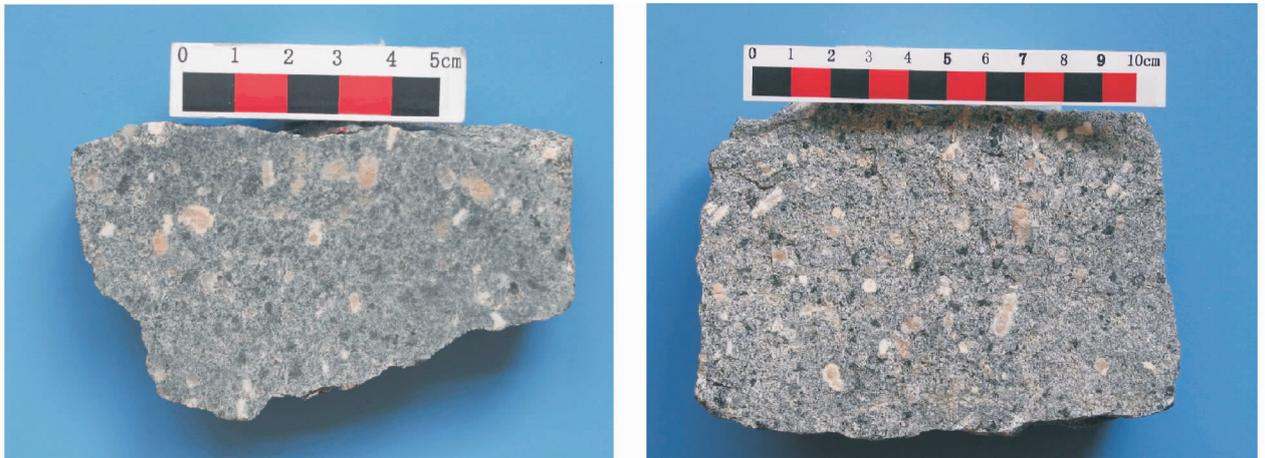


图4 岩浆混合岩(W4916-21a)与中部岩体的石英二长闪长(斑)岩(W4916-11)照片对比
二者均含有具斜长石环斑的碱性长石斑晶(肉红色)和暗色矿物集合体组成的团斑

Fig. 4 Photographs showing comparison between magma-mixed rock (sample W4916-21a) and quartz monzodiorite (sample W4916-11) of central rockbody

包于长石中)。近接触带粒度较细,石英增多,角闪石变少。

3.3 岩浆混合岩

其结构和成分相当于石英二长闪长(斑)岩。岩石为灰白

色,含肉红色钾长石斑晶(可具更长环斑结构,见图4的标本W4916-21a)。镜下呈斑状结构,斑晶2~15mm,为正长石、条纹长石和石英,偶有更长石;条纹长石多“聚斑”状,边缘参差状,有斜长石、石英再生晶,构成更长环斑结构(图5c);长石和石英周围常有角闪石、黑云母的条片状镶边。基质为不等粒结构,与

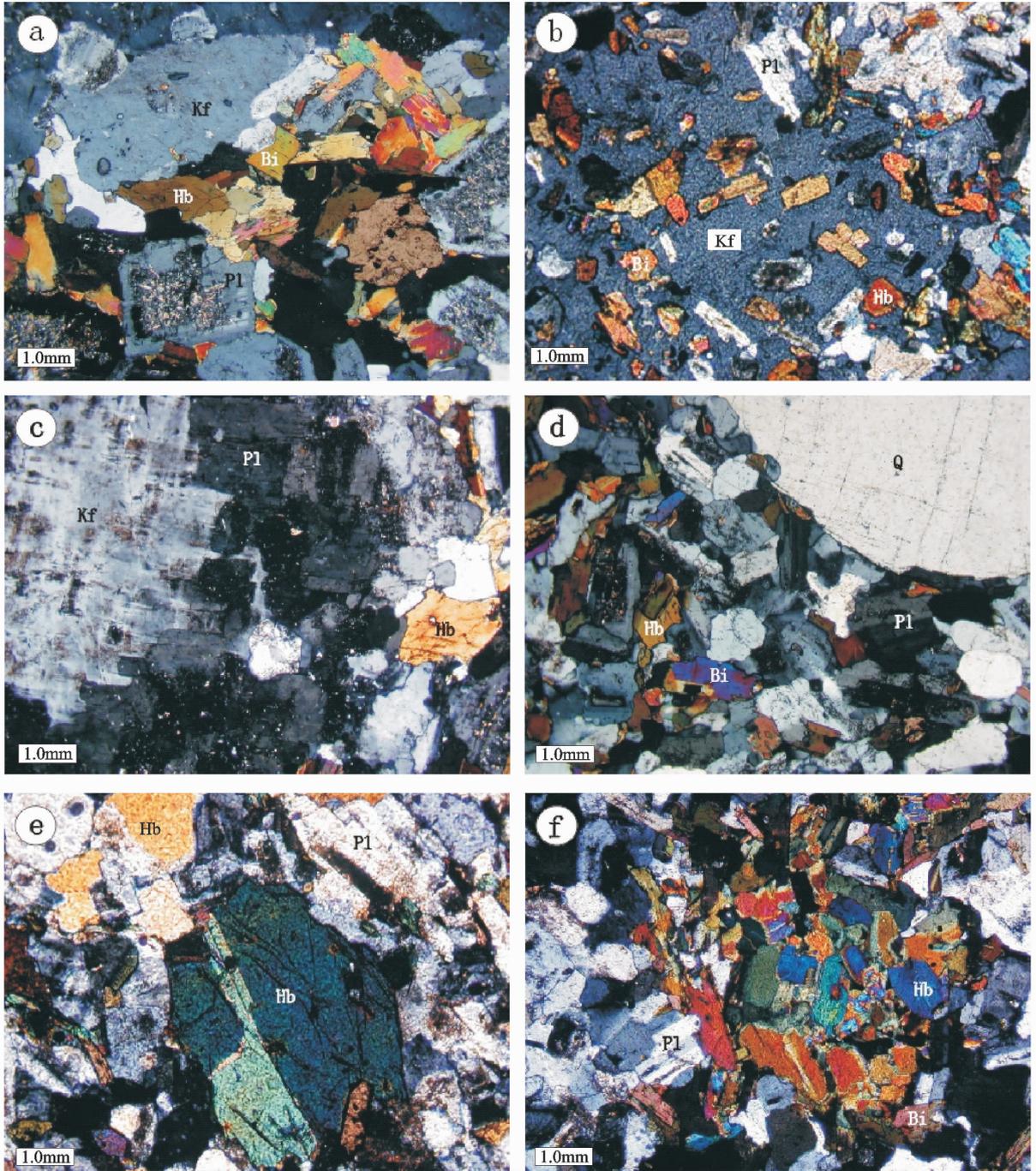


图5 尾亚岩浆混合作用各种岩石的镜下照片

a-肉红色花岗岩的似斑状结构,斑晶为条纹长石(Kf),基质中角闪石(Hb)、黑云母(Bi)呈聚晶团块状,斜长石(Pl)具溶蚀环带; b-闪长岩包体中钾长石(Kf)“变斑晶”呈不规则外形,含有黑云母、角闪石和中长石(Pl)的微细包晶; c-岩浆混合岩中钾长石巨斑的更长环斑结构,边缘为更长石(Pl)的再生晶; d-石英二长闪长岩体中石英(Q)斑晶呈浑圆状,注意基质中斜长石为简单双晶的钠长石; e-石英二长闪长岩体中的角闪石斑晶; f-石英二长闪长岩体基质中仍可见角闪石、黑云母等矿物的聚晶团块。矿物代号: Kf-钾长石,Pl-斜长石,Hb-角闪石,Bi-黑云母,Q-石英

