

西准噶尔托里县布尔克斯台岩体岩浆混合 作用的地球化学特征及其成矿意义

徐 倩¹, 晁文迪^{1,2}, 李永军^{1,3}, 王 冉^{1,3}, 康 磊^{3,4}, 段丰浩¹

(1. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国冶金地质总局西北局, 陕西 西安 710119;

3. 国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室, 陕西 西安 710054; 4. 中国地质调查局西安地质
调查中心, 陕西 西安 710054)

摘 要: 西准噶尔托里县阿达依金矿所在的布尔克斯台岩体主要由寄主岩石、闪长质微细粒包体和中性岩墙组成。为判别岩浆的化学混合及岩浆混合作用与金、铜成矿作用的关系, 对布尔克斯台岩体地球化学成分的相关度和寄主岩石的金、铜含量进行了研究。寄主岩石、闪长质微细粒包体和中性岩墙的稀土元素配分曲线和微量元素蛛网图形态相似, 在岩石硅酸盐成分哈克图解、同分母氧化物比值相关图解、微量元素相关图解和同分母比值相关图解上均呈现直线状趋势, 表明岩浆混合作用过程中发生了显著的元素迁移和成分交换。寄主岩石金、铜含量均较高且分布规律相似, 在闪长质微细粒包体相对富集区域异常强烈, 表明以闪长质微细粒包体为代表的幔源基性端员可能为阿达依金矿的形成提供了金、铜成矿物质来源。布尔克斯台岩体壳幔岩浆混合作用与金、铜成矿作用的相关关系, 表明幔源的基性端员对成矿作用的贡献可能是达尔布特构造-岩浆带金、铜富集的主要原因之一。

关键词: 岩浆混合; 地球化学; 阿达依金矿; 布尔克斯台岩体; 西准噶尔

中图分类号: P595; P618.51

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)03-0407-18

Geochemical characteristics and ore-forming significance of magma mixing action of Buerkesitai granite in Tuoli County, Western Junggar

XU Qian¹, CHAO Wen-di^{1,2}, LI Yong-jun^{1,3}, WANG Ran^{1,3}, KANG Lei^{3,4} and DUAN Feng-hao¹

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Northwest Bureau of China Metallurgical Geology, Xi'an 710119, China; 3. Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits, MLR, Xi'an 710054, China; 4. Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, China)

Abstract: The Buerkesitai granite where the Adayi gold ore deposit occurs is composed of host rocks, diorite microgranular enclaves and intermediate dyke swarms. The relative composition of geochemistry is one of the most effective means for determining the mixture of magma, whereas the concentrations of gold and copper geochemical prospecting samples from different areas of the host rock can identify the relationship between gold and copper ore potential and the mixture of magma. The patterns of REE and trace elements are similar to those of the host rock, diorite microgranular enclaves and intermediate dyke swarms. Harker diagrams, ratio diagrams in the same denominator, correlation diagrams and ratio diagrams of trace elements in the same denominator of the host rock, diorite microgranular enclaves and intermediate dyke swarms all have the same linear trends, which means that significant element migration and transfer of component once occurred. The host rock has high gold and copper

收稿日期: 2015-10-20; 接受日期: 2016-04-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41273033, 40534020, 41202044); 中国地质调查局资助项目(1212011220619); 陕西省自然科学基金资助项目(2012JM5004)

作者简介: 徐 倩(1992-), 女, 构造地质学专业硕士研究生, E-mail: 1046700698@qq.com。

concentrations and their regularities of distribution are similar. The fact that the gold and copper anomalies are scattered around areas where abundant diorite microgranular enclaves exist indicates that the mantle-sourced basic end-member represented by diorite microgranular enclaves might have provided the material source for gold and copper mineralization. The association between gold and copper mineralization potential and magma mixture indicates that one of the most important reasons for the enrichment of gold and copper in Darbut tectonic-magmatic belt is the contribution of the mantle-sourced basic end-member to metallogenesis.

Key words: magma mixing; geochemistry; Adayi gold ore deposit; Buerkesitai granite; Western Junggar

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41273033, 40534020, 41202044); China Geological Survey (1212011220619); National Natural Science Foundation of Shaanxi (2012JM5004)

作为成岩体系中的一种重要方式,岩浆混合(magma mixing)是指不同岩浆经混合作用(mixing)与混和作用(mingling)形成新的混合岩浆(hybrid magma)的过程(张旗等, 2007; 齐有强等, 2008; 邢光福等, 2010; 李永军等, 2014),其中混合(mixing)与混和(mingling)分别对应岩浆的化学混合与机械混和(Vernon *et al.*, 1988; 周珣若, 1994; Snyder *et al.*, 1997; 莫宣学等, 2002; 李昌年, 2002, 2006)。岩浆混合作用不仅是造成岩浆多元性和火成岩多样性的重要原因之一(董国臣等, 2006),也与许多金属矿床的成矿作用有着密切的联系(Du, 1999; 张诗启等, 2010; 王玉往等, 2012)。暗色微细粒包体是岩浆混合作用过程的产物和指示体(Vernon, 1984; Castro *et al.*, 1990; 李昌年, 2002),其岩相学标志是识别岩浆机械混和最显著、最直观的证据(王晓霞等, 2002; 康磊等, 2009),而元素地球化学成分的双扩散和相关度则是判别岩浆化学混合最有效的手段之一(李永军等, 2003; 张洪伟等, 2011)。

新疆北部西准噶尔托里县阿达依金矿位于哈图-包古图金-铜矿集区西南角的布尔克斯台岩体中,是区内一个典型的与花岗岩体相关的金矿。关于阿达依金矿的成矿物质来源,有学者认为以中性火山碎屑岩为主的早石炭世包古图组是阿达依金矿主要的含金矿源层(翟常晋, 2013),但矿区出露的包古图组地层中未见任何蚀变矿化(任雯, 2009),矿化体仅赋存于布尔克斯台岩体中。作者等在“新疆西准噶尔地区构造-岩浆带成矿地质作用及矿化特征调查与研究”项目调查中,发现阿达依金矿所在的布尔克斯台岩体中存在着大量的闪长质微细粒包体,岩浆机械混和的岩相学标志发育(晁文迪等, 2015),确认布尔克斯台岩体为一典型的岩浆混合成因花岗岩体。为进一步探索阿达依金矿成矿物质来源和成因、岩浆混合作用与成矿的关系,对布尔克斯台岩体

测制了 2 条基岩化探剖面,发现布尔克斯台岩体金、铜成矿元素含量与岩浆混合作用相关。本文主要就布尔克斯台岩体的地球化学特征和岩浆混合的地球化学证据进行讨论,并探讨岩浆混合作用的成矿意义。

1 区域地质概况及岩体特征

西准噶尔构造带位于中亚造山带西南部,是中亚古生代俯冲-增生复合造山带的主要组成部分(Feng *et al.*, 1989; 肖序常等, 1992; 何国琦等, 2004; 李锦轶等, 2006, 2009; Xiao *et al.*, 2009; Choulet *et al.*, 2013; Zhu *et al.*, 2013),分布着大量的中酸性侵入岩(图 1a)(Chen *et al.*, 2010, 2015; 王乐民等, 2015),尤其以西准噶尔南部的达尔布特构造-岩浆带侵入岩最为发育。达尔布特构造-岩浆带范围大致为北到铁厂沟、南到克拉玛依市区、东到红山、西到都伦河东,大地构造上位于唐巴勒-达尔布特古生代复合沟弧带与准噶尔中央地块结合部位,主要侵入体包括庙尔沟、哈图、阿克巴斯陶、铁厂沟、红山、加甫沙尔苏等大岩基以及别鲁阿嘎希、玉依塔勒盆克提、包古图等小岩体。这些小岩体主要为钙碱性系列的石英闪长岩和花岗闪长岩,与一般具有铝质 A 型花岗岩特点的大岩基明显不同。少量小岩体也具有铝质 A 型花岗岩特点,主要岩石类型为正长花岗岩和二长花岗岩,但出露面积较小,如也格孜卡拉和萨尔托海岩株(张丽敏等, 2014)。统计意义上看,钙碱性系列的石英闪长岩和花岗岩闪长岩小岩体与区域上金-铜的成矿关系密切,如包古图(成勇等, 2006; 张连昌等, 2006)、加尔塔斯(刘建平, 2009)等小岩体,而像庙尔沟、加甫沙尔苏等较大的碱性花岗岩岩基则大部分没有金-铜矿化。

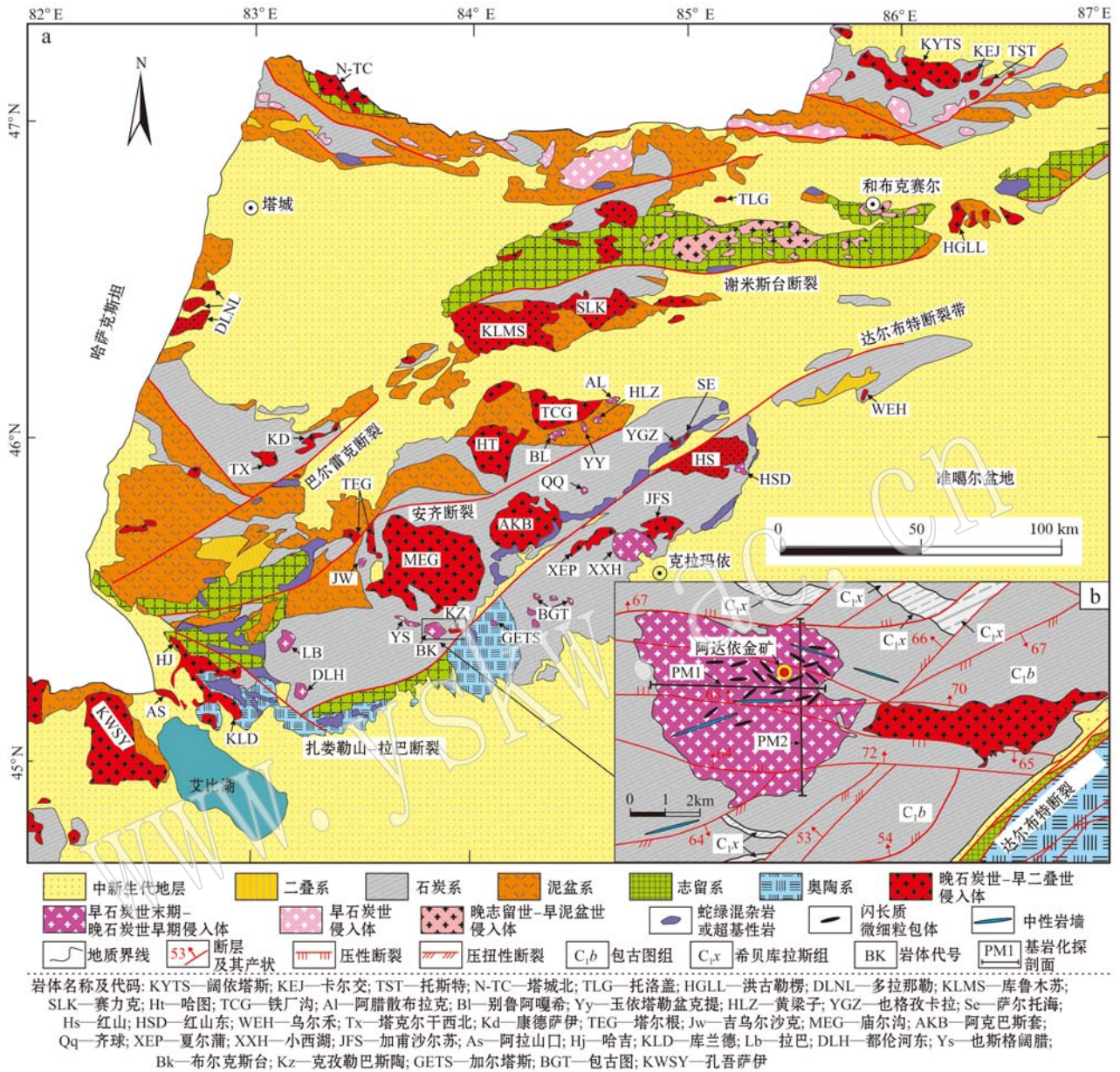


图1 西准噶尔地质简图(a, 据 Chen *et al.*, 2010, 2015; 王乐民等, 2015)和阿达依金矿一带地质简图^①(b)

Fig. 1 Geological sketch map of Western Junggar (a, after Chen *et al.*, 2010, 2015; Wang Leming *et al.*, 2015) and sketch map of Adayi gold mine^①(b)

布尔克斯台岩体位于达尔布特构造-岩浆带西南侧, 侵位于早石炭世包古图组灰绿色薄层状硅质粉砂岩中(图1b), 与地层的接触界线清晰, 接触面多为外倾式, 倾角约 $55^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 。该岩体出露面积约 24 km^2 , 地表显示为不规则状。岩体位于走向北东的达尔布特断裂西北侧约 4 km , 受达尔布特断裂及其次级断裂的影响较大, 数条走向东西的压性断裂穿过该岩体。阿达依金矿矿化体赋存于岩体和中性岩脉

