

# 新疆富蕴县希勒库都克钼铜矿区岩浆活动特征及其对区域晚-后碰撞构造演化的制约\*

游军<sup>1,2</sup> 洪涛<sup>1,2</sup> 吴楚<sup>3,4</sup> 丁汝福<sup>5</sup> 徐兴旺<sup>1\*\*</sup>

YOU Jun<sup>1,2</sup>, HONG Tao<sup>1,2</sup>, WU Chu<sup>3,4</sup>, DING RuFu<sup>5</sup> and XU XingWang<sup>1\*\*</sup>

1. 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029

2. 中国科学院大学,北京 100049

3. 地质过程与矿产资源国家重点实验室,中国地质大学,北京 100083

4. 中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083

5. 有色金属矿产地质调查中心,北京 100012

1. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

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

4. *School of Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

5. *China Non-ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing 100012, China*

2015-10-10 收稿, 2016-03-15 改回.

**You J, Hong T, Wu C, Ding RF and Xu XW. 2016. Characteristics of magmatic activity in the Xilekuduke Mo-Cu ore district, Fuyun County, Xinjiang, and its constrains on regional tectonic evolution in late-post collisional stages. *Acta Petrologica Sinica*, 32(5):1262–1282**

**Abstract** The time and metallogensis of collision between different terrains is one of the hottest topics for tectonic evolution and mineralization of the Central-Asia Orogenic Belt. It's unclear that whether there is late-collisional magmatic activity in northern Xinjiang area. The tectonic transformation time from collision to post-collision, characteristics of magmatic activity and metallogenic response during this tectonic evolution are also undefined. The present paper reports new geochemical and chronological data of intrusive rocks in the Xilekuduke district, northern area of East Junggar. The intrusive rocks are divided into four types, including the 340Ma diorite, 328Ma monzonitic granite, 325Ma granite porphyry and 315Ma quartz porphyry. All the four kind intrusive rocks are high-K calc-alkalic. The diorites possibly formed at late-collisional setting. The diorites are metaluminous, and have typical geochemical signatures of arc, including depletion of Nb, Ta and Ti, and without depletion of P and abnormality of  $\delta\text{Eu}$ . The monzonitic granites and granite porphyries possibly formed at the early stage of post collisional setting. The monzonitic granites are weakly peraluminous, and have transformational geochemical signatures of arc and post-collisional granite, such as weakly positive abnormality of  $\delta\text{Eu}$ , depletion of Nb, Ta and Ti, and medium depletion of P. The granite porphyries are weakly peraluminous, and have untypical geochemical signatures of post collisional granite, including negative Eu anomaly, the obvious depletion of Nb, Ta, Ti, P. The weakly peraluminous quartz porphyries have typical geochemical signatures of post collisional granite, including negative Eu anomaly, strong depletion of P, were possibly formed at post-collisional extension setting. Evidence that the intrusive rocks in the Xilekuduke district have low ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> ratio (0.702976 to 0.704306) and positive  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  values (+5.8 to +6.8) with  $t_{\text{DM}}$  ages ranging from 524Ma to 588Ma suggests that they were possibly derived from partial melting of the Early Paleozoic oceanic crust. It is suggested that the Sawuer island arc had experienced five evolutionary periods in the Late Palaeozoic as following: subduction period

\* 本文受国家自然科学基金项目(41390442)、国家科技支撑计划项目(2011BAB06B03-3, 2011BAB06B03-5)和中国科学院知识创新工程主要方向项目(KZCX-EW-LY03)联合资助。

第一作者简介: 游军,男,1985年生,博士生,矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: yj\_103.student@sina.com

\*\* 通讯作者: 徐兴旺,男,1966年生,研究员,主要从事构造地质、矿床地质和流体构造动力学研究, E-mail: xuxw@mail.iggcas.ac.cn

(from 400 to 370Ma), major collision period (from 360 to 340Ma), late-collision period (from 340 to 330Ma), early post-collision period (from 330 to 320Ma) and post-collision extension period (from 320 to 280Ma).

**Key words** Tectonic evolution; Magma activity; Late collision; Post collision; Xilekuduke; Xinjiang

**摘要** 新疆北部地区不同地体间的碰撞时间与碰撞过程的成矿作用是中亚造山带与成矿研究的热点问题。对于新疆北部地区是否存在晚碰撞岩浆活动、碰撞与后碰撞的转化时间及转化过程中的岩浆活动与成矿作用特征尚不清楚。本文报道了新疆东准噶尔希勒库都克铜矿矿区岩浆演化的研究成果。矿区存在 3 期岩浆活动形成 4 种岩石类型,依次为 340Ma 的闪长玢岩、328Ma 的二长花岗岩与 325Ma 的花岗斑岩、315Ma 石英斑岩。4 种岩石均具有高钾钙碱性特征。闪长玢岩形成于碰撞晚期环境,具有典型的岛弧地球化学特征,属准铝质岩石,无钨异常,亏损 Nb、Ta、Ti,无 P 亏损;二长花岗岩、花岗斑岩形成于后碰撞早期环境,其中二长花岗岩具有弧与后碰撞过渡的地球化学特征,属弱过铝质岩石,弱正钨异常,亏损 Nb、Ta、Ti, P 中等程度亏损;花岗斑岩具有不典型后碰撞的地球化学特征,属弱过铝质岩石,负钨异常,明显亏损 Nb、Ta、Ti,较强 P 亏损;石英斑岩形成于后碰撞伸展阶段并具有后碰撞的地球化学特征,属弱过铝质岩石、负钨异常,亏损 Nb、Ta、Ti,强 P 亏损。矿区侵入岩具有较低的 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 初始值 (0.702976 ~ 0.704306) 和相对较高的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值 (+5.8 ~ +6.8), 模式年龄 ( $t_{\text{DM}}$ ) 为 524 ~ 588Ma, 其可能主要源于早古生代洋壳的部分熔融。建立了萨吾尔岛弧晚古生代的构造演化模式及成岩、成矿过程,认为萨吾尔岛弧在晚古生代经历了俯冲期 (400 ~ 370Ma)、主碰撞期 (360 ~ 340Ma)、碰撞晚期 (340 ~ 330Ma)、后碰撞早期 (330 ~ 320Ma) 以及后碰撞伸展阶段 (320 ~ 280Ma) 五个阶段。

**关键词** 构造演化; 岩浆活动; 晚碰撞; 后碰撞; 希勒库都克; 新疆

**中图法分类号** P588.12; P588.13; P597.3

## 1 引言

新疆北部地区不同地体、岩浆弧与地块间的碰撞时间与碰撞过程的成矿作用是中亚造山带与成矿研究的热点问题 (Chen and Arakawa, 2005; 王京彬和徐新, 2006)。目前,对于阿尔泰-准噶尔地区不同构造单元间的碰撞与后碰撞时限趋于达成一定的共识。例如,童英等 (2006a)、周刚等 (2006, 2009) 与 Tong *et al.* (2012) 基于额尔齐斯碰撞带 A 型花岗岩的年龄,洪涛等 (2015) 基于额尔齐斯碰撞带糜棱岩的锆石 U-Pb 年龄认为阿尔泰地体与萨吾尔地体间的碰撞发生在 360Ma; 韩宝福等 (2006)、杨高等 (2009a, 2010)、郭芳放等 (2010)、汪帮耀等 (2011)、吴琪等 (2012) 与 Zhang *et al.* (2013) 认为卡拉麦里地区野马泉弧与准噶尔地体在早石炭世发生碰撞,并在 340 ~ 330Ma 进入后碰撞阶段 (李锦轶等, 1989; 黄岗等, 2012; Zhang *et al.*, 2013); Han *et al.* (2010, 2011)、Liu *et al.* (2012) 与 Li *et al.* (2014) 认为阿尔泰地区在 320 ~ 317Ma 进入后碰撞阶段; 韩宝福等 (2006)、袁峰等 (2006)、周涛发等 (2006) 与 Zhou *et al.* (2008) 基于 A 型花岗岩的年龄认为西准噶尔在 320Ma 时已进入后碰撞阶段; 陈石等 (2009) 研究显示三塘湖地区 320Ma 火山岩具双峰式特征,张元元等 (2009)、李涤等 (2013) 与 Li *et al.* (2014) 指出扎河坝地区 317Ma 火山岩也具双峰式特征,这意味着东准噶尔地区在 320Ma 已进入后碰撞伸展阶段。然而,新疆北部地区碰撞与后碰撞的转化时间及转化过程中的岩浆与成矿作用特征并不清楚,对于新疆北部地区是否存在晚碰撞岩浆活动也不清楚。

位于新疆东准噶尔北部地区的希勒库都克铜矿床是北京矿产地质研究院于 2005 年发现的 (丁汝福等, 2011)。

王玉往等 (2008, 2010)、龙灵利等 (2009)、王莉娟等 (2009, 2010)、曹锦元等 (2012)、郭方晶等 (2012)、刘猛等 (2012) 基于矿床的地质、地球化学、流体包裹体方面的研究,认为该矿床属于斑岩型铜铅矿床。龙灵利等 (2009, 2010, 2011) 报道了矿区含斑岩花岗岩斑岩以及二长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 329Ma 和 327Ma, 矿区辉钼矿的 Re-Os 年龄为 327Ma。近来,我们对希勒库都克矿区的岩芯进行了系统的编录与研究,结果发现矿区存在 3 个不同构造阶段的岩浆活动。本文报道了希勒库都克铜矿矿区不同侵入岩的岩石学、岩石地球化学、同位素以及年代学特征,重新建立了研究区晚碰撞-后碰撞岩浆过程与构造演化模式。

## 2 区域地质背景

希勒库都克铜矿矿区处于西伯利亚板块和哈萨克斯坦-准噶尔板块的结合部位,即萨吾尔晚古生代大洋岛弧带 (图 1a) 内 (董连慧等, 2009; Xu *et al.*, 2013), 位于额尔齐斯缝合带南侧、扎河坝-阿尔曼台蛇绿岩带与乌伦古河大断裂北侧,沙尔布拉克-阿克塔斯断裂从矿区北部穿过。东准噶尔北部地区露出地层以泥盆-石炭系为主,其中,泥盆系中、下统为一套海相中基性-基性火山岩建造,上泥盆统为海陆交互的磨拉石建造,其上被石炭系和二叠系海陆交互相陆源碎屑-火山岩建造和陆相火山磨拉石建造不整合覆盖,普遍缺失上石炭统。在卡拉麦里地区,下石炭统南明水组英安质凝灰岩与凝灰岩不整合覆盖在卡拉麦里蛇绿岩之上,为后碰撞火山岩 (李锦轶等, 1989; 黄岗等, 2012; Zhang *et al.*, 2013)。研究区内主要的断裂包括走向北北西向的卡拉先格断裂、北西向的额尔齐斯深大断裂及乌伦古河深大断裂,以及近东西向的卡拉麦里大断裂,且断裂带多具有压性或压

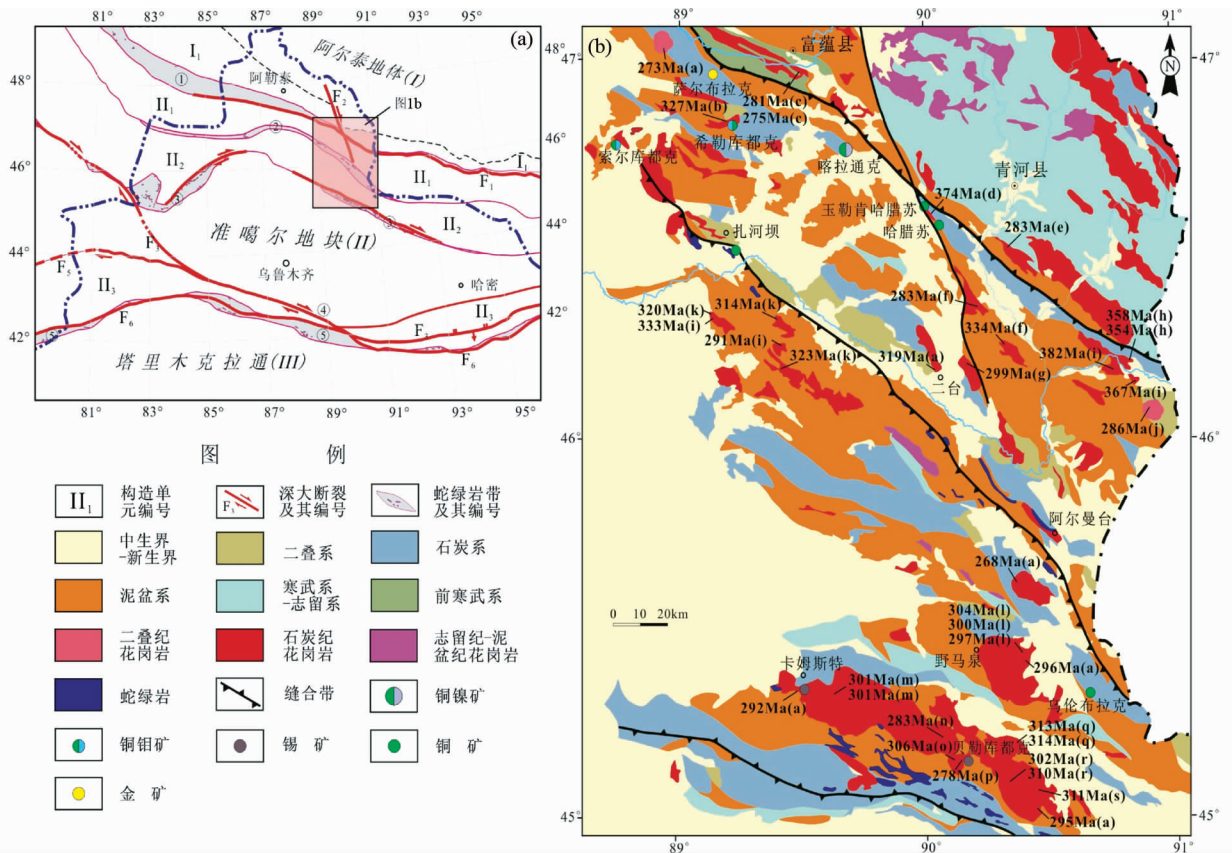


图1 希勒库都克钼铜矿床大地构造位置(a, 据董连慧等, 2009 修改)与区域地质图(b)