Fig.5 Microphotographs showing rock textures related to magma mixing

a-porphyritic-oid texture of incarnadine granite. Phenocryst is perthite (Kf). Hornblende (Hb) and biotite (Bi) in the matrix exhibits glomerogranular lump, and plagioclase (Pl) develops corrosion zoning; b-potassium feldspar (Kf) “porphyroblast” in diorite enclave presents irregular shape and contains biotite, hornblende and andesine (Pl) microlite; c-rapakivi texture of potassium feldspar in magma - mixed rock with cincture of regenerated oligoclase (Pl); d-quartz (Q) phenocryst in quartz monzodiorite is roundish shape, noticing the plagioclase in matrix is albite with simple twin; e-hornblende phenocryst in quartz monzodiorite; f-glomerogranular lump of hornblende and biotite is still seen in the matrix of quartz monzodiorite. Minerals abbreviation: Kf-potassium feldspar, Pl-plagioclase, Hb-hornblende, Bi-biotite, Q-quartz.

闪长岩相似,一般0.5~2mm,斜长石牌号范围较大,An可从5~50。主要组成矿物为斜长石35%~40%,钾长石10%~15%,石英10%~15%,黑云母10%~15%,普通角闪石10%~15%,少量板钛矿、铁矿物;微量针状磷灰石、锆石。

3.4 矿区中部的石英二长闪长(斑)岩体

岩石为灰白色,含肉红色钾长石斑晶(图4中标本W4916-11)。镜下与花岗岩与闪长岩混合而成的岩浆混合岩极为相似。岩石亦呈斑状结构,斑晶10%~15%,3~10mm(手标本可达15mm),多为“聚斑”,主要有条纹长石和石英。条纹长石亦具更长环斑结构,石英多浑圆状(图5d),有时可含少量角闪石(图5e)。基质一般为细粒结构,多<1mm,局部可呈文象结构,亦含少量“似斑状”聚晶团块(角闪石为主,含黑云母和长石,图5e),长石常有糙化。主要由碱性长石(微斜长石为主,少量正长石、钠长石,图5f)5%~15%、斜长石(钠-更-中长石)35%~45%、石英5%~20%、角闪石10%~20%、黑云母5%~15%,以及少量~微量楣石、磷灰石、锆石等组成。

综上所述,尾亚矿区岩浆混合作用的岩相学证据主要为:

(1)由花岗岩和闪长岩混合而成的岩浆混合岩结构均匀,成分相当于石英二长闪长岩,其矿物组成和结构与矿区中部石英二长闪长岩体基本相同;

(2)上述各类(参与岩浆混合作用)岩石发育明显的结晶不平衡结构:

① 各类岩石均见有钾长石的更长环斑结构。对于花岗岩而言,钾长石为其本身固有,发生岩浆混合时由于富钙的基性组分加入到花岗岩质岩浆中,使更长石沿钾长石边缘生长和交代,形成更长环边;对于闪长岩包体,钾长石为岩浆混合时酸性组分注入到闪长质岩浆被捕获形成;作为二者混合产物的岩浆混合岩和石英二长闪长岩(体),则为混合过程中不完全均一和不平衡作用造成。下面不平衡结构亦与钾长石环斑结构的形成相似。

② 斑晶的环边结构,如钾长石、斜长石、石英周围常有条片状黑云母、角闪石包围。

③ 石英斑晶被溶蚀成浑圆状;斜长石多具有熔蚀和被交代的环带和核心。

④ 均发育由黑云母、角闪石等暗色矿物组成的聚晶团块。

⑤ 发育不平衡的矿物组合,如同一标本中斜长石可见钠长石、更长石、中长石共存,钾长石可有正长石、微斜长石、条纹长石同时产出。

⑥ 从闪长质包体到岩浆混合岩、石英二长闪长岩,再到花岗岩,岩石粒度依次明显变粗,前者常出现针状的磷灰石、角闪石和楣石包晶。

⑦ 岩浆混合岩中出现钾长石“变”斑晶,内含有大量后期生长时捕虏的黑云母、角闪石和斜长石微细包晶。

4 矿物化学特征

对上述4类与岩浆混合作用有关的岩石,经过详细的显微镜研究,系统选择了钾长石、斜长石、角闪石和黑云母4种矿物,挑选具代表性的颗粒进行矿物成分研究。矿物分析在中国科学院矿产资源重点实验室 Cameca-SX51 电子探针仪器上完成。分析条件为:加速电压15kv,束流20nA,采用氧化物和硅酸盐标样,检测限>0.01%,精度>0.1%。分析结果见表1~表4。

4.1 斜长石

各类岩石中斜长石的化学成分如表1。

本区各类岩石中无论基性端元的闪长岩还是酸性端元的花岗岩,无论斑晶还是基质,多数斜长石为更长石,牌号一般在20~26。其中闪长岩包体较低,可在20±。另外,所分析样品中有1件(W5610-18)为钠长石,为斜长石斑晶的边缘,2件为中长石,分别是闪长岩包体中钾长石变斑晶中的包晶和石英二长闪长岩基质中环带状斜长石的核部。仔细分析对比可见,同一标本中,斑晶比基质更趋酸性(An较低)。

由于斜长石中Ab与An为类质同相的固溶体连续系列,其有关化学参数 Al_2O_3 、CaO、 Na_2O ,以及An、Ab等均表现出对 SiO_2 的线性关系,而Or则不具上述特征(图6)。与全岩Hake图解相似,这种线性关系正是岩浆混合作用所应具有的特点。同时,石英二长闪长岩的斜长石成分与岩浆混合岩中斜长石成分相似,投影点靠近,表明二者具同缘关系。

4.2 钾长石

各类岩石中钾长石成分如表2。

本区所有钾长石均属富钾的钾长石,钾长石分子(Or)多在90%以上,钠长石分子较低(An多在10%以下),含钙长石分子极低。但不同类型岩石中的钾长石成分仍表现出一定的差异性。

