

新疆尾亚矿区 3 期岩浆混合作用的初步研究

王玉往^{1,2} 王京彬² 王莉娟² 方同辉²

(1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 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. 北京矿产地质研究院, 北京 100012)

提要:新疆东天山的尾亚钒钛磁铁矿矿区, 发育 3 期岩浆混合作用。第一期为辉长质与花岗质岩浆混合, 并生成闪长质岩石; 第二期为闪长质与花岗质岩浆的混合, 生成了石英二长质岩浆; 第三期为石英二长岩浆与闪长质岩浆的混合。在各类岩石氧化物对 SiO₂ 的哈克图解上, 尾亚 3 期岩浆混合岩石的投影点分别呈相关的线性关系。在稀土和微量元素方面, 3 期岩浆混合作用形成的岩石分别表现出相近的地球化学特征, 配分曲线形态各自相似, 形成的过渡岩石——岩浆混合岩类与各自的端元岩石具有继承关系。3 期岩浆混合作用之间具有明显的继承性; 第一期形成的岩浆混合岩, 成分相当于闪长岩, 与第二期岩浆混合的基性端元属同类岩石, 且与第二期各类岩石具有相似的地球化学特征; 第二期形成的石英二长闪长岩, 与第三期的端元岩石石英二长斑岩体完全可以对比。尾亚地区的 3 期岩浆混合作用表明, 混合作用可以是多阶段、多期次的, 本区火成岩类最初的母岩浆是酸性的陆壳硅铝质和基性的幔源铁镁质岩浆, 岩浆混合作用反映了本区壳幔相互作用的本质。

关键词: 岩浆混合; 3 期混合; 岩浆混合岩; 暗色微粒包体; 岩石学; 新疆尾亚

中图分类号: P588.125 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2007)02-0289-11

岩浆混合作用(magma mixing)是指不同成分液态岩浆, 在岩浆房或上升通道中相互混合的作用^[1]。它作为一种重要的岩浆演化作用过程, 是造成火成岩多样性的重要原因, 因而越来越受到岩石学家的重视。岩浆混合作用的多期多阶段性早已为人们注意和研究。Vernon(1984)较早认为岩浆混合作用应分为岩浆混合(magma mixing, 包括岩浆化学混合和机械混合的全部岩浆混合作用)和岩浆混和(magma mingling, 仅指岩浆的机械混合)两个不同的阶段^[2]。成中梅等^[3]在研究河北兴隆寿王坟地区岩浆混合作用时指出, 该区基性与酸性两端元岩浆的混合应该用 3 阶段混合模型来解释。严格来讲, 上述岩浆混合阶段应属同一期次的岩浆混合作用, 并未形成相应的岩浆混合岩。多期次的岩浆混合作用以形成不同类型的岩浆混合岩为特征, 如中国的赣东北^[4]、北京的周口店岩体^[5]、巴西的 Fazenda Nova 岩体^[6]等。

在新疆尾亚钒钛磁铁矿矿区, 笔者首次发现存在 3 期岩浆混合作用: 第一期为辉长质与花岗质岩浆混合; 第二期为闪长质岩浆与花岗质岩浆混合; 第三期为石英二长岩浆与闪长质岩浆的混合。笔者对 3 期岩浆混合作用进行了详细的野

外产状和岩相学描述, 对其岩石学和岩石地球化学特征做了初步研究, 并在此基础上对其地质意义进行了讨论。

1 地质背景和岩浆混合

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, 尾亚环形复式岩株的北侧, 属尾亚超单元(外环)的一部分(图 1)。矿区南部的尾亚环形复式岩株由内环和外环构成^[7]; 内环为环形山超单元, 由石英闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩、钾长花岗岩 4 个单元组成, 其中二长花岗岩单元 U-Pb 一致年龄 240.62 Ma, 钾长花岗岩单元全岩 Ar-Ar 坪年龄 245.58 Ma、等时线年龄 250.19 Ma^[7]; 外环为尾亚超单元, 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。笔者对矿区石英正长岩和钾长花岗岩单元做单颗粒锆石 U-Pb 等时线年龄分别为(257.4±5.2)Ma 和(253.9±0.5)Ma^[8]。尾亚矿区广泛发育主要 5 大类岩石: 含钒钛磁铁矿的镁铁-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。矿区内未见大规模的闪长岩体。另外

收稿日期: 2006-08-06; 改回日期: 2006-11-23

基金项目: 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。

作者简介: 王玉往, 男, 1965 年生, 教授级高级工程师, 博士生, 主要从事矿床学及有关岩石学方面研究; E-mail: yuwangw@hotmail.com。

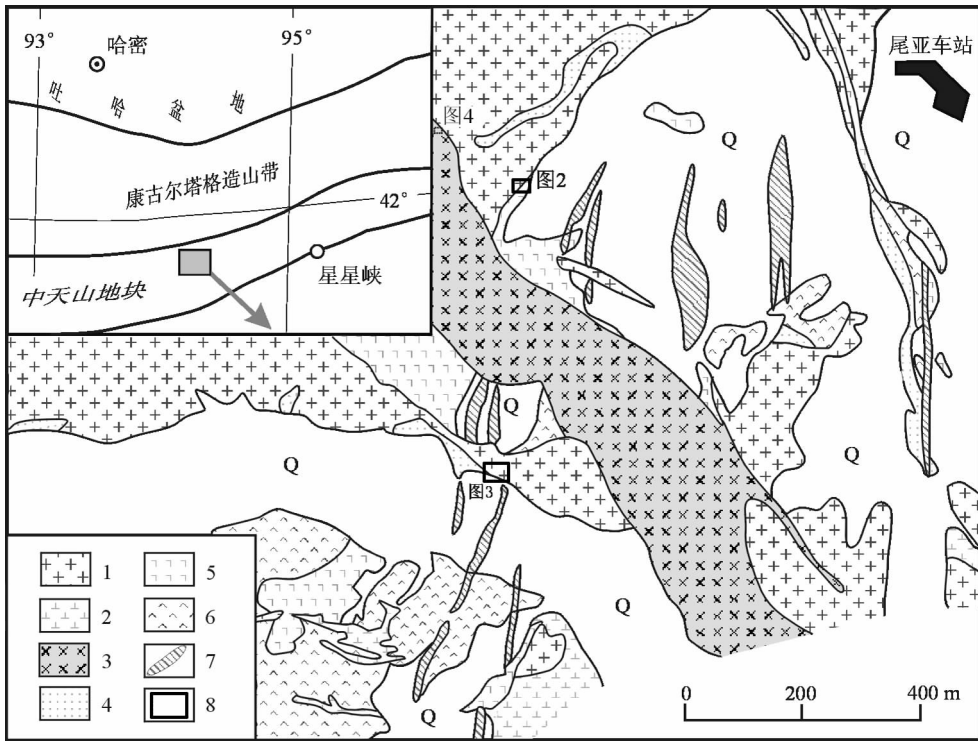


图1 尾亚矿区地质略图(据参考文献[9]修改)

1—花岗岩;2—(石英)正长岩;3—石英二长闪长岩;4—闪长岩;5—辉长岩类;6—超镁铁岩类;7—钒钛磁铁矿矿体;8—图2-4的素描、照片及采样位置;Q—第四系盖层

Fig.1 Geological sketch map of the Weiya ore district (modified after reference [9])

1-Granite;2-(Quartz) syenite;3-Quartz monzodiorite; 4-Diorite;5-Gabbros;6-Ultramafic rocks;7- Vanadium-bearing titanomagnetite orebody;8-Locations of sketches, photos and sampling of Figs. 2-4;Q-Quaternary cover

