

新疆阿尔泰小土尔根铜矿区岩体地球化学 及其地质意义

秦纪华¹, 耿新霞², 温超权¹, 郭建新¹, 任宇晨³

(1. 新疆地质矿产勘查开发局 第四地质大队, 新疆 阿勒泰 836500; 2. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3. 新疆大学 地质勘查与工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘要: 小土尔根是近年来诺尔特地区新发现的斑岩铜矿。矿区内发育花岗斑岩、花岗闪长斑岩、黑云母二长花岗岩, 其中与成矿作用密切相关的岩体为花岗闪长斑岩。为了确定矿区侵入岩成因及其与铜矿化的内在关系, 对矿区内发育的岩体开展了岩相学和地球化学研究。结果表明, 所有岩石富硅和碱, 铝含量中等, 属高钾钙碱性和钾玄质系列岩石。所有样品富集 Rb、Ba 等大离子亲石元素和轻稀土元素, 相对亏损 Nb、Ta、Ti、P、Sr 和重稀土元素, 指示其为同源岩浆分异演化的产物, 形成于陆缘弧环境。结合区域地质背景, 推测这些岩体是俯冲洋壳发生部分熔融并交代上覆地幔楔后, 在上升过程中经分离结晶作用后的产物。与典型的还原性斑岩型铜矿形成条件进行对比研究后, 认为小土尔根地区有形成斑岩型矿床的潜力。

关键词: 地质特征; 侵入岩; 地球化学; 铜矿床; 小土尔根; 新疆

中图分类号: P588.12⁺1; P618.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)02-0195-18

Geochemistry and geological implications of the plutons from the Xiaotuergen copper ore district in Altay, Xinjiang

QIN Ji-hua¹, GENG Xin-xia², WEN Chao-quan¹, GUO Jian-xin¹ and REN Yu-chen³

(1. No. 4 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Altay 836500, China; 2. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Land and Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. College of Geology and Prospecting Engineering Program, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: Xiaotuergen is the first porphyry copper deposit discovered in Nuoerte area in recent years. Granite porphyry, granodiorite porphyry and biotite monzonitic granite are widely developed in the ore district, and the mineralization is closely related to the granodiorite porphyry. In order to investigate the petrogenesis of intrusive rocks and their intrinsic relationship with copper mineralization, the authors carried out the petrographic and geochemical studies of the widely developed intrusive rocks in the ore district. The results show that all rocks exhibit high silica and alkaline, with moderate aluminum content. They belong to high-K calc-alkaline and shoshonitic rocks. All samples are enriched in Rb, Ba and other large ion lithophile elements (LILE) and LREE, and relatively depleted in Nb, Ta, Ti, P, Sr and HREE, indicating that they were formed by comagmatic differentiation and evolution in a continental arc environment. Combined with regional geological background, the authors hold that these rocks are the product of subducted oceanic crust which experienced partial melting, replacement

收稿日期: 2015-06-08; 接受日期: 2015-10-17

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(K1402); 新疆地质矿产勘查开发局自筹资金项目(XGMB2012019); 国家自然科学基金项目(41502078)

作者简介: 秦纪华(1970-), 男, 高级工程师, 从事矿产勘查工作, E-mail: 1456561626@qq.com; 通讯作者: 耿新霞(1979-), 女, 助理研究员, 从事成矿规律研究, E-mail: gengxinxia@cags.ac.cn。

of overlying mantle wedge and fractional crystallization during the rising process. A comparison with the formation conditions of typical reduced porphyry copper deposits shows that the Xiaotuergeren ore district has the potential to form porphyry deposit.

Key words: geological characteristics; intrusive rocks; geochemistry; copper deposit; Xiaotuergeren; Xinjiang

Fund support: Fundamental Scientific Research Separate Funds for Central Public Welfare Research Institutes (K1402); Self-collected Funds Project of Xinjiang Bureau of Geological and Mineral Exploration and Development (XGMB2012019); National Natural Science Foundation of China (41502078)

中亚造山带是全球最大的显生宙增生造山带(Şengör *et al.*, 1993)和陆壳生长区(Jahn *et al.*, 2000),以强烈的构造、岩浆活动和丰富的矿产资源为特征。中亚造山带内发育多个斑岩铜矿床,且规模巨大,如西段的哈萨克斯坦科翁腊德铜矿和阿克斗卡大型铜矿、乌兹别克斯坦阿尔马雷克超大型铜矿以及东段的蒙古国欧玉陶勒盖超大型铜金矿和额尔登特大型铜矿(Kudryavtsev, 1996; Golovanov *et al.*, 2005; 李光明等, 2008; Wainwright *et al.*, 2011; Seltnann *et al.*, 2013)。位于中亚成矿域中段的新疆地区,也发育多个斑岩型铜矿床,其主要分布于准噶尔、西天山和东天山地区,且多为中小型,少数达到大型规模(Han *et al.*, 2006; 张招崇等, 2006; Liu *et al.*, 2009; Shen *et al.*, 2010; 龙灵利等, 2011; 杨富全等, 2012; Yang *et al.*, 2012, 2014)。然而,同处中亚成矿域中段的新疆阿尔泰造山带内尚未有斑岩铜矿床的报道。

近年来,新疆地质矿产勘查开发局第四地质大队在新疆阿尔泰造山带的诺尔特盆地发现了小土尔根铜矿,该矿床具有斑岩铜矿床的典型特征。笔者所在项目组对该矿的含矿围岩成岩时代、矿床地质特征等方面开展了研究,初步认为该矿为斑岩铜矿。温超权等(2015)描述了小土尔根铜矿的矿化特征,划分了成矿期次,并与典型斑岩铜矿、准噶尔北缘卡拉先格尔斑岩铜矿带进行了对比,认为小土尔根铜矿属斑岩型铜矿床。秦纪华等(2016)获得了小土尔根铜矿区花岗斑岩、花岗闪长斑岩、黑云母二长花岗岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄(398~401 Ma),认为岩体为早泥盆世同一岩浆侵入活动形成的不同侵入体。然而,目前对于该矿床形成的构造背景、岩浆来源和演化、矿床的成矿潜力等问题尚不清楚。本文在野外地质调查和分析勘查资料基础上,对矿区出露的花岗斑岩、花岗闪长斑岩、黑云母二长花岗岩的岩体地质和地球化学进行了研究,探讨了岩浆起源及演化、矿床形成的地球动力学背景,以期对岩浆

作用与斑岩型矿床的成矿提供依据,也为诺尔特盆地乃至阿尔泰造山带的斑岩铜矿床的找矿勘查提供理论依据。

1 区域成矿地质背景

大地构造上,新疆阿尔泰包括西伯利亚板块的北阿尔泰早古生代陆缘活动带和南阿尔泰晚古生代活动陆缘。前者进一步分为诺尔特泥盆纪-石炭纪上叠火山-沉积盆地、喀纳斯-可可托海古生代岩浆弧;后者进一步分为克兰泥盆纪-石炭纪弧后盆地、卡尔巴-纳雷姆石炭纪-二叠纪岩浆弧和西卡尔巴石炭纪弧前盆地。前人根据红山嘴-诺尔特断裂、阿巴宫断裂、巴寨断裂、克兹加尔断裂,将中国阿尔泰造山带分为北、中和南阿尔泰(图1)(Li *et al.*, 2003; Xiao *et al.*, 2004; Zhu *et al.*, 2006)。其中北阿尔泰位于红山嘴-诺尔特断裂以北,出露下泥盆统诺尔特组、上泥盆统忙代恰组和库马苏组、下石炭统红山嘴组;中阿尔泰位于红山嘴断裂与阿巴宫断裂、巴寨断裂之间,主要为早古生代变质岩系和大面积侵入岩,是伟晶岩及白云母、稀有金属矿主要分布区;南阿尔泰北以阿巴宫断裂为界,南以克兹加尔断裂为界与额尔齐斯构造带相邻,主要由下泥盆统康布铁堡组和中泥盆统阿勒泰镇组变质火山-沉积岩系组成,是有色金属和铁矿的主要分布区。

诺尔特盆地位于中蒙边境的北阿尔泰,出露地层有震旦-寒武系库卫群、下泥盆统诺尔代恰组和库马苏组、下石炭统红山嘴组。库卫群是诺尔特盆地的基底,主要为角闪斜长片麻岩、角闪片岩、黑云斜长片麻岩、条带状黑云斜长混合岩夹斜长角闪岩、石英二云母片岩和变粒岩等(董永观等, 2010)。诺尔特组下部为安山岩、英安岩夹杏仁状安山岩和绢云绿泥千枚岩;上部为石英岩屑砂岩夹绢云绿泥千枚岩和安山岩及厚层状浅变质粉砂岩。代恰组为炭质、硅泥质岩、细碎屑岩,底部为英安质碎斑熔岩、英

安质晶屑凝灰岩、岩屑晶屑凝灰岩夹少量火山角砾岩(芮行健等, 1993)。库马苏组下亚组为变质长石岩屑砂岩、粉砂质泥岩夹砂砾岩等; 上亚组为变质中细粒砂岩、长石岩屑砂岩、粉砂岩夹结晶灰岩。该组中的火山岩主要是英安质火山岩、火山沉积岩。下石炭统红山嘴组主要为中酸性火山岩、火山沉积岩和浅-滨海相碎屑岩、生物灰岩, 可分为3个岩性段:

第1岩性段主要为凝灰质砂岩、凝灰质粉砂岩夹生物碎屑灰岩, 灰岩夹凝灰岩、凝灰质粉砂岩; 第2岩性段以流纹质晶屑凝灰岩、凝灰质粉砂岩、钙质凝灰质粉砂岩、流纹岩、角砾岩屑晶屑凝灰岩、角砾状灰岩为主; 第3岩性段以含砾细砂岩、泥质粉砂岩、含生物碎屑凝灰质粉砂岩、凝灰质细砂岩、凝灰质粉砂岩为主。

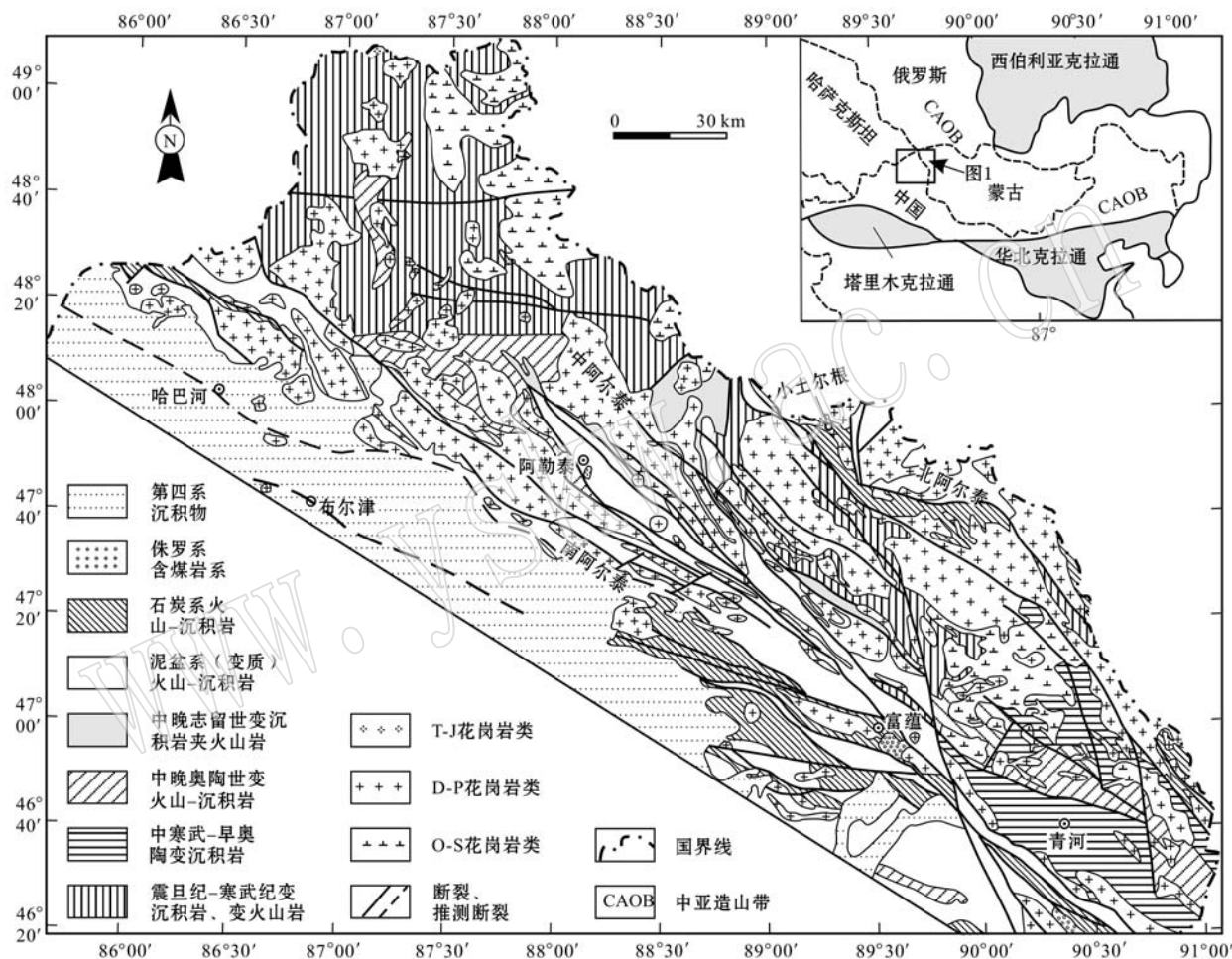


图1 阿尔泰造山带区域地质略图(据杨富全等, 2011)