花岗岩和闪长包体中钾长石更为富钾,Or分子明显高于岩浆混合岩和石英二长闪长岩。说明前者更接近端元岩浆结晶成分,而后者则相对受到更强的化学混染,有更多的斜长石成分加入。尤其是石英二长闪长岩中的钾长石,由于受到大面积的岩浆混合和相对较长时间的结晶过程,其钾长石的混染程度更强一些,甚至含一定数量的钙长石分子(An可达0.31%)。对于巨斑状钾长石似乎更容易受到混染,斑晶边缘较内部Or分子明显降低,而钠长石分子升高,表明受到了岩浆混合作用。

为了进一步研究钾长石斑晶的成分变化,对岩浆混合岩中(标本W4916-21a)的钾长石巨斑及其周围的更长石环斑作成分剖面测定,主要有关化学成分如图7。

由图7可见:① 钾长石巨晶周围可含有细粒钾长石

表2 尾亚岩浆混合各类岩石的钾长石成分(%)

Table 2 Selected electron microprobe analyses (%) of potassium feldspar (Kf) in different rocks related magma mixing

岩石类型	闪长岩包体	岩浆混合岩					石英二长闪长岩体					花岗岩		
样品号	W5610-16	W4916-21a					W4916-12(岩体边部)		W5610-18(岩体中部)			W2728-12		
矿物特征	基质中	基质中	巨斑1 中部	巨斑1 边部	巨斑 2a	巨斑 2b	基质微 斜长石	巨斑晶 中部	巨斑晶 边部	基质正 长石	斑晶 a	斑晶 b	斑晶条 纹长石	基质微 斜长石
SiO ₂	62.65	63.96	63.86	63.77	63.82	64.14	63.57	64.12	64.29	64.24	62.49	62.60	63.54	64.64
TiO ₂	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.02	0.00	0.06	0.08	0.04	0.01
Al ₂ O ₃	18.87	18.75	18.73	18.97	18.83	18.81	18.84	18.55	18.82	18.93	18.76	18.70	18.68	18.55
MgO	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.03
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.06	0.01	0.04	0.05	0.01	0.00
MnO	0.00	0.01	0.06	0.01	0.03	0.01	0.00	0.00	0.06	0.06	0.08	0.04	0.03	0.03
FeO	0.18	0.09	0.01	0.04	0.01	0.02	0.04	0.06	0.09	0.01	0.03	0.06	0.00	0.07
Na ₂ O	0.34	0.80	0.45	1.16	0.98	0.88	1.04	0.71	0.88	0.85	0.54	0.59	0.80	0.54
K ₂ O	15.95	15.54	16.19	15.07	15.44	15.60	15.12	15.60	15.36	15.73	15.82	15.80	15.45	15.97
Total	97.98	99.18	99.30	99.03	99.11	99.46	98.65	99.14	99.58	99.83	97.81	97.92	98.57	99.84
Ab	3.11	7.23	4.02	10.48	8.78	7.86	9.48	6.51	7.97	7.58	4.89	5.33	7.34	4.88
Or	96.89	92.77	95.98	89.52	91.22	92.14	90.52	93.37	91.72	92.38	94.93	94.40	92.63	95.12
An	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.31	0.04	0.19	0.27	0.03	0.00

表3 尾亚岩浆混合各类岩石的角闪石成分(%)

Table 3 Selected electron microprobe analyses (%) of hornblende in different rocks related magma mixing

岩石类型	闪长岩包体				岩浆混合岩	石英二长闪长岩体					花岗岩	
样品号	W5610-11b		W5610-16		W4916-21a	W4916-12 (岩体边部)		W5610-18 (岩体中部)			W2728-12	
矿物特征	聚晶团 块中	基质中	基质分 散状	基质聚 晶中	钾长石巨斑 旁聚晶团块	基质	聚晶团 块中	石英 环边	聚晶 团块	钾长石中 包晶	基质	钾长石 环边
SiO ₂	48.42	47.76	47.65	48.81	46.85	47.08	45.38	46.01	43.96	45.34	46.45	45.17
TiO ₂	0.67	0.68	1.04	0.78	1.11	0.70	1.50	1.23	1.78	1.00	1.21	1.18
Al ₂ O ₃	5.45	5.99	6.41	5.54	6.70	6.68	7.66	7.11	8.28	7.72	7.05	7.68
Cr ₂ O ₃	0.02	0.31	0.05	0.31	0.11	0.05	0.07	0.02	0.00	0.06	0.00	0.02
MgO	13.97	13.73	13.35	13.76	12.14	12.06	11.37	11.77	10.80	11.34	11.77	11.38
CaO	12.63	12.08	12.17	12.54	12.35	12.04	11.93	12.15	12.18	12.10	11.94	11.85
MnO	0.35	0.41	0.35	0.37	0.39	0.44	0.38	0.36	0.45	0.42	0.46	0.33
FeO	13.86	14.26	14.45	14.09	15.67	16.37	16.94	16.78	17.78	16.82	16.48	16.89
NiO	0.00	0.03	0.03	0.04	0.00	0.00	0.05	0.00	0.02	0.03	0.03	0.00
Na ₂ O	0.93	1.04	1.00	0.86	0.94	1.17	1.22	1.05	1.52	1.22	1.11	1.31
K ₂ O	0.56	0.57	0.67	0.55	0.64	0.68	0.75	0.86	0.88	0.84	0.76	0.93
H ₂ O	2.02	2.01	2.02	2.04	2.00	1.99	1.99	1.99	1.98	1.98	1.99	1.95
Cl						0.04					0.04	0.10
Total	98.90	98.87	99.19	99.69	98.90	99.30	99.24	99.33	99.62	98.87	99.30	98.81
(Fe + Mn)/ (Fe + Mn + Mg)	36.34	37.49	38.35	37.10	42.61	43.89	46.08	44.97	48.64	46.04	44.68	45.91

表4 尾亚岩浆混合各类岩石的黑云母成分(%)

Table 4 Selected electron microprobe analyses (%) of biotite in different rocks related magma mixing

岩石类型	闪长岩包体			岩浆混合岩		石英二长闪长岩体				花岗岩	
	样品号	W5610-11b	W5610-16	W4916-21a		W4916-12 (岩体边部)		W5610-18 (岩体中部)		W2728-12	
矿物特征	基质	钾长石 中包晶	基质中 分散	基质中	环斑旁	基质	聚晶团 块中	聚晶团 块中	钾长石 中包裹	基质	钾长石 环边
SiO ₂	36.98	37.32	36.97	36.78	37.36	37.75	37.61	37.06	36.79	37.24	37.17
TiO ₂	3.26	3.40	3.28	3.25	2.94	2.78	2.34	2.40	3.40	3.13	2.35
Al ₂ O ₃	14.59	14.14	14.54	14.91	14.76	14.58	14.74	14.29	14.09	14.18	14.20
Cr ₂ O ₃	0.01	0.04	0.15	0.01	0.08	0.05	0.05	0.03	0.01	0.14	0.13
MgO	12.79	13.37	12.56	12.01	12.45	12.76	12.74	12.98	11.96	12.35	12.87
CaO	0.00	0.00	0.04	0.00	0.05	0.00	0.02	0.00	0.00	0.08	0.07
MnO	0.19	0.28	0.20	0.20	0.19	0.30	0.34	0.29	0.21	0.27	0.35
FeO	16.91	17.26	17.11	18.53	18.50	18.44	18.01	19.03	18.45	18.81	18.40
NiO	0.07	0.04	0.03	0.01	0.04	0.00	0.02	0.04	0.00	0.04	0.04
Na ₂ O	0.09	0.10	0.12	0.12	0.06	0.10	0.08	0.10	0.09	0.09	0.16
K ₂ O	9.17	8.94	9.45	9.63	9.61	9.45	8.65	9.68	9.42	9.15	8.70
H ₂ O	3.93	3.96	3.93	3.94	3.97	3.99	3.95	3.95	3.90	3.95	3.92
Total	97.99	98.86	98.36	99.39	100.02	100.20	98.54	99.83	98.32	99.44	98.37
(Fe + Mn) / (Fe + Mn + Mg)	42.87	42.40	43.62	46.68	45.72	45.18	44.69	45.51	46.67	46.43	44.97