出露有辉绿岩、英安斑岩、闪长(玢)岩等脉岩。

据野外观察,本区可见3期岩浆混合作用。

第一期为花岗岩与辉长岩的混合。在矿区西北部伟晶岩采坑花岗岩体与辉长岩体的接触部位(图2),可见花岗岩中含辉长岩包体(图2-d)和二者机械混合形成过渡岩类——闪长质岩石(图2-e)等现象。辉长岩包体多呈椭圆形、似扁豆状、不规则圆形,局部可呈次棱角状,直径一般小于20cm,近接触带数量较多,结构较细(粒径基本<1mm)。从辉长岩包体的次棱角形态看,似乎辉长岩可能作为花岗岩的捕虏体,但另一方面,在辉长岩中亦可见花岗岩的包体残留(图2-c),即二者可以互为包体。

第二期为花岗岩与闪长岩的混合。该期岩浆混合作用的产状及岩相学特征^[9]如下:在中部石英二长岩体南侧10号矿体的北端(图3),可见到花岗质岩中含有大量暗色岩(闪长质)包体和二者相互包裹和穿插、过渡,而且可见到二端元混合而成的岩浆混合岩(图3,标本W4916-21a),其岩相学特征与矿区中部的石英二长(斑)岩体极为相似。由于野外可见肉红色花岗岩呈脉体穿过和烘烤(第一期岩浆混合)灰白色花岗岩,因此其形成可能较晚。

第三期为石英二长岩与闪长岩混合。在石英二长岩体的西北端,可见石英二长斑岩体中含有大量的闪长岩微粒包体

(图4),呈几至几十个厘米的不规则椭球,有时亦呈似棱角状,可发生塑性变形。一般包体与载体呈截然的界线,但部分包体可见与寄主岩石过渡和相互渗透(图4-b)。包体粒度一般比寄主岩石细,色率不一,可含有较多的暗色矿物聚晶团块(图4-b),也可出现较多的浅色矿物(主要为斜长石)斑晶(图4-a),反映出混合作用过程中,包体经历了持续的塑性变形过程和寄主岩浆的多次混合改造。石英二长(斑)岩体切穿矿区所有岩浆岩体,形成最晚。

综上所述,尾亚矿区存在3个期次的岩浆混合作用(表1)。

2 岩石学

2.1 花岗岩与辉长岩的混合

辉长质岩石:尾亚矿区基性-超基性岩发育,为钒钛磁铁矿矿床的含矿母岩。与岩浆混合作用有关的为碱性辉长岩类,分布于各矿段(矿区),与矿体密切相伴。该类岩石一般为深灰绿色、墨绿色,块状构造,中-粗粒辉长结构。主要由(钛)普通辉石、普通角闪石、基性斜长石(中-拉长石)和黑云母组成,含少量紫苏辉石、橄榄石、磁铁矿、钛铁矿、磷灰石、锆石等。根据矿物含量的变化可出现暗色辉长岩、橄榄辉长岩、角闪辉长岩等岩性。靠近与花岗岩接触带,辉长岩由于受到其混染,岩石变酸性,并可含少量钾长石,岩石为灰黑

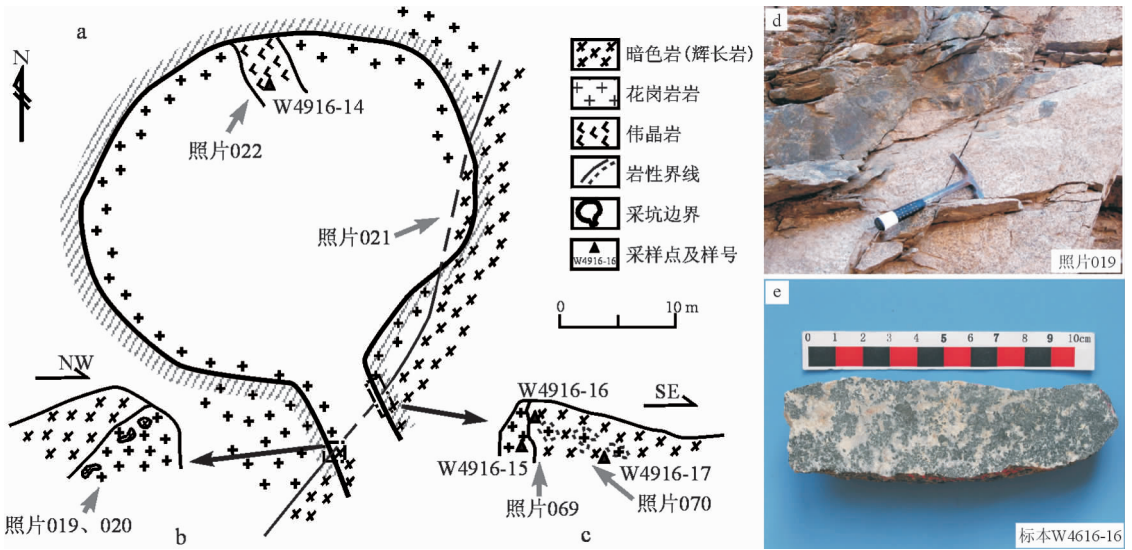


图 2 花岗岩与辉长岩接触和混合的照片和素描

- a—伟晶岩采坑素描,采坑东部为花岗岩与辉长岩接触带;b—接触带素描①,花岗岩中见辉长岩包体(照片 019);
- c—接触带素描②,辉长岩中见花岗岩包体;d—照片 019 示花岗岩中含辉长岩包体;
- e—花岗岩与辉长岩的混合及过渡岩石类型——岩浆混合岩 1,该标本组构从左到右由不均匀逐渐过渡为均匀

Fig.2 Photographs showing the contact and mixing between granite and gabbro

- a—Sketch of a pegmatite pit and the contact zone between granite and gabbro is located in the eastern part of the pit;b—Sketch of the contact zone ①, and gabbro inclusions are found in granite (Photo 019);
- c—Sketch of the contact zone ②, and granite inclusions are found in gabbro;d—Photo 019 shows that granite contains gabbro inclusions;
- e—Mixed and transitional rocks of granite and gabbro—magma mixed rock 1, and the fabric of the sample grades gradually from inhomogeneous to homogeneous from left to right

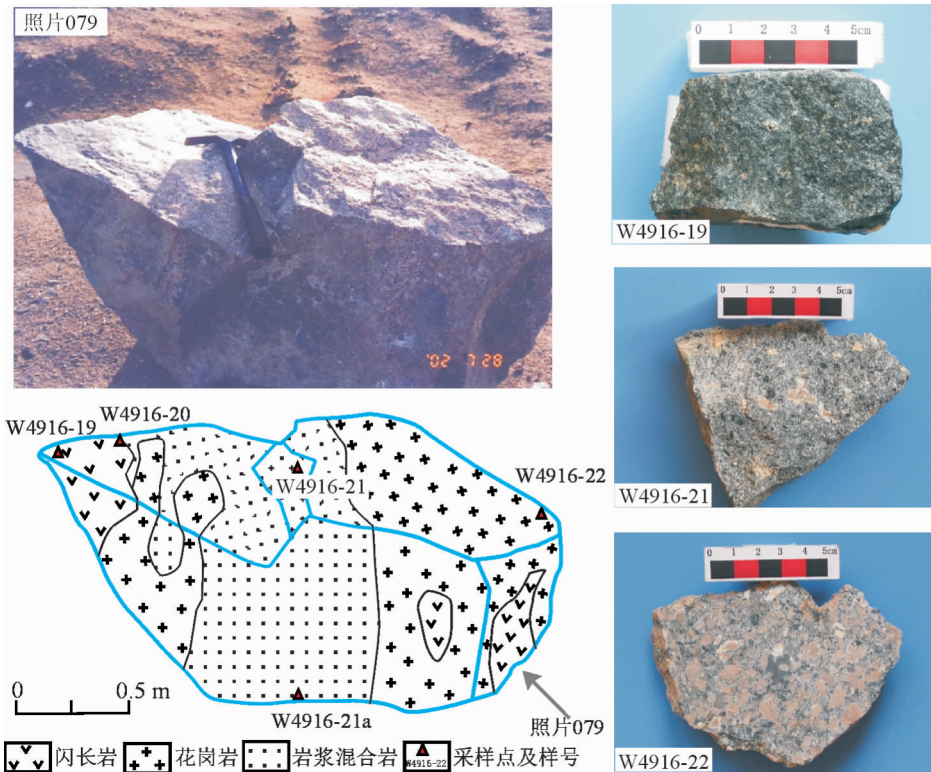


图 3 肉红色花岗岩与闪长岩接触和混合的照片和素描

Fig.3 Photographs showing the contact and mixing between flesh-red granite and diorite