Fig. 1 Simplified regional geological map of the Altay orogen (after Yang Fuquan *et al.*, 2011)

红山嘴断裂为区域规模最大的断裂, 走向 $320^{\circ} \sim 290^{\circ}$, 倾向南西, 倾角 $60^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。断裂南侧为库卫群深变质岩, 北侧出露地层为下石炭统红山嘴组。断裂两侧多分布混合岩化二长花岗岩和片麻状黑云母花岗岩, 发育多条韧性剪切带, 形成各种糜棱片岩。其他断裂有塔拉比格都尔根断裂、库热克特断裂、阿克萨拉沟断裂和阿特拉达断裂。区内褶皱主要有博扎依都根向斜、阿特拉达北背斜、阔克牙克达拉斯背斜和喀依腊克特喀拉都尔根背斜, 呈有规律

的线形排列, 由一系列紧闭的线形褶皱组成。诺尔特盆地内的侵入岩主要有黑云母二长花岗岩、黑云母花岗岩、花岗斑岩、石英斑岩、闪长岩、环斑花岗岩、英云闪长岩(袁峰等, 2001a; 李东, 2013)。

2 岩体地质特征

小土尔根铜矿位于诺尔特盆地的西北部, 矿区出露地层为下泥盆统诺尔特组, 岩性主要有凝灰质

粗砂岩、凝灰质细砂岩、凝灰质粉砂岩。矿区内出露岩体以花岗闪长斑岩、黑云二长花岗岩为主,其次是花岗斑岩(图 2)。其中花岗闪长斑岩与铜矿化关系密切,小土尔根铜矿赋存于花岗闪长斑岩体的内外接触带,在岩体内接触带有细脉浸染状矿石组成的复式脉状矿体。矿区圈定 3 个工业矿体,近东西-南东向雁行状排列(图 3)。其中 I 号为主矿体,长约 600 m,厚约 3.0~40.8 m。矿石多呈浸染状、细脉状、细脉-浸染状、网脉状和团块状构造(图 4a~4e)。矿石中主要原生金属矿物有黄铜矿、方铅矿和闪锌矿(图 4a~4f),次要的金属矿物为黄铁矿、磁黄铁

矿、磁铁矿和斑铜矿,次生的金属矿物有褐铁矿、孔雀石和辉铜矿。非金属矿物有方解石、绢云母、黑云母、更-钠长石、钾长石、角闪石、绿帘石、绿泥石、石英和磷灰石等。铜品位 0.20%~3.74%,平均 0.44%。围岩蚀变主要见硅化、绿泥石化、绿帘石化、绢云母化、钾长石化、黑云母化、碳酸盐化和高岭土化,其中硅化和碳酸盐化与成矿关系最为密切。

花岗闪长斑岩是含矿岩体,呈岩株状分布于矿区中东部,出露面积约 3.42 km²。岩体西侧侵入下泥盆统诺尔特组,接触面产状为北西外倾,花岗闪长斑岩体与其南邻的黑云二长花岗岩呈断层接触

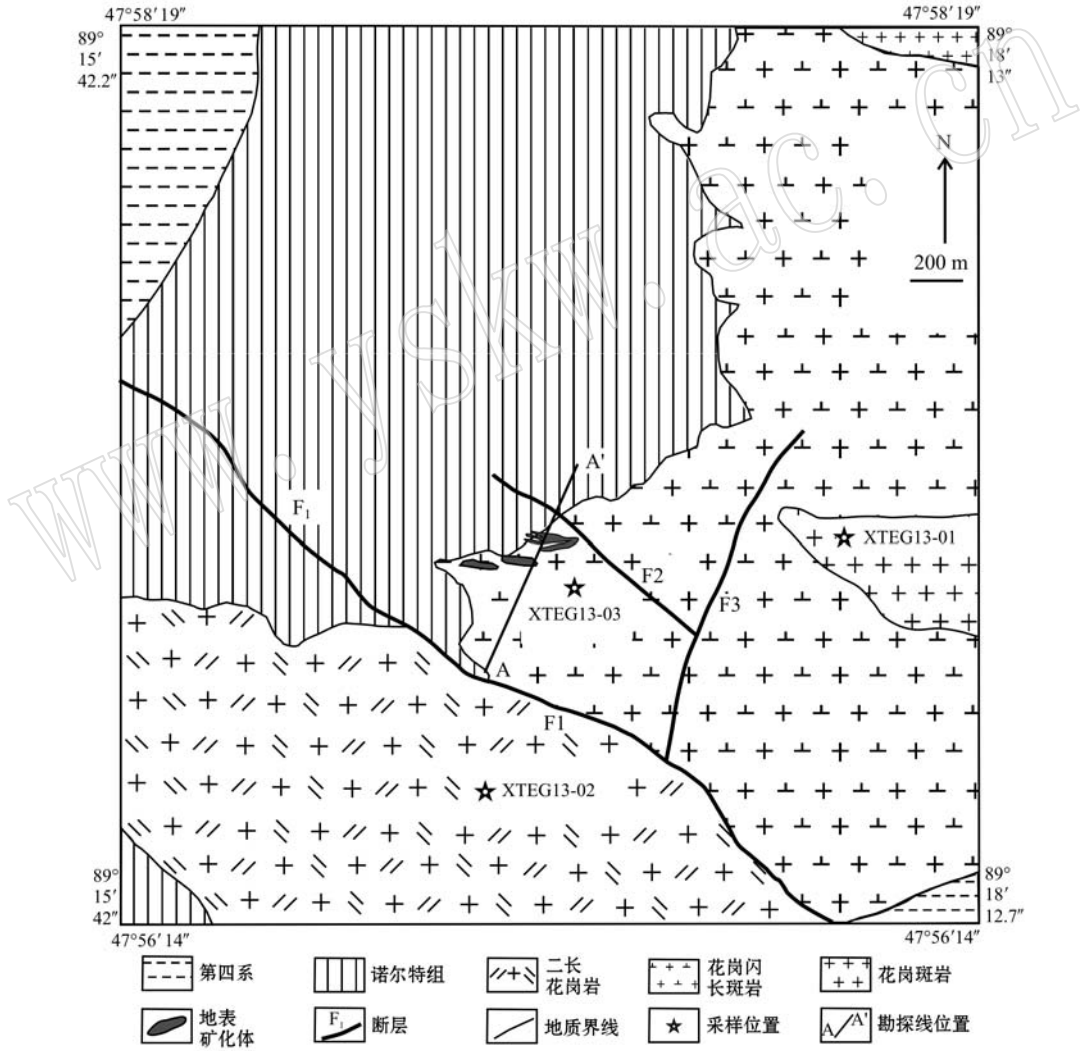


图 2 新疆小土尔根铜矿区地质略图[据新疆地质矿产勘查开发局第四地质大队(2015)^①简化修编]

Fig. 2 Geological map of the Xiaotuergeren copper deposit (after No. 4 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 2015)^①

① 新疆地质矿产勘查开发局第四地质大队. 2015. 新疆富蕴县小土尔根铜矿详查报告.

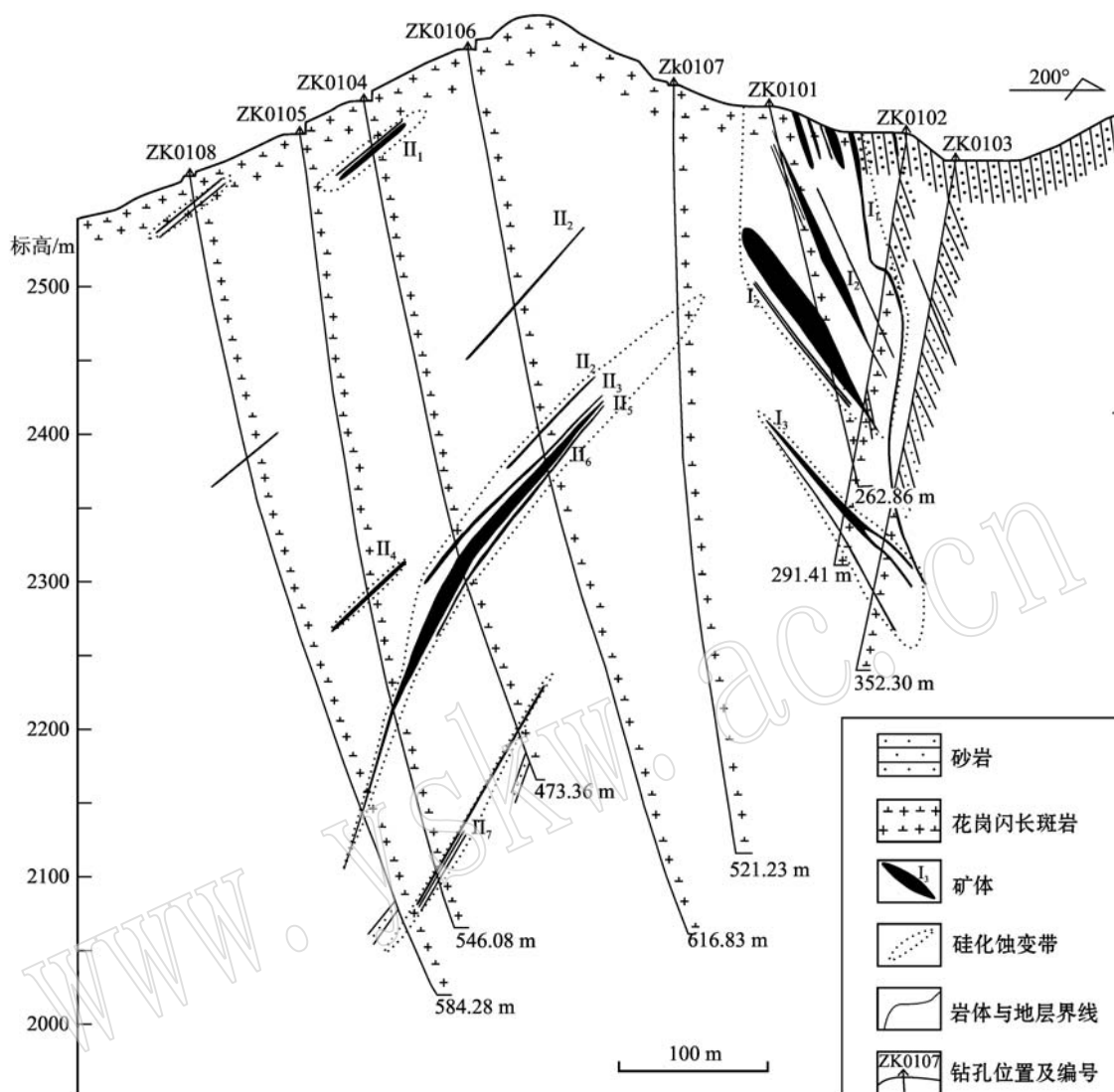


图3 新疆小土尔根铜矿1勘探线剖面图[据新疆地质矿产勘查开发局第四地质大队(2015)^①简化修编]

Fig. 3 Cross section along No. 1 exploration line of the Xiaotuerge copper deposit (modified after No. 4 Geological Party, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, 2015)^①

(图2)。岩石为浅灰色,块状构造,斑状结构、自碎斑结构和聚斑结构(图4g)。岩石由斑晶和基质组成,其中斑晶占35%~40%,常聚集显聚斑结构,主要由斜长石(10%~15%)、钾长石(5%~8%)、石英(8%~10%)和黑云母(4%~5%)组成(图4h)。斜长石呈自形柱状,粒径0.3~4 mm,常见棱角状-次棱角状,均已发生强烈绢云母化,仅保留其晶形交代假像结构。钾长石呈自形板状,主要为条纹长石,粒径0.5~3 mm,常呈棱角状-次棱角状,个别为溶蚀状。石英呈它形粒状,多呈熔蚀港湾状,个别见棱角状-

次棱角状,粒径0.5~5 mm。黑云母自形片状,粒径0.5~5 mm。基质60%~65%,主要为显微晶质-隐晶质的斜长石、钾长石、石英和黑云母。副矿物有钛铁矿、磁黄铁矿、磷灰石、锆石。花岗闪长斑岩锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄为 401.0 ± 2.9 Ma(秦纪华等,2016)。

中粗粒黑云二长花岗岩区域上呈北西向带状分布,在矿区西南部出露。北侧侵入诺尔特组,与含矿花岗闪长斑岩呈断层接触(图2)。岩石呈灰色,块状构造,中粗粒花岗结构(图4i),局部也见中细粒花岗

① 新疆地质矿产勘查开发局第四地质大队. 2015. 新疆富蕴县小土尔根铜矿详查报告.