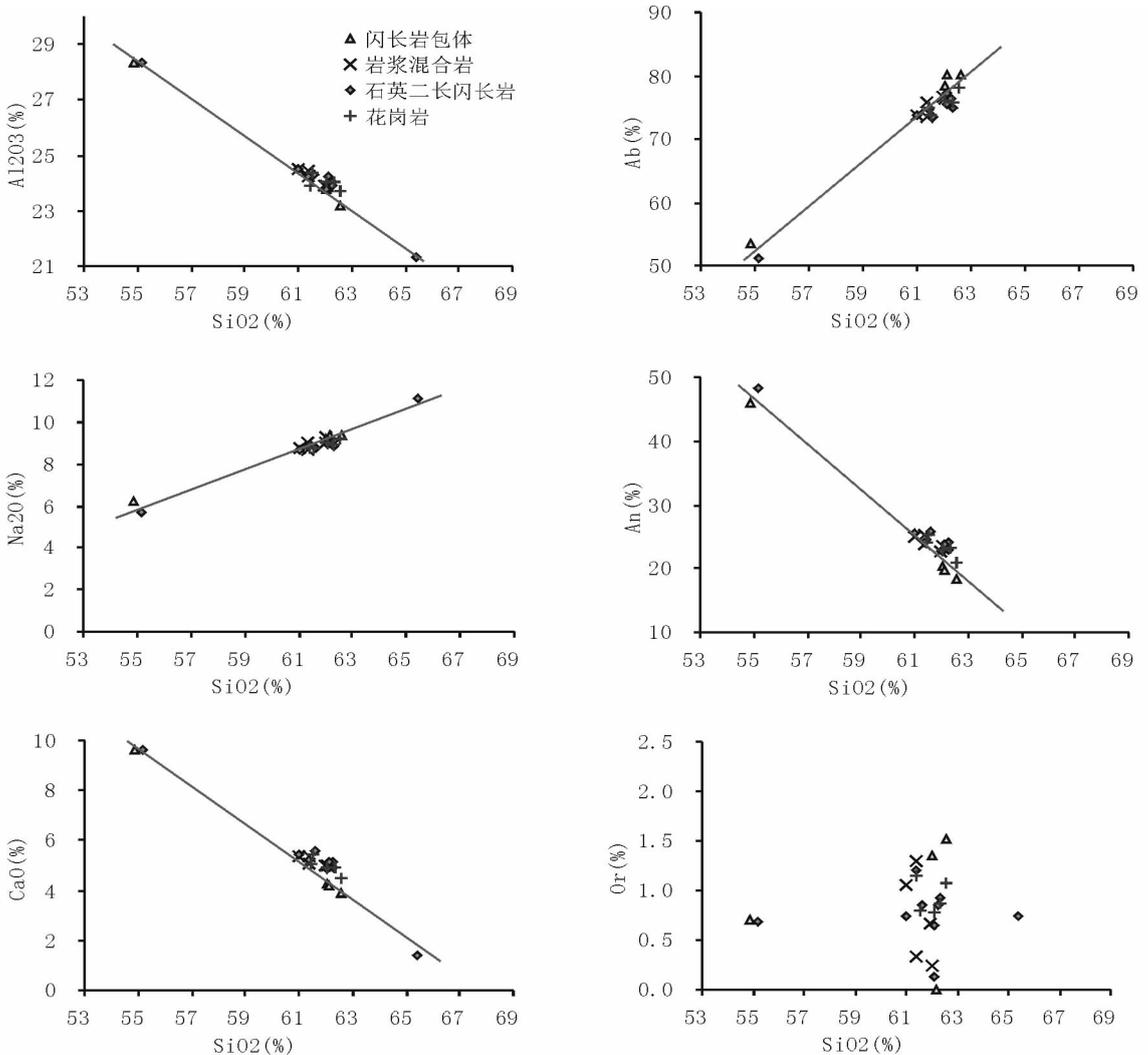


图6 斜长石 Al₂O₃、Na₂O、CaO、Ab、An 和 Or 对 SiO₂(%) 的关系图解

Fig.6 Diagrams of Al₂O₃, Na₂O, CaO, Ab, An and Or vs. SiO₂(%) for plagioclases

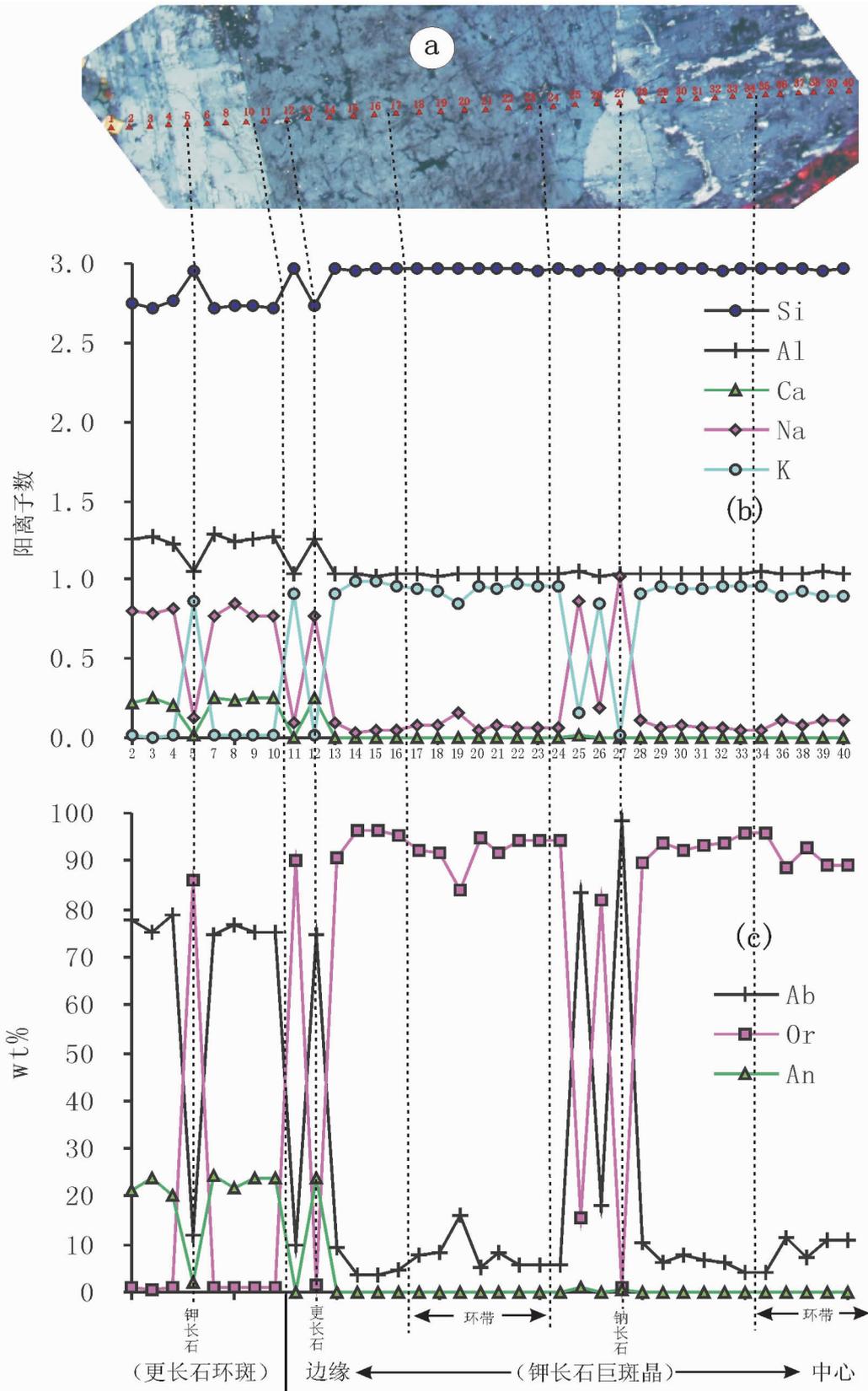


图7 钾长石巨斑及其周围的更长石环斑成分剖面

a 为钾长石巨斑晶剖面成分分析位置; b 为主要阳离子数(以 O=8 计算)值; c 为计算的钠长石(Ab)、钾长石(Or)和钙长石(An)重量百分数。

Fig.7 Chemical compositions of Kf huge phenocryst and surrounding plagioclase section