接触带中, 主要为石英脉型和蚀变岩型矿化, 石英脉和断层带中矿化特征明显。

2 岩石学和岩相学特征

布尔克斯台岩体主要由寄主岩石、闪长质微细粒包体和中性岩墙组成。寄主岩石主要岩石类型为花岗闪长岩(图2a), 偶见二长花岗岩和石英闪长岩,

① 新疆地矿局第七地质大队, 1990. 也斯道列提、萨尔卡姆斯什塔普地区 1:5 万区域地质调查报告。

不同岩石类型之间为渐变接触关系,以中细粒花岗岩结构为主。花岗闪长岩主要由斜长石、钾长石、石英和暗色矿物组成(图 2d)。斜长石(55%~60%)呈半自形板状,粒径 $0.4\text{ mm} \times 0.2\text{ mm} \sim 3.2\text{ mm} \times 1.6\text{ mm}$,聚片双晶发育,可见环带构造,杂乱分布。钾长石(10%~15%)为他形粒状,粒径 $0.2 \sim 1.3\text{ mm}$,具条纹结构,为条纹长石。石英(20%)为他形粒状,粒径 $0.2 \sim 1.3\text{ mm}$,波状消光。暗色矿物主要为黑云母和角闪石,其中黑云母(5%~10%)为片状,片径 $0.2 \sim 1.5\text{ mm}$,黄-褐色。普通角闪石(1%~5%)为半自形柱状,粒径 $0.3 \sim 1.4\text{ mm}$,黄-绿色,具闪石式解理。副矿物主要有磷灰石、磁铁矿和锆石等。

闪长质微细粒包体在岩体中分布不均匀,在阿达依金矿外围集中形成范围不大的包体相对富集区,最大体积分数可达 50%,向外逐渐减少至零星分布。包体主要岩石类型为石英闪长岩和闪长玢岩,半自形细粒-微细粒结构及斑状结构(图 2b)。斑晶主要为斜长石(0~5%),呈自形-半自形板状,粒径 $1.0\text{ mm} \times 0.6\text{ mm} \sim 2.8\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$,异常环带发育。基质主要由斜长石、石英、黑云母和普通角闪石组成(图 2e)。斜长石(60%~65%)呈半自形板状,粒径 $0.1\text{ mm} \times 0.05\text{ mm} \sim 0.8\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$,聚片双晶发育,可见环带构造,杂乱分布。石英(5%)为他形粒状,粒径 $0.05 \sim 0.5\text{ mm}$,波状消光,分布不均匀。黑云母(10%~15%)呈片状,片径 $0.05 \sim 0.4\text{ mm}$,黄-褐色。普通角闪石(15%~20%)呈半自形柱状,粒径 $0.2 \sim 1.0\text{ mm}$,黄-绿色,具闪石式解理。副矿物主要有磷灰石、磁铁矿和锆石等。

中性岩墙主要岩石类型与闪长质微细粒包体相似,为石英闪长岩和闪长玢岩(图 2c),半自形细粒-中细粒结构及斑状结构,与寄主岩石界线截然(图 2a),接触面靠近岩墙一侧可见平直的淬火边界。斑晶主要为斜长石和普通角闪石(图 2f),偶见普通辉石斑晶。其中斜长石斑晶(0~10%)呈半自形板状,粒径 $0.6\text{ mm} \times 0.1\text{ mm} \sim 2.0\text{ mm} \times 0.7\text{ mm}$,聚片双晶发育。普通角闪石斑晶(0~5%)呈半自形柱状,粒径 $0.4 \sim 2.5\text{ mm}$,黄-褐色,具闪石式解理。普通辉石斑晶呈柱状-粒状,粒径 $0.2 \sim 1.0\text{ mm}$,淡黄绿色,具辉石式解理。基质主要由斜长石和普通角闪石组成,偶见石英颗粒。斜长石(60%~75%)呈半自形板状,粒径 $0.05\text{ mm} \times 0.03\text{ mm} \sim 0.5\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$,聚片双晶发育,杂乱分布。普通角闪石(20%~30%)呈柱状-半自形柱状,粒径 $0.05 \sim 0.3\text{ mm}$,黄-

褐色、绿色,具闪石式解理。石英呈他形粒状,粒径 $0.03 \sim 0.2\text{ mm}$,波状消光,含量较少。副矿物主要有磷灰石、磁铁矿和榍石等。

布尔克斯台岩体具有丰富、典型的岩浆混合岩相学特征。野外露头可见包体具有半自形细粒-微细粒结构及斑状结构等典型的岩浆结构,显塑性流变特征,形态多为长条状和扁(椭)球状等,少数为撕裂状或不规则状(图 2g),与寄主岩石界线或截然或渐变过渡。在镜下,寄主岩石和包体的混合带的斜长石等主要矿物边缘溶蚀呈不规则状,且斜长石的异常环带发育。部分包体发育斜长石斑晶,斑晶包裹了许多细小的暗色矿物构成嵌晶结构(图 2h),少量斜长石斑晶横跨包体和寄主岩石的接触界线(图 2g)。此外,包体中发育独特的针状空心磷灰石(图 2i)。这些岩相学证据也是岩浆混合作用的证据之一。

3 样品及分析方法

对布尔克斯台岩体共测制了 2 条基岩化探剖面,剖面走向分别为 90° 和 180° ,2 条剖面均穿越布尔克斯台岩体(图 1b)。在剖面测制过程中,共选取了 10 件有代表性的较新鲜样品进行主量和微量元素分析,其中 4 件样品采自寄主岩石,3 件样品采自闪长质微细粒包体,3 件样品采自中性岩墙。主量元素分析在国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室采用 X 射线荧光光谱法(XRF)完成,所用主要仪器为日本岛津顺序扫描 LAB CENTER XRF-1800 型波长色散 X 射线荧光光谱仪,分析精度优于 1%。微量元素和稀土元素分析在国土资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)完成,所用主要仪器为美国热电 X-7 型、安捷伦 7700E 型电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)分析仪,样品测试经 BHVO-2、AGV-1、BCR-2 国际标样监控,分析方法详见 Liang 等(2000),多数微量元素分析精度优于 5%。在烘箱中经 1000°C 高温烘烤 90 min 后称重获得烧失量(LOI)。

化探样品大部分采自基岩化探剖面上的寄主岩石,少量采自围岩地层,采样间距约为 40 m,每件化探样品重量为 500~1 000 g,化探样品按位置依次编号,PM1 共采集 140 件基岩化探样品,样品编号为 PM1-1~PM1-140,PM2 共采集 112 件基岩化探样品,样品编号为 PM2-1~PM2-112。为保证样品新

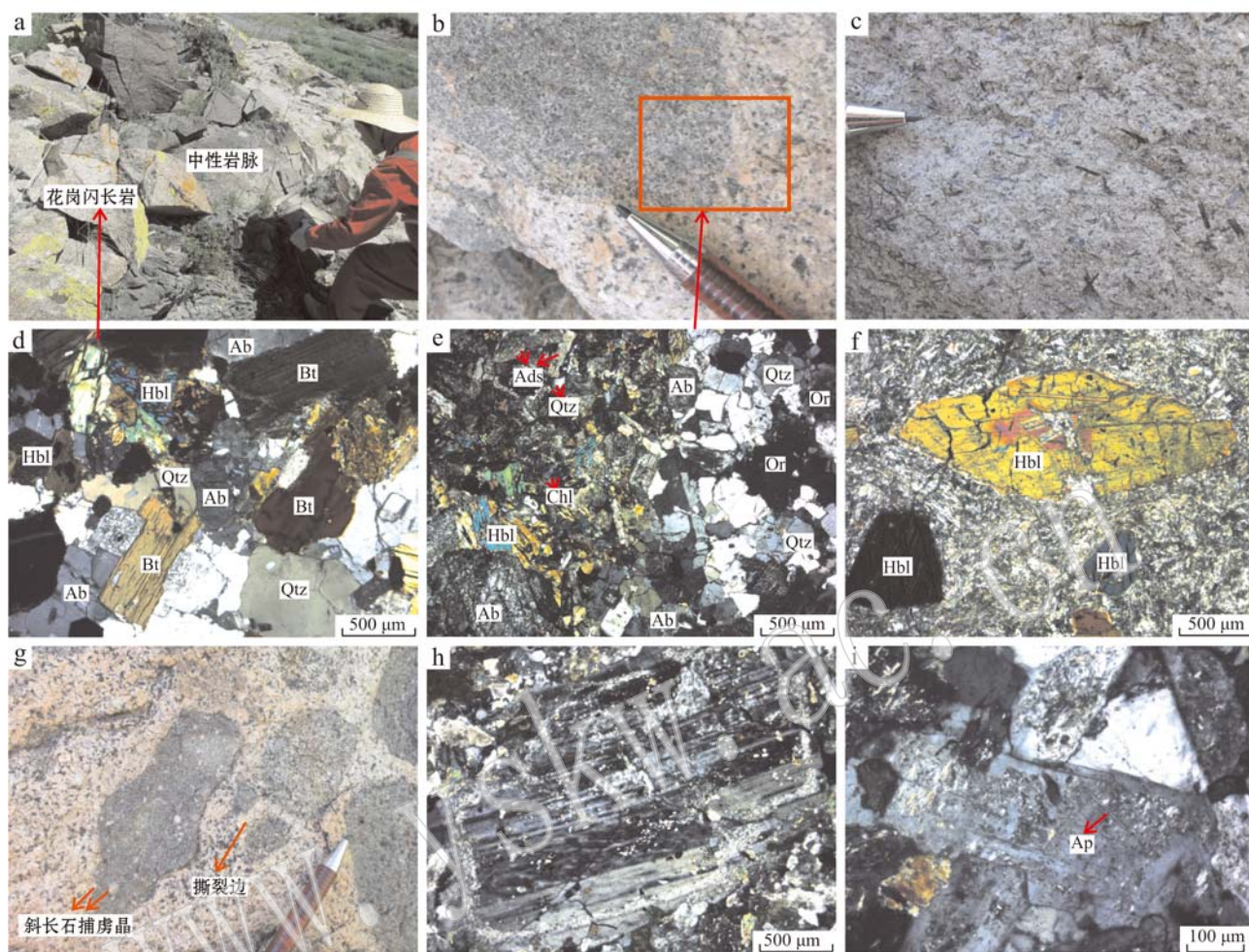


图2 布尔克斯台岩体野外露头特征和正交偏光显微照片

Fig. 2 Field characteristics and microphotographs of Buerkesitai granite (crossed nicols)

a—花岗闪长岩和中性岩脉；b—闪长质微细粒包体；c—闪长玢岩；d—花岗闪长岩镜下照片；e—包体和寄主岩石的接触界线；f—角闪石斑晶；g—撕裂边和斜长石捕虏晶；h—包体中的斜长石斑晶；i—包体中的针状磷灰石；Ab—钠长石；Hbl—普通角闪石；Qtz—石英；Bt—黑云母；Or—正长石；Chl—绿泥石；Ads—中长石；Ap—磷灰石
a—granodiorite and intermediate dyke swarm；b—petrographic section of granodiorite；c—diorite microgranular enclaves；d—boundary between the enclave and the host rock；e—dioritic porphyrite；f—hornblende phenocryst；g—edge crack and plagioclase xenoliths；h—plagioclase phenocryst in the enclave；i—acicular apatite in the enclave；Ab—albite；Hbl—hornblende；Qtz—quartz；Bt—biotite；Or—orthoclase；Chl—chlorite；Ads—andesine；Ap—apatite

鲜且具有代表性，所有样品均采自基岩露头。金和铜的含矿性测试分析工作在新疆维吾尔自治区矿产实验研究所完成，主要测试仪器为X系列电感耦合等离子体质谱仪和双道原子荧光光度计，其中双道原子荧光光度计的型号为AFS-2202，相对标准偏差优于2%。

4 地球化学特征

4.1 主量元素

布尔克斯台岩体寄主岩石、闪长质微细粒包体

和中性岩墙样品主量元素分析结果见表1，寄主岩石、闪长质微细粒包体和中性岩墙样品已分别按 SiO_2 含量由高到低排序。寄主岩石具有明显的低硅($\text{SiO}_2 = 64.01\% \sim 66.47\%$)、高钾($\text{K}_2\text{O} = 2.93\% \sim 3.54\%$)、低钛($\text{TiO}_2 = 0.49\% \sim 0.59\%$)、高钙($\text{CaO} = 2.50\% \sim 3.71\%$)、相对高铝($\text{Al}_2\text{O}_3 = 15.17\% \sim 15.45\%$)特征。 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ (1.03~1.25)值大于1， A/CNK (0.96~1.04)值小于1.1，过碱指数($\text{NK}/\text{A} = 0.60 \sim 0.66$)较低，平均仅为0.63。里特曼指数均小于4($\sigma = 1.96 \sim 2.26$)，为钙碱性系列，在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(图3a)中(Peccerillo and Taylor, 1976)，全