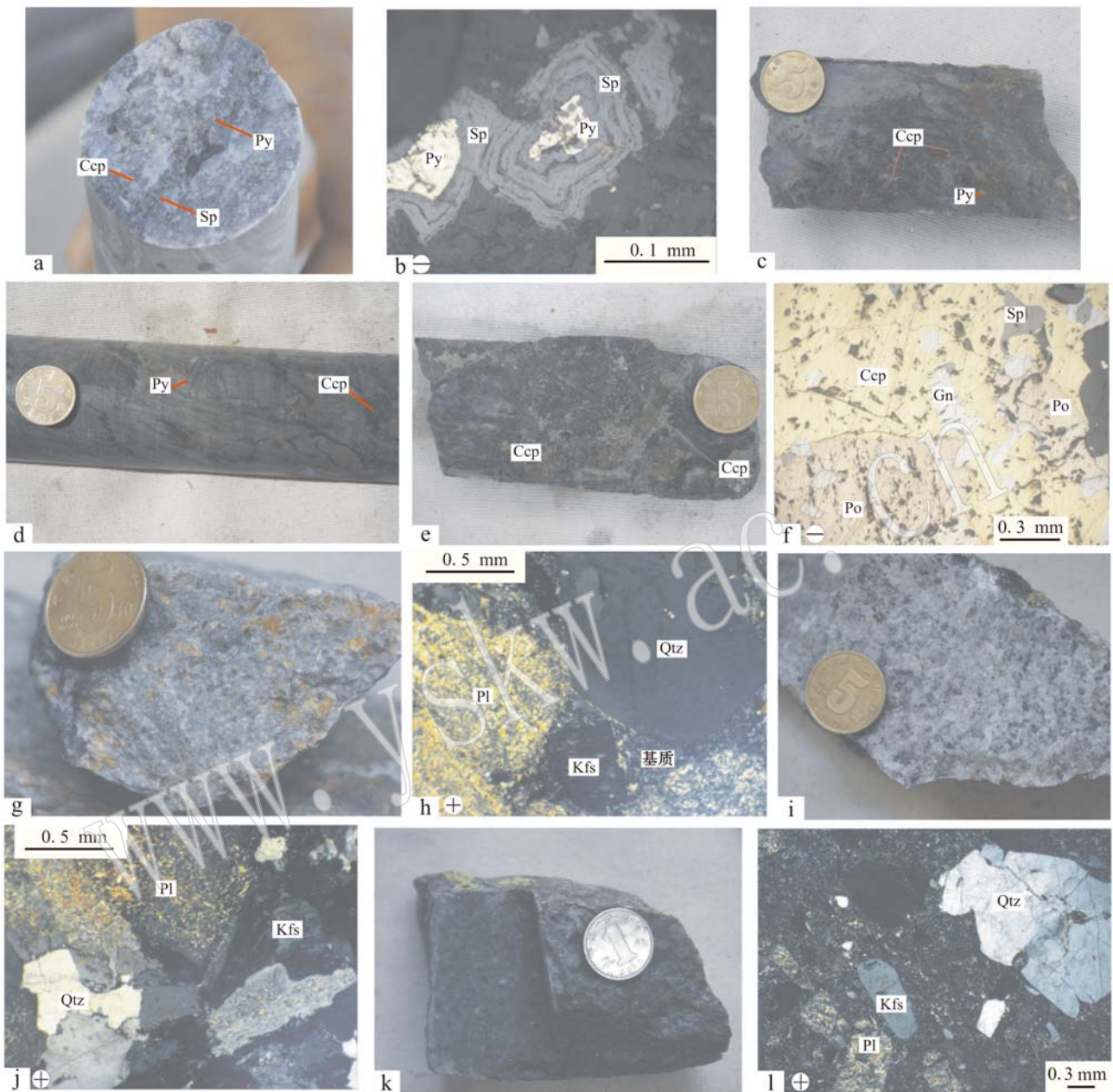


图4 小土尔根铜矿区岩体特征

Fig. 4 Characteristics of plutons in the Xiaotuergeren ore district

a—含黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿的石英脉；b—含浸染状黄铁矿化闪锌矿的黑云二长花岗岩的镜下特征；c—浸染状黄铁矿化黄铜矿化石英斑岩；d—脉状团块状黄铁矿黄铜矿化石英斑岩；e—团块状黄铜矿化硅化石英斑岩；f—方铅矿闪锌矿黄铜矿化硅化粉砂岩镜下照片；g、h—花岗闪长斑岩；i、j—黑云二长花岗岩；k、l—花岗斑岩；Ccp—黄铜矿；Sp—闪锌矿；Py—黄铁矿；Po—磁黄铁矿；Gn—方铅矿；Pl—斜长石；Kfs—钾长石；Qtz—石英；Bt—黑云母

a—chalcopyrite, pyrite and sphalerite in quartz vein; b—photomicrograph of disseminated pyrite and sphalerite mineralization in biotite monzogranite; c—disseminated pyrite and chalcopyrite mineralization in quartz porphyry; d—vein and lump type of pyrite and chalcopyrite mineralization in quartz porphyry; e—lump chalcopyrite mineralization in silicified quartz porphyry; f—photomicrograph of galena, sphalerite and chalcocite mineralization in silicified siltstone; g and h—granodiorite porphyry; i and j—biotite monzogranite; k and l—granite porphyry; Ccp—chalcopyrite; Sp—sphalerite; Py—pyrite; Po—pyrrhotite; Gn—galena; Pl—plagioclase; Kfs—feldspar; Qtz—quartz; Bt—biotite

结构。岩石矿物组成主要为斜长石(35%~40%)、钾长石(25%~30%)和石英(25%~30%)，含少量

黑云母(5%~6%)(图4j)。斜长石呈半自形柱状，聚片双晶发育，粒径2~7 mm。钾长石呈它形粒状，

主要为条纹长石, 粒径 2~7 mm。石英呈它形粒状, 粒径 2~7 mm。黑云母呈片状, 片径 0.1~1 mm。副矿物为钛铁矿、磷灰石和锆石。黑云二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 398.1 ± 2.2 Ma(秦纪华等, 2016)。

花岗斑岩主要分布于矿区东北和东部, 与花岗闪长斑岩呈侵入接触关系(图 2)。岩石为灰色, 块状构造, 斑状结构(图 4k)。岩石由斑晶(30%~35%)和基质(65%~70%)组成。斑晶主要为斜长石(8~10%)、钾长石(10%~12%)、石英(10~12%)和黑云母(2~5%)(图 4l)。钾长石多为自形板状条纹长石, 自形晶大小介于 1~3 mm 之间。斜长石多呈自形板状, 均已发生强烈绢云母化, 自形晶大小约 0.3~4 mm 之间。石英多为它形粒状, 粒径大小介于 0.2~5 mm 之间。黑云母为自形片状, 含量较少。基质为显微晶质的石英、钾长石和斜长石等。岩石中可见少量锆石、钛铁矿、磷灰石等副矿物, 并见绢云母、绿泥石和方解石等蚀变矿物。花岗斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 400.5 ± 2 Ma(秦纪华等, 2016)。

3 样品测试方法

本研究对 3 个岩体共 21 件新鲜样品进行了主量元素、稀土元素和微量元素分析(包括花岗斑岩 5 件、黑云二长花岗岩 8 件和花岗闪长斑岩 8 件), 具体采样位置见图 2。结果列于表 1。

岩石地球化学样品的无污染破碎及所有的样品测试均由澳实分析检测(广州)有限公司测试中心测定完成。主量元素分析采用等离子光谱仪定量分析, 检测元素范围 0.01%~100%; 微量元素和稀土元素分析仪器为等离子体质谱仪, 采用硼酸锂熔融。主量元素测试采用 X 射线荧光法(XRF)(国家标准 ME-XRF26 监控)在 X 荧光光谱仪(2100)上完成, 其中 FeO 采用容量滴定法(国家标准 Fe-VOL05 监控), 烧失量(LOI)用重量法(国家标准 ME-GRA05 标准监控)分析。微量和稀土元素测试利用等离子光谱仪(IRIS)(JY/T015-1996 准监控)和等离子质谱仪(X-series), 用 DZ/T0223-2001 标准鉴定, FeO 和烧失量(LOI)采用标准湿化学方法分析, 稀土和微量元素含量采用等离子质谱 X-series 测定, 并经过标准 DZ/T 0223-2001 监控, 含量 $>10 \times 10^{-6}$ 的元素分析精度优于 5%, 含量 $<10 \times 10^{-6}$ 的元素分析精度优

于 10%。

4 测试结果

4.1 主量元素

花岗斑岩具有高硅($\text{SiO}_2 = 71.10\% \sim 72.20\%$)、中等铝含量($\text{Al}_2\text{O}_3 = 12.85\% \sim 13.45\%$)、高全碱含量($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7.13\% \sim 7.49\%$)、相对富钾($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 2.32 \sim 2.90$)和低的 FeO^T (2.85%~3.26%)特征。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(图 5)上, 样品位于钾玄岩系列区域。 $A/\text{CNK}[\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})\text{摩尔分数}]$ 变化于 1.10~1.29 之间, $A/\text{NK}[\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})]$ 介于 1.42~1.49 之间, 属过铝质(图 6)。 $\text{Mg}^\#$ 变化于 34~36 之间。

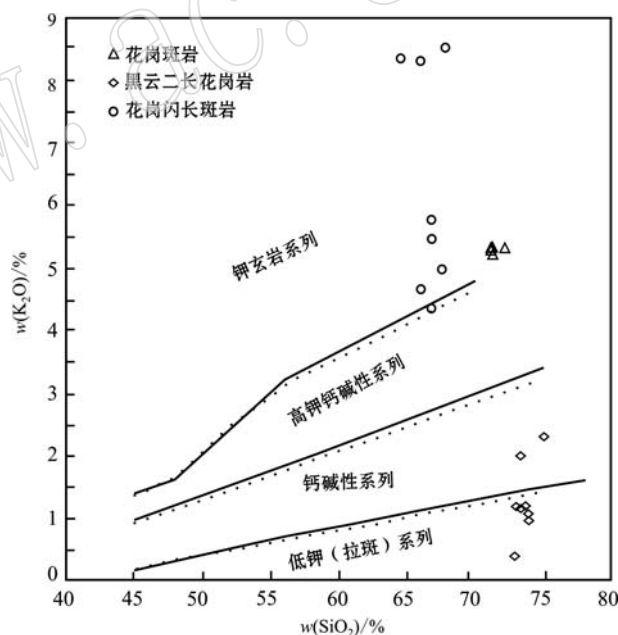


图 5 小土尔根矿区侵入岩 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解

(据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 5 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ diagrams of the intrusive rocks from the Xiaotuergen ore district (after Maniar and Piccoli, 1989)