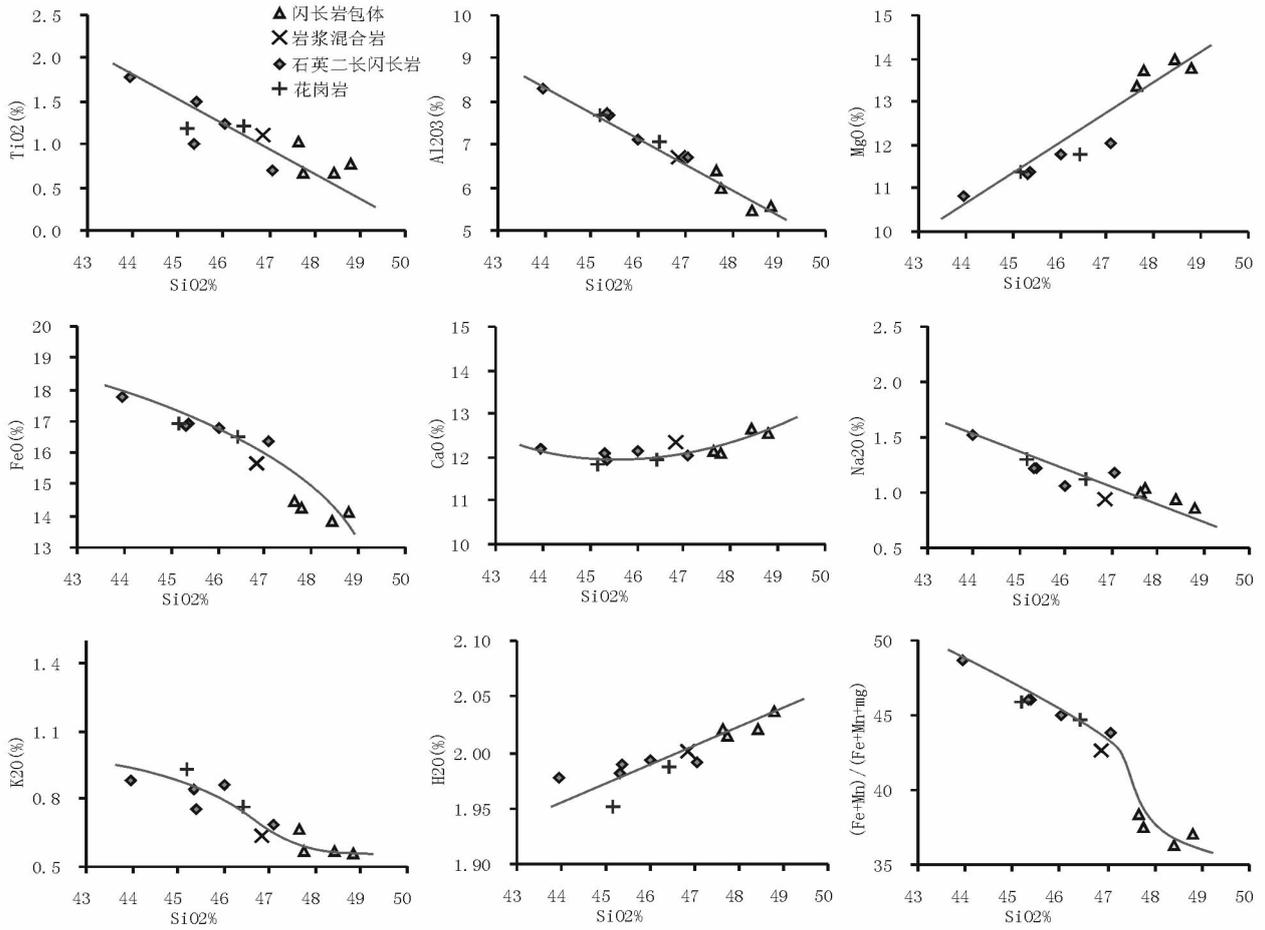


图8 角闪石的主要氧化物化学成分对 SiO₂ (%) 的关系图解

Fig.8 Diagrams of main oxides vs. SiO₂ (%) from hornblende

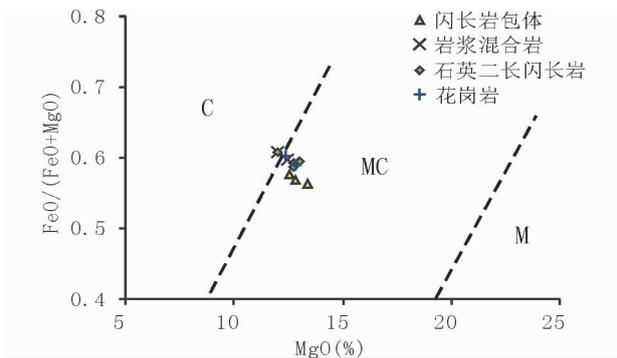


图9 黑云母成分与物质来源相关图

C-壳源区; MC-壳幔混源区; M-幔源区

Fig.9 Relations between composition of biotite and material source

时存在的现象并不多见。在大多数地区,人们讨论岩浆混合作用的证据时常常只针对暗色微粒包体及其寄主的花岗质岩石,当其岩相学、岩石学、地球化学显示岩浆混合作用时,即证明寄主岩石是由岩浆混合作用形成 (Vernon *et al.*, 1988; 刘春华等,1997; 梁明宏等,2002; 苑凤华等,2002; 云平等,2003)。其实,岩浆混合成因的岩浆岩在自然界中广泛存在 (Vernon, 1999; Poli and Tommasini, 1991; Poli, 1992; Thoma and Sinha, 1999; Waight *et al.*, 2000; Gagnevin *et al.*, 2004; Barbarin, 2005)。李昌年等 (1997) 首先报道了我国江西横峰县港边岩体属典型的岩浆混合杂岩体,并称之为“浆混岩”,对其作了深入的岩石学和地球化学研究 (李昌年等, 1997; 李昌年, 1999; 李昌年, 2002a; 唐春花等, 2004; 李昌年和廖群安, 2006), 但未说明该区是否存在暗色微粒包体证据。

尾亚地区的野外地质证据直接证明了岩浆混合作用的存在,酸性的花岗岩不仅与闪长岩石接触和互相包裹,岩浆混合作用中常见的野外产状 (如淬火边、相互包裹等) 和岩石结构构造等岩相学特征 (如钾长石的更长环斑结构、磷灰石等矿物的针状结构、暗色矿物的聚晶结构等) 在尾亚均已

5 讨论与结论

5.1 尾亚矿区石英二长闪长岩体为岩浆混合作用形成

自然界岩浆混合作用中暗色微粒包体与岩浆混合岩同

发现,而且还形成了二端元之间的混合和过渡相岩石—岩浆混合岩,其与尾亚矿区中部石英二长闪长(斑)岩体的宏观、微观(显微镜下)特征和矿物成分基本相同,直接证明了石英二长闪长岩体确系由花岗质岩浆和闪长质岩浆混合而成。

5.2 尾亚地区岩浆混合有化学混合作用参与