表 1 布尔克斯台岩体样品主量元素分析结果($w_B/\%$)及主要参数
Table 1 Major elements($w_B/\%$)concentrations of samples from Buerkesitai granite

样品	寄主岩石				闪长质微细粒包体			中性岩墙		
	花岗闪长岩				石英闪长岩			闪长玢岩		石英闪长岩
	4-5	13-1	12-32	8-4	2-6	12-301	12-302	11-1	5-1	7-1
SiO ₂	66.47	66.27	65.38	64.01	56.27	55.66	54.57	54.43	53.76	52.50
TiO ₂	0.53	0.49	0.53	0.59	0.84	1.02	0.96	0.83	0.86	0.90
Al ₂ O ₃	15.45	15.17	15.24	15.29	16.21	15.33	15.40	15.39	17.14	16.82
TFe ₂ O ₃	3.91	3.71	3.88	4.14	6.92	7.32	7.55	6.81	7.61	7.38
MnO	0.06	0.06	0.06	0.06	0.10	0.10	0.11	0.10	0.11	0.12
MgO	1.88	1.78	1.91	2.08	4.96	5.19	5.79	6.36	4.99	4.56
CaO	3.00	2.50	3.37	3.71	5.93	5.65	6.02	5.12	5.78	5.11
Na ₂ O	3.59	3.78	3.65	3.66	3.78	3.78	3.75	3.54	3.44	3.41
K ₂ O	3.49	3.54	3.05	2.93	1.68	2.68	2.58	2.44	2.30	2.36
P ₂ O ₅	0.13	0.11	0.12	0.14	0.19	0.27	0.26	0.23	0.16	0.26
LOI	1.30	1.73	1.76	1.47	2.48	1.81	2.03	3.28	2.79	4.69
Total	99.81	99.14	98.95	98.08	99.36	98.81	99.02	98.53	98.94	98.11
Na ₂ O+K ₂ O	7.08	7.32	6.70	6.59	5.46	6.46	6.33	5.98	5.74	5.77
Na ₂ O/K ₂ O	1.03	1.07	1.20	1.25	2.25	1.41	1.45	1.45	1.50	1.44
A/CNK	1.02	1.04	0.99	0.96	0.86	0.79	0.77	0.87	0.92	0.96
NK/A	0.63	0.66	0.61	0.60	0.50	0.59	0.58	0.55	0.48	0.49
R ₁	2 244	2 181	2 284	2 220	1 853	1 552	1 508	1 663	1 648	1 609
R ₂	727	669	775	826	1 234	1 195	1 268	1 220	1 247	1 177
σ	2.11	2.26	1.96	2.00	2.12	3.10	3.23	2.80	2.78	2.90

注: TFe₂O₃ 表示全铁; LOI 为烧失量; A/CNK = $Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$, NK/A = $(Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$, 表中 A/CNK 和 NK/A 为分子比; $R_1 = 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti)$; $R_2 = Al + 2Mg + 6Ca$, 式中 Si 等为 9 种氧化物(SiO₂、Na₂O、K₂O、FeO、Fe₂O₃、TiO₂、CaO、MgO、Al₂O₃)的阳离子数; $\sigma = (K_2O + Na_2O)^2/(SiO_2 - 43)$ 。各指数均为去除烧失量后,重新百分化计算所得。

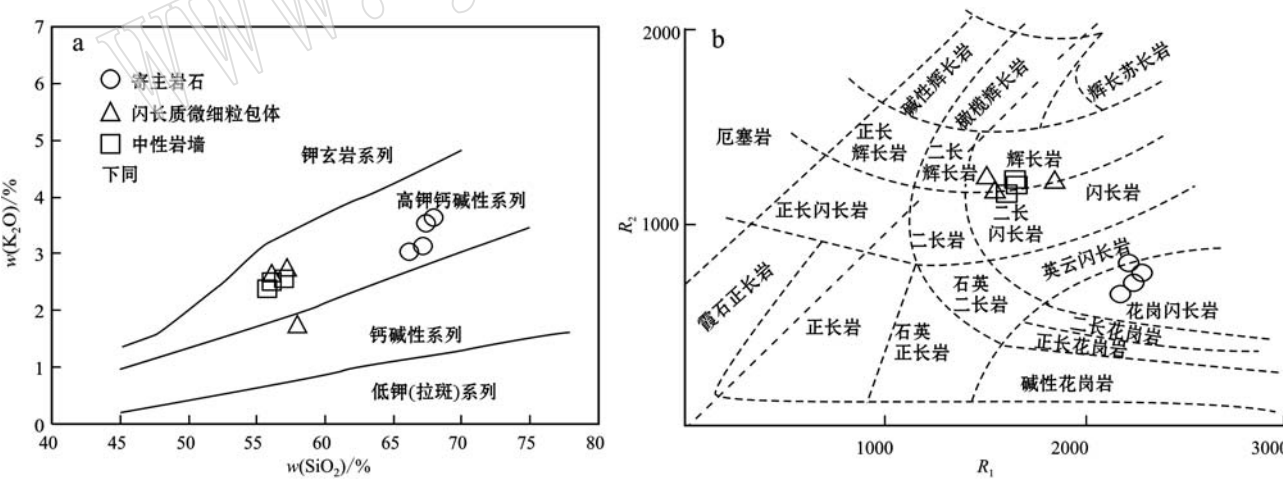


图 3 布尔克斯台岩体 K₂O-SiO₂ 图解和 R₂-R₁ 图解
Fig. 3 K₂O-SiO₂ diagram and R₂-R₁ diagram of Buerkesitai granite

部落入高钾钙碱性系列区。寄主岩石总体表现为偏钠质的高钾钙碱性 I 型花岗岩。在 R₂-R₁ 图解(图 3b)中(Bowden and Kinnaird, 1984; Batcher and Bowden, 1985),全部落入花岗闪长岩区,与薄片鉴定结果一致。

闪长质微细粒包体较寄主岩石偏基性(SiO₂ = 54.57% ~ 56.27%), 富钛(TiO₂ = 0.84% ~ 1.02%)、铁(TFe₂O₃ = 6.92% ~ 7.55%)、镁(MgO = 4.96% ~ 5.79%)和钙(CaO = 5.65% ~ 6.02%), 铝含量相近(Al₂O₃ = 15.33% ~ 16.21%)。中性岩墙

主量元素含量与闪长质微细粒包体相比差别不大, 但 SiO_2 含量更低(52.50%~54.43%)。除 5 号样品 K_2O 较低, 落入钙碱性系列区, 其余闪长质微细粒包体和中性岩墙样品在 SiO_2 - K_2O 图解(图 3a)中(Peccerillo and Taylor, 1976)均落入高钾钙碱性系列区。在 R_1 - R_2 图解(图 3b)中(Bowden and Kinnaid, 1984; Batcher and Bowden, 1985), 闪长质微细粒包体和中性岩墙样品均落入辉长岩-二长闪长岩界线附近, 与薄片定名略有差别, 但包体和中性岩墙样品中均未见钾长石, 参照其岩石学特征仍可定为石英闪长岩和闪长玢岩。

4.2 稀土元素

布尔克斯台岩体寄主岩石、闪长质微细粒包体和中性岩墙样品稀土和微量元素测试数据及相关参数见表 2。寄主岩石具有相对较低的稀土元素总量($81.45 \times 10^{-6} \sim 117.32 \times 10^{-6}$), 总体呈明显的右倾配分模式($\text{LREE}/\text{HREE} = 5.36 \sim 6.54$)。轻稀土强烈富集[(La/Yb)_N = 5.42~7.45], 轻稀土内部分异显著[(La/Sm)_N = 2.47~3.53], 重稀土内部分异程度一般[(Gd/Yb)_N = 1.75~1.90]。Eu 负异常($\delta\text{Eu} = 0.69 \sim 0.87$)轻微至中等, 反映出在岩浆演化过程中, 斜长石的分离结晶作用并不明显。样品对球粒陨石标准化后所得稀土元素配分曲线变化规律基本一致, 各样品 REE 配分曲线基本平行(图 4a)。

闪长质微细粒包体稀土总量($100.67 \times 10^{-6} \sim 143.45 \times 10^{-6}$)高于寄主岩石, 总体亦呈明显的右倾

配分模式($\text{LREE}/\text{HREE} = 5.08 \sim 7.36$)。轻稀土强烈富集[(La/Yb)_N = 5.12~8.71], 轻稀土内部分异显著[(La/Sm)_N = 2.21~2.85], 重稀土内部分异程度[(Gd/Yb)_N = 2.00~2.53]高于寄主岩石。Eu 负异常($\delta\text{Eu} = 0.85 \sim 0.93$)不明显, 反映出结晶分异在其演化过程中未起主导作用。样品对球粒陨石标准化后所得稀土元素配分曲线变化规律与寄主岩石相似, 各样品 REE 配分曲线基本平行(图 4a), 仅有相对位置的高低。

中性岩墙稀土元素总量变化较大($54.75 \times 10^{-6} \sim 108.08 \times 10^{-6}$), 总体呈明显的右倾配分模式($\text{LREE}/\text{HREE} = 4.04 \sim 6.69$)。轻稀土强烈富集[(La/Yb)_N = 3.66~7.62], 轻稀土内部分异程度一般[(La/Sm)_N = 1.61~2.74], 重稀土内部分异程度高于寄主岩石[(Gd/Yb)_N = 2.04~2.49], 与闪长质微细粒包体相近。与寄主岩石和闪长质微细粒包体不同, 中性岩墙出现了 Eu 正异常($\delta\text{Eu} = 1.00 \sim 1.63$)(图 4a)。

4.3 微量元素

将寄主岩石样品的微量元素含量对原始地幔的相对丰度进行标准化, 所得蛛网图各样品分配曲线整体较为协调(图 4b), 富集大离子亲石元素 Rb、Ba、Th、K, 皆高于原始地幔近百倍。高场强元素 Nb、Ta、P、Ti 相对亏损, 在蛛网图上呈现独特的“四凹”。闪长质微细粒包体与寄主岩石相似, 也富集大离子亲石元素 Rb、Ba、Th、K, 其 Rb 含量为原始地幔的近

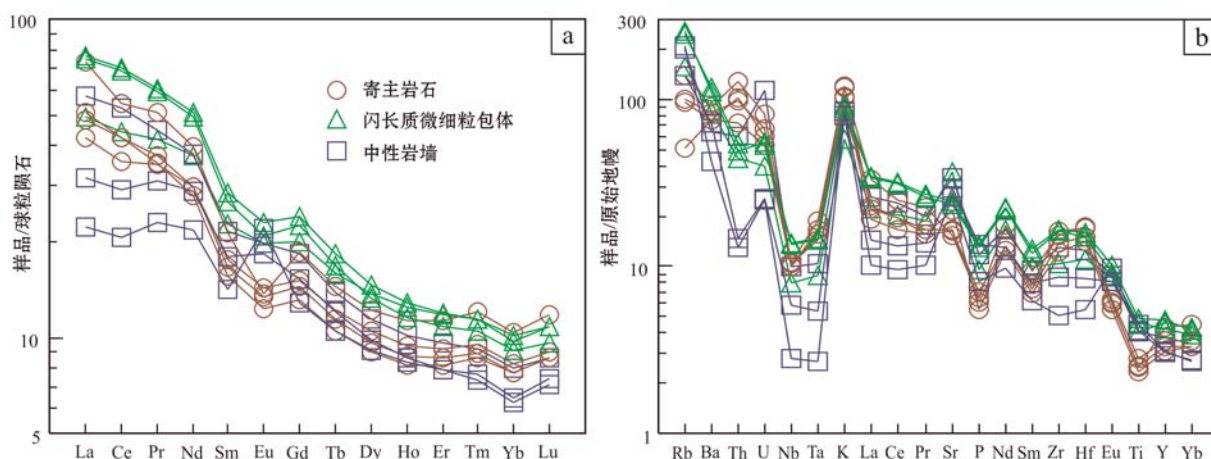


图 4 布尔克斯台岩体球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(a, 据 Henderson, 1984)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b, 据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a, after Henderson, 1984) and primitive mantle-normalized trace element diagram (b, after Sun and McDonough, 1989) of Buerkesitai granite

表 2 布尔克斯台岩体样品稀土元素和微量元素分析结果

 $\omega_B/10^{-6}$

Table 2 REE and trace elements concentrations of samples from Buerkesitai granite