黑云二长花岗岩具有高硅($\text{SiO}_2 = 72.90\% \sim 75.00\%$)、铝含量中等($\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.4\% \sim 13.8\%$)、低钛($\text{TiO}_2 = 0.36\% \sim 0.43\%$)特征, 全碱含量($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 4.17\% \sim 6.76\%$)和 FeO^T (1.73~3.08%)低。与花岗斑岩不同, 以富钠为特征($\text{Na}_2\text{O} = 2.21\% \sim 6.39\%$), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 变化于 0.06~0.89。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(图 5)上, 样品位于低钾拉斑系列区域,

部分位于钙碱系列区域。 A/CNK 变化于1.12~1.70之间, A/NK 介于1.25~1.90之间,表明过铝质(图6)。 $Mg^\#$ 变化于41~65之间。

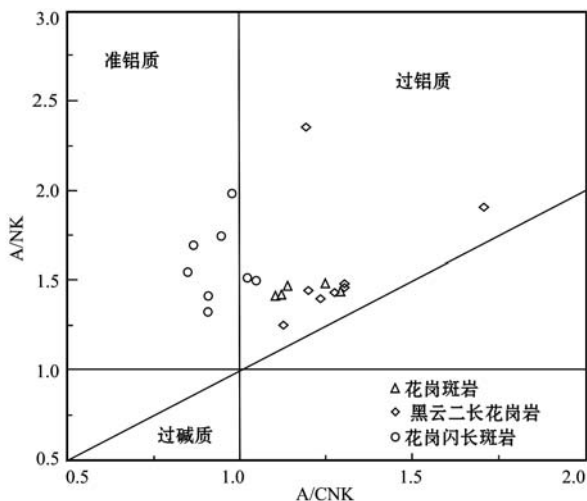


图6 小土尔根矿区侵入岩 $A/NK - A/CNK$ 图解
(据 Peccerillo and Taylor, 1976)

Fig. 6 $A/NK - A/CNK$ diagrams of the intrusive rocks from the Xiaotuergeren ore district (after Peccerillo and Taylor, 1976)

花岗闪长岩具有硅含量($SiO_2 = 64.50\% \sim 67.80\%$)、铝含量($Al_2O_3 = 13.10\% \sim 14.10\%$)和 TiO_2 含量($0.49\% \sim 0.68\%$)中等特征,富钾($K_2O = 4.34\% \sim 8.53\%$), K_2O/Na_2O 变化于2.7~33.4之间。在 $K_2O - SiO_2$ 图解(图5)上,样品位于钾玄岩系列区域。 A/CNK 变化于0.85~1.05之间, A/NK 介于1.33~1.99之间,主要为准铝质,少数为过铝质(图6)。 $Mg^\#$ 变化于33~53之间。

4.2 微量元素

花岗斑岩具有较高的稀土元素总量($161.67 \sim 196.81$) $\times 10^{-6}$,平均为 187.36×10^{-6} 。 $LREE/HREE = 6.13 \sim 6.65$, $(La/Yb)_N$ 为 $5.83 \sim 6.83$, $(La/Sm)_N = 3.06 \sim 3.42$, $\delta Eu = 0.42 \sim 0.56$ 。在稀土元素配分模式图上,呈明显轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾型,具有中等负铕异常(图7a1)。岩石的 Sr 含量为 $(99.6 \sim 114) \times 10^{-6}$, Nb 含量为 $(9.5 \sim 10.9) \times 10^{-6}$, Th 、 Ta 和 Zr 的含量分别为 $(14.65 \sim 15.55) \times 10^{-6}$ 、 $(0.9 \sim 1.2) \times 10^{-6}$ 和 $(191 \sim 252) \times 10^{-6}$ 。 Sr/Y 值相对低,介于2.3~2.7之间。

黑云二长花岗岩稀土元素总量变化最大,为 $(80.49 \sim 231.16) \times 10^{-6}$,平均为 166.01×10^{-6} , $LREE/HREE = 2.2 \sim 6.61$, $(La/Yb)_N$ 为 $1.64 \sim$

7.02 , $(La/Sm)_N = 2.16 \sim 3.62$ 。在稀土元素配分模式图上,呈明显右倾轻稀土元素富集和重稀土元素亏损特征,并具有中等负铕异常($\delta Eu = 0.44 \sim 0.59$) (图7a2)。岩石具有低 Sr 含量 $(62.3 \sim 365) \times 10^{-6}$, 中等含量的 Nb $(7.9 \sim 10.3) \times 10^{-6}$, 较高的 Th $(12.85 \sim 15.3) \times 10^{-6}$ 、 Ta $(0.7 \sim 1.1) \times 10^{-6}$ 和 Zr $(188 \sim 234) \times 10^{-6}$ 。 Sr/Y 值为 $1.3 \sim 9.2$ 。

花岗闪长斑岩具有较高的稀土元素总量($178.3 \sim 261.3$) $\times 10^{-6}$,平均为 204.41×10^{-6} ,轻重稀土元素分馏程度高, $LREE/HREE = 6.51 \sim 7.79$, $(La/Yb)_N$ 为 $6.75 \sim 8.16$,具有轻稀土元素富集的右倾型稀土元素配分模式和弱负铕异常($\delta Eu = 0.65 \sim 0.74$) (图7a3)。它们的 Sr 含量低 $(75.4 \sim 127) \times 10^{-6}$, Nb 含量中等 $(8.0 \sim 10.9) \times 10^{-6}$, Th $(11.8 \sim 14.75) \times 10^{-6}$ 、 Ta $(0.4 \sim 3.2) \times 10^{-6}$ 和 Zr $(236 \sim 354) \times 10^{-6}$ 含量较高。 Sr/Y 值为 $1.8 \sim 3.5$ 。

在原始地幔标准化蛛网图上,花岗斑岩与花岗闪长岩一致,表现为 Ba 、 Nb 、 Ta 、 Sr 、 P 和 Ti 相对亏损, Th 、 U 、 K 、 Zr 、 Hf 、 La 相对富集,而黑云二长花岗岩略有差别,表现为 Ba 、 Nb 、 Ta 、 Sr 、 P 和 Ti 相对亏损, Th 、 Zr 、 Hf 、 La 相对富集(图7b)。

总之,小土尔根矿区侵入岩主量元素变化范围不大(表1)。这些岩石属低钾拉斑-钙碱性系列-钾玄岩系列,其中花岗斑岩、花岗闪长岩为钾玄质准铝质-过铝质岩石,黑云二长花岗岩为低钾过铝质岩石。各侵入体也具有较为一致的微量元素地球化学特征(表1、图7)。

5 讨论

5.1 岩石形成的构造环境

在1:20万和1:5万区域地质报告中,小土尔根铜矿区的侵入岩被划归为华力西晚期(二叠纪)岩浆活动的产物。秦纪华等(2016)已获得含矿花岗闪长斑岩、黑云二长花岗岩和花岗斑岩的锆石 LA-ICP-MS $U-Pb$ 年龄分别为 401.0 ± 2.9 、 398.1 ± 2.2 和 400.5 ± 2 Ma,它们在误差范围内一致,表明它们是早泥盆世同一岩浆侵入事件形成的不同侵入岩。

诺尔特盆地位于中国阿尔泰造山带北部,前人对该地区的研究相对较少,研究程度也较低,对其古生代所处的构造环境有多种不同的认识。如袁峰等(2001a)认为诺尔特盆地泥盆纪-石炭纪火山岩形成于陆相环境;王登红等(2002)根据下泥盆统诺尔特

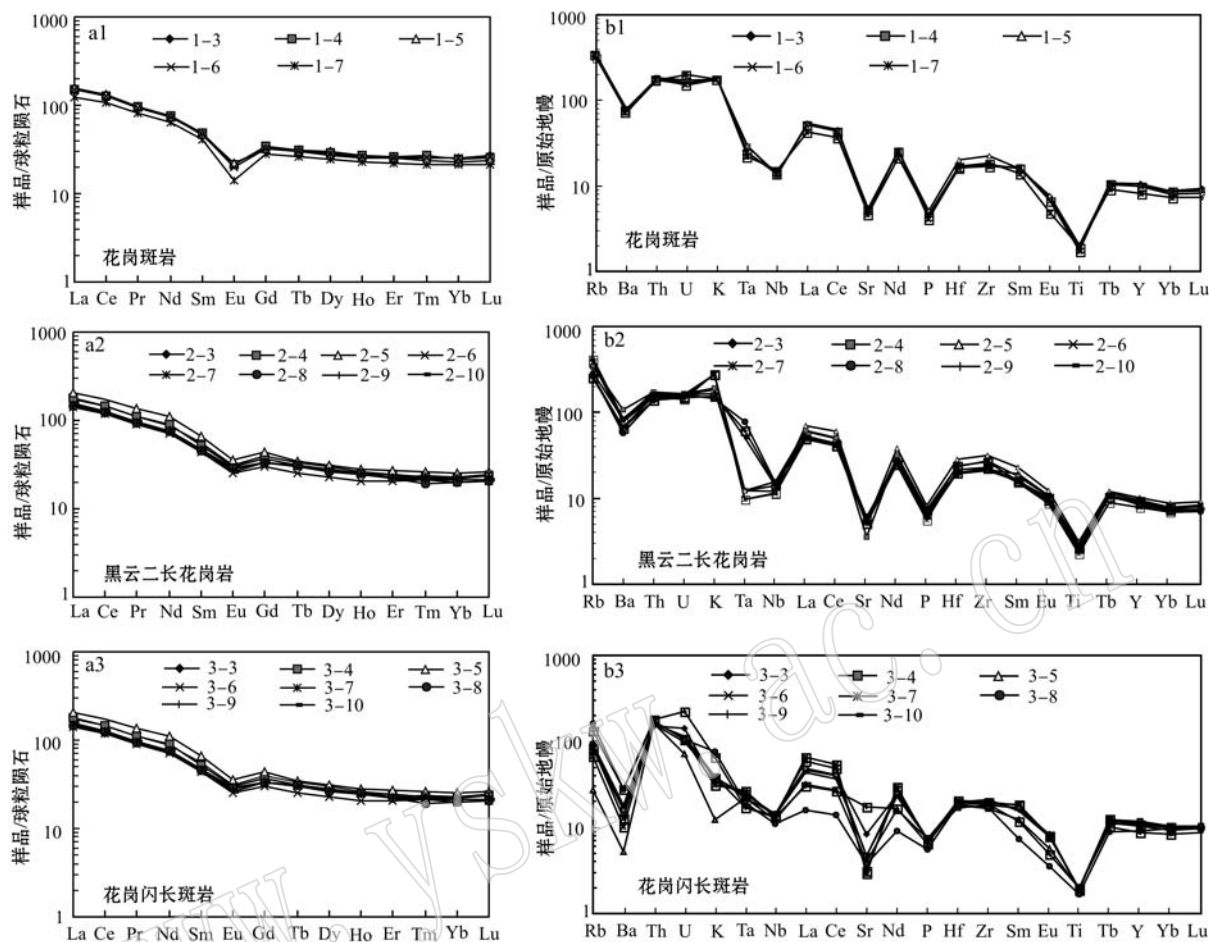


图7 小土尔根矿区侵入岩稀土元素球粒陨石标准化曲线(a, 球粒陨石据 Sun and McDonough, 1989)和微量元素蛛网图(b, 原始地幔数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns of the intrusive rocks from the Xiaotuergen ore district (a, chondrite data after Sun and McDonough, 1989) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b, normalizing data after Sun and McDonough, 1989)

组上部产珊瑚、腕足类、双壳类、海百合茎等化石,认为盆地该时期处于海相环境;周涛发等(2002)认为该区石炭纪火山岩是汇聚阶段向新陆壳阶段过渡时期火山作用的产物;何国琦等(2004)认为其是泥盆纪-石炭纪上叠火山-沉积盆地。袁峰等(2001b)认为加里东晚期花岗岩是哈萨克斯坦板块对西伯利亚大陆板块北西向俯冲的产物,华力西中期花岗岩是挤压与拉张体制转换时期的产物,华力西晚期的花岗岩是南阿尔泰对北阿尔泰碰撞作用的产物。

前已述及,小土尔根矿区同时代侵入岩石具有高碱特征,既有富钠也有富钾系列岩石,并同时具有富集大离子亲石元素和轻稀土元素、亏损 Nb、Ta 和 Ti 的地球化学特征,显示了岛弧岩浆岩和受地壳混染的板内(大洋板内和大陆板内)岩石特征。它们极