首先,本区岩浆混合作用过程中,出现大量的矿物组合和结构不平衡现象,有些不平衡现象主要是化学混合作用造成的。如斜长石常具有基性组分的溶蚀核和酸性组分环带,表明具基性熔蚀核的富 An 斜长石是混合前出现在较基性岩浆(闪长质)中的斑晶残余,该基性岩浆与偏酸性(花岗质)岩浆发生反应,从而使其熔蚀(Zorpi *et al.*, 1991)。巨晶的钾长石颗粒包裹角闪石、斜长石、黑云母等,表明偏基性岩浆(闪长质)或正在混合的岩浆(石英二长闪长质)骤冷产生很多小颗粒角闪石、斜长石、黑云母后缓慢冷却至外部环境温度,残余熔体在接近液相线温度形成巨大的钾长石、斜长石晶体,嵌晶状包裹着早期形成的晶体(Baxter and Feely, 2002)。钾长石巨晶周围常被角闪石、黑云母等包裹。按照鲍文反应序列,钾长石的结晶应晚于角闪石,而角闪石、黑云母围绕熔蚀的碱性长石生长反映了基性岩浆的加入,岩浆混合作用发生于偏基性岩浆与正在结晶出碱性长石的偏酸性岩浆之间(Jannousék 等,2000)。

其次,前已讨论,主要造岩矿物的化学成分特点,亦反映出岩浆化学混合作用的存在。这些化学混合特征表现在:① 闪长岩包体中的矿物成分更富含 Ca、Mg 等组分,如斜长石牌号较低;角闪石富 Mg 而贫 Al、Fe、K、Na;黑云母富 Mg 而贫 Fe 等。另一端元岩石—花岗岩中的钾长石则富 K(或 Or 分子)。岩浆混合岩中的矿物成分则变化范围较大,或介于端元岩石的矿物成分之间。② 具更长环斑结构的钾长石巨斑晶,其边缘的化学成分变化明显,表现为 Or 的降低和 Ab 的升高,说明被 Ab 分子交代,发生了化学反应。③ 端元岩石与岩浆混合岩(和石英二长闪长岩)中斜长石、角闪石矿物的主要氧化物化学成分对 SiO₂ 表现出明显的线性关系,是化学混合的直接表现。

5.3 尾亚地区岩浆混合作用的地质意义

首先,岩浆化学混合是一种完全的岩浆混合。由于其混合物中不保存端元岩浆的残余物,在岩石的矿物成分和结构构造上具有均一性,因此很难识别化学混合作用的存在。目前在岩浆混合研究领域中,有关化学混合的研究尚显不足(李昌年,2002b)。尾亚地区闪长岩包体与岩浆混合岩的共存,以及它们所表现出的化学混合特征,将有力推动岩浆化学混合作用的研究。

其次,将岩浆混合成因的花岗岩类岩石及其端元组分当作探测壳幔深部过程的探针,认真加以研究,对于理解壳幔相互作用及大陆地壳生长这一基本地质问题是很有意义的。新疆北部后碰撞阶段岩浆作用发育。近年来,人们在新疆东

昆仑和准噶尔地区已发现在花岗岩类中存在暗色微粒包体,证明了在其地质过程中经历过幔源基性岩浆与壳源酸性岩浆的混合(刘成东等,2002;李宗怀等,2004)。尾亚地区各类参与岩浆混合作用岩石的岩相学和矿物学特征,特别是黑云母的化学成分特征,初步表明了在天山地区存在的岩浆混合作用同样是壳幔相互作用的结果。

致谢 野外工作中得到新疆有色 704 地质队秦全新高级工程师及其尾亚项目组的大力支持,中国有色地质调查中心高珍全博士、中国科学院地质与地球物理研究所程春博士参加了部分野外工作。感谢与中国地质大学罗照华教授、莫宣学教授的有益讨论。