样品	寄主岩石				闪长质微细粒包体			中性岩墙		
	花岗闪长岩				石英闪长岩			闪长玢岩		石英闪长岩
	4-5	13-1	12-32	8-4	2-6	12-301	12-302	11-1	5-1	7-1
Li	18.80	5.33	4.67	3.28	40.39	38.58	39.59	50.39	41.21	46.41
Sc	3.74	2.82	3.56	3.43	23.27	20.02	18.77	21.71	23.34	22.75
V	92.21	87.24	93.64	104.51	200.59	182.99	181.33	189.54	245.12	240.67
Cr	53.31	54.24	57.73	58.50	211.49	236.43	295.61	336.40	113.15	130.69
Co	29.54	26.36	26.37	31.99	29.93	37.29	38.06	37.00	21.90	34.95
Ni	30.65	33.25	34.07	34.82	136.49	162.19	202.59	282.07	96.02	104.24
Cu	11.90	15.81	50.60	12.65	39.33	248.44	116.23	60.25	1 425.95	54.54
Zn	86.56	86.53	83.02	83.61	158.56	191.75	187.84	139.43	190.62	170.85
Ga	17.97	16.73	17.31	17.13	21.26	19.20	19.27	19.38	20.00	21.19
Rb	88.13	63.27	60.96	32.19	99.54	154.08	162.94	127.16	132.09	87.39
Sr	317.60	452.79	350.45	338.88	778.34	515.75	494.28	713.33	549.12	616.19
Y	19.66	13.93	14.98	16.14	20.71	21.42	19.24	16.89	13.63	14.12
Zr	170.77	136.59	154.22	180.94	116.18	185.69	182.26	144.40	57.01	95.51
Nb	7.52	7.11	6.98	7.28	5.63	9.83	9.56	7.12	2.00	4.15
Ba	624.46	572.97	525.26	524.81	592.85	816.96	776.36	439.49	294.92	503.11
La	22.64	14.96	15.69	13.14	15.21	23.80	23.07	17.75	6.89	9.85
Ce	43.96	34.18	34.23	28.97	35.63	56.45	55.46	42.49	16.75	23.55
Pr	6.23	4.32	4.55	4.26	5.11	7.35	7.17	5.44	2.80	3.78
Nd	23.79	16.80	17.91	17.79	22.28	30.56	29.48	22.70	13.05	17.31
Sm	4.14	3.04	3.26	3.43	4.43	5.57	5.23	4.18	2.77	3.51
Eu	1.01	0.91	0.99	1.05	1.45	1.69	1.54	1.46	1.62	1.35
Gd	4.79	3.42	3.74	3.90	5.16	6.23	5.81	4.73	3.33	3.95
Tb	0.69	0.50	0.54	0.58	0.76	0.87	0.80	0.66	0.50	0.57
Dy	3.94	2.92	3.12	3.37	4.40	4.73	4.28	3.67	2.95	3.18
Ho	0.81	0.59	0.63	0.68	0.90	0.92	0.83	0.73	0.60	0.62
Er	2.38	1.72	1.81	1.93	2.49	2.52	2.28	2.03	1.66	1.67
Tm	0.39	0.28	0.29	0.31	0.37	0.37	0.34	0.30	0.25	0.24
Yb	2.18	1.62	1.63	1.74	2.13	2.04	1.90	1.67	1.35	1.31
Lu	0.38	0.28	0.28	0.29	0.35	0.35	0.31	0.28	0.24	0.23
Hf	5.35	4.30	4.63	5.22	3.40	4.86	4.61	3.79	1.69	2.61
Ta	0.77	0.67	0.64	0.59	0.36	0.60	0.59	0.42	0.11	0.22
Pb	13.42	18.31	15.04	11.17	7.92	12.46	12.20	5.51	4.82	2.36
Th	10.72	8.36	8.56	6.04	3.77	4.58	4.17	5.02	1.09	1.24
U	1.71	1.38	1.24	1.11	0.84	1.10	1.16	2.38	0.52	0.53
Σ REE	117.32	85.54	88.67	81.45	100.67	143.45	138.51	108.08	54.75	71.10
Σ LREE	101.77	74.20	76.62	68.64	84.12	125.43	121.95	94.02	43.87	59.33
Σ HREE	15.55	11.34	12.04	12.81	16.55	18.02	16.56	14.06	10.87	11.76
Σ LREE/ Σ HREE	6.54	6.54	6.36	5.36	5.08	6.96	7.36	6.69	4.04	5.05
δ Eu	0.69	0.86	0.86	0.87	0.93	0.87	0.85	1.00	1.63	1.10
δ Ce	0.89	1.03	0.98	0.94	0.99	1.04	1.05	1.05	0.94	0.95
(La/Yb) _N	7.45	6.62	6.91	5.42	5.12	8.37	8.71	7.62	3.66	5.39
(La/Sm) _N	3.53	3.18	3.11	2.47	2.21	2.76	2.85	2.74	1.61	1.81
(Gd/Yb) _N	1.82	1.75	1.90	1.85	2.00	2.53	2.53	2.34	2.04	2.49
(Eu/Sm) _N	0.64	0.79	0.80	0.81	0.86	0.80	0.78	0.92	1.54	1.01
(Ce/Yb) _N	5.60	5.86	5.83	4.62	4.65	7.69	8.11	7.07	3.45	4.99
Nb/Ta	9.73	10.55	10.92	12.42	15.55	16.31	16.27	17.08	18.43	18.59

注：比值中的下标 N 为球粒陨石标准化值，标准化值引自 Henderson(1984)。

300 倍。与寄主岩石不同的是,在出现 Nb、Ta、P 相对亏损的同时,闪长质微细粒包体并未出现 Ti 的明显亏损(图 4b)。

中性岩墙微量元素含量变化较大($\text{Th} = 1.09 \times 10^{-6} \sim 5.02 \times 10^{-6}$, $\text{U} = 0.52 \times 10^{-6} \sim 2.38 \times 10^{-6}$, $\text{Nb} = 2.00 \times 10^{-6} \sim 7.12 \times 10^{-6}$, $\text{Ta} = 0.11 \times 10^{-6} \sim 0.42 \times 10^{-6}$),但所有样品均富集大离子亲石元素 Rb、Ba、K、Sr,亏损高场强元素 Nb、Ta。中性岩墙同时出现了 Eu 和 Sr 的正异常(图 4b),这与斜长石的堆晶有关,暗示中性岩墙形成于岩浆结晶作用晚期,是幔源岩浆分异演化的产物。

4.4 金、铜成矿元素

布尔克斯台岩体基岩化探剖面金、铜元素分析结果见表 3 和表 4。地壳中金的丰度值为 3.5×10^{-9} ,我国金含量的背景值是 1.4×10^{-9} ,金异常下限为 2.6×10^{-9} (王学求等,2013)。西准噶尔地区金含量的背景值约为 0.7×10^{-9} ,而且金元素含量在铁厂沟岩体、庙尔沟岩体和哈图岩体等花岗岩类岩基中具有最低值,而在包古图地区的数个小岩体则具有非常高的金元素异常和金矿化(陈宣华等,2015)。由表 3 和表 4 可以看出,布尔克斯台岩体寄主岩石 241 个样品金含量平均值为 4.2×10^{-9} ,是围岩地层 11 个样品金含量平均值(2.1×10^{-9})的 2 倍,且寄主

岩石的金含量绝大部分高于西准噶尔地区金含量的背景值(0.7×10^{-9}),最高值达 51.8×10^{-9} 。基岩化探剖面 PM1 中金异常主要集中在阿达依金矿外围(图 5a),也就是闪长质微细粒包体相对富集的区域,主要表现为 3 个相邻的峰值。PM1-60~PM1-69 号样品金含量平均值达 20.1×10^{-9} 。基岩化探剖面 PM2 中金异常的 3 个峰值(图 5b)集中在岩体东北角,而在远离闪长质微细粒包体富集的区域则较为平缓,无明显异常。

布尔克斯台岩体寄主岩石铜异常与金异常具有较好的相关关系,这与西准噶尔大部分地区的金、铜分布规律相似(陈宣华等,2015)。布尔克斯台岩体寄主岩石铜的丰度较高,241 个样品铜的平均含量为 67.0×10^{-6} ,高于围岩地层 11 个样品铜含量平均值(57.6×10^{-6}),且闪长质微细粒包体相对富集区域,PM1-60~PM1-69 号样品铜含量平均值达 338.7×10^{-6} ,最高值达 918.0×10^{-6} 。基岩化探剖面 PM1 中(表 3、图 5a),除样品 PM1-25 和 PM1-121 的金异常未对应出现铜异常外,PM1-47、PM1-48、PM103-1 的金异常均有相应的铜异常出现,尤其是闪长质微细粒包体富集区域,也就是 PM1-60~PM1-69 号样品,金异常均对应铜异常,二者套合程度较好,3 个峰值基本重合。基岩化探剖面 PM2 中(表 4、图 5b),

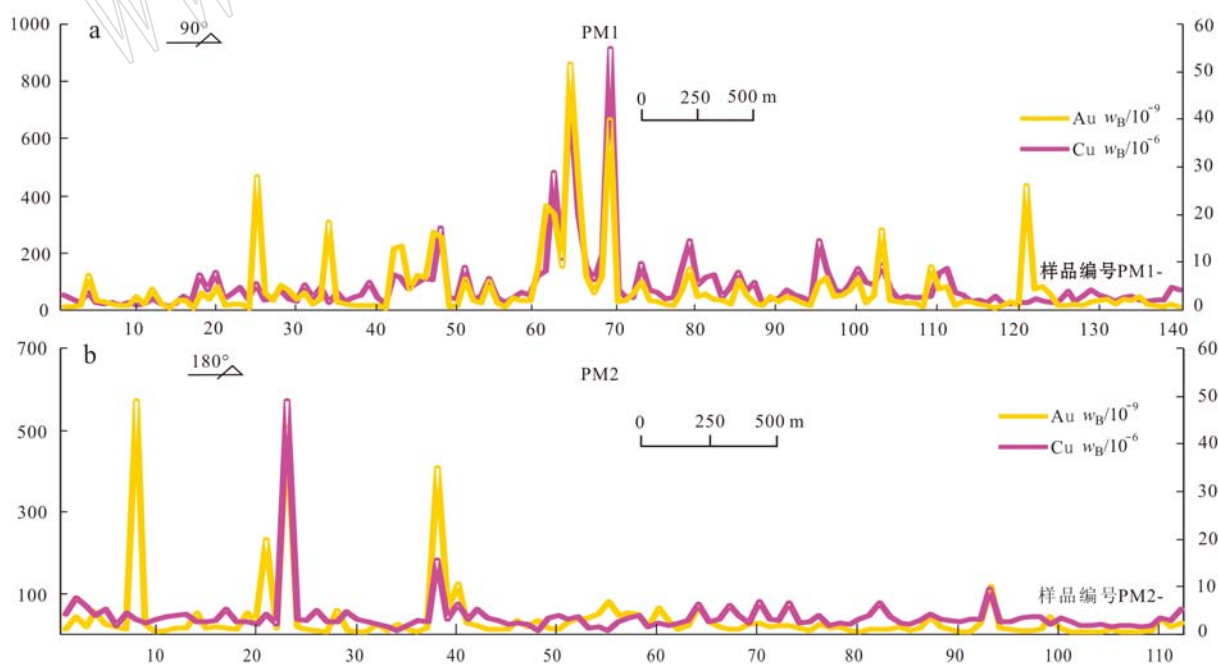


图 5 布尔克斯台岩体寄主岩石金、铜元素含量分布图

Fig. 5 Gold and copper content distribution of Buerkesitai granite

表 3 布尔克斯台岩体基岩化探剖面 PM1 样品金、铜元素分析结果

Table 3 Gold and copper concentrations of samples from geochemical prospecting section (PM1) for Buerkesitai granite