(a)  $F_1$ -额尔齐斯断裂;  $F_2$ -二台断裂;  $F_3$ -乌奇阿腊耳-精河-阿奇克库都克-沙泉子断裂;  $F_4$ -哈中断裂;  $F_5$ -卡拉套断裂;  $F_6$ -长阿吾子-巴伦台-红柳峡断裂; 蛇绿岩带: ①乔夏哈拉-布尔根蛇绿岩带; ②阿尔曼台-扎河坝-洪古勒塔格-塔城蛇绿岩带; ③卡拉麦里-达拉布特/克拉玛依-唐巴勒蛇绿岩带; ④八音沟蛇绿岩带; ⑤冰达坂-干沟-却勒塔格蛇绿岩带; 古生代构造单元:  $I_1$ -阿尔泰山南缘古生代弧盆体系;  $II_1$ -萨吾尔晚古生代大洋岛弧;  $II_2$ -谢米斯台-库兰喀孜干-纸房-琼河坝早古生代岛弧;  $II_3$ -天山地区古生代复合弧盆系统。(b) 图中岩体年代数据来源于文献: (a) 韩宝福等, 2006; (b) 龙灵利等, 2010; (c) 童英等, 2006b; (d) 杨富全等, 2012; (e) 周刚等, 2007; (f) 周刚等, 2006; (g) 李宗怀等, 2004; (h) 童英等, 2006a; (i) Shen *et al.*, 2011; (j) Tong *et al.*, 2012; (k) 刘家远和袁奎荣, 1996; (l) 甘林等, 2010; (m) 韩宇捷等, 2012; (n) 杨高等, 2010; (o) 李月臣等, 2007; (p) 杨高等, 2009b; (q) 林锦富等, 2007; (r) 苏玉平等, 2008; (s) 杨高等, 2009a

Fig. 1 Tectonic location (a, modified after Dong *et al.*, 2009) and regional geological (b) map of the Xilekuduke Mo-Cu deposit (a)  $F_1$ -Ertix fault zone;  $F_2$ -Ertai fault;  $F_3$ -Ucharal-Jinghe-Aaikudug-Shaquanzhi fault;  $F_4$ -Kazakhstan central fault;  $F_5$ -Kalatau fault;  $F_6$ -Changawozi-Baluntai-Hongliuhe fault. Ophiolite belts: ① Qiaoxiahala-Bulgon ophiolite belt; ② Armantai-Hongguleleng-Tacheng ophiolite belt; ③ Kalamali-Darabut/Karamay-Tangbale ophiolite belt; ④ Bayingou ophiolite belt; ⑤ Bingdaban-Gangou-Qulengtage ophiolite belt. Paleozoic tectonic unites:  $I_1$ -Paleozoic arc-basin system in southern Altay area;  $II_1$ -Late Paleozoic Sawuer island arc;  $II_2$ -Early Paleozoic Ximisitai-Kulankazigan-Zhifang-qionghaba arc;  $II_3$ -Tianshan Paleozoic arc-basin system. (b) ages of plutons in figure B are from references as following; (a) Han *et al.*, 2006; (b) Long *et al.*, 2010; (c) Tong *et al.*, 2006a; (d) Yang *et al.*, 2012; (e) Zhou *et al.*, 2007; (f) Zhou *et al.*, 2006; (g) Li *et al.*, 2004; (h) Tong *et al.*, 2006b; (i) Shen *et al.*, 2011; (j) Tong *et al.*, 2012; (k) Liu *et al.*, 1996; (l) Gan *et al.*, 2010; (m) Han *et al.*, 2012; (n) Yang *et al.*, 2010; (o) Li *et al.*, 2007; (p) Yang *et al.*, 2009a; (q) Lin *et al.*, 2007; (r) Su *et al.*, 2008; (s) Yang *et al.*, 2009b

扭性特征。区内侵入岩种类复杂,由深成、半深成、浅成到超浅成,由酸性、中性、基性与超基性均有产出。岩体侵入时代主体为石炭-二叠世,主要岩性有超镁铁岩、辉绿岩-橄辉岩组合、闪长玢岩、石英闪长玢岩、二长花岗岩、钾长花岗岩、花岗斑岩、石英斑岩及钠质花岗岩(图1b)。区内分布有萨尔库都克铜钼矿、希勒库都克铜钼矿、哈腊苏铜钼矿、玉勒肯哈腊苏铜钼矿、乌伦布拉克铜钼矿、喀拉通克铜钼矿、萨尔布拉克金矿、阿克塔斯金矿、卡姆斯特锡矿、贝勒库都克锡矿等铜

(钼)、钼、金、锡矿床(图1b)。

### 3 矿区地质特征

希勒库都克钼铜矿区出露地层主要为下石炭统黑山头组( $C_1h$ )和下石炭统南明水组( $C_1n$ ),黑山头组( $C_1h$ )为一套海陆交互相中性火山喷发-陆源碎屑沉积,安山岩、英安岩、

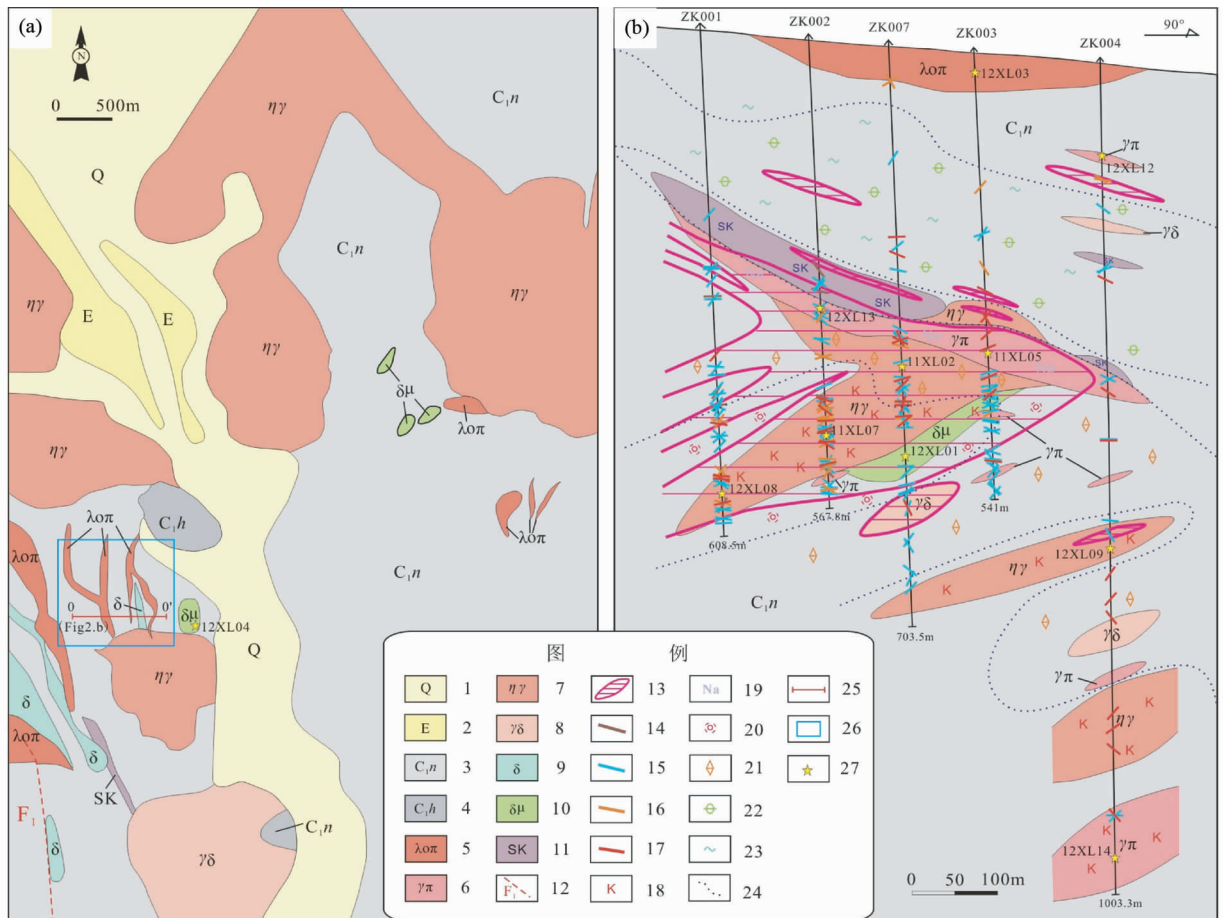


图2 希勒库都克钼铜矿区地质图(a, 据丁汝福等, 2011 修改)及0-0'线勘探线剖面图(b)

1-第四系;2-古近系;3-下石炭统南明水组英安质凝灰岩、凝灰质砂岩;4-下石炭统黑山头组安山岩、凝灰岩、凝灰质粉砂岩;5-石英斑岩;6-花岗斑岩;7-似斑状黑云母二长花岗岩;8-二长花岗岩;9-闪长玢岩;10-闪长玢岩;11-矽卡岩(化);12-断层;13-钼矿体;14-裂隙状辉钼矿;15-(含)辉钼矿-石英脉;16-辉钼矿-黄铁矿-石英脉;17-辉钼矿-黄铁矿-黄铜矿-石英脉;18-钾化;19-钠长石化;20-硅化;21-绢云母化;22-绿帘石化;23-绿泥石化;24-蚀变带界线;25-勘探线位置;26-钼铜矿床位置;27-取样位置

Fig. 2 Geological map (a, modified after Ding *et al.*, 2011) with a section of 0-0' prospecting line (b) of the Xilekuduke Mo-Cu ore district

1-Quaternary; 2-Paleogene; 3-dacitic tuff, tuff-sandstone of Lower Carboniferous Nanmingshui Formation; 4-andesite, tuff and tuff-siltstone of Lower Carboniferous Heishantou Formation; 5-quartz porphyry; 6-granite-porphry; 7-porphyrityc-like biotite monzonitic granite; 8-granodiorite; 9-diorite; 10-diorite-porphryite; 11-skarnization; 12-faults; 13-molybdenum ore bodies; 14-crack-type molybdenite; 15-molybdenite-quartz veins; 16-molybdenite-pyrite-quartz veins; 17-molybdenite-chalcopyrite-pyrite-quartz veins; 18-potassic; 19-albitic; 20-silicific; 21-sericitic; 22-epidotic; 23-chloritic; 24-boundary of alteration zone; 25-prospecting line position; 26-Mo-Cu deposit; 27-samples selecting position

安山质凝灰岩夹凝灰质砂岩呈透镜体状产出;南明水组(C<sub>1n</sub>)为一套滨海-浅海相火山碎屑岩、陆源碎屑岩沉积浅变质岩系,其岩性主要为英安质凝灰岩、凝灰质砂岩、粉砂岩等,局部夹灰岩,是矿区出露的主要地层,也是矿区的主要赋矿层位。矿区内断裂构造较为发育,重要的三组断裂走向分别为近EW向、NE向、NNW-近SN向。矿区内侵入岩较发育,从北到南依次出露似斑状黑云母二长花岗岩、石英斑岩、闪长岩、闪长玢岩、二长花岗岩、花岗闪长岩;深部还发育有花岗斑岩。二长花岗岩呈岩株状产出,闪长岩、闪长玢岩、花岗斑岩和石英斑岩均呈岩脉产出。依据岩体(脉)间相互穿插关系,侵入岩生成的先后顺序依次为闪长岩(δ)→闪长玢

岩(δμ)→花岗闪长岩(γδ)→二长花岗岩(ηγ)、花岗斑岩(γπ)→石英斑岩(λπ)(丁汝福等, 2011)。钼铜矿床主体位于矿区“香蕉状”二长花岗岩体南侧(图2a, b)。

矿区存在钼、铜矿化,垂向上具有上铜下钼的矿化特征(王玉往等, 2010)。钼矿化与花岗斑岩密切相关,钼矿体主要赋存于花岗斑岩、二长花岗岩接触带附近凝灰质粉砂岩中,矿化呈裂隙状、脉状或者浸染状分布于花岗斑岩中,钼矿脉类型主要有辉钼矿-石英脉、黄铁矿-辉钼矿-石英脉及黄铜矿-黄铁矿-辉钼矿-石英脉。铜矿化与二长花岗岩、花岗闪长岩有关,铜矿化(体)赋存于二长花岗岩、花岗闪长岩及伴生的矽卡岩中,矿化呈浸染状分布于闪长玢岩包体中或呈脉状