References

- Barbarin B. 2005. Mafic magmatic enclaves and mafic rocks associated with some granitoids of the central Sierra Nevada batholith, California; mature, origin, and relations with the hosts. *Lithos*, 80: 155 - 177
- Baxter S and Feely M. 2002. Magma mixing and mingling textures in granitoids: examples from the Galway Granite, Connemara, Ireland. *Mineralogy and Petrology*, 76 (1 - 2): 63 - 74
- Chen B, Lin CQ, Tian W. 2006. Magma mixing between mantle and crustal-derived melts in the process of Mesozoic magmatism, Taihangshan; constraints from petrology and geochemistry. *Earth Science Frontiers*, 13 (2): 140 - 147 (in Chinese with English abstract)
- Deng JF, Luo ZH, Su SG, MO XX, Yu BS, Lai XY and Chen HW. 2004. *Petrogenesis, Tectonic Setting and Mineralization*. Beijing: Geological Publishing House, 381p (in Chinese)
- Didier J and Barbarin B. 1991. *Enclaves and Granite Petrology, Developments in Petrology*. Amsterdam: Elsevier, 625p
- Gagnevin D, Daly JS and Poli G. 2004. Petrographic, geochemical and isotopic constraints on magma dynamics and missing in the Miocene Monte Capanne monzogranite (Elba Island, Italy). *Lithos*, 78: 157 - 195
- Hibbard MJ. 1991. Textural anatomy of twelve magma-mixed granitoid system. In: Dider J, Barbarin B (eds.). *Enclaves and Granite Petrology*. Elsevier, Amsterdam, 431 - 444
- Jannousék V, Bowes D R, Colin J R *et al.* 2000. Microstructural and mineralogical evidence for limited involvement of magma mixing in the petrogenesis of a Hercynian high-K calc-alkaline intrusion; the Kozarovice granodiorite, Central Bohemian Pluton, Czech Republic. *Transactions of the Royal society of Edinburgh: Earth Sciences*, 91 (1 - 2): 15 - 26
- Jiang W, Mo XX, Zhao CH, Guo TY and Zhang SQ. 1999. Geochemistry of granitoid and mafic microgranular enclave in Gangdise belt, Qinghai-Xizang Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 15 (1): 89 - 97 (in Chinese with English abstract)
- Li CN, Xue CS, Liao QA and Zhao LZ. 1997. Petrology of Gangbian magma-Mixed complex body and their genesis, Hengfeng County, Jiangxi province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 22(3): 261 - 267 (in Chinese with English abstract)
- Li CN. 1999. Discovery for precambrian magmatic mixed zone from northeastern Jiangxi province and their geological significance. *Earth Science Frontiers*, 6 (4): 331 - 337 (in Chinese with English abstract)
- Li CN. 2002a. Regional geological survey and petrological research of the

- Gangbian magma-mixed complex from northeastern Jiangxi Province. *Geology and Mineral Resources of South China*, (3): 9 – 18 (in Chinese with English abstract)
- Li CN. 2002b. Comment on the magma mixing and their research. *Geological Science and Technology Information*, 21(4): 49 – 54 (in Chinese with English abstract)
- Li CN and Liao QA. 2006. Magmatic mixing and mingling of Precambrian Gangbian complex in northeastern Jiangxi Province and their geological significance. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 25(5): 357 – 376 (in Chinese with English abstract)
- Li SL and Feng XC. 1997. Super-unite association of Weiya, eastern Tianshan of Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 15(1): 13 – 27 (in Chinese with English abstract)
- Li ZH, Han BF, Li XZ, Du W and Yang B. 2004. Microgranular dioritic enclaves in Junggar granites and their implications for the origin and evolution of post-collisional granitic magmatism in North Xinjiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23(3): 214 – 226 (in Chinese with English abstract)
- Liang MH, Zhou XA, Gong QS and Li HL. 2002. Magma hybrid process—field evidences from Gansu Beishan mountains. *Acta Geologica Gansu*, 11(1): 44 – 49 (in Chinese with English abstract)
- Liu CD, Zhang WQ, Mo XX, Luo ZH, Yu XH, Li SW and Zhao X. 2002. Features and origin of mafic microgranular enclaves in the Yuegelu granite in the Eastern Kunlun. *Geological Bulletin of China*, 21(11): 739 – 744 (in Chinese with English abstract)
- Liu CH, Sun JG and Zheng CQ. 1997. Petrographical sign of mingling of magma of Weideshan rock body. *Liaoning Geology*, 14(2): 125 – 131 (in Chinese with English abstract)
- Mo XX, Luo ZH, Xiao QH *et al.* 2002. Cognition of magma hybrid in granites and its research methods. In: Xiao QH, Deng JF, Ma DQ *et al.* eds. *The ways of investigation on granitoids*. Beijing: Geological Publishing House. 55 – 63 (in Chinese)
- Peng HM. 1997. Geological characteristics of biotite from Yangxi granite body and their geological implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 16(3): 271 – 281 (in Chinese with English abstract)
- Perugini D, Poli G and Prosperini N. 2002. Morphometric analysis of magmatic enclaves: a tool for understanding magma vesiculation and ascent. *Lithos*, 61(3 – 4): 225 – 235
- Poli G. 1992. Geochemistry of Tuscan Archipelago granitoids, central Italy: the role of hybridization processes in their genesis. *Journal of Geology*, 100: 41 – 56
- Poli G and Tommasini S. 1991. Model for the origin and significance of microgranular enclaves in cala-alkaline granitoids. *Journal of Petrology*, 32(3): 657 – 666
- Silva MVG, Neiva AMR and Whitehouse MJ. 2000. Geochemistry of enclaves and host granites from the Nelas area, central Portugal. *Lithos*, 50: 153 – 170
- Tang CH, Lou FS, Huang ZZ, Wu XH, Song ZR. 2004. Zircon U-Pb age of the Gangbian magma-mixed complex in Hengfeng, northeast Jiangxi province. *Resources Survey & Environment*, 25(3): 174 – 177 (in Chinese with English abstract)
- Thoma JB and Sinha AK. 1999. Field, geochemical and isotopic evidence for magma missing and assimilation and fractional crystallization processes in the Quottoon Igneous Complex, northwestern British Columbia and southeastern Alaska. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 36: 819 – 831
- Vernon RH. 1984. Microgranitoid enclaves in granites-globules of hybrid magma quenched in a plutonic environment. *Nature*, 309: 438 – 439
- Vernon RH. 1999. Crystallization and hybridism in microgranitoid enclaves magmas: Microstructural evidence. *J. Geophys. Res.*, 95: 17849 – 17859
- Vernon RH, Etheridge MA and Wall VJ. 1988. Shape and microstructure of microgranitoid enclaves: Indicators of magma mingling and flow. *Lithos*, (22): 1 – 11
- Waight TE, Dean AA, Maas R and Nicholls IA. 2002. Sr and Nd isotopic investigations towards the origin of feldspar megacrysts in microgranular enclaves in two I-type plutons of the Lachlan Fokl Belt, southeast Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 47: 1105 – 1112
- Wang JB and Wang YW. 2006. Metallogenetic chronology of Weiya vanadium-bearing titanomagnetite deposit, Xinjiang. *Mineral Deposits*, 25(Sup.), in press (in Chinese)
- Wang YW, Wang JB, Wang LJ, Qin QX, Peng XM and Hui WD. 2005. Weiya vanadium-bearing titanomagnetite deposit, Xinjiang—A polygenetic magmatic differentiation-magmatic injection — magmatic hydrothermal deposit. *Mineral Deposit*, 24(4): 349 – 359 (in Chinese with English abstract)
- Yang C, Zhu JC, Zhang PH and Xie CF. 2006. Geochemical characteristic sand genesis of dioritic enclaves in Lisong granite, NE Guangxi province. *Geological Journal of China Universities*, 12(3): 310 – 318
- Yuan FH, Lu XP, Qiao and GH. 2002. The geological evidence of mingling of magma of the Naozhigou rock body, southeastern part of Heilongjiang province. *Jilin Geology*, 21(1 – 2): 20 – 23 (in Chinese with English abstract)
- Yuan WM, Mo XX, Yu XH and Luo ZH. 2000. The record of Indosinian tectonic setting from the granitoid of eastern Kunlun Mountains. *Geological Review*, 46(2): 203 – 221 (in Chinese with English abstract)
- Yun P, Fan Y, Mo WR and Zhou JB. 2003. Mixing of Late Mesozoic crust-mantle-derived magma in Hainan Island: Evidence from quenched dioritic enclaves. *Geology and Mineral Resources of South China*, (2): 30 – 35 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YX. 1982. Geological characteristics and origin of Yangchuling porphyry W-Mo deposit. *Geochimica*, (2): 122 – 132 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZZ, Gu LX, Wu CZ, Li WQ, Xi AH and Wang S. 2005. Zircon SHRIMP Dating for the Weiya Pluton, Eastern Tianshan: Its Geological Implications. *Acta Geologica Sinica – English Edition*, 79(4): 481 – 490
- Zhou XR. 1994. Granite hybridization. *Earth Science Frontiers*, 1(1 – 2): 87 – 98 (in Chinese with English abstract)
- Zhou Y, Li CN, Zhong CS, Bi JL. 2006. Texture types and genetic mechanism of magma mixing in Gangbian magma mixed complex and mafic enclaves from northeastern Jiangxi province. *Acta Mineralogica Sinica*, 26(2): 181 – 188 (in Chinese with English abstract)
- Zorpi MJ, Coulon C and Orsini JB. 1991. Hybridization between felsic and mafic magmas in calc-alkaline granitoids: a case study in northern Sardinia, Italy. *Chemical geology*, 92(1/3): 45 – 86