样品编号	Au	Cu	样品编号	Au	Cu	样品编号	Au	Cu	样品编号	Au	Cu
PM1-1 *	0.9	51.8	PM1-36	1.6	30.5	PM1-71	2.3	48.6	PM1-106	1.7	50.2
PM1-2 *	1.0	39.6	PM1-37	1.1	42.2	PM1-72	3.8	42.1	PM1-107	1.7	44.7
PM1-3	1.2	26.7	PM1-38	1.3	52.8	PM1-73	6.2	166.0	PM1-108	1.0	46.0
PM1-4	7.6	63.1	PM1-39	1.2	98.5	PM1-74	2.4	70.1	PM1-109	9.5	46.6
PM1-5	2.4	24.6	PM1-40	1.1	44.8	PM1-75	2.0	62.2	PM1-110	4.6	130.0
PM1-6	2.1	20.0	PM1-41	0.8	21.2	PM1-76	1.4	37.5	PM1-111	5.3	148.0
PM1-7	1.4	28.0	PM1-42	13.2	124.0	PM1-77	1.2	45.7	PM1-112	1.3	60.4
PM1-8	1.3	17.8	PM1-43	13.8	114.0	PM1-78	4.2	148.0	PM1-113	1.9	50.9
PM1-9	1.2	27.4	PM1-44	4.6	75.3	PM1-79	9.0	244.0	PM1-114	2.1	31.6
PM1-10	3.2	18.7	PM1-45	7.6	94.0	PM1-80	3.1	86.8	PM1-115	1.6	33.3
PM1-11	1.4	20.4	PM1-46	7.1	109.0	PM1-81	3.6	117.0	PM1-116	1.2	25.0
PM1-12	4.7	41.8	PM1-47	16.6	106.0	PM1-82	2.6	126.0	PM1-117	0.8	50.2
PM1-13	1.6	23.8	PM1-48	15.6	288.0	PM1-83	2.2	42.2	PM1-118	1.3	19.8
PM1-14	0.7	13.0	PM1-49	0.9	43.2	PM1-84	1.5	79.1	PM1-119	2.1	21.9
PM1-15	2.2	22.0	PM1-50	1.2	40.5	PM1-85	6.6	132.0	PM1-120	1.3	26.2
PM1-16	2.2	47.2	PM1-51	6.7	151.0	PM1-86	3.4	64.7	PM1-121	26.3	26.4
PM1-17	0.8	32.6	PM1-52	2.3	41.2	PM1-87	1.8	99.3	PM1-122	4.8	38.2
PM1-18	4.0	124.0	PM1-53	1.7	49.4	PM1-88	1.1	22.3	PM1-123	5.3	32.3
PM1-19	2.6	69.9	PM1-54	6.2	111.0	PM1-89	3.0	41.8	PM1-124	3.7	24.2
PM1-20	5.3	134.0	PM1-55	1.8	41.9	PM1-90	1.9	38.7	PM1-125	1.3	34.6
PM1-21	1.1	41.5	PM1-56	1.0	26.1	PM1-91	3.2	69.7	PM1-126	1.2	64.5
PM1-22	1.4	56.0	PM1-57	2.8	45.8	PM1-92	2.5	51.4	PM1-127	1.5	31.4
PM1-23	1.6	80.0	PM1-58	2.2	63.6	PM1-93	1.7	42.8	PM1-128	1.2	49.5
PM1-24	0.7	39.2	PM1-59	2.2	53.1	PM1-94	1.1	29.9	PM1-129	2.1	70.2
PM1-25	28.3	92.1	PM1-60	9.5	119.0	PM1-95	5.7	242.0	PM1-130	2.4	52.4
PM1-26	3.9	33.6	PM1-61	22.2	135.0	PM1-96	7.0	138.0	PM1-131	2.6	45.8
PM1-27	2.2	39.9	PM1-62	20.4	482.0	PM1-97	3.1	72.5	PM1-132	1.4	30.0
PM1-28	5.4	70.9	PM1-63	9.4	180.0	PM1-98	3.3	62.3	PM1-133	2.6	44.8
PM1-29	4.4	41.0	PM1-64	51.8	752.0	PM1-99	4.4	93.8	PM1-134	2.4	46.9
PM1-30	2.6	32.0	PM1-65	28.3	343.0	PM1-100	6.8	146.0	PM1-135	3.2	37.3
PM1-31	4.0	90.1	PM1-66	7.3	156.0	PM1-101	1.7	95.8	PM1-136	1.6	31.4
PM1-32	1.6	42.9	PM1-67	4.0	106.0	PM1-102	3.4	90.4	PM1-137	1.1	36.6
PM1-33	2.5	78.9	PM1-68	7.4	196.0	PM1-103	17.0	158.0	PM1-138	1.0	35.7
PM1-34	18.6	28.3	PM1-69	40.2	918.0	PM1-104	2.3	73.7	PM1-139 *	1.6	79.6
PM1-35	2.0	60.2	PM1-70	2.1	72.8	PM1-105	2.0	38.8	PM1-140 *	1.0	69.5

注：* 代表采自围岩地层，Au($w_B/10^{-9}$)、Cu($w_B/10^{-6}$)，下表同。

金和铜元素含量变化的同步性不如基岩化探剖面 PM1，但是除 PM2-8 的金异常未对应明显的铜异常外，PM2-38 和 PM2-93 的金异常均有相应的铜异常出现，PM2-23 的铜异常也紧随 PM2-21 的金异常出现。总体来看，金和铜元素含量变化较为同步。

5 讨论

5.1 岩浆混合作用的地球化学证据

主量元素和微量元素在岩浆混合过程中所呈现的地球化学特征是不同的，扩散动力学理论可以较

好地解释这一规律(Lesher, 1990)。主量元素在硅酸盐熔体中主要是呈四面体形式的成网组分，因其成分和原子结构的影响，在岩浆混合过程中不易扩散和均匀化，造成了岩浆混合过程中主要岩石类型的有限多样性(董传万等, 1998)；而微量元素等非成网组分，在原结构上可直接进行简单交换，均匀化过程比主量元素更易进行，导致微量元素含量变化较大(Troll and Schmincke, 2002)，且这种变化具有一定的相似性(齐有强等, 2008)。正是这一规律，造成了布尔克斯台岩体在岩浆混合过程中主要岩石类型的有限多样性及其微量元素丰度和变化的相似性。在

表 4 布尔克斯台岩体基岩化探剖面 PM2 样品金、铜元素分析结果

Table 4 Gold and copper concentrations of samples from geochemical prospecting section(PM2) for Buerkesitai granite

样品编号	Au	Cu	样品编号	Au	Cu	样品编号	Au	Cu	样品编号	Au	Cu
PM2-1 *	1.0	49.4	PM2-29	0.7	55.0	PM2-57	4.5	39.8	PM2-85	0.7	26.2
PM2-2 *	3.6	91.3	PM2-30	0.5	38.7	PM2-58	4.1	45.9	PM2-86	1.2	35.4
PM2-3 *	1.6	67.5	PM2-31	0.5	30.6	PM2-59	1.5	18.5	PM2-87	3.6	49.0
PM2-4 *	4.8	46.8	PM2-32	2.1	25.5	PM2-60	5.6	28.1	PM2-88	1.5	38.4
PM2-5	2.1	62.5	PM2-33	0.7	18.4	PM2-61	2.5	23.9	PM2-89	0.9	33.6
PM2-6	1.6	21.3	PM2-34	2.1	10.7	PM2-62	1.1	29.9	PM2-90	0.6	32.0
PM2-7	1.1	52.5	PM2-35	1.1	22.8	PM2-63	1.7	36.1	PM2-91	0.6	36.8
PM2-8	49.2	36.6	PM2-36	0.5	35.3	PM2-64	5.9	75.3	PM2-92	2.4	39.0
PM2-9	2.1	29.7	PM2-37	1.2	30.2	PM2-65	2.6	32.1	PM2-93	10.1	113.0
PM2-10	0.6	36.5	PM2-38	35.2	182.0	PM2-66	1.6	38.2	PM2-94	1.2	32.0
PM2-11	0.7	43.7	PM2-39	5.2	38.8	PM2-67	1.0	73.2	PM2-95	1.0	33.2
PM2-12	1.2	48.0	PM2-40	10.6	74.5	PM2-68	0.9	46.7	PM2-96	0.8	39.8
PM2-13	1.4	50.4	PM2-41	2.3	38.9	PM2-69	2.0	28.6	PM2-97	0.7	44.5
PM2-14	4.6	30.7	PM2-42	1.9	63.2	PM2-70	2.3	80.6	PM2-98	1.1	44.4
PM2-15	1.4	31.2	PM2-43	1.0	41.4	PM2-71	1.6	39.2	PM2-99	3.8	24.7
PM2-16	1.5	34.3	PM2-44	1.0	34.8	PM2-72	1.8	34.8	PM2-100	1.2	41.2
PM2-17	1.2	63.4	PM2-45	1.1	26.7	PM2-73	1.7	77.2	PM2-101	0.6	30.3
PM2-18	0.9	30.5	PM2-46	3.0	30.0	PM2-74	1.2	29.0	PM2-102	0.6	23.2
PM2-19	4.4	32.4	PM2-47	1.6	26.8	PM2-75	0.7	32.4	PM2-103	0.6	23.9
PM2-20	3.0	26.9	PM2-48	2.8	10.0	PM2-76	2.2	47.1	PM2-104	0.6	25.6
PM2-21	19.8	50.3	PM2-49	1.4	41.5	PM2-77	1.2	22.6	PM2-105	1.0	19.2
PM2-22	1.4	27.0	PM2-50	1.0	46.1	PM2-78	1.5	29.6	PM2-106	0.6	22.9
PM2-23	43.6	574.0	PM2-51	2.6	36.4	PM2-79	0.7	24.2	PM2-107	0.6	23.3
PM2-24	1.5	36.5	PM2-52	3.1	42.6	PM2-80	0.6	37.7	PM2-108	0.6	19.9
PM2-25	1.0	33.3	PM2-53	3.5	17.7	PM2-81	1.1	47.2	PM2-109	0.8	23.5
PM2-26	0.7	59.8	PM2-54	4.3	19.7	PM2-82	1.0	77.8	PM2-110 *	3.5	39.6
PM2-27	0.6	31.0	PM2-55	6.8	11.5	PM2-83	0.9	44.4	PM2-111 *	1.6	35.6
PM2-28	4.9	32.0	PM2-56	4.0	30.7	PM2-84	1.5	29.0	PM2-112 *	2.4	63.1

球粒陨石标准化稀土元素配分曲线和原始地幔标准化微量元素蛛网图上(图 4),虽然寄主岩石、闪长质微细粒包体和中性岩墙样品的岩石类型不同,但其线型形态相似。

研究表明,在分离结晶作用过程中,受固溶体矿物相分离的影响,结晶分离矿物的组合在岩浆演化的不同阶段是不相同的,这导致了岩浆化学组成在化学成分变异图解上呈现曲线趋势;而在岩浆混合过程中,岩石化学组成在化学成分变异图解上会呈现直线状趋势,这种直线状趋势被认为是岩浆混合作用存在的证据之一(Zorpi *et al.*, 1989; Blundy and Sparks, 1992; 周珣若, 1994),在国内许多典型的岩浆混合花岗岩中均有发现(杨高学等,2009; 邹滔等, 2011, 2012; 于介江等,2013)。在岩石硅酸盐成分的哈克图解上(图 6),布尔克斯台岩体寄主岩石、闪长质微细粒包体和中性岩墙样品的投影点大致构成直线分布,闪长质微细粒包体和中性岩墙靠近贫 SiO₂ 端员,寄主岩石靠近富 SiO₂ 端员,这也是

岩浆混合作用的特征之一(莫宣学等,2002)。同分母比值相关图解是检验混合作用的最佳途径(中国科学院地球化学研究所, 2000),在 NaO/CaO - Al₂O₃/CaO、Na₂O/CaO - SiO₂/CaO、K₂O/CaO - Na₂O/CaO、SiO₂/MgO - Al₂O₃/MgO 同分母氧化物比值相关图解上(图 7),这种线性特征更加明显。

前已述及,微量元素的均匀化过程比主量元素更易进行,其含量变化上的相似性更易呈现。进一步选用微量元素相关图解和同分母比值相关图解,可以发现直线状趋势在 Nd - Sm、La - Ce、Lu - Yb、Co/Nb - V/Nb、Ce/Sr - Zr/Sr 这些微量元素相关图解和同分母比值相关图解上均较为显著(图 8)。但是在 Nb-Ta 相关图解上,闪长质微细粒包体和中性岩墙呈现较好线性关系的同时,与寄主岩石趋势明显不同,这可能指示了偏基性的闪长质微细粒包体和中性岩墙与偏酸性的寄主岩石的岩浆源区不同。Nb、Ta 同为高场强元素,二者原子结构和地球化学性质相近,其比值在分离结晶演化过程中一般变化