低的 TiO_2 ($<1\%$) 含量和轻稀土元素富集程度又与板内岩石特征有异。它们的 Ba 和 Sr 含量明显不同于大陆地壳岩石的 Ba 含量 (390×10^{-6}) 和 Sr 含量 (325×10^{-6}), 并且除一个样品外,其余所有岩石的 Nb/U 值 ($2.6 \sim 4.1$) 低于上地壳 ($\text{Nb/U} \approx 9$, Taylor and McLennan, 1985) 和全球平均俯冲沉积物 ($\text{Nb/U} \approx 5$, Plank and Langmuir, 1998) 的相应值,表明受陆壳混染较弱。在花岗岩类的 $(\text{FeO}^T + \text{MgO}) - \text{SiO}_2$ 和 Nb-Y 图解中,大部分样品位于弧花岗岩的范围内(图8)。此外,所有岩石的 Th/Ta 值小于 20,表明形成于活动大陆边缘弧环境。前人研究成果表明,大洋岛弧、活动大陆边缘和板内火山岩的 Th/Ta 值分别为 $20 \sim 90$ 、 $6 \sim 20$ 和 $1 \sim 6$ (Gorton and Schandl, 2000)。矿区内侵入岩的侵位时代为早泥盆世,与诺

表 1 小土尔根矿区侵入岩的主量元素($w_B/\%$)、稀土元素和微量元素($w_B/10^{-6}$)化学成分

Table 1 Major elements ($w_B/\%$), REE and trace elements ($w_B/10^{-6}$) analyses of the intrusive rocks from the Xiaotugen ore district																					
岩性	花岗岩							黑云二长花岗岩							花岗闪长斑岩						
	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8	2-9	2-10	3-3	3-4	3-5	3-6	3-7	3-8	3-9	3-10
SiO ₂	71.30	71.30	71.10	71.20	72.20	73.90	73.70	72.90	73.90	73.40	75.00	73.40	73.00	66.70	66.70	66.00	67.80	64.50	66.70	65.90	67.50
TiO ₂	0.40	0.39	0.44	0.38	0.42	0.41	0.42	0.42	0.40	0.42	0.36	0.43	0.42	0.56	0.63	0.68	0.49	0.57	0.62	0.61	0.52
Al ₂ O ₃	13.20	12.85	13.90	13.05	13.45	13.65	13.80	13.55	13.50	13.80	13.40	13.45	13.60	13.20	13.50	14.10	13.10	13.75	13.50	13.75	13.20
CaO	1.44	1.46	1.02	1.49	0.63	1.10	0.72	0.67	0.75	0.70	0.46	3.09	0.61	3.92	2.41	2.27	2.55	3.03	3.89	3.72	4.16
FeO ^T	3.25	3.24	3.55	3.07	3.48	2.93	2.88	2.57	2.76	2.77	1.73	1.82	3.08	2.15	3.91	2.40	2.05	2.39	2.42	2.64	2.15
K ₂ O	5.18	5.30	5.24	5.28	5.29	1.01	1.18	0.37	0.93	1.12	2.30	1.96	1.17	5.48	5.77	8.35	8.53	8.38	4.34	4.67	4.96
Na ₂ O	2.23	1.83	2.25	2.14	2.20	5.11	4.93	6.39	5.27	5.13	2.79	2.21	4.95	1.60	1.64	0.25	0.42	0.42	1.30	1.73	1.50
MgO	0.88	0.83	0.96	0.84	0.97	1.16	1.40	1.26	1.45	1.44	2.28	1.52	1.34	0.91	1.05	0.96	0.80	1.10	0.96	1.02	0.79
MnO	0.06	0.07	0.06	0.06	0.05	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.04	0.20	0.14	0.16	0.16	0.20	0.20	0.21	0.24
P ₂ O ₅	0.10	0.10	0.11	0.09	0.10	0.16	0.16	0.16	0.15	0.16	0.12	0.14	0.16	0.14	0.16	0.18	0.12	0.14	0.16	0.16	0.13
LOI	2.06	2.04	1.71	2.08	1.57	1.20	1.39	1.04	1.40	1.42	1.95	1.86	1.34	4.97	4.21	3.80	3.76	4.71	5.29	4.98	4.80
Total	100.10	99.41	100.34	99.68	100.36	100.66	100.61	99.36	100.54	100.39	100.41	99.91	99.71	99.83	100.12	99.15	99.78	99.19	99.38	99.39	99.95
FeO	2.27	2.11	2.13	2.00	2.44	2.14	2.26	2.18	2.24	2.16	1.39	1.17	2.26	1.32	2.57	1.45	1.66	1.79	1.58	1.73	1.25
K ₂ O+Na ₂ O	7.41	7.13	7.49	7.42	7.49	6.12	6.11	6.76	6.20	6.25	5.09	4.17	6.12	7.08	7.41	8.60	8.95	8.80	5.64	6.40	6.46
K ₂ O/Na ₂ O	2.32	2.90	2.33	2.47	2.40	0.20	0.24	0.06	0.18	0.22	0.82	0.89	0.24	3.43	3.52	33.40	20.31	19.95	3.34	2.70	3.31
A/NK	1.43	1.48	1.49	1.42	1.45	1.45	1.48	1.25	1.40	1.44	1.90	2.35	1.45	1.55	1.52	1.50	1.33	1.42	1.99	1.75	1.70
A/CNK	1.12	1.14	1.25	1.10	1.29	1.19	1.30	1.12	1.23	1.27	1.70	1.19	1.30	0.85	1.02	1.05	0.91	0.91	0.98	0.94	0.86
100 Mg [#]	35	33	35	35	35	51	41	51	58	54	65	53	55	38	42	42	36	44	52	52	34
La	37.3	36.3	37.3	35.5	29.2	32.1	33.2	21.7	45.2	40.5	11.0	21.0	30.1	41.5	42.0	48.3	33.7	36.4	34.9	34.4	36.6
Ce	80.0	77.2	79.2	77.7	65.9	71.1	72.6	48.8	95.8	86.6	25	47.7	65.4	88.5	90.3	106.5	72.4	77.9	74.2	73.2	77.8
Pr	9.13	9.09	9.10	8.96	7.77	8.18	8.58	5.71	10.30	9.58	3.03	5.45	7.86	10.55	10.55	13.05	8.63	9.06	8.89	8.72	9.09
Nd	35.0	35.0	34.4	34.6	29.4	32.4	33.5	21.8	40.1	37.1	12.4	22.6	30.8	41.3	42.4	51.4	33.3	35.8	35.3	33.8	35
Sm	7.05	7.35	7.12	7.23	6.16	7.23	7.55	5.46	8.05	8.15	3.29	5.24	6.94	8.53	8.07	10.25	6.79	7.14	7.02	7.05	7.30
Eu	1.25	1.22	1.28	1.14	0.82	1.40	1.33	0.96	1.35	1.33	0.60	0.82	1.32	1.83	1.76	2.08	1.46	1.69	1.70	1.60	1.54
Gd	6.85	7.17	6.68	6.60	5.68	7.24	7.41	6.76	8.27	8.47	4.93	6.23	7.17	8.03	7.55	8.96	6.26	6.93	6.85	6.85	6.87
Tb	1.16	1.15	1.11	1.14	0.98	1.26	1.32	1.23	1.34	1.37	0.97	1.10	1.20	1.25	1.16	1.31	0.96	1.11	1.17	1.12	1.13
Dy	7.50	7.42	6.84	7.12	6.16	8.21	8.48	7.38	7.95	8.43	6.54	6.53	7.86	7.55	7.16	7.80	5.83	7.00	6.62	6.64	6.90
Ho	1.55	1.52	1.43	1.48	1.28	1.66	1.74	1.63	1.69	1.80	1.53	1.42	1.63	1.47	1.41	1.56	1.18	1.45	1.41	1.37	1.36

续表 1
Continued Table 1

岩性 样号	花岗斑岩							黑云二长花岗岩							花岗闪长斑岩						
	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8	2-9	2-10	3-3	3-4	3-5	3-6	3-7	3-8	3-9	3-10
Er	4.38	4.33	4.13	4.24	3.64	4.95	5.04	5.00	5.04	5.30	4.91	4.39	4.79	3.98	4.08	4.46	3.35	3.77	3.70	3.68	3.82
Tm	0.67	0.69	0.61	0.65	0.55	0.75	0.76	0.72	0.73	0.76	0.71	0.65	0.72	0.58	0.59	0.67	0.54	0.61	0.49	0.55	0.56
Yb	4.28	4.18	3.92	4.30	3.59	4.89	5.07	4.57	4.62	4.98	4.82	4.08	4.87	3.84	3.69	4.30	3.38	3.87	3.39	3.63	3.56
Lu	0.69	0.65	0.61	0.66	0.54	0.77	0.77	0.73	0.72	0.71	0.76	0.64	0.74	0.59	0.59	0.67	0.52	0.62	0.52	0.54	0.55
ΣREE	196.81	193.27	193.73	191.30	161.67	182.14	187.40	132.50	231.16	215.10	80.49	127.90	171.40	219.50	221.30	261.30	178.30	193.40	186.20	183.15	192.10
La/HR	6.27	6.13	6.65	6.31	6.21	5.13	5.12	3.73	6.61	5.76	2.20	4.11	4.91	7.04	7.44	7.79	7.10	6.62	6.71	6.51	6.76
(La/Sm) _N	3.42	3.19	3.38	3.17	3.06	2.87	2.84	2.57	3.62	3.21	2.16	2.59	2.80	3.14	3.36	3.04	3.20	3.29	3.21	3.15	3.24
(Gd/Yb) _N	1.32	1.42	1.41	1.27	1.31	1.22	1.21	1.22	1.48	1.41	0.85	1.26	1.22	1.73	1.69	1.72	1.53	1.48	1.67	1.56	1.60
(La/Yb) _N	6.25	6.23	6.83	5.92	5.83	4.71	4.70	3.41	7.02	5.83	1.64	3.69	4.43	7.75	8.16	8.06	7.15	6.75	7.38	6.80	7.37
δEu	0.54	0.51	0.56	0.50	0.42	0.59	0.54	0.48	0.50	0.49	0.45	0.44	0.57	0.67	0.68	0.65	0.67	0.72	0.74	0.69	0.65
Sc	10.0	10.3	10.4	10.0	11.4	8.9	9.5	8.2	8.4	9.0	6.5	10.4	9.4	12.2	13.6	17.6	11.6	13.4	13.2	13.3	11.4
V	51	47	53	43	47	40	45	32	38	40	28	41	43	70	86	87	62	74	63	64	57
Cr	50	30	30	20	20	20	20	20	30	30	20	50	20	30	40	50	30	40	30	30	20
Co	5.5	5.6	5.5	5.3	5.7	4.5	4.9	3.7	3.2	4.0	2.4	3.1	7.8	6.3	6.3	3.8	3.9	4.1	4.0	4.4	2.9
Ni	8.4	8.8	10.3	7.9	9.2	8.8	9.7	9.4	9.5	9.1	6.8	9.9	9.6	12.0	20.4	13.3	10.0	11.1	12.1	13.1	8.9
Ga	19.6	18.1	20.0	17.9	18.0	18.1	19.6	15.3	17.6	19.0	15.1	19.1	18.7	19.0	20.9	24.1	17.7	19.6	17.7	17.6	17.6
Ge	0.12	0.13	0.13	0.13	0.13	0.10	0.12	0.09	0.12	0.12	0.08	0.10	0.11	0.13	0.15	0.17	0.13	0.15	0.15	0.15	0.15
Rb	214.0	215.0	216.0	201.0	215.0	51.6	58.4	17.2	42.4	53.5	102.0	85.3	58.1	188.0	219.0	278.0	244.0	261.0	170.0	161.5	169.5
Sr	110.0	104.5	103.0	114.0	99.6	176.0	99.2	85.4	62.3	65.8	79.9	365.0	99.2	109.0	75.4	111.0	124.0	127.0	116.0	107.5	106.0
Zr	200	192	252	191	209	225	204	188	222	213	191	208	234	240	308	354	259	296	236	253	246
Nb	9.7	9.5	9.8	10.0	10.9	10.2	10.3	8.7	9.3	9.9	7.9	9.4	9.7	10.0	11.0	8.5	8.0	8.2	10.9	10.4	9.9
Ba	557.0	502.0	505.0	513.0	549.0	112.0	110.5	36.3	70.8	89.4	195.5	193.0	125.5	584.0	753.0	591.0	547.0	564.0	402.0	458.0	468.0
Hf	5.2	5.2	6.2	5.0	5.3	6.0	5.3	5.6	6.4	6.0	5.7	6.0	6.1	6.1	7.3	8.7	6.6	7.4	6.0	6.1	6.1
Ta	1.2	1.2	1.0	1.0	0.9	1.0	0.9	0.9	1.1	1.0	0.8	0.7	0.7	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	3.2	2.5	2.1
Pb	51.5	22.0	21.2	27.6	15.3	11.0	3.8	3.7	1.9	2.4	2.0	5.8	2.9	4.1	6.7	4.0	17.3	25.7	3.4	5.0	8
Th	15.35	15.55	14.70	15.05	14.65	12.85	13.55	13.65	14.40	14.75	14.55	15.30	13.80	14.65	14.75	14.10	12.75	13.25	11.85	11.80	13.05
U	3.37	3.65	3.24	3.20	4.22	2.97	2.06	1.51	2.25	2.19	2.21	4.69	2.40	3.37	3.43	3.38	2.96	3.15	3.37	3.10	3.40
Cs	7.92	8.09	8.29	7.58	7.22	1.39	1.50	0.52	1.02	1.32	1.82	2.06	1.22	6.85	9.54	7.79	6.58	7.40	7.24	6.88	8.02
Y	48.0	44.8	45.1	44.7	37.3	51.1	54.1	47.0	46.7	49.7	41.8	39.8	49.6	43.7	41.8	45.8	35.7	42.8	38.3	39.9	40.6