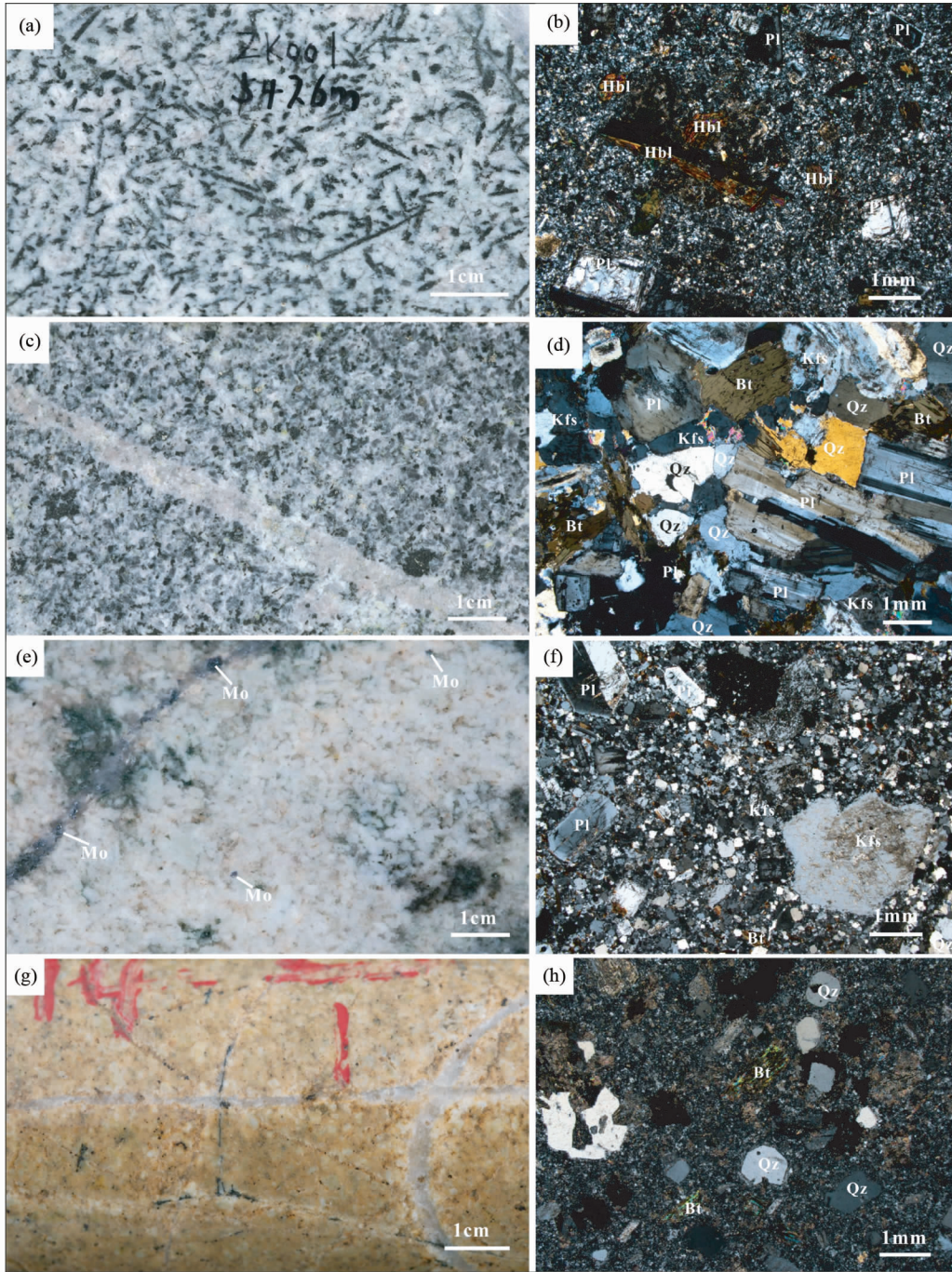


图3 希勒库都克钼铜矿区几种主要侵入岩手标本及镜下照片

(a) 闪长玢岩(手标本);(b) 闪长玢岩(正交偏光);(c) 二长花岗岩(手标本);(d) 二长花岗岩(正交偏光);(e) 花岗斑岩(手标本);(f) 花岗斑岩(正交偏光);(g) 石英斑岩(手标本);(h) 石英斑岩(正交偏光). 矿物代号: Qz-石英; Pl-斜长石; Kfs-钾长石; Hbl-角闪石; Bt-黑云母; Mo-辉钼矿

Fig. 3 Hand specimens and microscopic pictures of major types of intruded rocks in the Xilekuduke Mo-Cu ore district

(a) diorite (hand specimen); (b) diorite (microscopic, orthogonal polarized); (c) monzonitic granite (hand specimen); (d) monzonitic granite (microscopic, orthogonal polarized); (e) granite porphyry (hand specimen); (f) granite porphyry (microscopic, orthogonal polarized); (g) quartz porphyry (hand specimen); (h) quartz porphyry (microscopic, orthogonal polarized); Mineral codes: Qz-quartz; Pl-plagioclase; Kfs-K-feldspar; Hbl-hornblende; Bt-biotite; Mo-molybdenite; Ccp-chalcopyrite

分布于二长花岗岩、砂卡岩中,铜矿脉类型主要有黄铁矿-黄铜矿脉及(辉钼矿)-黄铁矿-黄铜矿-石英脉(图2b)。

矿区的交代蚀变类型多样,有砂卡岩化、钾长石化、黑云母化、钠长石化、硅化、绢云母化、白云母化、绿帘石化与绿泥

表1 希勒库都克钼铜矿区侵入岩主量元素分析结果 ( $\times 10^{-2}$ )Table 1 Major-elements analytical results of intruded rocks in the Xilekuduke Mo-Cu ore district ( $\times 10^{-2}$ )

样品号	12XL04	12XL01	11XL07	11XL02	12XL08	12XL09	12XL12	12XL13	12XL14	11XL05	12XL03
岩性	闪长玢岩		二长花岗岩			花岗斑岩			石英斑岩		
SiO <sub>2</sub>	59.48	55.75	66.65	65.13	67.96	68.21	71.40	71.74	72.51	72.36	74.30
TiO <sub>2</sub>	0.64	0.80	0.44	0.48	0.35	0.33	0.23	0.21	0.19	0.17	0.26
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.95	16.41	15.54	15.75	16.73	15.69	14.87	14.87	14.27	14.20	13.49
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.09	2.73	1.42	1.59	0.37	1.51	0.10	0.44	0.41	0.51	0.77
FeO	2.63	3.10	1.99	1.93	1.11	1.18	0.41	0.28	0.31	0.59	1.15
MnO	0.09	0.15	0.05	0.03	0.05	0.05	0.03	0.02	0.02	0.04	0.04
MgO	2.06	4.02	1.57	1.77	1.17	1.05	0.53	0.35	0.27	0.30	0.55
CaO	4.84	5.80	3.64	3.75	2.44	2.36	1.61	1.68	2.08	1.32	0.94
Na <sub>2</sub> O	4.67	4.05	3.49	3.77	4.88	4.57	5.22	4.68	4.53	4.20	4.24
K <sub>2</sub> O	2.46	2.62	3.33	3.05	3.26	3.27	3.27	3.78	3.09	4.20	3.59
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.42	0.34	0.17	0.18	0.17	0.18	0.09	0.07	0.07	0.06	0.07
LOI	3.30	3.87	1.34	2.02	1.52	1.58	2.58	2.04	2.32	2.08	0.82
Total	100.0	100.1	100.0	99.8	100.3	100.2	100.4	100.3	100.2	100.2	100.5
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	7.13	6.67	6.82	6.82	8.14	7.84	8.49	8.46	7.62	8.40	7.83
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	0.53	0.65	0.95	0.81	0.67	0.72	0.63	0.81	0.68	1.00	0.85
$\sigma$	3.08	3.19	1.97	2.10	2.65	2.44	2.54	2.49	1.97	2.40	1.96
A/CNK	1.00	0.93	1.03	1.04	1.10	1.07	1.02	1.01	1.02	1.00	1.05
A/NK	1.63	1.68	1.54	1.56	1.40	1.36	1.19	1.19	1.27	1.14	1.17

石化、碳酸盐化。矽卡岩化与二长花岗岩伴生,主要位于二长花岗岩与围岩接触上;钾长石化主要位于二长花岗岩及花岗斑岩中;钠长石化分布于花岗斑岩中;绢云母化、白云母化主要分布于二长花岗岩及闪长玢岩中;黑云母化、硅化、绿帘石化、绿泥石化主要分布于围岩地层中。剖面上从侵入岩到围岩蚀变带依次可划分为:以钾化为主的蚀变带(钾长石化、绢云母化、碳酸盐化)—以绢云母化为主的蚀变带(绢云母化、白云母化、碳酸盐化、绿泥石化)—以钠长石化为主的蚀变带(钠长石化、碳酸盐化、绢云母化)—以矽卡岩化、绿帘石化、绿泥石化为主的蚀变带(王玉往等, 2010; 丁汝福等, 2011)(图2b)。

## 4 岩石学特征

矿区内侵入岩较发育,从北到南依次出露似斑状黑云母二长花岗岩、石英斑岩、闪长岩、闪长玢岩、二长花岗岩、花岗闪长岩;深部还发育有花岗斑岩。二长花岗岩呈岩株状产出,闪长岩、闪长玢岩、花岗斑岩和石英斑岩均呈岩脉产出。矿区几种主要的岩浆岩岩石学特征如下:

闪长玢岩呈灰-灰绿色,斑状结构,半自形-自形板柱状结构,块状构造。岩石由斑晶与基质组成。斑晶矿物包括斜长石、角闪石与黑云母,斜长石含量5%~8%,为中长石,呈自形板柱状,分布均匀,角闪石含量10%~15%,呈半自形-自形长柱状,黑云母少量,呈片状-叶片状。基质矿物有斜长石、角闪石、黑云母及磁铁矿、磷灰石等副矿物,斜长石含量50%~55%,呈自形板柱状,角闪石含量5%~8%,呈半自

形-自形长柱状,黑云母含量3%~5%,呈片状-叶片状均匀分布于岩石之中,石英含量3%~5%,呈他形粒状。(图3a, b)。

二长花岗岩呈灰-灰白色,半自形-自形板柱状结构,块状构造,岩石的矿物包括斜长石、石英、钾长石、角闪石和黑云母及黄铁矿、磷灰石等副矿物。斜长石含量40%~45%,为中-更长石,呈半自形板柱状,石英含量20%~23%,呈他形粒状,钾长石含量15%~20%,呈他形粒状,角闪石含量3%~5%,呈半自形-自形柱状,黑云母含量8%~12%左右,呈片状-叶片状(图3c, d)。

花岗斑岩呈灰白色-肉红色,斑状结构,半自形-自形板柱状结构,块状构造。斑晶矿物以斜长石、钾长石、石英和黑云母为主;斜长石含量12%~16%,为更-钠长石,呈半自形板柱状,钾长石含量5%左右,呈半自形板状,石英含量3%~5%,呈他形粒状,黑云母少量,呈半自形片状。基质矿物有斜长石、钾长石、石英及黄铁矿、磷灰石等副矿物,其中,斜长石含量30%~35%,呈自形板柱状,钾长石含量10%~15%,呈他形粒状,石英含量15%~20%,呈他形粒状(图3e, f)。

石英斑岩呈灰白-白色,斑状结构,霏细结构,块状构造。斑晶以石英为主,石英含量10%~15%,呈他形粒状、溶蚀港湾状。基质矿物以石英、钾长石、斜长石为主及黄铁矿、褐铁矿等副矿物,其中,石英含量35%~40%,呈他形粒状,钾长石含量20%~25%,呈他形粒状,斜长石含量15%~20%,呈半自形板状(图3g, h)。

表2 希勒库都克铜矿侵入岩微量元素分析结果( $\times 10^{-6}$ )Table 2 Micro-elements analytical results of intruded rocks in the Xilekuduke Mo-Cu ore district( $\times 10^{-6}$ )

样品号	12XL04	12XL01	11XL07	11XL02	12XL08	12XL09	12XL12	12XL13	12XL14	11XL05	12XL03
岩性	闪长玢岩		二长花岗岩			花岗斑岩				石英斑岩	
Li	22.10	17.97	14.13	18.55	12.42	14.99	1.93	2.04	1.55	2.50	9.03
Be	1.43	1.32	1.05	1.12	1.46	1.19	1.42	1.44	1.23	1.47	1.70
Sc	8.38	6.46	7.18	7.77	3.53	5.09	2.10	1.90	1.70	1.87	3.58
V	85.30	52.84	71.06	77.46	30.86	36.04	15.10	12.80	11.91	10.63	31.99
Cr	6.14	3.66	26.08	31.17	4.83	4.68	3.79	4.76	5.00	3.99	30.62
Co	14.55	7.20	7.02	8.73	2.45	5.68	1.27	1.89	2.45	2.36	1.85
Ni	15.71	2.23	15.39	38.70	35.10	7.54	12.49	38.97	9.68	9.43	13.66
Ga	18.05	15.66	16.25	16.72	15.15	15.14	14.70	14.71	12.73	14.35	15.14
Rb	89.8	103	73.0	80.5	62.1	70.4	74.5	75.4	62.6	65.7	44.6
Sr	578	492	576	593	547	446	169	178	113	336	254
Zr	120	120	136	126	183	117	160	160	149	125	100
Hf	3.26	3.40	3.63	3.34	4.51	3.81	3.02	4.35	3.78	3.67	3.02
Nb	8.42	7.51	7.42	7.73	10.37	6.62	13.12	13.38	12.70	13.47	16.22
Ta	0.47	0.48	0.57	0.55	0.62	1.03	0.84	0.89	1.00	0.92	1.36
Cs	4.38	1.75	1.56	2.79	1.74	1.72	2.72	2.53	2.22	1.66	0.30
Ba	454	728	731	709	844	640	811	1101	586	990	884
Th	3.07	3.70	5.11	4.90	4.85	4.24	7.07	7.34	6.89	7.25	10.56
U	2.04	1.74	1.99	1.74	1.83	2.52	5.07	6.60	2.08	2.25	2.57
Pb	3.98	10.28	4.69	5.00	7.08	8.45	4.26	4.88	1.97	4.31	10.31
La	18.77	22.58	12.15	18.33	19.18	18.11	37.95	35.68	30.29	31.14	45.25
Ce	39.28	45.32	22.89	33.29	33.34	31.92	62.58	58.04	48.31	57.09	77.64
Pr	4.75	5.79	2.90	4.06	4.24	4.19	7.77	7.36	6.22	6.96	8.59
Nd	19.19	22.99	11.75	15.41	16.66	16.40	27.91	25.62	22.71	24.99	29.10
Sm	3.66	4.15	2.28	2.66	3.03	3.08	4.12	4.06	3.60	3.93	3.94
Eu	1.13	1.26	0.84	0.88	1.12	0.99	0.95	0.88	0.71	0.93	0.86
Gd	3.19	3.78	1.98	2.22	2.64	2.79	3.23	3.21	2.68	3.11	4.05
Tb	0.49	0.57	0.29	0.31	0.41	0.44	0.46	0.44	0.39	0.45	0.54
Dy	2.84	3.44	1.62	1.72	2.40	2.69	2.56	2.40	2.17	2.50	2.63
Ho	0.57	0.72	0.33	0.35	0.52	0.57	0.52	0.49	0.45	0.51	0.54
Er	1.65	1.99	0.92	0.95	1.46	1.58	1.44	1.38	1.30	1.44	1.63
Tm	0.26	0.31	0.14	0.14	0.23	0.24	0.22	0.21	0.21	0.22	0.32
Yb	1.72	2.02	0.92	0.97	1.58	1.61	1.54	1.50	1.45	1.53	2.00
Lu	0.27	0.32	0.15	0.16	0.27	0.27	0.26	0.26	0.24	0.25	0.30
Y	14.80	18.03	8.04	8.12	13.68	14.88	13.90	13.22	12.46	14.05	16.41
ΣREE	97.77	115.3	59.15	81.43	87.09	84.88	151.5	141.5	120.7	135.0	177.4
LREE	86.78	102.1	52.81	74.63	77.57	74.69	141.3	131.7	111.8	125.0	165.4
HREE	10.99	13.15	6.35	6.81	9.52	10.19	10.23	9.89	8.89	9.98	12.02
LREE/HREE	7.89	7.76	8.32	11.0	8.15	7.33	13.8	13.3	12.6	12.5	13.8
(La/Yb) <sub>N</sub>	7.82	8.01	9.49	13.6	8.69	8.05	17.6	17.1	14.9	14.6	16.2
(La/Sm) <sub>N</sub>	3.31	3.51	3.44	4.45	4.09	3.80	5.94	5.67	5.43	5.12	7.41
(Gd/Yb) <sub>N</sub>	1.53	1.55	1.79	1.90	1.38	1.43	1.73	1.77	1.52	1.68	1.67
δEu	0.98	0.96	1.18	1.07	1.18	1.01	0.77	0.72	0.67	0.79	0.65
δCe	0.99	0.95	0.92	0.91	0.87	0.87	0.85	0.83	0.82	0.91	0.90
Ta/Hf	0.144	0.141	0.157	0.165	0.138	0.270	0.278	0.205	0.265	0.251	0.450
Ta/Zr	0.004	0.004	0.004	0.004	0.003	0.009	0.005	0.006	0.007	0.007	0.014