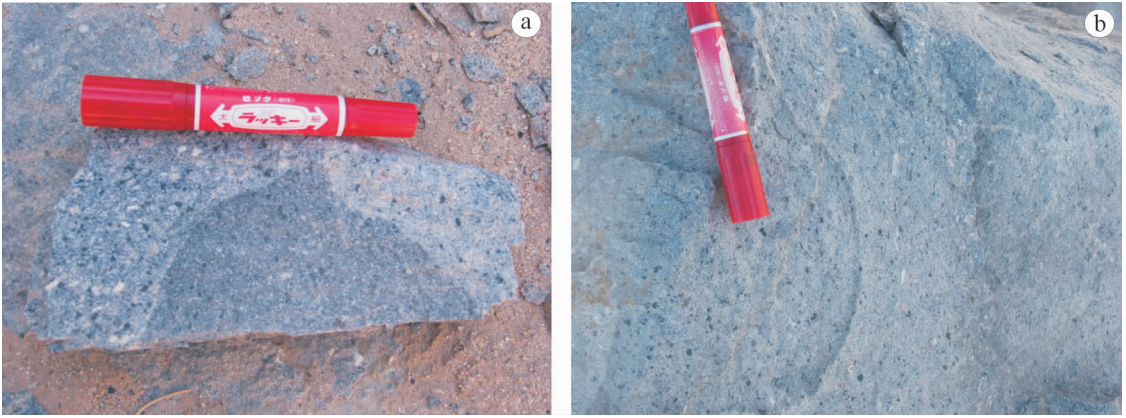


图 4 石英二长斑岩体中闪长质微粒包体的特征

Fig.4 Photomicrographs showing the characteristics of diorite enclaves in quartz monzonite porphyry

表 1 尾亚地区 3 期岩浆混合作用

Table 1 Three stages of magma mixing in the Weiya ore district

混合期次	第一期	第二期	第三期
端元岩石 岩浆混合岩	花岗岩、辉长岩 石英闪长岩	钾长花岗岩、闪长岩 石英二长岩	石英二长岩、闪长岩 ?
表现方式	花岗岩与辉长岩接触、互为包体、 形成岩浆混合岩	端元组分互为包体、相互过渡渗透、形成 岩浆混合岩	闪长岩呈包体, 或过渡渗透
其他特点		岩浆混合岩的岩性与结构特征与石英二 长岩完全相同	

色,镜下呈中细粒结构(多 1~2 mm)。主要矿物含量为中—拉长石 40%~45%,正长石及条纹长石 5%,石英 5%,普通辉石 30%~35%,黑云母 5%~10%,铁质矿物及不透明微粒 5%~10%,角闪石<5%,紫苏辉石<5%,少量磷灰石、锆石。

花岗岩:分布于矿区西北部,岩石呈灰白色带肉红色色调。镜下为花岗岩结构,偶见文象结构。有破碎,粒径一般 0.5~3 mm,主要矿物含量石英为 35%~40%,微斜长石及条纹长石 40%~45%,更—钠长石(有绢云母化、糙化)5%~10%,少量黑云母、磁铁矿、角闪石,微量锆石、磷灰石。

闪长质(混合)岩:该类岩石产于花岗岩与辉长岩的接触带,野外呈 1~2 m 宽的不规则带状或断续团块状。岩石结构混杂,总体成分相当于石英二长闪长岩,笔者暂用“混合岩 1”称之。岩石为灰白色—浅灰色斑杂状构造,镜下为不等粒结构(多 0.5~2 mm)、碎粒状(多<0.3 mm),长石具环带结构。矿物成分亦较混杂:有石英和辉石共生,斜长石有酸性和中长石。主要矿物成分为:石英 10%~15%,正长石 5%~10%,斜长石 30%~35%,角闪石 30%~35%,黑云母 10%~15%,不透明铁矿物(5%~10%)。少—微量矿物有次透辉石、板钛矿、榍石、磷灰石。

2.2 花岗岩与闪长质岩石的混合

肉红色花岗岩:分布于矿区西南,岩石为肉红色,中—粗粒似斑状结构。“斑晶”10%~40%,一般 3~10 mm,钾长石可呈“巨斑”(最大可达 20 mm),半自形—他形,主要是正长石和微斜条纹长石,常具更长环斑结构,沿环带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 3 mm 的连续不等粒状,角闪石、黑云母等常局部形成聚晶团块,表

明受到过偏基性岩浆的混染。总体矿物成分为:钾长石 30%~40%;石英 15%~30%;更长石 20%~25%,常具环带;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。

闪长质岩石:矿区及周围附近并未见大面积出露的闪长岩体,矿区内闪长质地体可见有英安斑岩脉和闪长岩脉。其中英安斑岩脉为浅黄白色块状,镜下为斑状结构。斑晶 10%~15%,粒径 1~1.5 mm,主要为自形—半自形正长石,少量为蚀变角闪石和更长石;基质为显微细粒结构(<0.3 mm),主要为碱性长石(40%~45%),其他少量矿物有石英、黑云母、角闪石、方解石,少—微量磷灰石、榍石、铁矿物、绿帘石等。闪长岩(脉)为细粒浅灰白色块状,镜下为细粒结构(多在 0.3~1 mm),斜长石具交代镜边结构。主要矿物为中长石(50%~55%)、角闪石(20%~25%)、黑云母(15%~20%)、石英(5%~10%),微量赤铁矿、磷灰石和榍石。

与岩浆混合有直接关系的是钾长花岗岩中较多的闪长质微粒包体。由于多呈微粒包体或与花岗岩接触,亦常具混合结构。较新鲜部位岩石与闪长岩脉的成分相似,为浅灰色细粒结构,一般<1mm,且多<0.5 mm,呈细粒或似辉绿—间粒结构。近混合带含斑晶,可达 2~5 mm,成分由角闪石集合体、浑圆状溶蚀石英(眼斑状捕虏晶,外围有时具黑云母鳞片状镶边)组成,可含少量的钾长石斑晶(外围具钠更长石环边,与钾长花岗岩相似)。主要矿物含量更—中长石为 40%~45%,绿色普通角闪石 30%~35%,黑云母 10%~15%,石英 5%~

10%, 板状矿 5% 左右。少—微量矿物有钾长石、不透明含铁矿物、锆石、磷灰石(常呈针状包于斜长石中)。近接触带粒度较细, 石英增多, 角闪石变少。

石英二长质(混合)岩: 产于肉红色花岗岩和闪长岩的接触带(0.5~1 m 宽), 其结构和成分相当于石英二长(斑)岩, 笔者暂以“混合岩 2”称之。岩石为灰白色, 含肉红色钾长石斑晶(可具更长环斑结构, 图 3 的标本 W4916-21a)。镜下呈斑状结构, 斑晶 2~15 mm, 为正长石、条纹长石和石英, 偶有更长石; 条纹长石多为“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; 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, 与闪长岩相似, 一般 0.5~2 mm, 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%, 见少量板状矿、含铁矿物; 微量针状磷灰石、锆石。