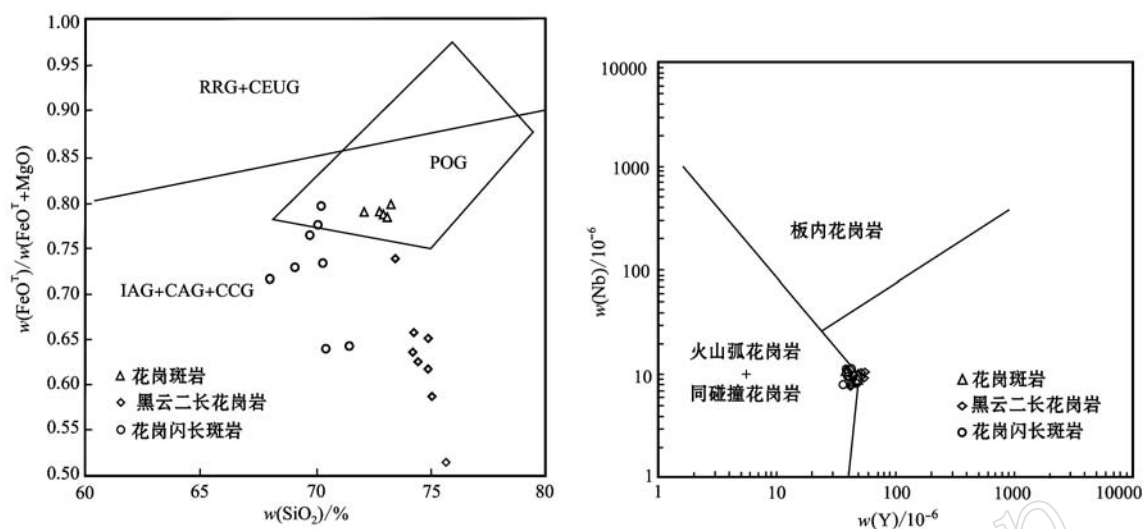


图 8 新疆小土尔根铜矿(FeO^T+MgO)-SiO₂ 和 Nb-Y 判别图解

Fig. 8 (FeO^T+MgO)-SiO₂ and Nb-Y diagrams for intrusive rocks of the Xiaotuergeren ore district

CAG—大陆弧花岗岩; IAG—岛弧花岗岩; CCG—大陆碰撞花岗岩; POG—造山后花岗岩; RRG—与裂谷有关的花岗岩;

CEUG—与大陆的造陆抬升有关的花岗岩

CAG—continental arc granitoids; IAG— island arc granitoids; CCG—continental collisional granitoids; POG—post-orogenic granite;

RRG—rift-related granitoids; CEUG—continental epeirogenic uplift granitoids

尔特盆地晚古生代挤压环境下花岗岩的发育时间相当。结合区域地质背景研究成果,认为小土尔根矿区侵入岩应形成于陆缘弧环境。

5.2 岩浆来源和演化

前已述及,小土尔根铜矿区花岗闪长斑岩、黑云二长花岗岩和花岗斑岩具有相似的微量和稀土元素配分模式,表明它们具有一定的亲缘性。然而,3种岩石的主量元素明显不同,如花岗闪长斑岩具有最高的碱和钾含量,黑云母二长花岗岩具有较低的碱含量且相对富钠。在哈克图解(图9)上,不同岩性之间无演化趋势,同一岩性岩石的SiO₂与TiO₂、CaO、K₂O有一定的负相关,与其他元素的相关性不明显,表明这些岩石具有不同的演化过程。

所有岩石具准铝质和过铝质特征(A/CNK=0.87~1.3,1件样品为1.7),并具有较高的碱含量(K₂O+Na₂O=4.3~9.3),然而它们的Al₂O₃含量不高(<14%),因此高的铝饱和指数应该与较低的CaO含量有关。同时,所有岩石发育有黑云母和角闪石,有相对高的Mg[#](0.34~0.65),FeO^T/MgO介于1.62~3.54之间,表明有幔源物质参与,排除了玄武质下地壳熔融的可能性,因为玄武质岩石部分熔融生成的岩浆Mg[#]值通常小于0.4(Rapp and Watson, 1995)。所有岩石具有高的LILE/HFSE和

LREE/HREE值,表明其源区受到了俯冲物质(熔体和流体)的改造。同时它们有高的SiO₂和全碱含量,Al₂O₃、MgO、TiO₂、CaO和FeO含量低,显著亏损Sr、Ba、Nb、Ta和Ti,说明岩石经历了强烈的结晶分异作用。它们的10 000 Ga/Al值介于2.26~3.08之间,Zr+Nb+Ce+Y含量为(265.7~514.8)×10⁻⁶,在Nb-10 000 Ga/Al图上位于I-S型花岗岩区(图10a),在10 000 Ga/Al-(Zr+Nb+Ce+Y)图上位于分异I型花岗岩区和未分异花岗岩区(图10b),岩石应属I型分异花岗岩类。据此可以推测小土尔根矿区花岗质岩石可能是俯冲板片熔体和流体交代上覆地幔楔后,在上升过程中经历了结晶分异作用的产物。不同的岩石类型可能与源区部分熔融程度以及结晶分异程度有关。

5.3 成矿潜力

前人研究成果表明,新疆阿尔泰(包括准噶尔北缘)地区花岗质岩石广为发育,主要形成于早中古生代(中晚奥陶世和晚志留世—晚泥盆世)、晚古生代(早石炭世和早二叠世)和早中生代(中晚三叠世—早侏罗世)3个阶段(王涛等,2010)。其中奥陶世(470 Ma)至晚泥盆世(360 Ma)以富钠为特征,早石炭世(358~353 Ma)出现了富钾和富钠的碱性花岗岩(如布尔根,Na₂O/K₂O=0.82~1.08,童英,2006a),

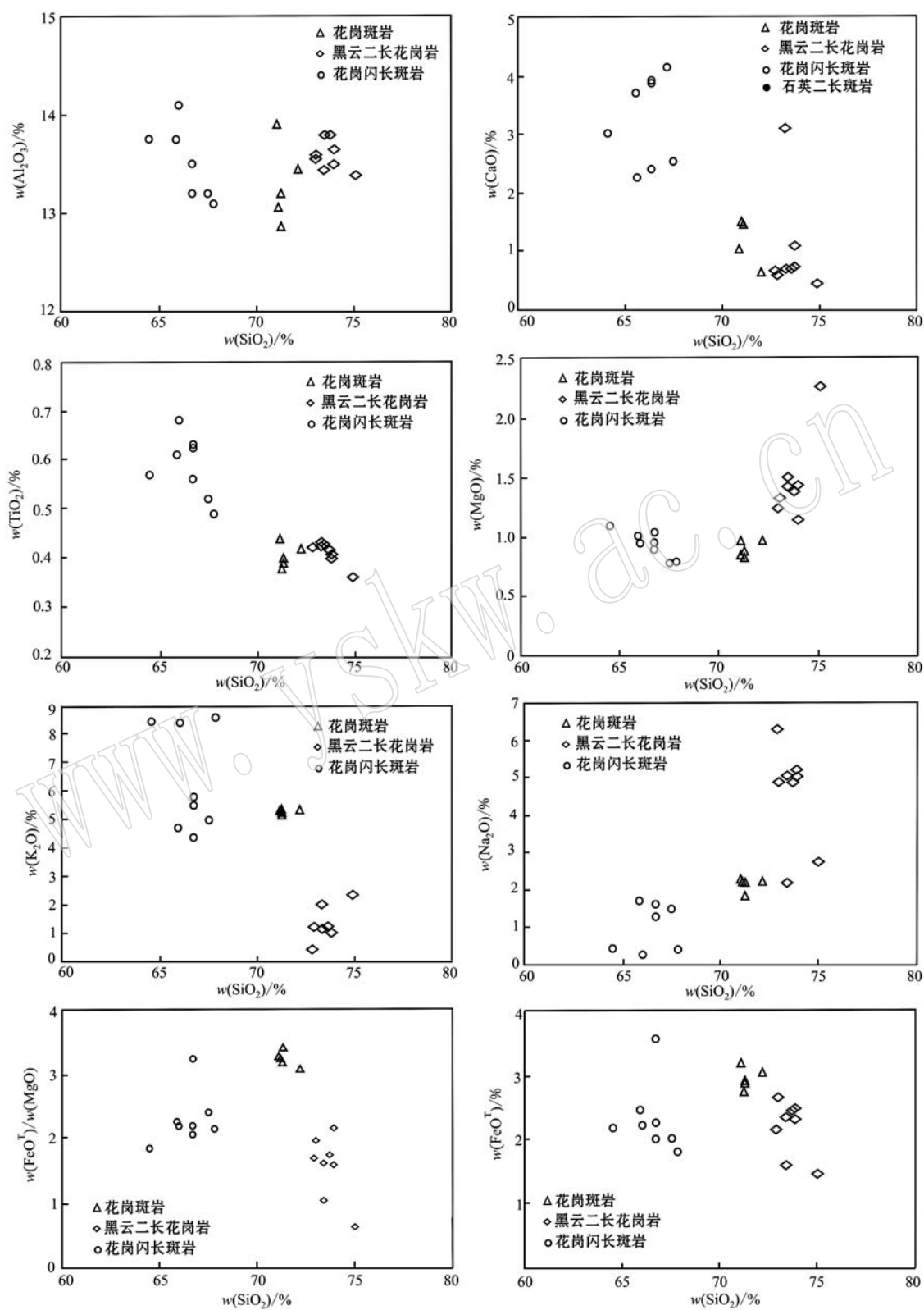


图9 小土尔根矿区侵入岩哈克图解

Fig. 9 Harker variation diagrams for intrusive rocks of the Xiaotuerge ore district

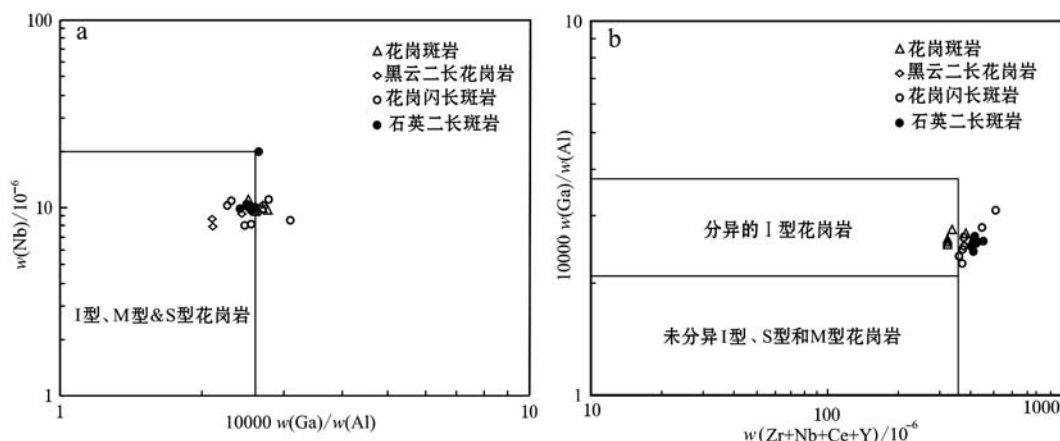


图 10 花岗岩类成因类型判别图解(据 Whalen *et al.*, 1987)