孔及地表较新鲜的岩石(图2),对全部11件岩石样品进行主、微量测试,其中闪长玢岩2件,二长花岗岩4件,花岗斑岩4件,石英斑岩1件。对4种不同岩石类型的样品分别进行锆石 U-Pb 测年(4件:12XL01、11XL07、11XL05、12XL03)及全岩 Sr、Nd 同位素测量(5件:12XL01、11XL02、11XL07、11XL05、12XL03)。

## 5 样品选择与分析测试方法

### 5.1 样品选择

针对矿区不同类型的岩石样品开展了系统的地球化学、同位素及年代学研究。岩石样品均采自矿区00号勘探线钻

表3 希勒库都克钼铜矿区侵入岩 Sr、Nd 同位素组成

Table 3 Sr and Nd isotope compositions for the intruded rocks from the Xilekuduke Mo-Cu ore district

样品号	岩石类型	年龄 (Ma)	Rb ( $\times 10^{-6}$ )	Sr ( $\times 10^{-6}$ )	$\frac{87\text{Rb}}{86\text{Sr}}$	$\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}$	$2\sigma$	$\left(\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}\right)_i$	$f_{\text{Rb/Sr}}$	$\varepsilon_{\text{Sr}}(0)$
12XL01	闪长玢岩	340	102.69	492.46	1.3381	0.709458	0.000013	0.702976	15.18	70.4
11XL02	二长花岗岩	328	80.47	592.75	0.4289	0.705539	0.000011	0.703537	4.19	14.8
11XL07	二长花岗岩	328	72.98	575.68	0.3454	0.705178	0.000011	0.703565	3.18	9.6
11XL05	花岗斑岩	325	65.74	335.67	1.0476	0.708720	0.000012	0.703876	11.67	59.9
12XL03	石英斑岩	315	44.60	253.82	0.4971	0.706534	0.000010	0.704306	5.01	28.9

样品号	$\varepsilon_{\text{Nd}}(0)$	Sm ( $\times 10^{-6}$ )	Nd ( $\times 10^{-6}$ )	$\frac{147\text{Sm}}{144\text{Nd}}$	$\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}$	$2\sigma$	$\left(\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}\right)_i$	$f_{\text{Sm/Nd}}$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{\text{DM}}$ (Ma)
12XL01	3.4	4.15	22.99	0.1259	0.512813	0.000012	0.512532	-0.36	6.5	588
11XL02	3.3	2.66	15.41	0.1140	0.512809	0.000011	0.512564	-0.42	6.8	524
11XL07	3.4	2.28	11.75	0.1208	0.512812	0.000011	0.512552	-0.39	6.6	558
11XL05	3.6	3.93	24.99	0.1232	0.512822	0.000012	0.512560	-0.37	6.6	556
12XL03	2.3	3.94	29.10	0.1106	0.512757	0.000010	0.512529	-0.44	5.8	584

注: Sr 初始比值  $\left(\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}\right)_i = \left(\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}\right)_s - \left(\frac{87\text{Rb}}{86\text{Sr}}\right)_s (e^{\lambda t} - 1)$ ;  $\varepsilon_{\text{Sr}}(0) = \left[\left(\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}\right)_s / \left(\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}\right)_{\text{UR}} - 1\right] \times 10^4$ ;  $\varepsilon_{\text{Sr}}(t) = \left[\left(\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}\right)_i / \left(\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}\right)_{\text{UR}} - 1\right] \times 10^4$ ;  $\left(\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}\right)_{\text{UR}} = \left(\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}\right)_{\text{UR}} - \left(\frac{87\text{Rb}}{86\text{Sr}}\right)_{\text{UR}} (e^{\lambda t} - 1)$ ;  $f_{\text{Rb/Sr}} = \left(\frac{87\text{Rb}}{86\text{Sr}}\right)_s / \left(\frac{87\text{Rb}}{86\text{Sr}}\right)_{\text{UR}} - 1$ ; Nd 初始比值  $\left(\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}\right)_i = \left(\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}\right)_s - \left(\frac{147\text{Sm}}{144\text{Nd}}\right)_s (e^{\lambda t} - 1)$ ;  $\varepsilon_{\text{Nd}}(0) = \left[\left(\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}\right)_s / \left(\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}\right)_{\text{CHUR}} - 1\right] \times 10^4$ ;  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t) = \left[\left(\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}\right)_i / \left(\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}\right)_{\text{CHUR}} - 1\right] \times 10^4$ ;  $\left(\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}\right)_{\text{CHUR}} = \left(\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}\right)_{\text{CHUR}} - \left(\frac{147\text{Sm}}{144\text{Nd}}\right)_{\text{CHUR}} (e^{\lambda t} - 1)$ ;  $f_{\text{Sm/Nd}} = \left(\frac{147\text{Sm}}{144\text{Nd}}\right)_s / \left(\frac{147\text{Sm}}{144\text{Nd}}\right)_{\text{CHUR}} - 1$ ; 亏损地幔的一阶段模式年龄:  $t_{\text{DM}} = 1/\lambda \ln \left\{ 1 + \left[\left(\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}\right)_{\text{DM}} - \left(\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}\right)_s\right] / \left[\left(\frac{147\text{Sm}}{144\text{Nd}}\right)_{\text{DM}} - \left(\frac{147\text{Sm}}{144\text{Nd}}\right)_s\right] \right\}$ ; 其中 s 代表样品测定值; t 代表年龄;  $\left(\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}\right)_{\text{UR}} = 0.7045$ ;  $\left(\frac{87\text{Rb}}{86\text{Sr}}\right)_{\text{UR}} = 0.0827$ ;  $\left(\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}\right)_{\text{CHUR}} = 0.512638$ ;  $\left(\frac{147\text{Sm}}{144\text{Nd}}\right)_{\text{CHUR}} = 0.1967$ ;  $\left(\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}\right)_{\text{DM}} = 0.513151$ ;  $\left(\frac{147\text{Sm}}{144\text{Nd}}\right)_{\text{CHUR}} = 0.2137$

## 5.2 分析测试方法

### 5.2.1 主量、微量元素

样品主量元素分析测试工作在中国科学院矿产资源研究重点实验室完成。主量元素的测定采用 X-射线荧光光谱法(XRF): 首先称取 0.5g 样品放入坩埚, 然后加入适量硼酸高温熔融成玻璃片, 最后在日本岛津公司的顺序式 X 射线荧光光谱仪(XRF-1500)上采用外标法测定氧化物含量, 分析误差小于 5%。主量元素分析结果列于表 1, 并借助 Geokit2012(路远发, 2004)计算程序得到岩石的主要岩石化学参数。

微量元素分析测试工作在中国科学院矿产资源研究重点实验室完成。微量元素的测定采用 ICP-MS 法, 称取 40mg 样品用酸溶法制成溶液, 然后在 ICP-MS Element II 上进行测定, 其精度为: 元素含量大于  $10 \times 10^{-6}$  的误差小于 5%, 而小于  $10 \times 10^{-6}$  的误差小于 10%。具体分析方法参见李献华等(2002)。岩石稀土元素及微量元素测试结果列于表 2, 运用 Geokit 2012(路远发等, 2004)对稀土数据采用原始地幔数据(Sun and McDonough, 1989)进行标准化, 并计算主要的稀土元素参数。

### 5.2.2 全岩 Rb-Sr-Sm-Nd 同位素

全岩 Rb-Sr、Sm-Nd 样品的前处理在中国科学院地质与地球物理研究所超净实验室完成, 同位素比值测量在中国科学院地质与地球物理研究所固体同位素地球化学实验室

的 MAT-262 型热电质谱仪上完成, 详细的 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素测定流程遵照 Li *et al.* (2012a) 和 Yang *et al.* (2010)。分别采用  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$  和  $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$  校正 Nd 和 Sr 同位素比值。国际标样 NBS-987 和 JNdi-1 用来评估测量数据收集过程中的仪器稳定性, 本次测定过程中 NBS-987 的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710236 \pm 0.000010$  ( $2\sigma$ ,  $n = 4$ ), JNdi-1 的  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512124 \pm 0.000012$  ( $2\sigma$ ,  $n = 4$ )。USGS 标样 BCR-2 被用来监测分析流程的精确度, 本次测量过程中, BCR-2 的  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.715021 \pm 0.000015$ ,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512635 \pm 0.000011$ , 和应用 TIMS 以及 MC-ICP-MS 方法得到的测量结果(Li *et al.*, 2012a, b)在误差范围内保持一致。对岩石样品按其 U-Pb 年龄推算它们的  $\left(\frac{87\text{Sr}}{86\text{Sr}}\right)_i$ 、 $\left(\frac{143\text{Nd}}{144\text{Nd}}\right)_i$ 、 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  等值, 参数计算方法详见表注。同位素分析结果及参数列于表 3。

### 5.2.3 锆石 U-Pb 测年

本次锆石 U-Pb 定年采用 SIMS 与 LA-ICP-MS 两种方法。其中闪长玢岩 12XL01 采用 SIMS 方法测年, 二长花岗岩 11XL02、花岗斑岩 11XL05、石英斑岩 12XL03 采用 LA-ICP-MS 方法测年, 2 种分析方法的实验方法与技术流程如下:

锆石 SIMS U-Pb 定年: 将闪长玢岩 12XL01 样品中分选出的锆石样品颗粒和锆石标样 Plésovice (Sláma *et al.*, 2008) 和 Qinghu (Li *et al.*, 2009) 粘贴在环氧树脂靶上, 然后抛光使其曝露一半晶面。对锆石进行透射光和反射光显微照相以及阴极发光图象分析, 以检查锆石的内部结构、帮助



表4 希勒库都克铜矿区长花岗岩(样品 12XL01)中锆石 SIMS U-Pb 定年结果

Table 4 CAMECA SIMS dating results of zircons from diorite (Sample 12XL01) in the Xilekuduke Mo-Cu ore district

测点号	U		Th		Pb		Th/U	$f_{206}(\%)$	同位素比值			同位素年龄(Ma)						
	( $\times 10^{-6}$ )	U	Th	Pb	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\sigma$			$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\sigma$		
12XL01-01	1840	2798	154	1.58	0.05	0.40119	1.65	0.05497	1.51	0.05294	0.64	0.92032	342.5	4.8	344.9	5.1	326.1	14.6
12XL01-02	788.6	824.7	58.5	0.97	0.15	0.39237	1.92	0.05317	1.50	0.05352	1.20	0.78242	336.1	5.5	333.9	4.9	351.5	26.8
12XL01-03	1986	2724	159	1.32	0.14	0.39863	1.69	0.05408	1.51	0.05346	0.76	0.89363	340.7	4.9	339.5	5.0	348.3	17.1
12XL01-04	3027	5689	272	1.97	0.00	0.40316	1.58	0.05535	1.50	0.05282	0.50	0.94782	343.9	4.6	347.3	5.1	321.3	11.4
12XL01-05	1806	2556	146	1.38	0.03	0.39896	1.65	0.05426	1.50	0.05333	0.68	0.91191	340.9	4.8	340.6	5.0	342.8	15.2
12XL01-06	1457	2124	119	1.34	0.08	0.40127	1.82	0.05398	1.50	0.05391	1.03	0.82538	342.6	5.3	338.9	5.0	367.4	23.0
12XL01-07	2216	4386	200	2.03	0.04	0.39868	1.77	0.05466	1.51	0.05290	0.92	0.85404	340.7	5.1	343.1	5.0	324.3	20.7
12XL01-08	2298	3447	191	1.61	0.02	0.39879	1.67	0.05490	1.50	0.05268	0.74	0.89699	340.8	4.9	344.5	5.0	315.2	16.7
12XL01-09	1788	2238	139	1.16	0.02	0.40114	1.65	0.05415	1.50	0.05373	0.68	0.91142	342.5	4.8	339.9	5.0	359.7	15.2
12XL01-10	974.0	1319	76.0	1.40	0.55	0.38543	2.10	0.05300	1.50	0.05275	1.47	0.71558	331.0	5.9	332.9	4.9	317.9	33.0
12XL01-11	2127	3376	175	1.47	0.15	0.39673	1.74	0.05386	1.50	0.05342	0.87	0.86578	339.3	5.0	338.2	5.0	346.8	19.5
12XL01-12	1909	2926	160	1.68	0.31	0.39895	1.99	0.05519	1.51	0.05243	1.31	0.75531	340.9	5.8	346.3	5.1	304.3	29.5