2.3 石英二长(斑)岩与闪长质岩石的混合

石英二长(斑)岩: 呈 NW-SE 向带状产于矿区中部, 岩石为灰白色, 含肉红色钾长石斑晶。镜下与肉红色花岗岩与闪长质包体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%, 3~10 mm(手标本可达 15 mm), 多为“聚斑”, 主要有正长石、条纹长石和石英。钾长石亦具更长环斑结构, 石英多浑圆状, 有时可含少量角闪石。基质一般为细粒结构, 多 < 1 mm, 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), 主要由碱性长石(微斜长石为主, 少量正长石、钠长石)、斜长石(钠—更—中长石)、石英、角闪石、黑云母和少量至微量楣石、磷灰石、锆石等组成。

闪长岩: 呈包体产于石英二长斑岩体中, 岩石特征与肉红色花岗岩中的包体基本相同。

3 岩石地球化学

选择与岩浆混合作用有关的岩石样品, 分别进行了岩石主元素和微量元素地球化学成分分析(表 2)。硅酸盐全分析由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所分析, 其中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 TFe_2O_3 (检测限为 0.1%), 和 MnO 、 Na_2O 、 K_2O 、 P_2O_5 、 TiO_2 (检测限为 0.01%) 用融片法在 3080E2 型 X 荧光仪分析, CO_2 (检测限为 0.1%) 用电位法, H_2O^+ 和 H_2O^- (检测限为 0.1%) 用重量法, FeO (检测限为 0.1%) 用容量法分别完成。微量元素分析由中国科学院地质与地球物理研究所 ICP-MS 实验室在“ELEMENT”分析仪上采用 In 内标溶液、ICP-MS 法完成, 分析精度为 3%, 检测限为 $0.002 \times 10^{-6}(\text{La}) \sim 0.02 \times 10^{-6}(\text{Ce})$ 。

3.1 主元素

在岩石硅酸盐成分的哈克图解上(图 5), 第一期岩浆混合有关岩石中, 花岗岩、辉长岩以及二者接触形成的闪长质岩石(混合岩 1)的化学成分投影点呈连续一致的线性关系, 表明它们可能具有相关的成因关系。值得探讨的问题是, “混合岩 1”的大多数氧化物成分与肉红色花岗岩中的闪长质包

体极为接近, 另外闪长岩脉和英安岩脉的投影点也落在该期的演化趋势线附近, 它们是否具有某种成因联系, 将在后述稀土和微量元素一节再做进一步探讨。

第二期的肉红色花岗岩(混染花岗岩)、闪长质包体、混合形成的石英二长质岩石(混合岩 2), 以及与矿区中部石英二长斑岩体、闪长岩脉和英安岩脉呈连续一致的线性关系, 表明他们具有相关的成因关系, 同时也佐证了该岩浆混合岩(混合岩 2)与花岗质和闪长质岩浆混合有关。由图 5 可见, 该期岩浆混合有关岩石的演化趋势线与第一期演化截然分离, 表现出明显的 2 次岩浆混合特征。值得注意的是, 由于该混染花岗岩富碱, 但主要是富钾, 其 Na_2O 含量较低, 甚至低于闪长岩包体, 在哈克图上, Na_2O 含量呈递减趋势(图 5)。

第三期岩浆混合作用, 只见到端元岩石, 即石英二长斑岩和闪长岩, 但它们与第二期岩浆混合的有关岩石在化学成分上相关, 具有相同的演化趋势线, 表明二者可能为同一演化序列连续的岩浆混合。

3.2 稀土元素

由花岗岩与辉长岩混合而成的闪长质“混合岩 1”的稀土元素特征, 总体表现为与混合辉长岩相似, 其中轻稀土元素曲线与矿区含矿辉长岩相似(图 6-a), 但比花岗岩平缓的多, 而重稀土元素则与混合花岗岩相似。这可能是受部分熔融作用的影响, 因为在熔融过程中, 不相容元素不易进入较基性岩浆, 致使酸性岩比基性岩更容易富集不相容元素; 相反, 在重稀土元素(相容性相对较强)方面, 由“混合岩 1”、混染辉长岩向含矿的辉长岩, 重稀土亏损则逐渐变强。总之, 稀土元素特征显示, 混合而成的闪长质岩石与辉长岩类和花岗岩均存在继承关系。同时, “混合岩 1”同第二期岩浆混合的岩石在稀土元素, 尤其是铈异常、重稀土元素特征上很是相似, 只是轻稀土曲线略缓, 表现出了一定的继承关系。

矿区含矿辉长岩由于含有大量富钙斜长石, 表现出明显的正铈异常, 而被花岗质岩浆混合后则为弱的负铈异常, 表现出与之互补的特征。矿区闪长岩脉、英安斑岩脉的稀土元素特征为轻稀土富集型, 其配分曲线为鲜明的无弯曲直线型, 即轻重稀土分馏程度相似($(\text{La}/\text{Sm})_n \approx (\text{Gd}/\text{Yb})_n$), 且曲线为较陡倾斜、负铈异常极弱(近无铈异常)。其特征与“混合岩 1”有较大差异, 表明与第一期岩浆混合无关, 只是硅酸盐成分较为接近而已。

肉红色花岗岩与闪长岩岩浆混合而成的石英二长质岩石(混合岩 2)与花岗岩、闪长岩包体, 以及石英二长斑岩体表现出极为相似的特征(图 6-b), 表明它们稀土分异程度相同, 可能为同源关系。矿区闪长岩脉和英安斑岩脉的稀土元素特征亦与“混合岩 2”有一定差异, 特别是其较陡稀土曲线, 反映其岩浆演化晚期特征或受到相对强的陆壳混染作用^[3]。但轻稀土特征与之相对一致, 表明它们存在一定的相关关系。

3.3 微量元素

在微量元素蛛网图上(图 7-a), 花岗岩、辉长岩类及其“混合岩 1”具有明显的演化和继承关系。尤其是 Sr 异常, “混

表 2 尾亚地区岩浆混合作用有关岩石地球化学成分

Table 2 Geochemical compositions of rocks related to magma mixing in the Weiya ore district