Fig. 10 Genetic discrimination diagrams for intrusive rocks of the Xiaotuergen ore district (after Whalen *et al.*, 1987)

早二叠世(290~270 Ma)有部分岩石以富钾为特征, 为高钾钙碱性-钾玄岩系列(王涛等, 2010), 如塔克什肯口岸岩体($K_2O/Na_2O = 0.7 \sim 1.2$, 童英等, 2006b)和喇嘛昭花岗岩($K_2O/Na_2O = 1.08 \sim 1.24$, 王涛等, 2005)。诺尔特地区小土尔根矿区侵入岩形成于早泥盆世, 既有富钾的碱性岩石也有富钠的钙碱性岩石, 这与中阿尔泰和南阿尔泰该时期多为富钠岩石明显不同。

斑岩型矿床可以形成于弧环境(Sillitoe, 1998; Oyarzun *et al.*, 2001; 张连昌等, 2004)、碰撞造山环境或碰撞后伸展环境(侯增谦等, 2009; 毛景文等, 2014)、陆内环境(张旗等, 2004)。许多世界级的大型-超大型斑岩型矿床多与弧环境岩浆作用有关(安芳等, 2015)。早期的研究认为, 斑岩型矿床与富水的氧化型磁铁矿系列花岗质岩石有密切的时空联系(Gustafson and Hunt, 1975; Audétat *et al.*, 2004; Sillitoe, 2010), 伴随发育大量高氧化特征的矿物, 如硬石膏、磁铁矿和赤铁矿(吴楚等, 2015)。因为高氧化性岩浆不仅控制着亲硫和亲铁元素的溶解度(Mungall, 2002; 安芳等, 2015), 并且能够使岩浆中的硫以硫酸盐(SO_4^{2-})形式存在, 抑制其在岩浆阶段形成金属硫化物, 确保母岩浆在侵位之前不会流失大量成矿金属元素(Carroll and Rutherford, 1985; Lee *et al.*, 2012); 同时, 高的氧逸度也有助于分解早期残留的硫化物, 使亲硫和亲铁元素活化进入岩浆熔体使之富集(Richards, 2003)。近年来, 大量的研究成果证明, 富含磁黄铁矿的 I 型花岗岩也与斑岩型铜矿床有密切联系, 并被称之为还原性斑岩型矿床, 如西准噶尔的包古图斑岩型铜矿床

(Cao *et al.*, 2014)和罕哲杂能斑岩型铜矿(郭正林等, 2010)、加拿大的 Catface 斑岩型 Cu-Mo-Au 矿床(Smith *et al.*, 2012)、普朗斑岩型铜矿床(刘江涛等, 2013)被确认为还原性斑岩型矿床。

典型的氧化性斑岩铜矿具有高氧化特征矿物, 如磁铁矿、赤铁矿和硬石膏等, 成矿流体含有大量氧化性气体(SO_4^{2+}), 流体包裹体包裹大量高氧化特征矿物(磁铁矿、赤铁矿、硬石膏), 岩浆或流体都表现出高的 f_{O_2} 条件($>FMQ + 2$), 蚀变规模与矿床规模巨大, Cu-Au-Mo 矿床均有产出。Rowins (2000)提出还原性斑岩型 Cu-Au 矿的概念, 其特征是发育大量的原生磁黄铁矿, 无高氧化特征矿物, 成矿流体富含大量的还原性气体(如 CH_4), 流体包裹体不包裹高氧化特征矿物, 岩浆或流体均表现出低 f_{O_2} ($<FMQ$), 蚀变规模与矿床规模较小, 相对富 Au(曹明坚, 2013)。小土尔根铜矿床赋存于花岗闪长斑岩中, 矿化呈发育浸染状、细脉状和网脉状矿化, 与成矿有关的花岗闪长斑岩属钛铁矿系列、I 型花岗岩, 岩石中富含原生磁黄铁矿以及大量的热液磁黄铁矿, 缺乏高氧化特征的矿物, 如硬石膏、磁铁矿和赤铁矿, 流体包裹体显微测温 and 群体包裹体成分表明成矿流体中富含 CH_4 和 CO_2 , 属 $H_2O-NaCl-CH_4-CO_2$ 体系, 这些特征表明小土尔根为还原性斑岩铜矿。母岩浆与受流体交代的地幔楔部分熔融有关, 可以为成矿作用发生提供有利的物质条件, 因为地幔来源的物质对斑岩型 Cu 矿床的母岩浆提供了重要的成矿元素(Mungall, 2002; Richards, 2003; Sun *et al.*, 2004; Stern *et al.*, 2007)。诺尔特盆地在早泥盆世处于陆缘弧环境, 为斑岩型矿床的形成提供了

非常有利的构造背景,还原性岩浆体系有利于岩浆演化形成还原性斑岩 Cu 或富 Au 斑岩 Cu 矿床,因此,小土尔根地区早泥盆世具备形成斑岩型矿床的成矿地质条件,有形成斑岩型矿床的潜力。

6 结论

(1) 小土尔根矿区侵入岩为钙碱性系列和钾玄岩系列岩石,富集大离子亲石元素和轻稀土元素,亏损 Nb、Ta、Ti 和重稀土元素,与弧岩浆具有相似的地球化学特征。

(2) 与成矿有关的中酸性岩是俯冲板片熔体和流体交代上覆地幔楔后,在上升过程中经历了结晶分异作用的产物。

(3) 岩石形成于与俯冲有关的陆缘弧构造环境中,还原性岩浆体系有利于岩浆演化形成还原性斑岩铜或富 Au 斑岩铜矿床。

References

- An Fang, Wang Juli, Zhu Yongfeng, *et al.* 2015. Mineralogy and geochemistry of intrusions related to Sayak large copper deposit, Kazakhstan, Central Asian metallogenic belt: Magma nature and its significance to mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(2): 555~570(in Chinese with English abstract).
- Audétat A, Pettke T and Dolej D. 2004. Magmatic anhydrite and calcite in the ore-forming quartz-monzodiorite magma at Santa Rita, New Mexico (USA): Genetic constraints on porphyry-Cu mineralization[J]. *Lithos*, 72(3~4): 147~161.
- Cao Mingjian. 2013. Petrogenesis and Metallogenesis of Baogutu Reduced Porphyry Copper Deposit, West Junggar, and Its Comparison with Porphyry Deposits from Balkhash (Ph. D Paper)[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 1~234 (in Chinese with English abstract).
- Cao M J, Qin K Z, Li G M, *et al.* 2014. Baogutu: An example of reduced porphyry Cu deposit in western Junggar[J]. *Ore Geology Reviews*, 56: 159~180.
- Carroll M R and Rutherford M J. 1985. Sulfide and sulfate saturation in hydrous silicate melts[J]. *Journal of Geophysical Research*, 90(S02): 601~612.
- Dong Yongguan, Rui Xingjian, Zhou Gang, *et al.* 2010. Characteristics of regional geochemical exploration abnormality and mineralization in the Nurt area, Altay, Xinjiang[J]. *Geological Review*, 56(2): 215~223(in Chinese with English abstract).
- Golovanov I M, Seltnann R and Kremenetsky A A. 2005. The porphyry Cu-Au/Mo deposits of Central Eurasia: 2. The Almalıyk (Kal'makyr-Dalnee) and Saukbulak Cu-Au porphyry systems, Uzbekistan[A]. Porter T M. *Super Porphyry Copper & Gold Deposits: A Global Perspective*[C]. Adelaide: PGC Publishing, 2: 513~523.
- Gorton M P and Schandl E S. 2000. From continents to island area: A geochemical index of tectonic setting for arc-related and within-plate felsic to intermediate volcanic rock[J]. *Canadian Mineralogist*, 38: 1065~1073.
- Guo Zhenglin, Li Jinxiang, Qin Kezhong, *et al.* 2010. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of Hanzheganeng Cu-Au deposit in West Junggar, Xinjiang implications for magma source and metallogenic tectonic setting[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3563~3578(in Chinese with English abstract).
- Gustafson L B and Hunt J P. 1975. The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile[J]. *Economic Geology*, 70(5): 857~912.
- Han C M, Xiao W J, Zhao G C, *et al.* 2006. Geological characteristics and genesis of the Tuwu porphyry copper deposit, Hami, Xinjiang, Central Asia[J]. *Ore Geology Reviews*, 29: 77~94.
- He Guoqi, Cheng Shoude, Xu Xin, *et al.* 2004. An Introduction to the Explanatory Text of the Map of Tectonics of Xinjiang and Its Neighbouring Areas(1:250 000 000)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~65(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian and Yang Zhiming. 2009. Porphyry deposits in continental settings of China: Geological characteristics, magmatic-hydrothermal system, and metallogenic model[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(12): 1779~1817(in Chinese with English abstract).
- Jahn B M, Wu F Y and Hong D W. 2000. Important crustal growth in the Phanerozoic: Isotopic evidence of granitoids from east-central Asia[J]. *Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet Science)*, 109(1): 5~20.
- Kudryavtsev Y K. 1996. The Co-Mo deposits of Central Kazakhstan [A]. Shatov V, Seltnann R, Kremenetsky A, *et al.* *Granite-related Ore Deposits of Central Kazakhstan and Adjacent Areas*[C]. St. Petersburg: Glagol Publishing House, 119~144.
- Lee C T A, Luffi P, Chin E J, *et al.* 2012. Copper systematics in arc magmas and implications for Crust-Mantle differentiation[J]. *Science*, 336(6077): 64~68.
- Li Dong. 2013. Metallogenic regularity and prospecting marks of nurt

- basin of northern zone of Taishan, Xinjiang[J]. Xinjiang Nonferrous Metals, Supp.: 48~50(in Chinese with English abstract).
- Li Guangming, Qin Kezhang, Li Jinxiang, *et al.* 2008. Geological features and tectonic setting of porphyry copper deposits rounding the Balkhash region, Central Kazakhstan, Central Asia[J]. Acta Petrologica Sinica, 24(12): 2 679~2 700(in Chinese with English abstract).
- Li J Y, Xiao W J, Wang K Z, *et al.* 2003. Neoproterozoic-Paleozoic tectonostratigraphy, magmatic activities and tectonic evolution of eastern Xinjiang, NW China[A]. Mao J W, Goldfarb R J, Seltman R, *et al.* Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan[C]. IAGOD Guidebook Series 10: CERCAMS/NHM London, 31~74.
- Liu Y L, Guo L S, Liu, Y D, *et al.* 2009. Geochronology of Baogutu porphyry copper deposit in Western Junggar area, Xinjiang of China [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 52 (10): 1 543~1 549.
- Liu Jiangtao, Yang Liqiang and Lü Liang. 2013. Pulang reduced porphyry copper deposit in the Zzhongdian area, Southwest China: Constrains by the mineral assemblages and the ore-forming fluid compositions[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(11): 3 914~3 924 (in Chinese with English abstract).
- Long Lingli, Wang Yuwang, Du Andao, *et al.* 2011. Molybdenite Re-Os age of Xilekuduke Cu-Mo deposit in Xinjiang and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 30(4): 635~644(in Chinese with English abstract).
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. The Geological Society of America Bulletin, 101(5): 635~643.
- Mao Jingwen, Luo Maocheng, Xie Guiqing, *et al.* 2014. Basic characteristics and new advances in research and exploration on porphyry copper deposits[J]. Acta Geologica Sinica, 88(12): 2 153~2 175 (in Chinese with English abstract).
- Mungall J E. 2002. Roasting the mantle: Slab melting and the genesis of major Au and Au-rich Cu deposits[J]. Geology, 30(10): 915~918.
- Oyarzun R, Marquez A and Lillo Javier. 2001. Giant versus small porphyry copper deposits of Cenozoic age in north Chile: Adakitic versus normal calc-alkaline magmatism[J]. Mineralium Deposita, 36: 794~798.
- Peccerillo R and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey. Contrib [J]. Mineral Petrology, 58: 63~81.
- Plank T and Langmuir C. 1998. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle[J]. Chemical Geology, 145(3~4): 325~394.
- Qin Jihua, Geng Xinxia, Wen Chaoquan, *et al.* 2016. Zircon LA-ICP-MS U-Pb age of intrusion from Xiaotuergen copper deposit in Altay, Xinjiang and its geological significance[J]. Mineral Geology, 35(1): 18~32(in Chinese with English abstract).
- Rapp H P and Walsom E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8~32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. Journal Petrology, 36: 891~931.
- Richards J P. 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation[J]. Economic Geology, 98(8): 1 515~1 533.
- Rowins S M. 2000. Reduced porphyry copper-gold deposit: A new variation on an old theme[J]. Geology, 28: 491~494.
- Rui Xingjian. 1993. Primary Gold Deposits in Alaty, Xinjiang[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1~276(in Chinese with English abstract).
- Seltmann R, Porter T M and Pirajno F. 2013. Geodynamics and metallogeny of the central Eurasian porphyry and related epithermal mineral systems: a review[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 3: 30.
- Sengör A M C, Natal'in B A and Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Asia[J]. Nature, 364: 299~307.
- Shen P, Shen Y C, Pan H D, *et al.* 2010. Baogutu porphyry Cu-Mo-Au deposit, West Junggar, Northwest China: petrology, alteration, and mineralization[J]. Economic Geology, 105: 947~970.
- Sillitoe R H. 1998. Major regional factors favoring large size, high hypogene grade, elevated gold content and supergene oxidation and enrichment of porphyry copper deposits[A]. Porter T M. Porphyry and Hydrothermal Copper and Gold Deposits: A Global Perspective [C]. Perth Conference Proceedings: Glenside, South Australia, Australian Mineral Foundation, 21~34.
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[J]. Economic Geology, 105(1): 3~41.
- Smith C M, Canil D, Rowins S M, *et al.* 2012. Reduced granitic magmas in an arc setting: The Catface porphyry Cu-Mo deposit of the Paleogene Cascade Arc[J]. Lithos, 154: 361~373.
- Stern C R, Funk J A, Skewes M A, *et al.* 2007. Magmatic anhydrite in plutonic rocks at the El Teniente Cu-Mo deposit, Chile, and the role of sulfur- and copper-rich magmas in its formation[J]. Economic