选择适宜的测试点位。样品靶在真空下镀金以备分析。U、Th、Pb 的测定在中国科学院地质与地球物理研究所 CAMECA SIMS-1280 二次离子质谱仪(SIMS)上进行,详细分析方法见 Li *et al.* (2009)。锆石标样与锆石样品以 1:3 比例交替测定。U-Th-Pb 同位素比值用标准锆石 Plésovice (337Ma) (Sláma *et al.*, 2008)校正获得,U 含量采用标准锆石 91500 ( $81 \times 10^{-6}$ ; Wiedenbeck *et al.*, 1995)校正获得,以长期监测标准样品获得的标准偏差(1SD = 1.5%)和单点测试内部精度共同传递得到样品单点误差,以标准样品 Qinghu (159.5Ma; Li *et al.*, 2009)作为未知样监测数据的精确度。普通 Pb 校正采用实测 $^{204}\text{Pb}$ 值。数据结果处理采用 ISOPLLOT 软件(Ludwig, 2003),数据处理结果见表 4。

锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年:将二长花岗岩 11XL02、花岗斑岩 11XL05、石英斑岩 12XL03 中分选出的锆石/斜锆石标准样品和人工合成的硅酸盐玻璃 NIST SRM 610 分别用双面胶粘在载玻片上,放上 PVC 环,然后将环氧树脂和固化剂进行充分混合后注入 PVC 环中,待树脂充分固化后将样品从载玻片上剥离,并对其进行抛光,直到样品露出一个光洁的平面。本文锆石 U-Pb 年龄分析方法基本同 Yuan *et al.* (2004)、柳小明等(2007)、Frei and Gerdes (2009)、Johnston *et al.* (2009)。测试是在中国科学院地质与地球物理研究所引进的 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)上进行,分析时激光束斑直径为  $45\mu\text{m}$ ,激光剥蚀时间为 40s。每测定 10 个样品点测定一个锆石 91500 和一个 NIST SRM 610。 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ,  $^{237}\text{U}/^{235}\text{U}$  ( $^{235}\text{U} = ^{238}\text{U}/137.88$ ),  $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$  的比值则采用标准锆石 91500 为外部标准进行校正。分馏校正和结果的计算采用 GLITTER 4.0 软件。各样品的加权平均年龄计算及谐和图的绘制采用 Isoplot (Ver 3.0) 程序(Ludwig, 2003)。元素浓度采用 GLITTER (Ver4.0) 程序进行计算,以 NIST SRM 610 作外标,锆石以 Si 作为内标(谢烈文等, 2008; 王岚等, 2012),数据处理结果见表 5。

## 6 分析结果

### 6.1 主量、微量元素特征

闪长玢岩(图 4)  $\text{SiO}_2$  含量为 55.75% ~ 59.48%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 16.41% ~ 16.95%, 全碱( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ )含量为 6.67% ~ 7.13%, 铝不饱和指数 A/CNK 为 0.93 ~ 1.00, 里特曼指数  $\sigma$  为 3.08 ~ 3.19。二长花岗岩(图 4)  $\text{SiO}_2$  含量为 65.13% ~ 68.21%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 15.54% ~ 16.73%, 全碱( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ )含量为 6.82% ~ 8.14%, 铝不饱和指数 A/CNK 为 1.03 ~ 1.10, 里特曼指数  $\sigma$  为 1.97 ~ 2.65。花岗斑岩(图 4)  $\text{SiO}_2$  含量为 71.40% ~ 72.51%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 14.20% ~ 14.87%, 全碱( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ )含量为 7.62% ~ 8.49%, 铝不饱和指数 A/CNK 为 1.00 ~ 1.02, 里特曼指数  $\sigma$  为 1.97 ~ 2.54。石英斑岩(图 4)  $\text{SiO}_2$  含量为 74.30%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$

表5 希勒库都克钼铜矿区二长花岗岩、花岗斑岩与石英斑岩中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果

Table 5 LA-ICP-MS dating results of zircons from granodiorite, granite-porphyry and quartz-porphyry in the Xilekuduke Mo-Cu ore district

测点号	<sup>238</sup> U	<sup>232</sup> Th	<sup>206</sup> Pb	Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)					
	(×10 <sup>-6</sup> )				<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	σ
11XL02 二长花岗岩																
-01	141.3	119.2	30.36	0.84	0.39864	0.03397	0.05200	0.00192	0.05108	0.00461	341	25	327	12	244	127
-02	169.5	141.6	35.42	0.84	0.38681	0.03477	0.05482	0.00192	0.05149	0.00490	332	25	344	12	26	140
-03	171.2	136.2	34.55	0.80	0.40920	0.02911	0.05456	0.00162	0.05470	0.00414	348	21	342	10	400	106
-04	102.4	62.40	20.25	0.61	0.38934	0.02846	0.05305	0.00159	0.05350	0.00416	334	21	333	10	350	111
-05	135.9	68.72	26.80	0.51	0.39547	0.02626	0.05233	0.00134	0.05506	0.00386	338	19	329	8	415	103
-06	147.2	109.8	28.89	0.75	0.38377	0.02189	0.05176	0.00118	0.05398	0.00326	330	16	325	7	370	87
-07	152.6	108.2	31.68	0.71	0.38431	0.02543	0.05259	0.00131	0.05317	0.00370	330	19	330	8	336	105
-08	135.2	85.69	25.49	0.63	0.40164	0.03393	0.05286	0.00173	0.05802	0.00496	343	25	332	11	531	128
-09	443.8	476.2	96.82	1.07	0.40910	0.03785	0.05497	0.00232	0.05402	0.00539	348	27	345	14	372	133
-10	181.9	122.9	37.50	0.68	0.39470	0.02210	0.05361	0.00124	0.05340	0.00317	338	16	337	8	346	85
-11	154.6	94.75	31.44	0.61	0.39184	0.03401	0.05256	0.00177	0.05402	0.00496	336	25	330	11	372	135
-12	138.3	72.15	30.29	0.52	0.40409	0.06575	0.05481	0.00342	0.05337	0.00918	345	48	344	21	345	252
-13	220.0	167.4	42.98	0.76	0.38144	0.02251	0.05060	0.00128	0.05448	0.00343	328	17	318	8	391	87
-14	181.2	100.4	38.05	0.55	0.40555	0.02510	0.05346	0.00121	0.05616	0.00357	346	18	336	7	459	97
-15	138.4	82.67	36.12	0.60	0.40135	0.04266	0.05294	0.00222	0.05716	0.00631	343	31	333	14	498	161
-16	138.7	92.99	27.53	0.67	0.39040	0.03149	0.05111	0.00154	0.05512	0.00468	336	23	321	9	417	127
-17	167.7	115.6	35.24	0.69	0.40323	0.03665	0.05291	0.00179	0.05770	0.00529	344	27	332	11	518	141
11XL05 花岗斑岩																
-01	136.1	81.12	26.88	0.60	0.38808	0.01045	0.05242	0.00062	0.05371	0.00153	333	8	329	4	359	39
-02	473.0	294.1	104.6	0.62	0.36809	0.00453	0.05164	0.00046	0.05170	0.00070	318	3	325	3	272	14
-03	226.9	112.1	50.97	0.49	0.38891	0.00667	0.05227	0.00056	0.05398	0.00101	334	5	328	3	370	20
-04	537.9	537.7	112.6	1.00	0.37478	0.00498	0.05184	0.00048	0.05245	0.00077	323	4	326	3	305	15
-05	412.8	282.3	91.12	0.68	0.37448	0.00443	0.05160	0.00045	0.05266	0.00069	323	3	324	3	314	13
-06	441.8	371.8	85.94	0.64	0.37653	0.00860	0.05188	0.00066	0.05266	0.00131	324	6	326	4	314	29
-07	362.4	322.1	67.15	0.89	0.36599	0.00504	0.05119	0.00047	0.05188	0.00078	317	2	322	3	280	16
-08	547.9	528.8	113.5	0.97	0.37392	0.00398	0.05171	0.00045	0.05248	0.00062	323	3	325	3	306	11
-09	354.1	181.6	82.13	0.51	0.37258	0.00462	0.05102	0.00047	0.05300	0.00073	322	3	321	3	329	13
-10	388.3	325.5	82.72	0.84	0.37042	0.00513	0.05106	0.00049	0.05265	0.00080	320	4	321	3	314	16
-11	620.2	612.7	124.1	0.99	0.37603	0.00459	0.05173	0.00047	0.05276	0.00071	324	3	325	3	318	13
-12	267.5	160.3	59.60	0.60	0.38286	0.00681	0.05191	0.00056	0.05354	0.00104	329	5	326	3	352	22
-13	528.3	583.3	110.0	1.10	0.38686	0.00487	0.05285	0.00048	0.05314	0.00074	332	4	332	3	335	14
12XL03 石英斑岩																
-01	1576	1646	306.1	1.04	0.37987	0.01479	0.04998	0.00089	0.06674	0.00237	327	11	314	5	830	52
-02	310.3	144.1	60.04	0.46	0.36775	0.01986	0.05005	0.00109	0.06923	0.00316	318	15	315	7	906	75
-03	1345	1482	267.1	1.10	0.36995	0.01157	0.05037	0.00075	0.06767	0.00185	320	9	317	5	858	40
-04	903.6	1066	204.13	1.18	0.36305	0.01421	0.05056	0.00094	0.05495	0.00221	314	11	318	6	410	55
-05	1005	941.1	197.7	0.94	0.36283	0.01171	0.05047	0.00076	0.06221	0.00185	314	9	317	5	681	43
-06	823.2	703.6	173.6	0.85	0.36687	0.01639	0.05060	0.00105	0.05832	0.00257	317	12	318	6	542	62
-07	805.6	1015	164.5	1.26	0.37859	0.01258	0.05001	0.00079	0.06796	0.00202	326	9	315	5	867	43
-08	621.2	850.8	131.7	1.37	0.36419	0.01875	0.05051	0.00012	0.06379	0.00296	315	14	318	7	735	71
-09	630.3	601.4	127.5	0.95	0.37561	0.01633	0.04992	0.00104	0.05748	0.00258	324	12	314	6	510	59
-10	666.6	551.1	131.0	0.83	0.36607	0.01852	0.05036	0.00115	0.05992	0.00292	317	14	317	7	601	70
-11	1232	1523	237.7	1.24	0.36036	0.01326	0.05030	0.00071	0.09811	0.00221	312	10	316	4	1589	48
-12	438.2	323.6	93.39	0.74	0.37522	0.02215	0.05023	0.00131	0.06139	0.00349	324	16	316	8	653	82
-13	892.9	932.1	174.7	1.04	0.36372	0.01016	0.05008	0.00067	0.06426	0.00162	315	8	315	4	750	37
-14	367.5	246.0	77.71	0.67	0.36323	0.02084	0.05030	0.00126	0.06217	0.00330	315	16	316	8	680	80
-15	936.2	1086	194.2	1.16	0.36170	0.02046	0.05039	0.00094	0.11539	0.00347	313	15	317	6	1886	75
-16	900.0	645.9	182.2	0.72	0.36073	0.01432	0.05004	0.00086	0.07112	0.00231	313	11	315	5	961	53

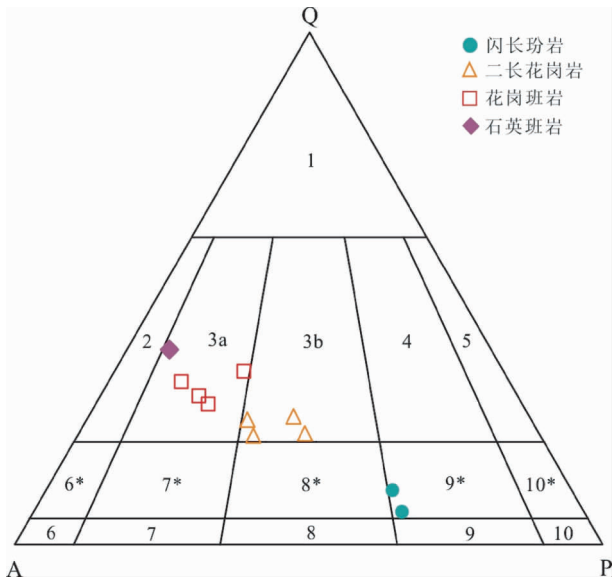


图4 希勒库都克钼铜矿区侵入岩 Q-A-P 分类图解

Fig. 4 Q-A-P classification diagrams for intruded rocks from the Xilekuduke Mo-Cu ore district

含量为 13.49%，全碱 ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) 含量为 7.83%，铝不饱和指数 A/CNK 为 1.05，里特曼指数  $\sigma$  为 1.96 (表 1)。总体上，除闪长玢岩属准铝质高钾钙碱性系列，二长花岗岩、花岗斑岩、石英斑岩均属弱过铝质高钾钙碱性系列 (图 5a, b)。

闪长玢岩样品稀土元素含量 ( $\sum \text{REE}$ ) 为  $97.77 \times 10^{-6}$  ~  $115.3 \times 10^{-6}$ ，平均为  $106.5 \times 10^{-6}$ 。LREE/HREE 平均为 7.83, ( $\text{La}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub>、( $\text{La}/\text{Sm}$ )<sub>N</sub>、( $\text{Gd}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub> 平均值分别为 7.92、3.41、1.54,  $\delta\text{Eu} = 0.97$ ,  $\delta\text{Ce} = 0.97$ 。二长花岗岩样品稀土元素含量 ( $\sum \text{REE}$ ) 为  $59.15 \times 10^{-6}$  ~  $87.09 \times 10^{-6}$ ，平均为

$78.14 \times 10^{-6}$ 。LREE/HREE 平均为 8.69, ( $\text{La}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub>、( $\text{La}/\text{Sm}$ )<sub>N</sub>、( $\text{Gd}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub> 平均值分别为 9.96、3.95、1.63,  $\delta\text{Eu} = 1.11$ ,  $\delta\text{Ce} = 0.89$ 。花岗斑岩样品稀土元素含量 ( $\sum \text{REE}$ ) 为  $120.7 \times 10^{-6}$  ~  $151.5 \times 10^{-6}$ ，平均为  $137.2 \times 10^{-6}$ 。LREE/HREE 平均为 13.1, ( $\text{La}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub>、( $\text{La}/\text{Sm}$ )<sub>N</sub>、( $\text{Gd}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub> 平均值分别为 16.1、5.54、1.68,  $\delta\text{Eu} = 0.74$ ,  $\delta\text{Ce} = 0.85$ 。石英斑岩样品稀土元素含量为  $177.4 \times 10^{-6}$ ，LREE/HREE 为 13.8, ( $\text{La}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub>、( $\text{La}/\text{Sm}$ )<sub>N</sub>、( $\text{Gd}/\text{Yb}$ )<sub>N</sub> 分别为 16.2、7.41、1.67,  $\delta\text{Eu} = 0.65$ ,  $\delta\text{Ce} = 0.90$  (表 2)。上述岩石稀土元素配分模式均呈明显右倾、轻稀土富集型。轻稀土元素均相对富集，轻重稀土元素之间分异明显，轻稀土元素内部有明显分异，而重稀土元素组基本不分异。基本无铈异常，且铈异常存在差异，闪长玢岩无铈异常，二长花岗岩具有弱的正铈异常、花岗斑岩、石英斑岩均具有较明显的负铈异常 (图 6a)。