附中文参考文献

- 陈斌,刘超群,田伟. 2006. 太行山中生代岩浆作用过程中的壳幔岩浆混合作用: 岩石学和地球化学证据. *地学前缘*, 13(2): 140 – 147
- 邓晋福,罗照华,苏尚国,莫宣学,于炳松,赖兴运,谏宏伟. 2004. 岩石成因、构造环境与成矿作用. 北京: 地质出版社, 381p
- 江万,莫宣学,赵崇贺,郭铁鹰,张双全. 1999. 青藏高原冈底斯带中段花岗岩类及其中铁镁质微粒包体地球化学特征. *岩石学报*, 15(1): 87 – 97
- 李昌年,薛重生,廖群安,赵良政. 1997. 江西横峰县港边岩浆混合杂岩体岩石学研究及其成因探讨. *地球科学-中国地质大学学报*, 22(3): 261 – 267
- 李昌年. 1999. 赣东北前寒武纪岩浆混合作用岩带的发现及其地质意

- 义. 地学前缘, 6(4): 331-337
- 李昌年. 2002a. 赣东北晚元古代港边岩浆混合杂岩体的区域地质调查及岩石学研究. 华南地质与矿产, (3): 9-18
- 李昌年. 2002b. 岩浆混合作用及其研究评述. 地质科技情报, 21(4): 49-54
- 李昌年, 廖群安. 2006. 赣东北前寒武纪港边杂岩体的岩浆混合(和)作用及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 25(5): 357-376
- 李嵩龄, 冯新昌. 1997. 新疆天山东部尾亚超单元组合特征. 新疆地质, 15(1): 13-27
- 李宗怀, 韩宝福, 李辛子, 杜蔚, 杨斌. 2004. 新疆准噶尔地区花岗岩中微粒闪长质包体特征及后碰撞花岗岩浆起源和演化. 岩石矿物学杂志, 23(3): 214-226
- 梁明宏, 周兴安, 龚全胜, 李海林. 2002. 岩浆混合作用—来自甘肃北山的野外证据. 甘肃地质学报, 11(1): 44-49
- 刘成东, 张文秦, 莫宣学, 罗照华, 喻学惠, 李述为, 赵欣. 2002. 东昆仑约格鲁岩体暗色微粒包体特征及成因. 地质通报, 21(11): 739-744
- 刘春华, 孙景贵, 郑常青. 1997. 伟德山岩体岩浆混合作用和岩相学标志. 辽宁地质, 14(2): 125-131
- 莫宣学, 罗照华, 肖庆辉等. 2002. 花岗岩类岩石中岩浆混合作用的认识与研究方法. 见: 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等主编, 花岗岩研究思维与方法. 北京: 地质出版社, 55-63
- 彭花明. 1997. 杨溪岩体中黑云母的特征及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 16(3): 271-281
- 唐春花, 楼法生, 黄志忠, 吴新华, 宋志瑞. 2004. 赣东北岩浆混合杂岩体的锆石 U-Pb 年龄. 资源调查与环境, 25(3): 174-177
- 王京彬, 王玉往. 2006. 新疆尾亚钒钛磁铁矿矿床成矿年龄探讨. 矿床地质, 25(增刊), 出版中
- 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 秦全新, 彭晓明, 惠卫东. 2005. 新疆尾亚钒钛磁铁矿—一个岩浆分异~贯入~热液型复成因矿床. 矿床地质, 24(4): 349-359
- 杨策, 朱金初, 张佩华, 谢才富. 2006. 广西姑婆山里松花岗岩中闪长质包体的地球化学特征及其成因探讨. 高校地质学报, 12(3): 310-318
- 苑风华, 路孝平, 乔国华. 2002. 黑龙江省东南部闹枝沟岩体岩浆混合作用的野外地质学证据. 吉林地质, 21(1-2): 20-23
- 袁万明, 莫宣学, 喻学惠, 罗照华. 2000. 东昆仑印支期区域构造背景的花岗岩记录. 地质论评, 46(2): 203-211
- 云平, 范渊, 莫位任, 周进波. 2003. 海南岛晚中生代壳幔岩浆混合作用—来自闪长质淬冷包体的证据. 华南地质与矿产, (2): 30-35
- 张玉学. 1982. 阳储岭斑岩钨钼矿床地质地球化学特征及其成因探讨. 地球化学, (2): 122-132
- 周珣若. 1994. 花岗岩混合作用. 地学前缘, 1(1-2): 87-97
- 周勇, 李昌年, 钟称生, 毕金龙. 2006. 赣东北港边火成杂岩体岩浆混合作用结构类型与成因机理. 矿物学报, 26(2): 181-188