- Geology, 102(7): 1 335~1 344.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society Special Publication, 42: 313~345.
- Sun W D, Arculus J R and Kamenetsky S V. 2004. Release of gold-bearing fluids in convergent margin magmas prompted by magnetite crystallization[J]. Nature, 431(7 011): 975~978.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[M]. Oxford: Blackwell, 312.
- Tong Ying. 2006. Geochronology, Origin of the Late Paleozoic Granitoids from the Altai Orogen in China and Their Geological Significance(Ph. D Paper) [D]. Beijing: Institute of Geology, CAGS, 1~145(in Chinese with English abstract).
- Tong Ying, Wang Tao, Kovach V P, *et al.* 2006. Age and origin of the Takeshiken postorogenic alkali-rich intrusive rocks in southern Altai, near the Mongolian border in China and its implications for continental growth[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1 267~1 278(in Chinese with English abstract).
- Wainwright A J, Tosdal R M, Wooden J L, *et al.* 2011. U-Pb (zircon) and geochemical constraints on the age, origin, and evolution of Paleozoic arc magmas in the Oyu Tolgoi porphyry Cu-Au district, southern Mongolia[J]. Gondwana Research, 19: 764~787.
- Wang Denghong, Chen Yuchuan, Xu Zhigang, *et al.* 2002. Metallogenic Series and Metallogenic Regularity of Altai Province[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1~498(in Chinese).
- Wang Tao, Hong Dawei, Tong Ying, *et al.* 2005. Zircon U-Pb age and origin of post-orogenic Lamazhao granitic pluton from Altai orogen: its implications for vertical continental growth[J]. Acta Petrologica Sinica, 21(3): 640~650(in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Tong Ying, Li Shan, *et al.* 2010. Spatial and temporal variations of granitoid in the Aalaty orogen and their implications for tectonic setting and crustal growth: perspectives from Chinese Altay [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 29(6): 595~618(in Chinese with English abstract).
- Wen Chaoquan, Guo Jianxin, Qin Jihua, *et al.* 2015. Geological characteristics and genetic type of Xiaotuergen copper deposit, Chinese Altay, Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 33(4): 469~474(in Chinese with English abstract).
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 95: 407~419.
- Wu Chu, Liu Yan, Cao Mingjian, *et al.* 2015. Characteristics and formation mechanism of reduced porphyry Cu and Mo-Cu deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 31(2): 617~638(in Chinese with English abstract).
- Xiao W J, Windley B F, Badarch G, *et al.* 2004. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: implications for the growth of Central Asia[J]. Journal of the Geological Society, London, 161: 339~342.
- Yang Fuquan, Liu Feng, Chai Fengmei, *et al.* 2011. Iron deposits in Altay, Xinjiang: Geological characteristics, time-space distribution and metallogenesis[J]. Mineral Deposits, 30(4): 575~598(in Chinese with English abstract).
- Yang F Q, Mao J W, Pirajno F, *et al.* 2012. A review of the geological characteristics and geodynamic setting of Late Paleozoic porphyry copper deposits in the Junggar region, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Northwest China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 49: 80~98.
- Yang Fuquan, Zhang Zhixin, Liu Guoren, *et al.* 2012. Geochronology of Yulekenhalasu porphyry copper deposit in northern Junggar area, Xinjiang, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(7): 2 029~2 042(in Chinese with English abstract).
- Yang F Q, Chai F M, Zhang Z X, *et al.* 2014. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry, and Sr-Nd-Hf isotopes of granitoids in the Yulekenhalasu copper ore district, northern Junggar, China: Petrogenesis and tectonic implications[J]. Lithos, 190~191: 85~103.
- Yuan Feng, Zhou Taofa and Yue Shucang. 2001a. The ages and the genetic types of the granites in the Nurt area, Altay[J]. Xinjiang Geology, 19(4): 292~296(in Chinese with English abstract).
- Yuan Feng, Zhou Taofa and Yue Shucang. 2001b. Geochemical characteristics and tectonic setting of the volcanic rocks in the Nurt area of Altay[J]. Geology Geochemistry, 29(2): 31~35(in Chinese with English abstract).
- Zhang Lianchang, Qin Kezhang, Ying Jifeng, *et al.* 2004. The relationship between ore-forming processes and adakitic rock in Tuwu-Yandong porphyry copper metallogenic belt, eastern Tianshan mountains[J]. Acta Petrologica Sinica, 20(2): 259~268(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Qin Kezhang, Wang Yunlong, *et al.* 2004. Study on adakite broadened to challenge the Cu and Au exploration in China[J]. Acta Petrologica Sinica, 20(2): 195~204(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z C, Yang S H, Chen B L, *et al.* 2006. The SHRIMP Age of

- subduction granite in the north of eastern Junggar, Xinjiang[J]. Science Bulletin, 51: 1 565~1 574(in Chinese).
- Zhou Taofa, Yuan Feng and Yue Shucang. 2002. Volcanism and genesis of Carboniferous volcanic rocks in the Nurt faulted volcanic basin [J]. Journal of Hefei Univwesity of Technology, 25(4): 481~486 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Y F, Zeng Y S and Gu L B. 2006. Geochemistry of the rare metal-bearing pegmatite No. 3 vein and related granites in the Keketuohai region, Altay Mountains, northwest China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 27: 61~77.
- ### 附中文参考文献
- 安 芳, 王居里, 朱永峰, 等. 2015. 中亚萨亚克矿田成矿岩体矿物学和地球化学: 岩浆性质与成矿意义[J]. 岩石学报, 31(2): 555~570.
- 曹明坚. 2013. 西准包古图还原性斑岩铜矿成岩成矿过程及与巴尔喀什斑岩矿带对比[博士学位论文][D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 1~234.
- 董永观, 芮行健, 周 刚, 等. 2010. 新疆诺尔特地区化探特征及成矿潜力分析[J]. 地质论评, 56(2): 215~223.
- 郭正林, 李金祥, 秦克章, 等. 2010. 新疆西准噶尔罕哲尔能 Cu-Au 矿床的锆石 U-Pb 年代学和地球化学特征: 对源区和成矿构造背景的指示[J]. 岩石学报, 26(12): 3 563~3 578.
- 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.
- 侯增谦, 杨志明. 2009. 中国大陆环境斑岩型矿床: 基本地质特征、岩浆热液系统和成矿概念模型[J]. 地质学报, 83(12): 1 779~1 817.
- 李 东. 2013. 新疆阿尔泰山北带诺尔特盆地成矿规律及找矿标志浅谈[J]. 新疆有色金属, 增刊, 48~50.
- 李光明, 秦克章, 李金祥, 等. 2008. 哈萨克斯坦环巴尔喀什斑岩铜矿地质与成矿背景研究[J]. 岩石学报, 24(12): 2 679~2 700.
- 刘江涛, 杨立强, 吕 亮. 2013. 中甸普朗还原性斑岩铜矿床: 矿物组合与流体组成约束[J]. 岩石学报, 29(11): 3 914~3 924.
- 龙灵利, 王玉往, 杜安道, 等. 2011. 新疆希勒库都克铜钼矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 30(4): 635~644.
- 毛景文, 罗茂澄, 谢桂青, 等. 2014. 斑岩铜矿床的基本特征和研究勘查新进展[J]. 地质学报, 88(12): 2 153~2 175.
- 秦纪华, 耿新霞, 温超权, 等. 2016. 新疆阿尔泰山小土尔根铜矿区岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 矿床地质, 35(1): 18~32.
- 芮行健. 1993. 新疆阿尔泰山金矿床[M]. 北京: 地质出版社, 1~12.
- 童 英. 2006. 阿尔泰山带晚古生代花岗岩年代学、成因及其地质意义(博士学位论文)[C]. 北京: 中国地质科学院地质研究所, 1~145.
- 童 英, 王 涛, Kovach V P, 等. 2006. 阿尔泰山蒙边界塔克什肯口岸后造山富碱侵入岩体的形成时代、成因及其地壳生长意义[J]. 岩石学报, 22(5): 1 267~1 278.
- 王登红, 陈毓川, 徐志刚, 等. 2002. 阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律[M]. 北京: 原子能出版社, 1~498.
- 王 涛, 洪大卫, 童 英, 等. 2005. 中国阿尔泰山带后造山喇嘛昭花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄、成因及陆壳垂向生长意义[J]. 岩石学报, 21(3): 640~650.
- 王 涛, 童 英, 李 舫, 等. 2010. 阿尔泰山带花岗岩时空演变、构造环境及地壳生长意义——以中国阿尔泰山为例[J]. 岩石矿物学杂志, 29(6): 595~618.
- 温超权, 郭建新, 秦纪华, 等. 2015. 新疆阿尔泰山小土尔根铜矿床地质特征及成因类型[J]. 新疆地质, 33(4): 469~474.
- 吴 楚, 刘 妍, 曹明坚, 等. 2015. 还原性斑岩型 Cu 与 Mo-Cu 矿特征与形成机制[J]. 岩石学报, 31(2): 617~638.
- 杨富全, 刘 锋, 柴凤梅, 等. 2011. 新疆阿尔泰山铁矿: 地质特征、时空分布及成矿作用[J]. 矿床地质, 30(4): 575~598.
- 杨富全, 张志欣, 刘国仁, 等. 2012. 新疆准噶尔北缘玉勒肯哈腊苏斑岩铜矿床年代学研究[J]. 岩石学报, 28(7): 2 029~2 042.
- 袁 峰, 周涛发, 岳书仓. 2001a. 阿尔泰山诺尔特地区花岗岩形成时代及成因类型[J]. 新疆地质, 19(4): 292~296.
- 袁 峰, 周涛发, 岳书仓. 2001b. 阿尔泰山诺尔特地区火山岩岩石地球化学特征及构造背景[J]. 地质地球化学, 29(2): 31~36.
- 张连昌, 秦克章, 英基丰, 等. 2004. 东天山土屋一延东斑岩铜矿带埃达克岩及其与成矿作用的关系[J]. 岩石学报, 20(2): 259~268.
- 张 旗, 秦克章, 王云龙, 等. 2004. 加强埃达克岩研究, 开创中国 Cu、Au 等找矿工作的新局面[J]. 岩石学报, 20(2): 195~204.
- 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 等. 2006. 新疆东准噶尔北部俯冲花岗岩的 SHRIMP U-Pb 锆石定年[J]. 科学通报, 51: 1 565~1 574.
- 周涛发, 袁 峰, 岳书仓. 2002. 诺尔特断陷火山盆地石炭纪火山岩成因及火山作用机理[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 25(4): 481~486.