闪长玢岩、二长花岗岩、花岗斑岩和石英斑岩均呈右倾型式，富集 Rb、Ba、U、K、La、Pb 等元素而相对亏损 Th、Nb、Ta、Ti 元素。不同的是，闪长玢岩不具有 P 元素的亏损而二长花岗岩、花岗斑岩和石英斑岩都具有不同程度的 P 元素亏损，且亏损的程度递增 (图 6b)。二长花岗岩、花岗斑岩和石英斑岩的微量元素 Ta/Hf 值及 Ta/Zr 值相对高于闪长玢岩。在岩石的 Rb-Yb + Ta 图解 (Pearce, 1996) 上，闪长玢岩落入 VAG (岛弧花岗岩) 区域，二长花岗岩、花岗斑岩多数落入 VAG (岛弧花岗岩) 与 Post-COLG (后碰撞花岗岩) 过渡区域，石英斑岩落入 Post-COLG 区域 (图 7a)。在 Rb/30-Hf-3Ta 图解 (Harris *et al.*, 1986) 上，闪长玢岩亦落入 VAG 区域，二长花岗岩 3 件样品落入 VAG 区域、1 件落入 Post-COLG 区域，花岗斑岩多数落入 Post-COLG 区域，石英斑岩落入 Post-COLG 与 WPG (板内花岗岩) 过渡区域中 (图 7b)。

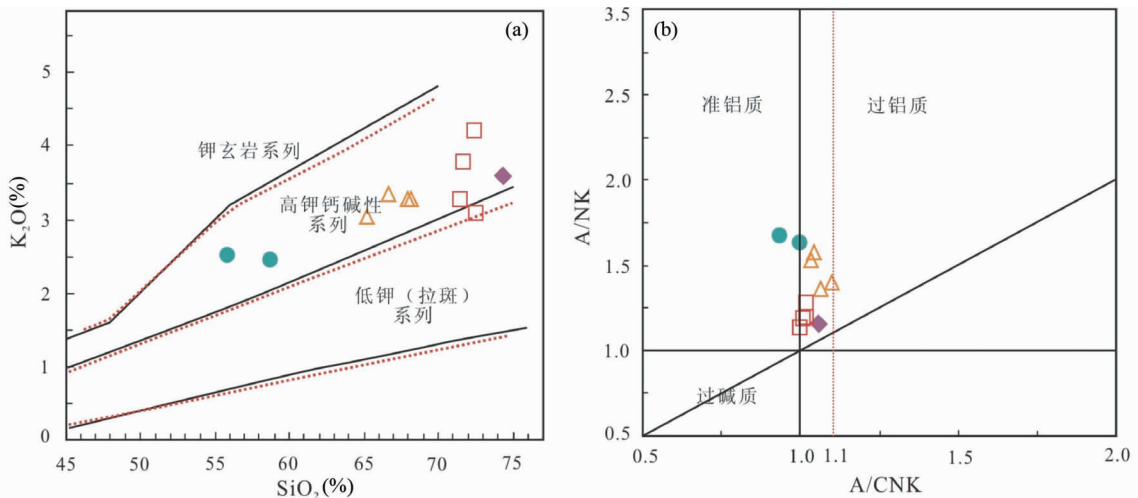


图5 希勒库都克钼铜矿区侵入岩  $\text{K}_2\text{O}$ - $\text{SiO}_2$  图解 (a, 底图据 Peccerillo and Taylor, 1976, 虚线据 Middlemost, 1985) 及 A/NK-A/CNK 图解 (b)

Fig. 5  $\text{K}_2\text{O}$  vs.  $\text{SiO}_2$  diagram (a, modified after Peccerillo and Taylor, 1976; dashed line from Middlemost, 1985) and A/NK vs. A/CNK diagram (b) of intruded rocks from the Xilekuduke Mo-Cu ore district

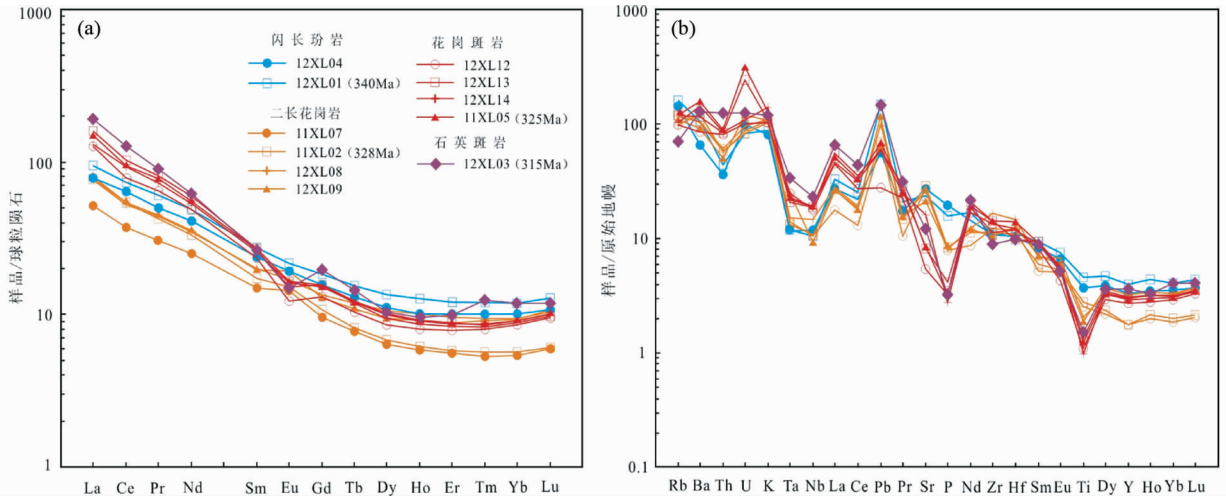


图6 希勒库都克钼铜矿区侵入岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b) (标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized trace element spider diagrams (b) of intruded rocks from the Xilekuduke Mo-Cu ore district (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

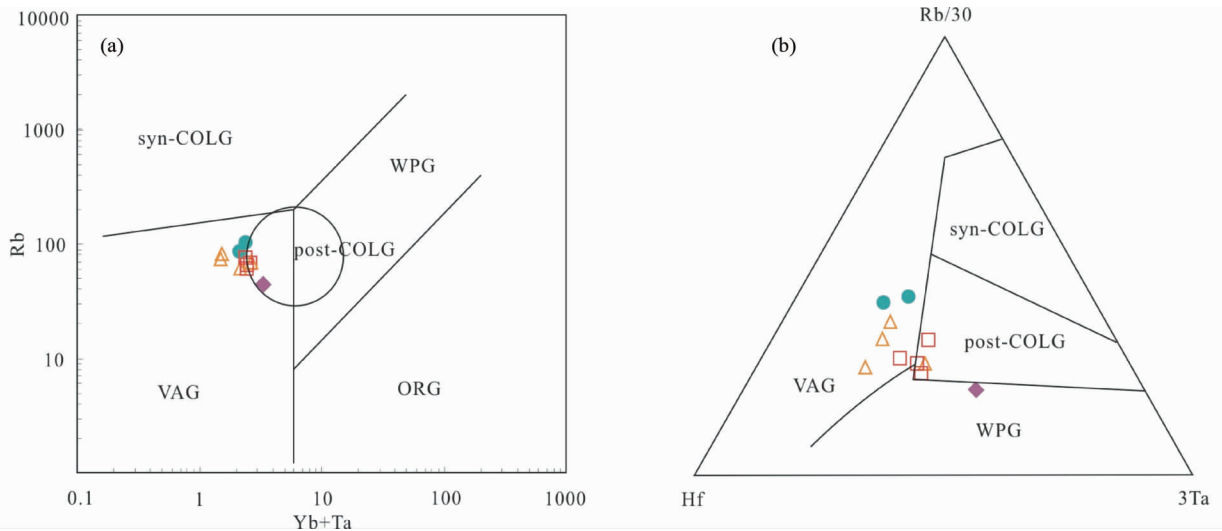


图7 希勒库都克钼铜矿区侵入岩 Rb-Yb + Ta 图解(a, 底图据 Pearce, 1996)及 Rb/30-Hf-3Ta 图解(b, 底图据 Harris *et al.*, 1986)

Fig.7 Rb vs. Yb + Ta diagram (a, modified after Pearce, 1996) and Rb/30-Hf-3Ta diagram (b, modified after Harris *et al.*, 1986) for intruded rocks from the Xilekuduke Mo-Cu ore district

## 6.2 全岩 Rb-Sr-Sm-Nd 同位素

这些样品的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  值变化范围很小, 在 0.702976 ~ 0.704306 之间, 落在幔源花岗岩的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  范围 (0.7020 ~ 0.7060) 内 (蔡剑辉等, 2005)。样品的  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$  变化范围也很小, 在 0.512529 ~ 0.512564 之间, 对应的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值在 +5.8 ~ +6.8 之间, 岩石的地幔模式年龄  $t_{\text{DM}}$  在 524 ~ 588Ma 之间 (表3)。在  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  同位素相关图解 (图8a) 上样品均落入日本岛弧以及马里亚纳岛弧区

域。在侵入年龄- $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  图解 (图8b) 上, 样品多落入北疆地区洋壳范围或在其附近。

## 6.3 锆石 U-Pb 年龄

闪长玢岩 (样品 12XL01) 锆石长度在 80 ~ 250 $\mu\text{m}$  之间, 宽度在 50 ~ 100 $\mu\text{m}$  之间, 长宽比 1.6 ~ 5, 锆石呈自形-半自形长柱状-不规则六边形。锆石 CL 图多呈灰黑色, 核部和韵律环带多不清晰, 且少数锆石碎裂或边部有溶蚀现象 (图9a)。锆石的 SIMS U-Pb 分析结果 (表4、图10a) 显示: 12XL01 样品



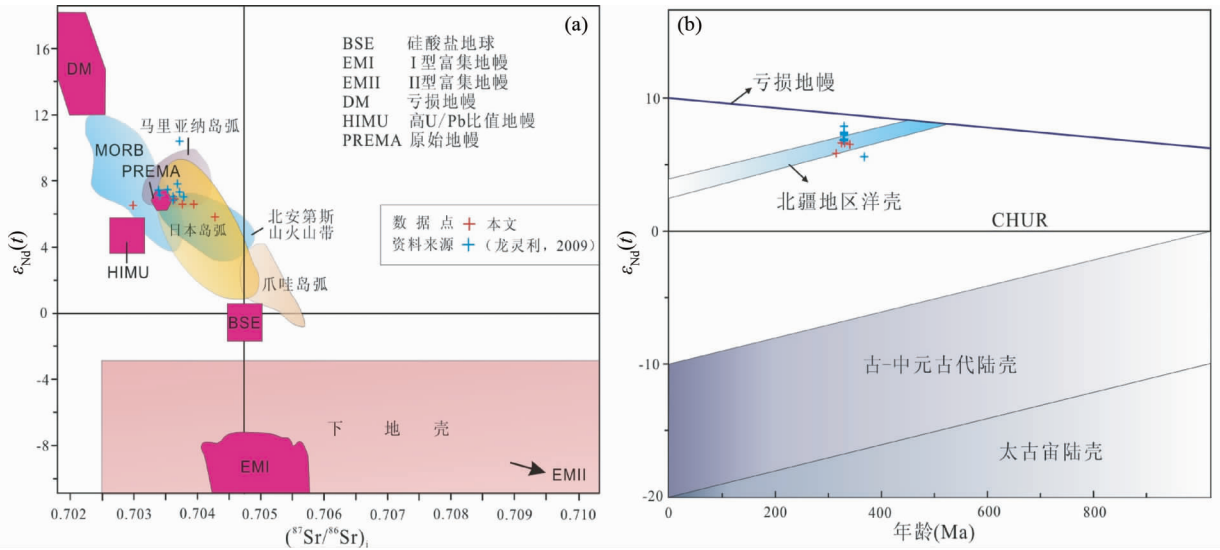


图8 希勒库都克钼铜矿区侵入岩( $^{87}Sr/^{86}Sr$ )<sub>i</sub>- $\epsilon_{Nd}(t)$ 同位素相关图解(a, 底图据 Zindler and Hart, 1986; Winter, 2001)和侵入岩年龄- $\epsilon_{Nd}(t)$ 关系图解(b)

图b中:亏损地幔线据 Goldstein *et al.*, 1984; 北疆地区洋壳数据韩宝福等, 1999; 古-中元古代陆壳 Nd 同位素演化线据 Hu *et al.*, 2000

Fig. 8 ( $^{87}Sr/^{86}Sr$ )<sub>i</sub> vs.  $\epsilon_{Nd}(t)$  isotope diagram (a, modified after Zindler and Hart, 1986; Winter, 2001) and  $\epsilon_{Nd}(t)$  vs.  $^{206}Pb$ - $^{235}U$  age diagram (b) of zircons from intruded rocks in the Xilekuduke Mo-Cu ore district

In Fig. 8b: depleted mantle line from Goldstein *et al.*, 1984; dates of Oceanic crust of northern Xinjiang are from Han *et al.*, 1996; Nd isotopic evolutionary line of late-mid Proterozoic continental crust originates from Hu *et al.*, 2000