混合形式 岩性	第一期				第二期				第三期				矿区未直接参与岩浆混合(无接触关系)的其他有关岩石			
	混合辉长岩 W4916-17	混合岩1 W4916-16	花岗岩 W4916-13	闪长岩 W4916-19W	闪长岩 W4916-20W	混合花岗岩 W4916-21a	混合花岗岩 W4916-11W	石英二长斑岩 W4916-12	闪长岩 W4914-10	含矿辉长岩 W3827-2	闪长岩 W3827-3	混合花岗岩 W4916-9	混合花岗岩 W4916-10	闪长岩脉 W4916-1	混合花岗岩 W4916-2	闪长岩脉 W4916-1
样品号	W4916-17	W4916-16	W4916-13	W4916-19W	W4916-20W	W4916-21a	W4916-11W	W4916-12	W3827-2	W3827-3	W4916-9	W4916-10	W4916-1	W4916-2	W4916-1	
SiO ₂ /10 ⁻²	54.92	59.46	75.26	60.48	62.54	69.73	65.34	61.54	48.04	43.95	45.82	76.36	61.94	63.56	61.94	
TiO ₂	2.18	1.52	0.10	0.78	0.83	0.28	0.53	0.66	2.50	4.23	2.90	0.29	0.75	0.71	0.75	
Al ₂ O ₃	12.78	14.13	13.43	15.56	15.75	14.58	14.84	15.21	16.39	14.28	17.14	11.42	15.73	14.93	15.73	
Fe ₂ O ₃	3.89	2.56	0.68	1.94	2.11	0.53	1.45	2.02	4.45	5.81	7.60	1.52	1.67	1.31	1.67	
FeO	0.220	0.196	0.021	0.099	0.113	0.093	0.079	0.106	0.16	0.19	0.16	0.030	0.030	0.06	0.030	
MnO	5.91	4.06	0.01	4.48	4.76	3.95	2.83	3.98	4.61	5.85	5.83	0.17	3.78	2.35	3.78	
MgO	7.16	5.61	0.94	5.30	5.73	4.83	4.09	4.99	9.13	9.49	6.39	0.74	3.59	3.66	3.59	
CaO	2.80	4.08	4.08	4.45	4.68	4.00	3.96	4.25	4.04	3.20	3.92	2.55	4.50	4.12	4.50	
Na ₂ O	1.50	2.00	4.75	1.75	1.69	2.22	2.95	2.02	0.96	0.65	0.69	5.12	4.08	2.45	4.08	
K ₂ O	0.20	0.30	0.02	0.24	0.25	0.18	0.14	0.20	2.02	2.02	0.53	0.06	0.23	0.26	0.23	
P ₂ O ₅	0.49	0.13	0.21	0.42	0.43	0.28	0.16	0.20	0.15	0.15	0.29	0.33	0.37	1.69	0.37	
CO ₂	0.36	0.71	0.11	0.66	0.75	0.88	0.62	0.76	0.57	0.68	1.28	0.28	1.67	1.90	1.67	
H ₂ O ⁺	0.11	0.13	0.06	0.12	0.16	0.12	0.12	0.14	0.12	0.17	0.45	0.33	0.37	0.22	0.37	
H ₂ O ⁻	100.11	99.66	99.96	100.00	99.69	100.18	99.67	99.65	100.09	99.71	100.45	100.22	100.24	99.85	100.24	
La/10 ⁻⁶	12.87	19.05	23.29	31.57	39.52	46.96	37.07	27.63	27.48	27.25	10.78	16.37	29.12	39.57	29.12	
Ce	31.39	47.94	42.24	62.92	87.07	103.45	78.17	68.57	65.17	64.89	22.96	33.18	60.85	79.75	60.85	
Pr	4.61	6.628	4.553	7.461	10.829	13.291	9.398	9.213	9.911	9.899	3.355	4.771	7.256	9.232	7.256	
Nd	19.98	27.64	14.73	28.16	38.95	50.15	32.95	34.64	47.47	48.40	14.45	19.90	26.57	32.65	26.57	
Sm	5.227	6.675	2.506	4.922	7.439	10.669	6.633	7.248	11.234	11.648	3.608	4.877	5.068	5.980	5.068	
Eu	1.343	1.157	0.566	0.919	1.367	1.297	0.991	1.038	5.531	5.605	3.011	3.044	1.268	1.393	1.268	
Gd	4.963	6.092	2.049	4.796	6.547	9.39	6.574	6.375	9.902	10.218	3.35	4.953	4.312	5.054	4.312	
Tb	0.849	0.999	0.3	0.766	1.001	1.616	1.045	1.075	1.437	1.500	0.499	0.717	0.618	0.665	0.618	
Dy	5.176	5.958	1.68	4.240	5.84	9.858	6.08	6.614	7.741	8.034	2.708	4.08	3.288	3.47	3.288	
Ho	1.096	1.279	0.347	0.853	1.233	2.139	1.31	1.432	1.500	1.525	0.53	0.817	0.64	0.671	0.64	
Er	0.673	0.799	0.198	0.504	0.696	1.103	0.73	0.828	0.903	0.935	0.35	0.502	0.35	0.374	0.35	
Tm	0.474	0.619	0.190	0.391	0.546	0.903	0.616	0.647	0.454	0.461	0.193	0.306	0.253	0.254	0.253	
Yb	3.157	4.310	1.373	2.528	3.649	5.87	4.137	4.398	2.584	2.621	1.148	1.914	1.545	1.62	1.545	
Lu	0.505	0.686	0.224	0.401	0.55	0.854	0.63	0.687	0.368	0.376	0.163	0.284	0.224	0.233	0.224	
Y	27.99	35.37	10.35	22.99	31.70	53.26	37.10	38.12	36.43	37.31	12.94	20.77	16.09	16.94	16.09	
Rb	71.51	233.27	117.95	149.85	141.47	124.46	191.31	209.37	27.18	11.56	13.82	45.88	59.04	61.30	59.04	
Sr	290.5	174.1	56.8	339.3	328.5	330.8	286.1	271.5	674.9	586.7	675.6	679.4	517.8	424.6	517.8	
Ba	290.5	201.3	193.2	257.0	214.0	393.8	464.0	190.5	1036.1	913.8	1140.7	1337.5	804.4	690.0	804.4	
Nb	7.743	15.460	4.768	11.939	15.065	20.484	17.187	19.63	3.616	3.193	4.653	5.621	8.842	13.264	8.842	
Ta	0.766	1.469	0.507	0.920	1.291	2.152	1.30	1.748	1.692	2.020	0.391	0.414	0.654	0.886	0.654	
Zr	57.56	79.00	95.35	252.39	279.28	343.76	256.78	180.92	65.90	58.70	62.55	113.54	216.61	293.99	216.61	
Hf	1.996	3.009	3.216	6.438	7.426	10.077	7.35	8	1.538	1.544	1.686	2.887	7.815	5.698	7.815	
Th	6.693	13.10	15.45	9.785	9.467	14.80	22.67	14.92	2.182	1.742	1.078	2.742	16.38	9.689	16.38	
U	2.717	5.938	3.92	2.256	2.53	4.121	4.825	4.184	1.176	0.510	1.301	1.061	3.75	2.865	3.75	
Cs	122.416	3.787	1.66	3.728	3.787	2.479	6.633	4.869	1.433	1.210	1.808	1.392	1.59	1.59	1.59	
K ₂ O+Na ₂ O	4.30	6.10	8.83	6.20	6.39	6.21	6.93	6.29	5.00	3.86	4.59	5.82	8.06	6.58	8.06	
<FeO>	11.09	7.07	0.90	5.36	5.97	4.91	3.86	5.39	10.95	14.26	13.22	9.71	1.43	3.81	1.43	
<FeO>/MgO	1.88	1.74	90.13	1.20	1.25	1.24	1.37	1.35	2.38	2.44	2.27	2.77	5.71	1.62	5.71	
K ₂ O/Na ₂ O	0.54	0.49	1.16	0.39	0.36	0.56	0.74	0.48	0.24	0.20	0.18	0.42	1.73	0.59	1.73	
ΣLR/HR	94.69	132.71	95.15	153.00	208.03	262.45	189.44	173.68	194.44	196.12	68.10	96.98	419.73	182.28	419.73	
δEu	3.91	4.62	12.10	8.28	8.10	6.16	6.82	5.85	6.03	5.90	5.85	21.53	11.10	12.29	11.10	
(La/Yb) _n	0.80	0.54	0.74	0.54	0.59	0.39	0.58	0.45	1.57	1.54	2.61	1.94	0.28	0.76	0.28	
(La/Sm) _n	2.75	2.98	11.44	8.42	7.30	5.39	7.29	6.04	7.17	7.01	6.33	5.77	24.03	16.47	24.03	
(La/Yb) _m	1.55	1.80	5.85	3.62	3.34	2.77	3.52	2.40	1.54	1.47	1.88	2.11	6.77	4.16	6.77	
(Gd/Yb) _m	1.27	1.14	1.20	1.53	1.45	1.29	1.28	1.17	3.09	3.15	2.35	1.94	3.25	2.52	3.25	
Rb _n /Yb _n	12.56	30.02	47.65	32.88	21.50	11.76	25.65	26.40	5.83	2.45	6.68	13.29	21.20	20.99	21.20	