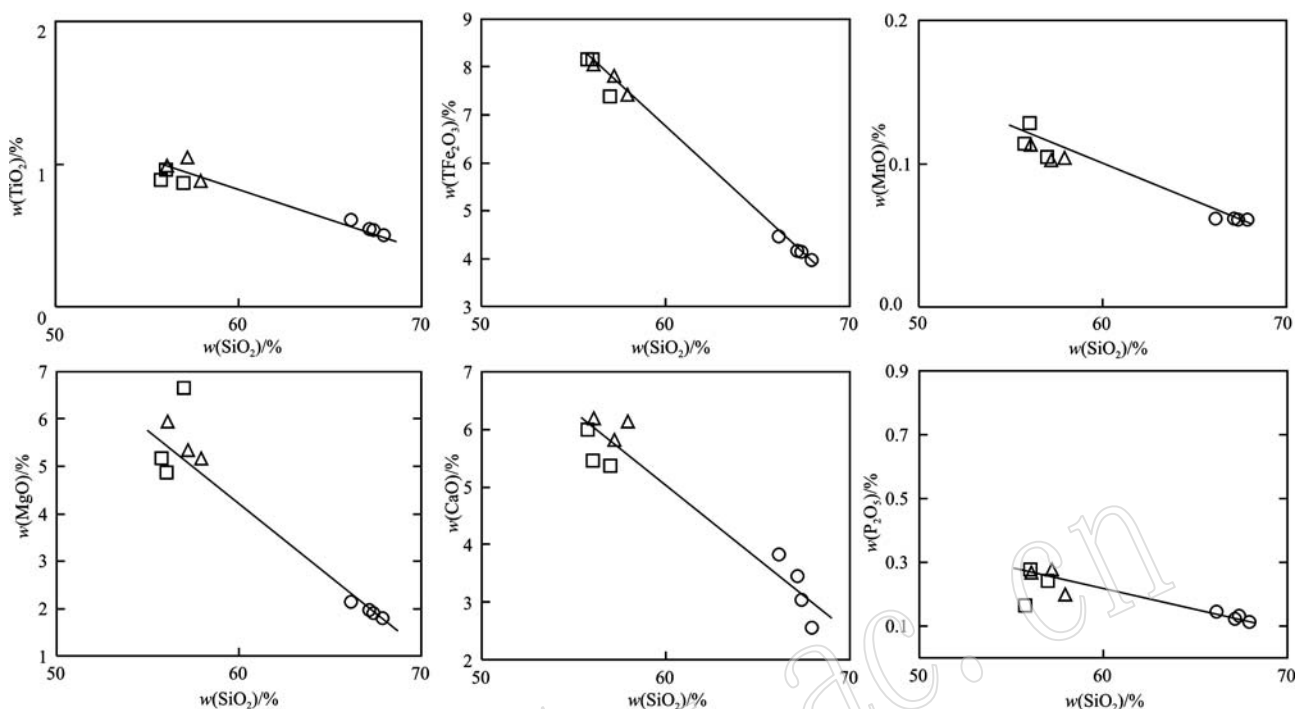


图 6 布尔克斯台岩体哈克图解

Fig. 6 Harker diagrams of Buerkesitai granite

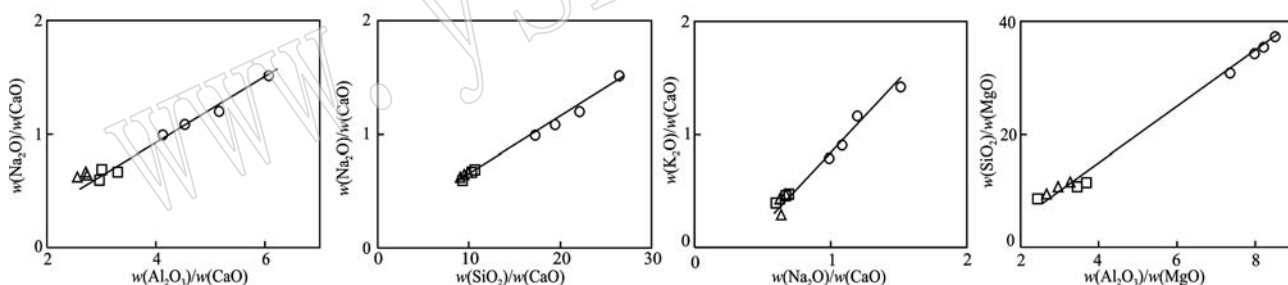


图 7 布尔克斯台岩体同分母氧化物比值相关图解

Fig. 7 Ratio diagrams in the same denominator of oxide for Buerkesitai granite

很小,可以用来探讨岩浆的物质源区特征(Foley, 1984)。寄主岩石 Nb/Ta 值为 9.73~12.42,平均为 10.90,略大于下地壳的比值(8.3, Rudnick and Gao, 2003);闪长质微细粒包体和中性岩墙 Nb/Ta 平均值分别为 16.04 和 18.03,接近于原始地幔的 Nb/Ta 值(17.39, Sun and McDonough, 1989),这暗示闪长质微细粒包体和中性岩墙可能来自同一源区,即起源于地幔的玄武质岩浆,而且闪长质微细粒包体和中性岩墙在与寄主岩石混合之前应该更偏基性,岩浆混合的两个端员分别是幔源的基性端员和壳源的酸性端员。

岩浆混合及成岩过程中,随着镁铁质岩浆的注

入和长英质岩浆结晶作用的进行,粘度增大,两种岩浆的交换能力降低,可划分出 4 种混合类型(Fernandez and Barbarin, 1991; 莫宣学, 2011)。第 1 种为完全的混合作用形成较均匀的混合岩浆;第 2 种为不完全的机械混和作用,长英质岩浆中残留镁铁质岩浆包体;第 3 种为镁铁质岩浆贯入未完全固结的长英质岩浆的初始裂隙中,形成“同深成作用岩墙”;第 4 种为镁铁质岩浆侵入全部固结的长英质岩浆,形成真正的岩墙。布尔克斯台岩体中寄主岩石是第 1 种完全的混合作用的产物,闪长质微细粒包体是第 2 种不完全的机械混和作用的记录者,而中性岩墙边部可见明显的淬火边,则是第 4 种混合作用及后

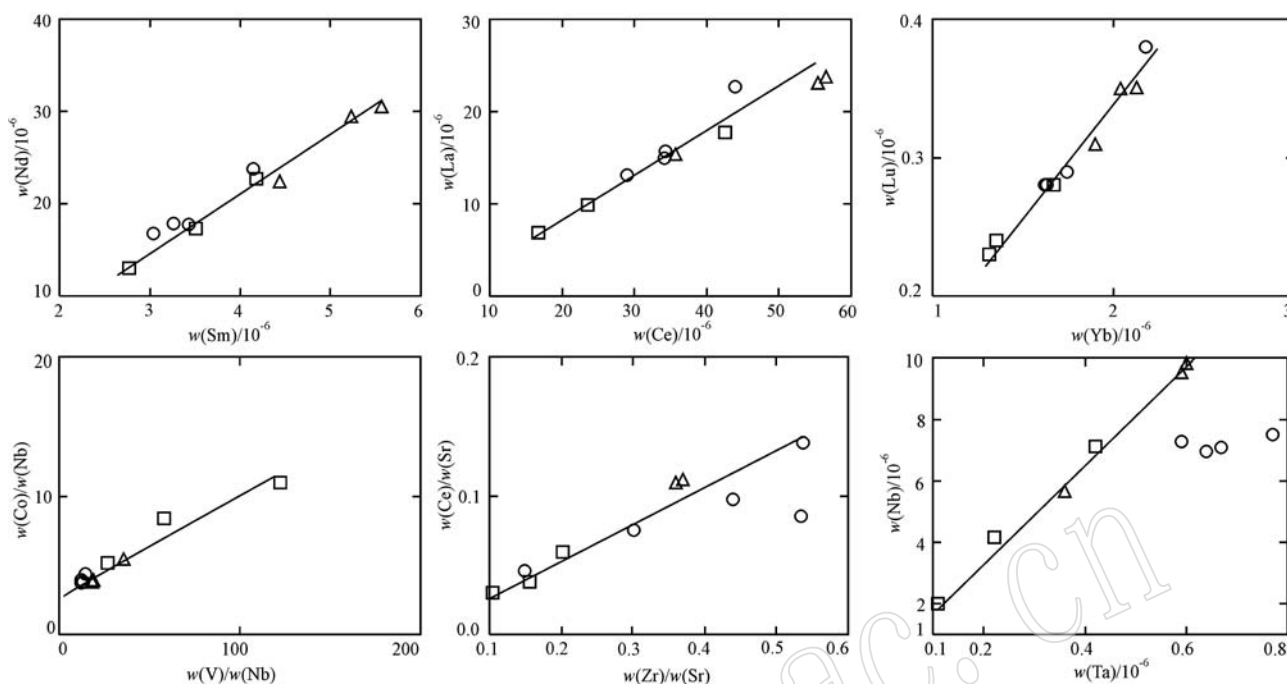


图8 布尔克斯台岩体微量元素相关图解及同分母比值相关图解

Fig. 8 Correlation diagrams and ratio diagrams in the same denominator of trace elements for Buerkesitai granite

续分异演化作用的产物。西准噶尔地区特别是克拉玛依-包古图一带分布着大量中基性岩墙,其形成时代集中于晚古生代,特别是晚石炭世(贺新星等, 2015),有学者指出这些岩墙正是壳幔岩浆混合作用的产物(康磊等, 2009; 张洪伟等, 2011)。

5.2 岩浆混合作用的成矿意义

近年来,国内外多个矿床报道了岩浆混合作用的存在,如铜陵地区的铜金矿(杜杨松等, 1997),菲律宾的 Mount Pinatubo 斑岩铜矿和美国犹他州的 Bingham Canyon 斑岩铜金钼矿(Hattori and Keith, 2001),俄罗斯的 Zhireken 斑岩钼铜矿(Anita and Vitaly, 2004),中国云南的普朗铜矿(曹殿华等, 2009)、西藏甲玛铜多金属矿(彭惠娟等, 2011)、内蒙古的敖仑花铜钼矿(邹滔等, 2012)、新疆北部的希勒库都克铜钼矿(龙灵利等, 2010)等,而且希勒库都克矿化较好的地方,往往是闪长质微细粒包体相对富集的区域(王玉往等, 2008)。

阿达依金矿所属的哈图-包古图金-铜矿集区主体位于达尔布特构造-岩浆带内,主要包括哈图、萨Ⅰ、灰绿山、满洞山、鸽子洞和阔个沙也等百余个金矿床以及包古图、吐克吐克、宏远等铜(钼)矿(李永军等, 2012; 朱永峰等, 2013)。哈图-包古图金-铜矿集区可以分为哈图金矿带和包古图铜金成矿带(申

萍等, 2010),哈图金矿带的金矿化与拉斑玄武质火山活动关系密切(沈远超等, 1993),成矿物质来源与石炭纪多期次海相火山喷发活动密切相关(吴延之, 2012),而包古图铜金成矿带的铜金矿化主要和中酸性小岩体有关(成勇等, 2006; 张连昌等, 2006)。关于阿达依金矿的成矿物质来源,有学者认为以中基性火山碎屑岩为主的早石炭世包古图组是主要的含金矿源层(翟常晋, 2013),但阿达依金矿矿化体仅赋存于岩体中,矿区出露的包古图组地层也未见任何蚀变矿化(任雯, 2009)。

从布尔克斯台岩体寄主岩石基岩化剖面金、铜元素分析结果(表3、表4)来看,寄主岩石金、铜含量均较高,明显不同于邻近的金、铜含量均较低的庙尔沟岩体,而与包古图地区数个小岩体具有的高金、铜异常类似。尤其值得一提的是,铜在闪长质微细粒包体和中性岩墙中的平均值分别为 134.66×10^{-6} 和 513.58×10^{-6} (表2),并不含铜矿物的中性岩墙中铜元素含量最高值达 1425.95×10^{-6} ,远高于寄主岩石中的含量(表3、表4)。在闪长质微细粒包体相对富集的区域,寄主岩石中的金、铜异常也较明显(图5),且铜异常峰值基本与金异常峰值重合,铜异常与金异常套合程度较好。

罗照华等(2007)将西藏曲水岩体中含铜暗色微

粒包体视作透岩浆流体成矿作用的见证,这对于理解阿达依金矿岩浆演化与成矿作用、布尔克斯台岩体岩浆混合作用的成矿意义具有一定有益的启示。岩浆混合作用对阿达依金矿成矿作用的主要贡献在于,以闪长质微细粒包体为代表的幔源基性岩浆的贯入-混合,不仅为阿达依金矿的形成提供了金、铜成矿物质来源,提高了成矿金属元素的丰度,还增加了成矿流体的含量。基性岩浆通过熔离作用形成了不溶解的硅酸盐熔体和含矿流体,硅酸盐熔体因失水而快速结晶固结成岩,形成了与寄主岩石接触关系截然的闪长质微细粒包体,而含矿流体除了晶出少量造矿矿物之外,在寄主岩浆固结之后才开始实质性的结晶作用。流体的散失和寄主岩浆温度的降低促使成矿物质发生结晶作用,但随着温度的降低,含矿流体中的硅酸盐矿物大部分发生了结晶作用,只有少量的 SiO_2 溶解在流体中,形成了含矿石英脉,这解释了阿达依金矿的主要矿化类型为石英脉型。含矿流体在结晶作用的同时,向寄主岩进行化学扩散或发生渗滤交代作用,直到含矿流体消耗殆尽,这也正是在闪长质微细粒包体相对富集区域,金、铜异常明显,而在远离闪长质微细粒包体的部位无明显异常的主要原因。

6 结论

(1) 西准噶尔托里县布尔克斯台岩体主要由寄主岩石花岗闪长岩、闪长质微细粒包体和中性岩墙组成,寄主岩石总体表现为偏钠质的高钾钙碱性 I 型花岗岩,包体和中性岩墙总体表现为高钾钙碱性闪长岩。

(2) 布尔克斯台岩体寄主岩石、包体和中性岩墙稀土元素配分模式均为右倾型,三者在球粒陨石标准化稀土元素配分曲线上近于平行,但寄主岩石和包体出现轻微和弱的 δEu 负异常,中性岩墙出现了 δEu 正异常;寄主岩石和包体均富集大离子亲石元素 Rb、Ba、Th、K,相对亏损高场强元素 Nb、Ta、P,中性岩墙微量元素含量变化较大,但均富集大离子亲石元素 Rb、Ba、K、Sr,亏损高场强元素 Nb、Ta;在岩石硅酸盐成分哈克图解、同分母氧化物比值相关图解、微量元素相关图解和同分母比值相关图解上,三者均呈现直线状趋势,表明岩浆混合作用过程中发生了显著的元素迁移和成分交换。

(3) 布尔克斯台岩体寄主岩石金、铜含量均较

高且具有较好的相关关系,闪长质微细粒包体相对富集的区域,金、铜异常明显,表明以闪长质微细粒包体为代表的基性端员可能为阿达依金矿的形成提供了金、铜成矿物质来源。布尔克斯台岩体壳幔岩浆混合作用与金、铜成矿作用的相关关系,为进一步研究阿达依金矿,以及研究达尔布特构造-岩浆带金、铜成矿物质来源与成因提供了新的思路,幔源的基性端员对成矿作用的贡献可能是达尔布特构造-岩浆带金、铜富集的主要原因之一。

致谢 野外地质工作得到了新疆有色地质勘查局 701 大队阿达依金矿项目组和新疆地矿局第七地质大队同行的大力帮助,张胜龙、赵得龙、董柯、史子豪、苏文博和郭鑫亦参与了剖面测制和样品采集,在此一并表示感谢!