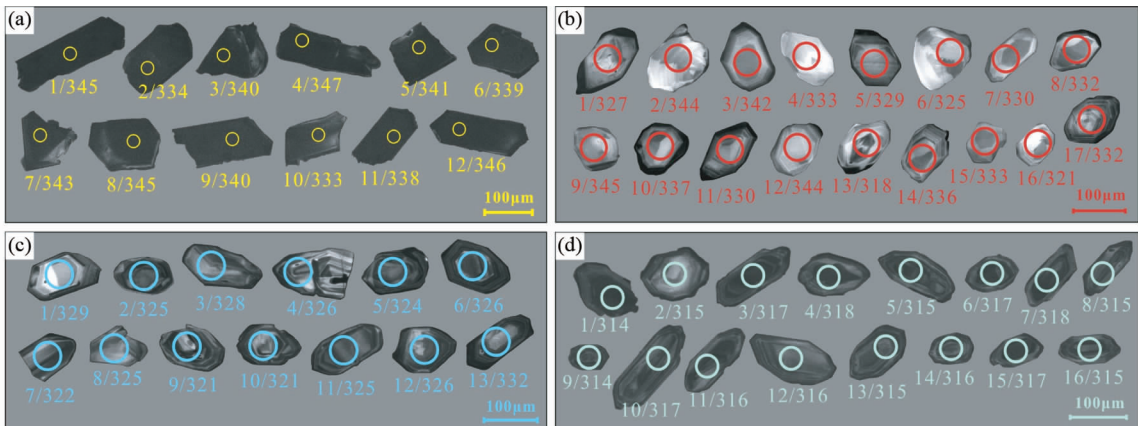


图9 希勒库都克钼铜矿区侵入岩锆石 CL 图像与 U-Pb 定年测点位置

(a) 闪长玢岩(12XL01); (b) 二长花岗岩(11XL02); (c) 花岗斑岩(11XL05); (d) 石英斑岩(12XL03). 7/322 代表 7 号锆石测点  $^{206}Pb$ - $^{235}U$  年龄为 322Ma

Fig. 9 CL images and selected U-Pb dating positions of zircons from intruded rocks in the Xilekuduke Mo-Cu ore district

(a) diorite (Sample 12XL01); (b) monzonitic granite (Sample 11XL02); (c) granite porphyry (Sample 11XL05); (d) quartz porphyry (Sample 12XL03). 7/322 represents that the  $^{206}Pb$ - $^{235}U$  age of the No. 7 zircon is 322Ma

中锆石 U、Th 与 Pb 含量分别为: U 含量  $788.6 \times 10^{-6} \sim 3027 \times 10^{-6}$ , Th 含量  $824.7 \times 10^{-6} \sim 5689 \times 10^{-6}$ , Pb 含量  $58 \times 10^{-6} \sim 272 \times 10^{-6}$ , Th/U 比值 0.97 ~ 2.03 (均大于 0.4), 锆石主体显示岩浆锆石的特征, 具有较高的 U、Th 含量从而使锆石的 CL 图像多呈灰黑色。12 个锆石的  $^{206}Pb/^{238}U$  年龄在 332.9 ~ 347.3Ma 之间, 误差范围内基本一致, 这组年

龄数据点在谐和图上相对集中分布(图 10a), 加权平均年龄为  $340.7 \pm 2.8$  Ma,  $^{206}Pb/^{238}U$  谐和年龄为  $340.3 \pm 2.8$  Ma。分析测试样品  $f_{206}(\%)$  值 0.00 ~ 0.55, 普通铅含量较低, 数据置信度 95%, 数据可信度高。

二长花岗岩(11XL02) 锆石长度在 50 ~ 130 μm 之间, 宽度在 46 ~ 90 μm 之间, 长宽比 1.1 ~ 2.6, 锆石主要以半自形-

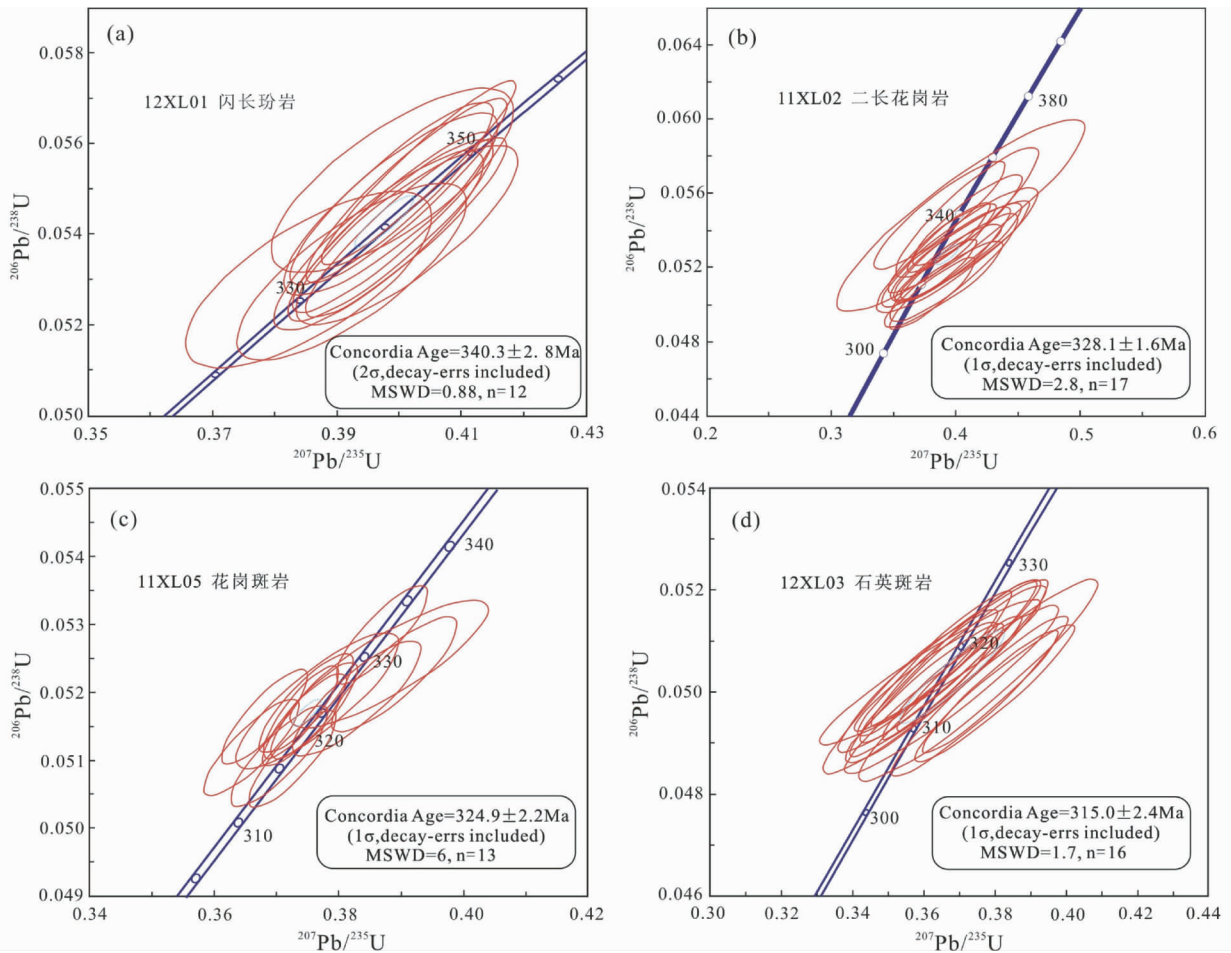


图 10 希勒库都克钼铜矿区侵入岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 10 Concordia age diagram of U-Pb ages of zircon from intruded rocks in the Xilekuduke Mo-Cu ore district

自形短柱状、不规则六边形或者八边形为主,少数呈规则的长柱状。锆石多无色、透明,晶形较好,少数锆石具碎裂现象,CL图多具有核和较清晰的韵律环带,多呈灰白色,为典型的岩浆锆石(图9b)。锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果(表5、图10b)显示:二长花岗岩锆石 U、Th 与 Pb 含量分别为: $^{238}\text{U}$  含量  $102.4 \times 10^{-6} \sim 443.8 \times 10^{-6}$ ,  $^{232}\text{Th}$  含量  $62.40 \times 10^{-6} \sim 476.2 \times 10^{-6}$ ,  $^{206}\text{Pb}$  含量  $25.25 \times 10^{-6} \sim 96.82 \times 10^{-6}$ , Th/U 比值  $0.51 \sim 1.07$ (均大于 0.4)。17 个锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄在  $321 \sim 345\text{Ma}$  之间,误差范围内基本一致,这组年龄数据点在谐和图上相对集中分布(图10b),加权平均年龄为  $331.0 \pm 4.6\text{Ma}$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  谐和年龄为  $328.1 \pm 1.6\text{Ma}$ 。普通铅含量较低,数据置信度 95%,数据可信度高。

花岗斑岩(11XL05)锆石长度在  $82 \sim 125\mu\text{m}$  之间,宽度在  $46 \sim 86\mu\text{m}$  之间,长宽比为  $1.3 \sim 2.8$  之间,锆石主要以半自形-自形长柱状、不规则六边形或者八边形为主,部分呈短柱状。锆石多无色、透明,晶形较好,少数锆石具碎裂现象,锆石 CL 图多具有核和清晰的韵律环带,多呈灰色,为典型的岩浆锆石(图9c)。锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果(表5、图10c)显示:花岗斑岩锆石 U、Th 与 Pb 含量分别为: $^{238}\text{U}$  含

量  $136.1 \times 10^{-6} \sim 620.2 \times 10^{-6}$ ,  $^{232}\text{Th}$  含量  $81.12 \times 10^{-6} \sim 612.7 \times 10^{-6}$ ,  $^{206}\text{Pb}$  含量  $26.88 \times 10^{-6} \sim 124.1 \times 10^{-6}$ , Th/U 比值  $0.49 \sim 1.10$ (均大于 0.4)。13 个锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄在  $321 \sim 332\text{Ma}$  之间,误差范围内基本一致,这组年龄数据点在谐和图上相对集中分布(图10c),加权平均年龄为  $325.2 \pm 1.7\text{Ma}$ ,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  谐和年龄为  $324.9 \pm 2.2\text{Ma}$ 。数据置信度 95%,数据可信度高。

石英斑岩(12XL03)锆石长度在  $65 \sim 200\mu\text{m}$  之间,宽度在  $45 \sim 85\mu\text{m}$  之间,长宽比  $1.2 \sim 3.8$ ,锆石主要以半自形-自形长柱状、短柱状为主,少数呈不规则六边形。锆石多无色、透明,晶形较好,少数锆石具碎裂现象,多具有核和清晰的韵律环带,部分核部呈灰黑色。CL 图像多呈灰色,为岩浆锆石(图9d)。锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果(表5、图10d)显示:石英斑岩锆石 U、Th 与 Pb 含量分别为: $^{238}\text{U}$  含量  $310.3 \times 10^{-6} \sim 1576 \times 10^{-6}$ ,  $^{232}\text{Th}$  含量  $144.1 \times 10^{-6} \sim 1646 \times 10^{-6}$ ,  $^{206}\text{Pb}$  含量  $60.04 \times 10^{-6} \sim 306.1 \times 10^{-6}$ , Th/U 比值  $0.46 \sim 1.37$ (均大于 0.4)。16 个锆石的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄在  $314 \sim 318\text{Ma}$  之间,误差范围内一致,这组年龄数据点在谐和图上相对集中分布(图10d),加权平均年龄为  $316.0 \pm 2.8\text{Ma}$ ,

$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  谐和年龄为  $315.0 \pm 2.4\text{Ma}$ 。数据置信度 95%，数据可信度高。

## 7 讨论

希勒库都克铜矿侵入岩岩石样品 12XL01 (闪长玢岩)、11XL02 (二长花岗岩)、11XL05 (花岗斑岩)、12XL03 (石英斑岩) 中挑选的锆石形态较规则, 锆石 CL 图像核部、环带相对清晰, 多呈灰白色, 且具有较高的 Th/U 比值 (均大于 0.4) 以及较为一致的锆石稀土元素配分模式, 属于较典型的岩浆成因锆石。依据锆石 SIMS 和 LA-ICP-MAS U-Pb 测年结果, 结合矿区侵入岩的产状及相互穿插关系, 获得了闪长玢岩、二长花岗岩、花岗斑岩及石英斑岩的形成时代, 从早到晚依次为  $340.3 \pm 2.8\text{Ma}$ 、 $328.1 \pm 1.6\text{Ma}$ 、 $324.9 \pm 2.2\text{Ma}$ 、 $315.0 \pm 2.4\text{Ma}$ , 其中二长花岗岩、花岗斑岩年龄与龙灵利等 (2009, 2011) 报道的花岗闪长岩 ( $326.8 \pm 1.2\text{Ma}$ )、花岗斑岩 ( $329.6 \pm 4.1\text{Ma}$ ) 年龄在误差范围内相近, 总体上, 希勒矿区的侵入岩主要形成于早石炭的晚期-晚石炭的早期。

矿区侵入岩的岩石化学测试结果显示, 闪长玢岩、二长花岗岩、花岗斑岩、石英斑岩均为准铝质-弱过铝质的高钾钙碱性花岗岩系列, 均具有 I 型花岗质岩石的特点 (Chappell and White, 1974) (其中石英斑岩岩石化学特征偏向 A 型花岗岩, 见图 4), 符合后碰撞花岗岩类的岩石化学特征 (韩宝福, 2007)。

上述侵入岩的稀土配分模式较为一致, 均明显显示右倾、轻稀土富集型, 区别在于从闪长玢岩、二长花岗岩到花岗斑岩、石英斑岩, 稀土元素总量、轻稀土元素含量以及轻重稀土元素之间的分异程度都呈递增的趋势, 且负铕异常也逐渐增强 (二长花岗岩的弱正铕异常例外) (图 6a)。二长花岗岩出现的正铕异常可能是二长花岗岩的岩浆熔出后, 源区残留物中有石榴子石而无斜长石, 斜长石几乎全部进入熔浆 (蔡剑辉等, 2005)。而花岗斑岩、石英斑岩的负铕异常则是岩浆分离结晶过程中斜长石先从熔体中分离的缘故。