注: <FeO>为全铁; δEu = (La/Yb)_n / (La/Sm)_n; (Gd/Yb)_n 为 Boynton 球粒陨石(10)标准化后的元素比值; Rb_n/Yb_n 为 Thompson 原始地幔(12)标准化后的元素比值。

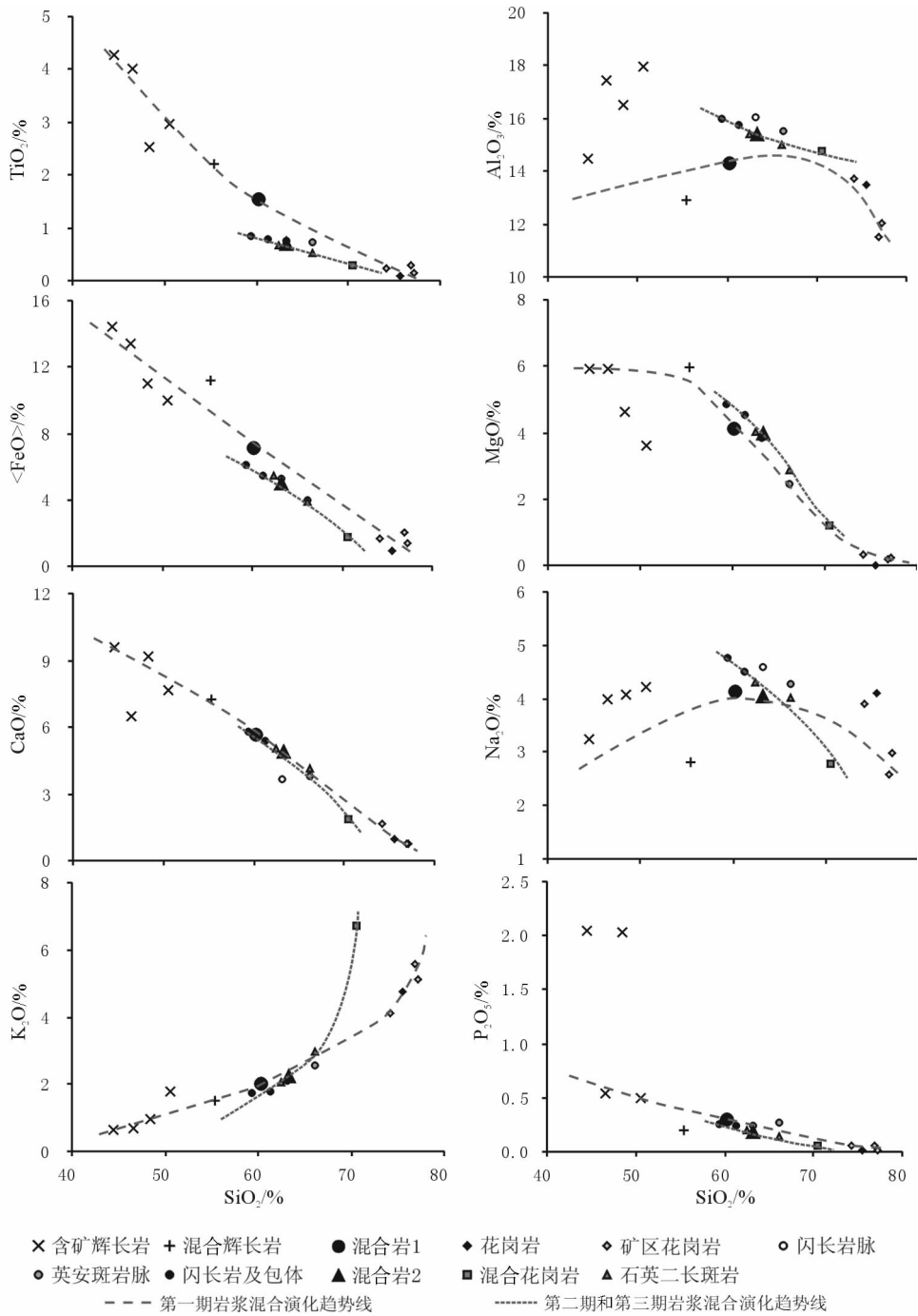


图 5 尾亚地区岩浆混合作用有关岩石的哈克图解

Fig.5 Harker diagrams of rocks related to magma mixing in the Weiya ore district

合岩 1”表现为与辉长岩和花岗岩端元的互补和过渡特征。由于花岗岩缺少富钙的斜长石,具较强的 Sr 负异常(基性岩则多为弱负异常或无明显异常),混合后,由于斜长石的加入,负 Sr 异常也随之变弱,总体继承了基性岩的特征。相应的, Ba 异常则继承了花岗岩的特征。对于 Nb、Ta、Zr、Hf、Y 等,各类岩石则表现为一致的负异常特征,表明该区岩石被陆壳混染的程度总体较低,但“混合岩 1”的负异常相对较弱,可能

由于受岩浆之间的混染所致。

值得注意的是,“混合岩 1”的微量元素曲线特征,与第二期岩浆混合的岩石几乎完全一致,反映出二者的同源或继承关系。同样,闪长岩脉、英安斑岩脉的微量元素特征,特别是 Ba、Sr、Nb、Ta、Zr、Hf 特征与之完全不同,暗示其与之无起源关系。

肉红色花岗岩、闪长岩包体,二者混合而成的石英二长

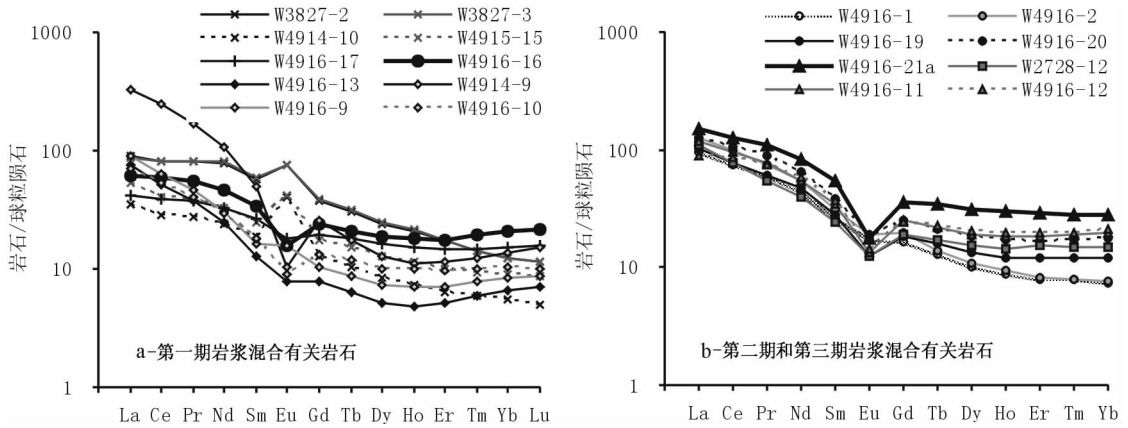


图6 尾亚地区3期岩浆混合作用有关岩石的REE配分曲线
(样号同表2,标准化值据文献[11])

Fig.6 REE distribution patterns of rocks related to three stages of magma mixing in the Weiya ore district^[11]