References

- Anita N B and Vitaly I S. 2004. Contribution from mafic melt to the Zhireken porphyry Mo-Cu deposit, Eastern Transbaikalia, Russia: Evidence from mafic microgranular enclaves[J]. *Int. J. Econ. & Environ. Geol.*, 1(1): 42~45.
- Blundy J D and Sparks R S J. 1992. Petrogenesis of mafic inclusions in granitoids of the Andamello Massif, Italy[J]. *Journal of Petrology*, 33(5): 1 039~1 104.
- Batcher R A and Bowden P. 1985. Petrogenic interpretation of granitoid rocks series using multicationic parameters[J]. *Chemical Geology*, 48: 43~45.
- Bowden P and Kinnaird J A. 1984. The petrology and geochemistry of alkaline granites from Nigeria[J]. *Phys. Earth Planet Int.*, 35: 199~211.
- Cao Dianhua, Wang Anjian, Li Wenchang, *et al.* 2009. Magma mixing in the Pulang porphyry copper deposit: evidence from petrology and element geochemistry[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(2): 166~175 (in Chinese with English abstract).
- Castro A, Moreno-Ventas I and De LRJD. 1990. Microgranular enclaves as indicators of hybridization processes in granitoid rocks Hercynian Belt, Spain[J]. *Geological Journal*, 25(3~4): 391~404.
- Chao Wendi, Li Yongjun, Wang Ran, *et al.* 2015. Genesis of magma mixing and its geological implications for Buerkesitai granite in Tuoli County, West Junggar[J]. *Northwestern Geology*, 48(3): 149~156(in Chinese with English abstract).
- Chen Jiafu, Han Baofu, Ji Jianqing, *et al.* 2010. Zircon U-Pb ages and tectonic implications of Paleozoic plutons in northern West Junggar,

- North Xinjiang, China[J]. *Lithos*, 115(1): 137~152.
- Chen Jiafu, Han Baofu, Zhang Lei, *et al.* 2015. Middle Paleozoic initial amalgamation and crustal growth in the West Junggar(NW China): Constraints from geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf-Os isotopes of calc-alkaline and alkaline intrusions in the Xiemisitai-Saier Mountains[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 90~109.
- Chen Xuanhua, Nie Lanshi, Ding Weicui, *et al.* 2015. The relationship between strike-slip tectonic system and geochemical anomalies in the West Junggar, northwestern China and its implication for mineral exploration[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(2): 371~387(in Chinese with English abstract).
- Cheng Yong and Zhang Rui. 2006. Mineralization regularity of Cu-Au deposits in the Baogutu area, Western Junggar, Xinjiang[J]. *Geology and Prospecting*, 42(4): 11~15(in Chinese with English abstract).
- Choulet F, Chen Y, Cogné J P, *et al.* 2013. First Triassic palaeomagnetic constraints from Junggar(NW China) and their implications for the Mesozoic tectonics in Central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 78(3): 371~394.
- Dong Chuanwan, Li Wuxian, Chen Xiaoming, *et al.* 1998. Late Mesozoic magma mixing in the southeast area of Fujian: Petrological record of Pingtan igneous complexes[J]. *Progress in Natural Science*, 8(5): 581~586(in Chinese with English abstract).
- Dong Guochen, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, *et al.* 2006. Magma mixing in middle part of gangdise magma belt: evidence from granitoid complex[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 835~844(in Chinese with English abstract).
- Du Y S. 1999. Petrological and mineralogical study of enclaves in plutons in the typical mining districts of Tongling, Anhui and its bearing on the process of magmatism-metallogeny[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 18(3): 208~218.
- Du Yangsong and Li Xuejun. 1997. Enclaves in the typical mining districts of Tongling, Anhui and their implication to the process of magmatism-metallogeny[J]. *Geological Journal of China Universities*, 3(2): 44~45, 50~55(in Chinese with English abstract).
- Feng Y, Coleman R G, Tilton G, *et al.* 1989. Tectonic evolution of the west Junggar region, Xinjiang, China[J]. *Tectonics*, 8(4): 729~752.
- Fernandez A N and Barbarin B. 1991. Relative rheology of coeval mafic and felsic magmas: nature of resulting interaction processes and shape and mineral fabrics of mafic microgranular enclaves[A]. Didier J and Barbarian B. *Enclaves and Granites Petrology*[C]. Amsterdam: Elsevier, 263~276.
- Foley S F. 1984. Liquid immiscibility and melt segregation in alkaline lamprophyres from Labrador[J]. *Lithos*, 17: 127~137.
- Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. 2000. *Advanced Geochemistry*[M]. Beijing: Science Press, 174~188(in Chinese).
- Hattori K H and Keith J D. 2001. Contribution of mafic melt to porphyry copper mineralization: evidence from Mount Pinatubo, Philippines, and Bingham Canyon, Utah, USA[J]. *Mineralium Deposita*, 36(8): 799~806.
- He Guoqi, Cheng Shoude, Xu Xin, *et al.* 2004. An introduction to the explanatory text of the map of tectonics of Xinjiang and its neighboring areas(1:2 500 000)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~65(in Chinese).
- He Xinxing, Xiao Long, Wang Guocan, *et al.* 2015. Petrogenesis and geological implications of Late Paleozoic intermediate-basic dyke swarms in Western Junggar[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(5): 778~796(in Chinese with English abstract).
- Henderson P. 1984. General Geochemical Properties and Abundances of the Rare Earth Element[M]. *Rare Earth Element Geochemistry*, Amsterdam: Elsevier, 63~114.
- Kang Lei, Li Yongjun, Zhang Bing, *et al.* 2009. Petrographic evidence for magma mixing of Xiaerpu granite in West Junggar, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(5): 423~432(in Chinese with English abstract).
- Leshner C E. 1990. Decoupling of chemical and isotopic exchange during magma mixing[J]. *Nature*, 344(6 263): 235~237.
- Li Changnian. 2002. Comment on the magma mixing and their research[J]. *Geological Science and Technology Information*, 21(4): 49~54(in Chinese with English abstract).
- Li Changnian and Liao Qun'an. 2006. Magmatic mixing and mingling of Precambrian Gangbian complex in northeastern Jiangxi Province and their geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(5): 357~376(in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, He Guoqi, Xu Xin, *et al.* 2006. Crustal tectonic framework of Northern Xinjiang and adjacent regions and its formation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 148~168(in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, Zhang Jin, Yang Tiannan, *et al.* 2009. Crustal tectonic division and evolution of the southern part of the north Asian orogenic region and its adjacent areas[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 39(4): 584~605(in Chinese with English abstract).
- Li Yongjun, Liang Jiwei, Yang Gaoxue, *et al.* 2014. Introduction to Regional Geological Survey[M]. Beijing: Geological Publishing House, 40~44(in Chinese).
- Li Yongjun, Wang Ran, Li Weidong, *et al.* 2012. Discovery of the porphyry copper-molybdenum deposits and prospecting reflections in southern Darbut tectonic magmatic belts, West Junggar, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 2 009~2 014(in Chinese with English abstract).
- Li Yongjun, Zhao Renfu, Li Zhucang, *et al.* 2003. Origin discrimina-

- tion of granitoids formed by mingled magma: using a trace element diagram and exemplified by Wenquan granites, Western Qingling [J]. *Journal of Chang'an University (Earth Science Edition)*, 25 (3): 7~15 (in Chinese with English abstract).
- Liang Q, Jing H and Gregoire D C. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Talanta*, 51: 507~513.
- Liu Jianping, Wang He, Gong Guilun, *et al.* 2009. Geological features and deep prognostication of Jaertasi porphyry copper deposit in Western Jungar, Xinjiang [J]. *Geology and Prospecting*, 45(1): 7~12 (in Chinese with English abstract).
- Long Lingli, Wang Yuwang, Wang Jingbin, *et al.* 2010. Magma mixing in the Xilekuduke Cu-Mo ore district in Xinjiang: Evidence from zircon U-Pb chronology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 449~456 (in Chinese with English abstract).
- Luo Zhaohua, Mo Xuanxue, Lu Xinxiang, *et al.* 2007. Metallogeny by trans-magmatic fluids-theoretical analysis and field evidence [J]. *Earth Science Frontiers*, 14(3): 165~183 (in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue. 2011. Magmatism and evolution of the Tibetan Plateau [J]. *Geological Journal of China Universities*, 17(3): 351~367 (in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, Xiao Qinghui, *et al.* 2002. Cognition of magma hybrid in granites and its research methods [A]. Xiao Qinghui and Deng Jingfu. *The Ways of Investigation on Granitoids* [C]. Beijing: Geological Publishing House, 53~70 (in Chinese).
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 58(1): 63~81.
- Peng Huijuan, Wang Xiongwu, Müller Axel, *et al.* 2011. Magma mixing in Jiama Cu-polymetallic deposit of Tibet: Evidence from quartz and feldspar phenocrysts [J]. *Mineral Deposits*, 30(2): 249~265.
- Qi Youqiang, Hu Ruizhong, Liu Shen, *et al.* 2008. Review on magma mixing and mingling [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(4): 409~416 (in Chinese with English abstract).
- Ren Wen. 2009. Geology and geochemical anomaly characteristics of A-dayi porphyry copper deposits in Tuoli, Xinjiang [J]. *Xinjiang Non-ferrous Metals*, (S1): 37~41 (in Chinese).
- Rudnick R L and Gao S. 2003. Composition of the Continental Crust [A]. Heinrich H and Karl Turekian. *Treatise on Geochemistry* [C]. Oxford: Elsevier, 1~64.
- Shen Ping, Shen Yuanchao, Pan Chengze, *et al.* 2010. Zircon age and metallogenic characteristics of the Hatu-Baogutu Au-Cu metallogenic concentric region in Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 2875~2893 (in Chinese with English abstract).
- Shen Yuanchao and Jin Chengwei. 1993. Magmatism and Gold Mineralization in the Western Junggar Region [M]. Beijing: Science Press, 1~239 (in Chinese).
- Snyder D, Crambes C, Tait S, *et al.* 1997. Magma mingling in dikes and sills [J]. *Journal of Geology*, 105(1): 75~86.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. Geol Soc. Spec. Pub., London, 42: 313~345.
- Troll V R and Schmincke H. 2002. Magma mixing and crustal recycling recorded in ternary feldspar from compositionally zoned peralkaline ignimbrite "A", Gran Canaria, Canary Islands [J]. *Journal of Petrology*, 43(2): 243~270.
- Vernon R H, Etheridge M A and Wall V J. 1988. Shape and microstructure of microgranitoid enclaves: Indicators of magma mingling and flow [J]. *Lithos*, 22(1): 1~11.
- Vernon R H. 1984. Microgranitoid enclaves in granites-globules of hybrid magma quenched in a plutonic environment [J]. *Nature*, 309: 438~439.
- Wang Lemin, Duan Fenghao, Ji Zhengbao, *et al.* 2015. Zircon U-Pb geochronology of pluton from Baobei gold orefield in Western Junggar and its metallogenic significance [J]. *Northwestern Geology*, 48 (3): 241~250 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaoxia, Wang Tao, Lu Xinxiang, *et al.* 2002. Petrographic evidence of hybridization of magma of the Laojunshan and Qinlingliang rapakivi-textured granites in the North Qinling and its significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 21(8~9): 523~529 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xueqiu, Xu Shanfa, Chi Qinghua, *et al.* 2013. Gold geochemical provinces in China: a micro- and nano-scale formation mechanism [J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(1): 1~8 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yuwang, Wang Jingbin, Long Lingli, *et al.* 2012. Type, indicator, mechanism, model and relationship with mineralization of magma mixing: A case study in North Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8): 2317~2330 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yuwang, Wang Jingbin, Wang Shulai, *et al.* 2008. Magma mixing in the Xilekuduke area, Fuyun County, Xinjiang and its mineralization significance [J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(2): 221~233, 293~294 (in Chinese with English abstract).
- Wu Yanzhi. 2012. Characteristics of ore-controlling structures and prospective analysis of Hatu-Saertuohai gold belt in Western Junggar, Xinjiang [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 22 (3): 854~862 (in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Windley B F, Yuan C, *et al.* 2009. Paleozoic multiple sub-