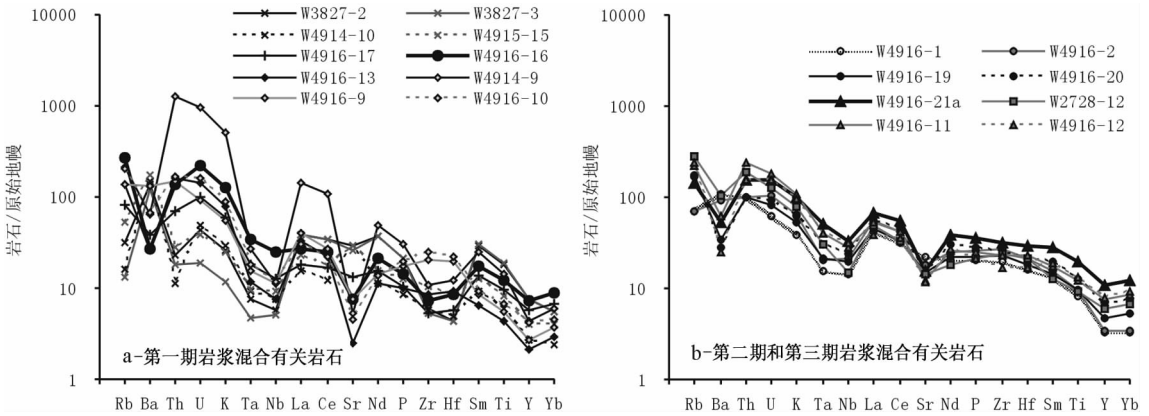


图7 尾亚地区3期岩浆混合作用有关岩石的微量元素蛛网图
(样号同表2,标准化值据文献[12])

Fig.7 Primitive mantle-normalized trace element distribution spidergrams for rocks related to three stages of magma mixing in the Weiya ore district^[12]

质岩石(混合岩2),以及石英二长(斑)岩体表现出极为相似的特征,表明它们为同源关系。矿区闪长岩脉和英安斑岩脉的微量元素总体与上述岩石相似或具一致的变化规律,但Sr、Ba的负异常不明显,表明其分离结晶作用相对较弱。

4 讨论与结论

4.1 尾亚地区存在3期岩浆混合作用的证据

(1)野外存在多种形式的岩浆混合作用,即花岗质与辉长质岩的岩浆混合(相互接触和穿插,二者互为包体,形成过渡的岩浆混合岩)、花岗质与闪长质的岩浆混合(端元组分为包体、相互过渡和渗透,形成的过渡类型岩类在矿区有岩体出露)、石英二长岩质与闪长岩的岩浆混合(闪长岩呈包体,并与寄主岩石过渡渗透),其中前2种岩浆混合作用可直接生成岩浆混合岩。

(2)岩相学证据:尾亚地区的岩浆混合作用,特别是暗色微粒包体,发育岩浆混合成因微粒包体中常见的岩石结构

造,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;第二期岩浆混合形成的岩浆混合岩(混合岩2)与石英二长(斑)岩体的宏观、微观(显微镜下)特征和矿物成分基本相同。

(3)岩石化学方面,各类岩石氧化物对SiO₂的关系图上,3期岩浆混合的岩石分别表现出各自的线性关系。

(4)在稀土和微量元素方面,3期岩浆混合作用形成的岩石分别表现出相近的地球化学特征,配分曲线形态各自相似;形成的过渡岩石——混合岩类与各自的端元岩石具有继承关系。

(5)3期岩浆混合作用之间具有明显的继承性;第一期形成的混合岩,成分相当于闪长岩,与第二期岩浆混合的基性端元属同类岩石,且与第二期各类岩石在地球化学特征上一致;第二期形成的石英二长闪长岩,则与第三期的端元岩石石英二长斑岩体完全可以对比。

(6)矿区的闪长岩脉和英安斑岩脉,在哈克图解中(图5)

与第二期岩浆混合的岩石呈线性关系,其稀土和微量元素特征与第二期岩石具有相似性和继承关系。

4.2 尾亚3期岩浆混合作用的意义

国内外同一地区存在多种岩浆混合作用的类型并不鲜见,如巴西东北部的 Fazenda Nova^[6]、西秦岭的温泉^[14]、安徽铜陵地区^[15]等。李昌年^[16]曾报道了中国赣东北地区的前寒武系岩浆混合岩带,并对其作了深入的岩石学和地球化学研究^[14,16-17]。该岩浆混合岩带由港边、周家埠等6个岩浆混合杂岩体所组成,其岩石类型有角闪石英正长岩、玄武安山玢岩、石英正长岩、石英二长闪长岩、闪长岩和二长花岗岩等,可呈均匀和非均匀岩浆混合。可见,该区多种岩浆混合作用类型与本区类似,对本区研究具有重要启示意义。

岩浆混合作用造成了本区岩石的多样性。区内初始岩浆可能只有基性的幔源岩浆和酸性的花岗质岩浆,经过岩浆混合作用形成了闪长质、石英二长质,甚至钙碱性花岗质岩石等众多类型。从岩石化学成分和岩石类型看,岩浆混合岩的酸度、碱度和钾富集度的类型均较端员岩石复杂的多。

将岩浆混合岩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^[18,19]。Zhang等^[20]对尾亚地区锆石同位素的研究表明,尾亚环形复式岩体的形成系与幔源岩浆底垫有关。以往人们研究岩浆混合作用时常用MME包体的同位素示踪^[21,22],尾亚地区第一期岩浆混合直接有辉长岩参与,是壳幔岩浆相互作用的直接证据。尾亚地区的3期岩浆混合作用表明,混合作用的发生可以是长期的、多阶段、多期次的;本区出露的各有关岩类,其最初母岩浆是酸性的陆壳硅铝质和基性的幔源铁镁质岩浆,因此岩浆混合作用反映了本区壳幔相互作用的本质。

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,有色金属地质调查中心高珍权博士、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。

参考文献(References):

- [1] 徐夕生,周新民. 花岗岩类中的岩石包体[J]. 南京大学学报(地球科学版), 1988, (1):233-241.
Xu Xisheng, Zhou Xinmin. Enclaves in the granitoids [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 1988, (1):233-241 (in Chinese with English abstract).
- [2] Vernon R H. Microgranitoid enclave in granites—globules of hybrid magma quenched in a plutonic environment [J]. Nature, 1984, 309: 438-439.
- [3] 成中梅,路风香,李昌年,等. 河北寿王坟花岗岩闪长岩中暗色微粒岩石包体的成因[J]. 现代地质, 2003, 17(1):20-26.