- duction-accretion processes of the southern Altaids[J]. American Journal of Science, 309(3): 221~270.
- Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Feng Yimin, *et al.* 1992. Tectonic Evolution of Northern Xinjiang and Its Adjacent Regions[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~169(in Chinese).
- Xing Guangfu, Lu Qingdi, Jiang Yang, *et al.* 2010. Identification and significance of "gneissic" magma-mixed complex in the Changle-Nan'ao fault zone, southeastern Fujian, China[J]. Geological Bulletin of China, 29(1): 31~43(in Chinese with English abstract).
- Yang Gaoxue, Li Yongjun, Wu Hong'en, *et al.* 2009. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Huangyangshan pluton and its enclaves from Kalamaili area eastern Junggar, Xinjiang, and geological implication[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(12): 3 197~3 207(in Chinese with English abstract).
- Yu Jiejiang, Hou Xuegang, Ge Wenchun, *et al.* 2013. Magma mixing genesis of the Early Permian Liulian pluton at the northeastern margin of the Jiamusi massif in NE China: Evidences from petrography, geochronology and geochemistry[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(9): 2 971~2 986(in Chinese with English abstract).
- Zhai Changjin. 2013. Geological characteristics and metallogenic potential of Adayi gold deposits in Tuoli, Xinjiang[J]. Xinjiang Nonferrous Metals, (3): 47~51(in Chinese).
- Zhang Hongwei, Kang Lei, Zhao Chunhuan, *et al.* 2011. Geochemical evidence of magma mingling of Xiaerpu Granite in West Junggar, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 44(2): 41~50(in Chinese with English abstract).
- Zhang Limin, Li Yongjun, Sun Yong, *et al.* 2014. U-Pb geochronology of Saertuohai Granitic stock in Western Junggar, NW China[J]. Xinjiang Geology, 32(1): 35~41(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lianchang, Wan Bo, Jiao Xuejin, *et al.* 2006. Characteristics and geological significance of adakitic rocks in copper-bearing porphyry in Baogutu, Western Junggar[J]. Geology in China, 33(3): 626~631(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Pan Guoqiang, Li Chengdong, *et al.* 2007. Granitic magma mixing versus basaltic magma mixing: New viewpoints on granitic magma mixing process: some crucial questions on granite study(1)[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(5): 1 141~1 152(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shiqi, Cai Minghai, Peng Zhen'an, *et al.* 2010. Geological characteristics of Tungsten-tin deposits and the indication of mantle material participating the Tungsten-tin mineralization in Guposhan region, Guangxi[J]. Northwestern Geology, 43(1): 86~97(in Chinese with English abstract).
- Zhou Xunruo. 1994. Hybridization in the genesis of granitoids[J]. Earth Science Frontiers, 1(1~2): 87~97(in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongfeng, An Fang, Xu Cunyuan, *et al.* 2013. Geology and Deposits in the Hatu and Its Adjacent Region(Xinjiang): Evolution and Prospecting Model[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~147(in Chinese).
- Zhu Y F, Chen B, Xu X, *et al.* 2013. A new geological map of the western Junggar, north Xinjiang(NW China): Implications for Paleoenvironmental reconstruction[J]. Episodes, 36(3): 205~220.
- Zorpi M J, Coulon C, Orsini J B, *et al.* 1989. Magma mingling, zoning and emplacement in calc-alkaline granitoid plutons[J]. Tectonophysics, 157(4): 315~329.
- Zou Tao, Wang Jingbin, Wang Yuwang, *et al.* 2011. Magma mixing in the Karamay rock body of west Junggar, Xinjiang: evidence from geochemistry[J]. Geology in China, 38(1): 65~76(in Chinese with English abstract).
- Zou Tao, Wang Jingbin, Wang Yuwang, *et al.* 2012. Magma mixing characteristics and geological significance of host porphyry from the Aolunhua Mo-Cu deposit, Inner Mongolia[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 42(S2): 171~187(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 曹殿华, 王安建, 李文昌, 等. 2009. 普朗斑岩铜矿岩浆混合作用: 岩石学及元素地球化学证据[J]. 地质学报, 83(2): 166~175.
- 晁文迪, 李永军, 王 冉, 等. 2015. 西准噶尔托里县布尔克斯台岩体岩浆混合成因的确认及其地质意义[J]. 西北地质, 48(3): 149~156.
- 陈宣华, 聂兰仕, 丁伟翠, 等. 2015. 西准噶尔走滑断裂系元素分布特征及其成矿意义[J]. 岩石学报, 31(2): 371~387.
- 成 勇, 张 锐. 2006. 新疆西准包古图地区铜金成矿规律浅析[J]. 地质与勘探, 42(4): 11~15.
- 董传万, 李武显, 陈小明, 等. 1998. 闽东南晚中生代岩浆混合作用: 平潭火成杂岩的岩石学证据[J]. 自然科学进展: 国家重点实验室通讯, 8(5): 581~586.
- 董国臣, 莫宣学, 赵志丹, 等. 2006. 冈底斯岩浆带中段岩浆混合作用: 来自花岗杂岩的证据[J]. 岩石学报, 22(4): 835~844.
- 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): 44~45, 50~55.
- 何国琦, 成守德, 徐 新, 等. 2004. 中国新疆及邻区大地构造图(1:2 500 000)说明书[M]. 北京: 地质出版社, 1~65.
- 贺新星, 肖 龙, 王国灿, 等. 2015. 西准噶尔晚古生代中基性岩墙群岩石学成因及地质意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 40(5): 778~796.
- 康 磊, 李永军, 张 兵, 等. 2009. 新疆西准噶尔夏尔甫岩体岩浆混合的岩相学证据[J]. 岩石矿物学杂志, 28(5): 423~432.

- 李昌年. 2002. 岩浆混合作用及其研究评述[J]. 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[J]. 岩石矿物学杂志, 25(5): 357~376.
- 李锦轶, 何国琦, 徐新, 等. 2006. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨[J]. 地质学报, 80(1): 148~168.
- 李锦轶, 张进, 杨天南, 等. 2009. 北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 39(4): 584~605.
- 李永军, 梁积伟, 杨高学, 等. 2014. 区域地质调查导论[M]. 北京: 地质出版社, 40~44.
- 李永军, 王冉, 李卫东, 等. 2012. 西准噶尔达尔布特南构造-岩浆岩带斑岩型铜—钼矿新发现及找矿思路[J]. 岩石学报, 28(7): 2009~2014.
- 李永军, 赵仁夫, 李注苍, 等. 2003. 岩浆混合花岗岩微量元素成因图解尝试—以西秦岭温泉岩体为例[J]. 长安大学学报(地球科学版), 25(3): 7~15.
- 刘建平, 王核, 龚贵伦, 等. 2009. 新疆西准噶尔地区加尔塔斯斑岩型铜矿地质特征与深部预测[J]. 地质与勘探, 45(1): 7~12.
- 龙灵利, 王玉往, 王京彬, 等. 2010. 新疆希勒库都克铜钼矿区岩浆混合作用: 来自锆石 U-Pb 年代学的证据[J]. 岩石学报, 26(2): 449~456.
- 罗照华, 莫宣学, 卢欣祥, 等. 2007. 透岩浆流体成矿作用——理论分析与野外证据[J]. 地学前缘, 14(3): 165~183.
- 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识别与研究方法[A]. 肖庆辉, 邓晋福. 花岗岩研究思维与方法[C]. 北京: 地质出版社, 53~70.
- 莫宣学. 2011. 岩浆作用与青藏高原演化[J]. 高校地质学报, 17(3): 351~367.
- 彭惠娟, 汪雄武, Müller Axel, 等. 2011. 西藏甲玛铜多金属矿区成矿斑岩的岩浆混合作用: 石英及长石斑晶新证据[J]. 矿床地质, 30(2): 249~265.
- 齐有强, 胡瑞忠, 刘桑, 等. 2008. 岩浆混合作用研究综述[J]. 矿物岩石地球化学通报, 27(4): 409~416.
- 任雯. 2009. 新疆托里县阿达依斑岩铜矿点地质及地球化学异常特征[J]. 新疆有色金属, (S1): 37~41.
- 申萍, 沈远超, 潘成泽, 等. 2010. 新疆哈图-包古图金铜矿集区锆石年龄及成矿特点[J]. 岩石学报, 26(10): 2879~2893.
- 沈远超, 金成伟. 1993. 西准噶尔地区岩浆活动与金矿化作用[M]. 北京市: 科学出版社, 1~239.
- 王乐民, 段丰浩, 纪征宝, 等. 2015. 西准噶尔宝贝金矿区小岩株锆石 U-Pb 年代学及其对成矿的时代制约[J]. 西北地质, 48(3): 241~250.
- 王晓霞, 王涛, 卢欣祥, 等. 2002. 北秦岭老君山-秦岭梁环斑结构花岗岩岩浆混合的岩相学证据及其意义[J]. 地质通报, 21(8~9): 523~529.
- 王学求, 徐善法, 迟清华, 等. 2013. 中国金的地球化学省及其成因的微观解释[J]. 地质学报, 87(1): 1~8.
- 王玉往, 王京彬, 龙灵利, 等. 2012. 岩浆混合作用的类型、标志、机制、模式及其与成矿的关系—以新疆北部为例[J]. 岩石学报, 28(8): 2317~2330.
- 王玉往, 王京彬, 王书来, 等. 2008. 新疆富蕴希力库都克地区岩浆混合作用及其成矿意义[J]. 地质学报, 82(2): 221~233, 293~294.
- 吴延之. 2012. 新疆西准噶尔哈图-萨尔托海金矿带控矿构造特征及找矿前景分析[J]. 中国有色金属学报, 22(3): 854~862.
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民, 等. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造[M]. 北京: 地质出版社, 1~169.
- 邢光福, 卢清地, 姜杨, 等. 2010. 闽东南长乐-南澳断裂带“片麻状”浆混杂岩的厘定及其地质意义[J]. 地质通报, 29(1): 31~43.
- 杨高学, 李永军, 吴宏恩, 等. 2009. 东准噶尔卡拉麦里地区黄羊山花岗岩和包体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及地质意义[J]. 岩石学报, 25(12): 3197~3207.
- 于介江, 侯雪刚, 葛文春, 等. 2013. 佳木斯地块东北缘早二叠世六连岩体的岩浆混合成因: 岩相学、年代学和地球化学证据[J]. 岩石学报, 29(9): 2971~2986.
- 翟常晋. 2013. 新疆托里县阿达依金矿地质特征及成矿远景分析[J]. 新疆有色金属, (3): 47~51.
- 张洪伟, 康磊, 赵春环, 等. 2011. 西准噶尔夏尔甫岩体岩浆混合的地球化学证据[J]. 西北地质, 44(2): 41~50.
- 张丽敏, 李永军, 孙勇, 等. 2014. 西准噶尔萨尔托海花岗岩株锆石 U-Pb 年代学及地质意义[J]. 新疆地质, 32(1): 35~41.
- 张连昌, 万博, 焦学军, 等. 2006. 西准包古图含铜斑岩的埃达克岩特征及其地质意义[J]. 中国地质, 33(3): 626~631.
- 张旗, 潘国强, 李承东, 等. 2007. 花岗岩混合问题: 与玄武岩对比的启示——关于花岗岩研究的思考之一[J]. 岩石学报, 23(5): 1141~1152.
- 张诗启, 蔡明海, 彭振安, 等. 2010. 广西姑婆山地区钨锡矿床地质特征及幔源物质参与与成矿显示[J]. 西北地质, 43(1): 86~97.
- 中国科学院地球化学研究所. 2000. 高等地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 174~188.
- 周珣若. 1994. 花岗岩混合作用[J]. 地学前缘, 1(1~2): 87~97.
- 朱永峰, 安芳, 徐存元, 等. 2013. 新疆哈图及其周边金矿成矿规律和深部找矿预测[M]. 北京: 地质出版社, 1~147.
- 邹滔, 王京彬, 王玉往, 等. 2011. 新疆克拉玛依岩体的岩浆混合成因: 岩石地球化学证据[J]. 中国地质, 38(1): 65~76.
- 邹滔, 王京彬, 王玉往, 等. 2012. 内蒙古敖伦花斑岩铜钼矿含矿斑岩的岩浆混合特征及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(S2): 171~187.