- Cheng Zhongmei, Lu Fengxiang, Li Changnian, et al. Genesis of microgranular enclaves in Shouwangfen granodiorites, Hebei Province [J]. Geosciences, 2003, 17 (1):20-26 (in Chinese with English abstract).
- [4] 李昌年. 赣东北前寒武纪岩浆混合作用岩带的发现及其地质意义[J]. 地学前缘, 1999, 6(4):331-337.
Li Changnian. Discovery for Precambrian magmatic mixed zone from northeastern Jiangxi province and their geological significance [J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6 (4):331-337 (in Chinese with English abstract).
- [5] 马昌前,王人镜,邱家骥. 花岗质岩浆起源和多次岩浆混合的标志:包体——以北京周口店岩体为例[J]. 地质论评, 1992, 38(2): 109-119.
Ma Changqian, Wang Renjing, Qui Jiaxiang. Enclaves as indicators of the origin of granitoid magma and repeated magma mingling: an example from the Zhoukoudian intrusion, Beijing [J]. Geological Review, 1992, 38(2):109-119(in Chinese with English abstract).
- [6] Neves S P, Vauchez A. Successive mixing and mingling of magmas in a plutonic complex of northeast Brazil[J]. Lithos, 1995, 34(4):275-299.
- [7] 李嵩龄,李文钊,冯新昌,等. 东天山尾亚复式岩株形成时代讨论 [J]. 新疆地质, 2002, 20(4):357-359.
Li Songling, Li Wenqian, Feng Xinchang, et al. Age of formation of Weiya composite stocks in eastern Tianshan mountains [J]. Xinjiang Geology, 2002, 20(4):357-359(in Chinese with English abstract).
- [8] 王京彬,王玉往. 新疆尾亚钒钛磁铁矿矿床成矿年龄探讨 [J]. 矿床地质, 2006, 25(增刊):309-312.
Wang Jingbin, Wang Yuwang. Metallogenetic chronology of Weiya vanadium-bearing titanomagnetite deposit, Xinjiang [J]. Mineral Deposits, 2006,25(supp.):309-312(in Chinese).
- [9] 王玉往,王京彬,王莉娟,等. 新疆尾亚钒钛磁铁矿——一个岩浆分异—贯入—热液型成因矿床[J]. 矿床地质, 2005, 24(4):349-359.
Wang Yuwang, Wang Jingbin, Wang Lijuan, et al. Weiya vanadium-bearing titanomagnetite deposit, Xinjiang—A polygenetic magmatic differentiation — magmatic injection — magmatic hydrothermal deposit [J]. Mineral Deposits, 2005, 24(4):349-359 (in Chinese with English abstract).
- [10] 王玉往,王京彬,王莉娟,等. 新疆尾亚地区石英二长闪长岩的岩浆混合成因[J]. 岩石学报, 2007, 23(3): 出版中.
Wang Yuwang, Wang Jingbin, Wang Lijuan, et al. Magma-mixing genesis of quartz monzodiorite in the Weiya, Xinjiang [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (3), in press (in Chinese with English abstract).
- [11] Boynton W V. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [C]//Henderson P (ed). Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam:Elsevier Science Publishers, 1984:63-114.
- [12] Thompson R N. British Tertiary volcanic province [J]. Scottish J. Geol., 1982, 18:49-107.
- [13] 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京:科学出版社, 1997: 1-238.

- Zhao Zhenhua. *Geochemical Principle of Trace Element* [M]. Beijing: Science Press, 1997: 1-238 (in Chinese).
- [14] 李永军, 李注苍, 丁仁平, 等. 西秦岭温泉花岗岩体岩石学特征及岩浆混合标志[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(3): 7-12.
- Li Yongjun, Li Zhucang, Ding Saping, et al. Petrology features and magma mingling marks of the Wenquan granite from western Qinling [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2004, 26 (3): 7-12 (in Chinese with English abstract).
- [15] 吴才来, 周询若, 黄许陈, 等. 铜陵地区中酸性侵入岩的包体岩石学研究[J]. 地球学报, 1997, 18(2): 182-191.
- Wu Cailai, Zhou Xunruo, Huang Xuchen, et al. Enclave petrology of intermediate-acid intrusive rocks in Tongling district, Anhui [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1997, 18(2): 182-191 (in Chinese with English abstract).
- [16] 李昌年, 薛重生, 廖群安, 等. 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 [J]. 地球科学-中国地质大学学报, 1997, 22(3): 261-267.
- Li Changnian, Xue Chongsheng, Liao Qun'an, et al. Petrology of Gangbian magma-Mixed complex body and their genesis, Hengfeng County, Jiangxi Province [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 1997, 22(3): 261-267 (in Chinese with English abstract).
- [17] 李昌年. 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[J]. 华南地质与矿产, 2002, (3): 9-18.
- Li Changnian. Regional geological survey and petrological research of the Gangbian magma-mixed complex from northeastern Jiangxi Province [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2002, (3): 9-18 (in Chinese with English abstract).
- [18] 刘成东, 张文秦, 莫宣学, 等. 东昆仑约格鲁岩体暗色微粒包体特征及成因[J]. 地质通报, 2002, 21(11): 739-744.
- Liu Chengdong, Zhang Wenqin, Mo Xuanxue, et al. Features and origin of mafic microgranular enclaves in the Yuegelu granite in the Eastern Kunlun [J]. *Geological Bulletin of China*, 2002, 21(11): 739-744 (in Chinese with English abstract).
- [19] 李宗怀, 韩宝福, 李辛子, 等. 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质浆起源和演化 [J]. 岩石矿物学杂志, 2004, 23(3): 214-226.
- Li Zonghuai, Han Baofu, Li Xinzi, et al. Microgranular dioritic enclaves in Junggar granites and their implications for the origin and evolution of post-collisional granitic magmatism in North Xinjiang [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2004, 23 (3): 214-226 (in Chinese with English abstract).
- [20] Zhang Zunzhong, Gu Lianxing, Wu Changzhi, et al. Zircon SHRIMP dating for the Weiya pluton, eastern Tianshan: Its geological implications [J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2005, 79(4): 481-490.
- [21] 曲晓明, 王鹤年. 郭家岭岩体壳幔岩浆混合作用与侵位机制动力学研究[J]. 地质科学, 1997, 32(4): 445-453.
- Qu Xiaoming, Wang Hemian. Dynamic study on the crustal-mantle magma mixing and emplacement mechanism of Guojialing granite [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1997, 32 (4): 445-453 (in Chinese with English abstract).
- [22] 云平, 范渊, 莫位任, 等. 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[J]. 华南地质与矿产, 2003, (2): 30-35.
- Yun Ping, Fan Yuan, Mo Weiren, et al. Mixing of Late Mesozoic crust-mantle-derived magma in Hainan Island: Evidence from quenched dioritic enclaves [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2003, (2): 30-35 (in Chinese with English abstract).

Three-stages magma mixing in the Weiya ore district, Xinjiang

WANG Yu-wang^{1,2}, WANG Jing-bin², WANG Li-juan², FANG Tong-hui²

(1.School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing); State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2.Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012, China)

Abstract: Three-stage magma mixing occurred in the Weiya vanadium-bearing titanomagnetite ore district, East Tianshan, Xinjiang. The first stage was mixing of gabbroic and granitic magmas, which formed dioritic rock; the second stage was mixing of dioritic and granitic magmas, which formed quartz monzonitic rock; the third stage was mixing of quartz monzonitic and dioritic magmas. The data points of the rocks produced during the third stage of magma mixing show a linear relation in the Hake diagrams of main oxides vs. SiO_2 . The rocks formed in three stages of magma mixing show similar geochemical characteristics in terms of REE and trace elements and their distribution patterns are also similar, and the transitional rocks—hybrid rocks formed during magma mixing have inheriting relations with their respective end-member rocks. The inheriting relations of the three stages of magma mixing are as follows: the first stage gave rise to hybrid rock with a composition equivalent to that of diorite, which belongs to the same type of rock as the basic end-member rock of the second stage and displays similar geochemical characteristics to those of various types of rock formed in the second stage; and the quartz monzodiorite formed in the second stage can be completely correlated with the end-member rock—quartz monzonite—porphyry—of the third stage. The three stages of magma mixing in the Weiya area might suggest that magma mixing can occur in multiple stages and that the primary parent magma of igneous rocks in the area was derived from continental crustal acid sialic magma and mantle-derived mafic magma, and magma mixing reflects the essence of crust-mantle interaction in this area.

Key words: magma mixing; three-stages magma mixing; hybrid rock; melanocratic microgranular enclave; petrology; Weiya, Xinjiang

About the first author: WANG Yu-wang, male, born in 1965, professor, engages in the study of mineral deposits and related petrology; E-mail: yuwangw@hotmail.com.