从各岩石微量元素地幔标准化蛛网图中可以看出, 闪长玢岩、二长花岗岩、花岗斑岩和石英斑岩均呈右倾型式, 相对富集 Rb、Ba、U、K、La、Pb 等元素而相对亏损 Th、Nb、Ta、Ti 元素 (图 6b)。闪长玢岩具有明显的 Nb、Ta、Ti 元素的亏损和无 P 元素的亏损符合典型岛弧环境下形成岩石的地球化学特征 (赵振华, 2007), 表明其岩浆源区具有岛弧岩浆的地球化学特征; 而具有 Nb、Ta、Ti 元素亏损和递增 P 元素亏损的二长花岗岩、花岗斑岩及石英斑岩, 具有弧向后碰撞过渡的地球化学特征 (韩宝福, 2007; 赵振华, 2007)。在岩石的 Rb-Yb + Ta 图解 (Pearce, 1996) 上, 闪长玢岩落入 VAG (岛弧花岗岩) 区域, 二长花岗岩、花岗斑岩多数落入 VAG (岛弧花岗岩) 与 Post-COLG (后碰撞花岗岩) 过渡区域, 石英斑岩落入 Post-COLG 区域 (图 7a)。在 Rb/30-Hf-3Ta 图解 (Harris *et al.*, 1986) 上, 闪长玢岩亦落入 VAG 区域, 二长花岗岩 3 件

样品落入 VAG 区域、1 件落入 Post-COLG 区域, 花岗斑岩多数落入 Post-COLG 区域, 石英斑岩落入 Post-COLG 与 WPG (板内花岗岩) 过渡区域中 (图 7b)。一方面说明上述岩石主要形成于碰撞晚期向后碰撞转换时期, 另一方面也说明形成的构造背景存在差异。P 亏损, 以及明显高于闪长玢岩的 Ta/Hf 及 Ta/Zr 值, 可以将形成于后碰撞环境的二长花岗岩、花岗斑岩和石英斑岩与形成于碰撞晚期的闪长玢岩区分开来 (Harris *et al.*, 1986)。

基于东准噶尔地区的研究成果, 萨吾尔弧与阿尔泰地体在 360Ma 发生碰撞 (童英等, 2006a; 周刚等, 2006; 洪涛等, 2015), 野马泉弧与准噶尔地体在 340Ma 左右发生碰撞 (韩宝福等, 2006; 杨高等, 2009a; 吴琪等, 2012; Zhang *et al.*, 2013), 因此东准噶尔在 340Ma 时处于碰撞阶段。尽管具有典型的弧地球化学特征, 但是希勒矿区的闪长玢岩 (340.3Ma) 从成岩时代上来讲应形成于碰撞环境而非俯冲下的岛弧环境, 但是其具有的弧地球化学特征, 又有别于同碰撞环境下形成的过铝质花岗岩, 同时 Ta/Hf 及 Ta/Zr 值又明显低于二长花岗岩、花岗斑岩及石英斑岩, 而二长花岗岩 (328.1Ma) 具有部分弧的地球化学特征, 花岗斑岩 (324.9Ma)、石英斑岩 (315.1Ma) 具有后碰撞岩体的地球化学特征。矿区二长花岗岩、花岗斑岩、石英斑岩与萨吾尔地区后碰撞成因的森塔斯岩体 (328Ma)、沃肯萨岩体 (324Ma)、塔斯特岩体 (314Ma) 具有的高钾偏碱性 I 型花岗岩的部分地球化学特征相似 (袁峰等, 2006; Zhou *et al.*, 2008), 表明二长花岗岩、花岗斑岩形成于后碰撞早期环境, 石英斑岩则形成于向后碰撞伸展阶段过渡环境。闪长玢岩应形成于与后碰撞环境相衔接的碰撞晚期 (晚碰撞) 环境。

东准噶尔北部地区广泛发育晚古生代的岩浆岩, 前人针对这些岩体进行了系统的年代学研究。我们统计了东准噶尔北部地区主要岩体的锆石 U-Pb 年龄 (图 11), 结果显示: 东准噶尔北部地区岩浆活动从早-中泥盆世一直持续到二叠纪末, 未见明显的间歇期。结合前人对准噶尔地区的构造研究, 认为古亚洲洋在 400 ~ 370Ma 发生俯冲 (张招崇等, 2006), 萨吾尔岛弧与阿尔泰地体在 ~360Ma 左右发生碰撞 (童英等, 2006a; 周刚等, 2006; 洪涛等, 2015), 并在 ~330Ma 左右进入后碰撞阶段 (韩宝福等, 2006; 陈石等, 2009; 李涤等, 2013; Li *et al.*, 2014)。结合希勒矿区侵入岩的形成时代及构造环境, 进一步将东准噶尔北部地区岩体的形成时间分为三期五个阶段: 俯冲期 (400 ~ 370Ma)、碰撞期 (360 ~ 330Ma) 与后碰撞期 (330 ~ 280Ma)。碰撞期可划分为主碰撞阶段 (360 ~ 340Ma) 和碰撞晚期 (340 ~ 330Ma) 两个阶段, 后碰撞期分为后碰撞早期 (330 ~ 320Ma) 和后碰撞期伸展阶段 (320 ~ 280Ma) (图 11)。

尽管矿区侵入岩样品具较低的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  初始值 (0.702976 ~ 0.704306) 和相对较高的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值 (+5.8 ~ +6.8) 均显示了岩石的幔源特征。关于花岗岩类的这种 Sr、Nd 同位素特征 (+6.5 ~ +10), 韩宝福等 (1999) 认为源区岩

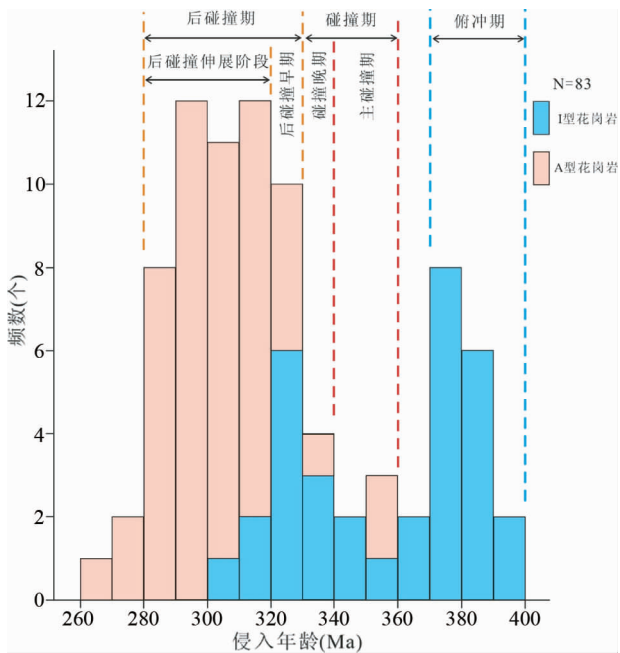


图 11 东准噶尔花岗岩类锆石 U-Pb 年龄的直方图

数据来源: 刘家远和袁奎荣, 1996; 韩宝福等, 2006; 童英等, 2006a, b; Tong *et al.*, 2012; 周刚等, 2006, 2007; 李月臣等, 2007; 林锦富等, 2007; 苏玉平等, 2008; 杨高等, 2009a, b, 2010; 甘林等, 2010; 杨富全等, 2012; Shen *et al.*, 2011

Fig. 11 Histogram of Zircon U-Pb ages of granitic rocks in East Junggar

Data resource: Liu *et al.*, 1996; Han *et al.*, 2006; Tong *et al.*, 2006a, b, 2012; Zhou *et al.*, 2006, 2007; Li *et al.*, 2007; Lin *et al.*, 2007; Su *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2009a, b, 2010; Gan *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2012; Shen *et al.*, 2011

浆直接来自于底侵亏损地幔的部分熔融, 龙灵利等(2009)则认为希勒矿区源区岩浆来自于亏损地幔和少量地壳物质的部分熔融。但是亏损地幔直接岩浆分异结晶难以解释北疆地区大面积分布的后碰撞花岗岩。而希勒矿区侵入岩相对年轻的地幔模式年龄( $t_{DM} = 524 \sim 588\text{Ma}$ )表明其可能源于具幔源同位素特征之年轻地壳的部分熔融。在( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub>- $\epsilon_{Nd}(t)$ 同位素相关图解上测试样品投点均落入日本岛弧以及马里亚纳岛弧区域(图 8a), 其具相似的大洋岛弧 Sr、Nd 同位素特征。在侵入年龄- $\epsilon_{Nd}(t)$ 图解上(图 8b), 样品投点多落入北疆地区洋壳范围或在其附近, 结合相对年轻的地幔模式年龄, 揭示了矿区碰撞-后碰撞岩浆可能并非直接源于亏损地幔的部分熔融, 而是主要来自于早古生代洋壳的部分熔融。

依据东准噶尔区域构造演化格局(Xu *et al.*, 2013)以及成岩成矿的特点, 结合希勒库都克钼铜矿区成岩成矿时代、岩石地球化学以及 Sr、Nd 同位素特征, 我们建立萨吾尔大洋岛弧晚古生代的构造演化模式(图 12)以及对应的成岩成矿过程:

(a) 俯冲期(400 ~ 370Ma): 早泥盆世末古亚洲洋开始向

南北方向发生了双向俯冲(张海洋等, 2004; 张招崇等, 2006), 萨吾尔大洋岛弧形成于古亚洲洋向南的洋内俯冲作用, 俯冲的洋壳出溶的流体交代了上覆的楔形地幔, 被交代的亏损地幔发生部分熔融形成玄武质岩浆, 侵入于下地壳底部, 热的玄武质岩浆造成下地壳部分熔融形成英安质岩浆, 玄武质岩浆与英安质岩浆混合形成安山质/闪长质岩浆, 上侵冷凝固结晶形成闪长岩、闪长玢岩或者喷发地表形成安山岩、安山玢岩, 形成以岛弧组分为主体的新生地壳(Winter, 2001; Richards and Kerrich, 2007)。

(b) 主碰撞期(360 ~ 340Ma): 晚泥盆世末-早石炭世, 大洋闭合之后, 新生萨吾尔大洋岛弧在南北两侧分别与野马泉陆缘弧及阿尔泰地体南缘发生碰撞, 并在北侧形成额尔齐斯碰撞带; 在水平挤压应力下, 在阿尔泰地体南缘形成前陆褶皱以及逆冲断层, 且在碰撞带附近形成韧性变形带。岩浆活动转变为以壳源活动为主, 地壳物质的加入得以形成过铝质的花岗岩。但位于玛因鄂博断裂带南侧布尔根一带的 A 型花岗岩则可能是幔源岩浆底侵强烈结晶分异的产物(童英等, 2006a)。

(c) 碰撞晚期(340 ~ 330Ma): 早石炭世, 萨吾尔大洋岛弧进入碰撞后碰撞过渡时期, 软流圈上涌与俯冲洋壳板片的再下冲, 形成与俯冲阶段相似的构造动力学背景, 亏损地幔部分熔融形成的玄武质岩浆与下地壳部分熔融形成的英安质岩浆混合形成闪长质岩浆, 上侵冷凝固结晶形成具有岛弧地球化学特征的闪长岩、闪长玢岩(Harris *et al.*, 1986)。

(d) 后碰撞早期(330 ~ 320Ma): 早石炭世末, 发生在萨吾尔岛弧与野马泉陆缘弧及阿尔泰地体南缘的之间碰撞造山作用结束, 转入后碰撞阶段。软流圈上涌造成岩石圈地幔减薄并发生部分拆沉, 洋壳物质部分熔融形成花岗闪长质岩浆, 上侵到地壳浅部结晶形成花岗闪长岩、二长花岗岩及花岗斑岩, 并在岩浆期后热液作用下形成斑岩型钼铜矿床。由于俯冲洋壳形成于亏损地幔, 因此其部分熔融形成岩浆、结晶分异形成花岗斑岩, 伴随的钼成矿作用使得钼具有幔源特征, 表现为希勒库都克钼铜矿床的辉钼矿具有较高的 Re 元素含量(龙灵利等, 2011)。

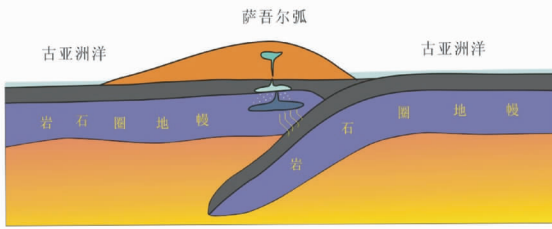
(e) 后碰撞伸展阶段(320 ~ 280Ma): 晚石炭世-早二叠世, 区域水平主应力由挤压变为伸展, 软流圈地幔基性-超基性岩浆底侵于下地壳, 造成下地壳物质部分熔融形成花岗质岩浆, 结晶分异形成碱性花岗岩, 在希勒库都克地区表现为形成具有偏碱性特征的石英斑岩。而底侵的基性-超基性岩浆则上侵、结晶分异形成基性-超基性小杂岩体(韩宝福等, 1999)。因而岩浆活动呈现双峰式特征, 在邻区扎河坝地区表现为石炭系不整合覆盖在泥盆系之上, 上石炭统巴塔玛依内山组(C<sub>2</sub>b)主要为一套玄武岩、流纹岩岩石组合, 呈现双峰式火山岩特征(李涂等, 2013)。

## 8 结论

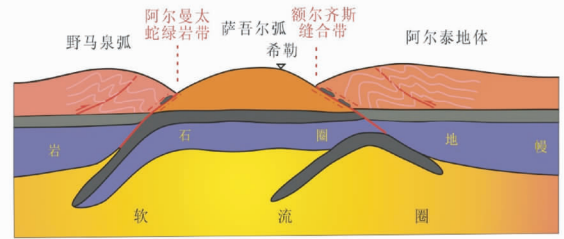
(1) 希勒库都克钼铜矿区闪长玢岩、二长花岗岩、花岗斑



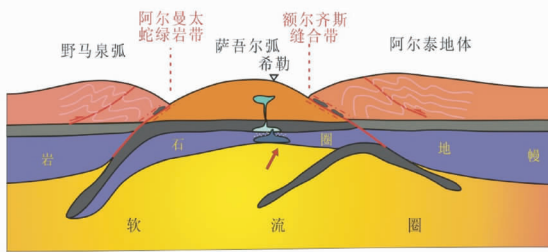
(a) 俯冲期 (400-370Ma)



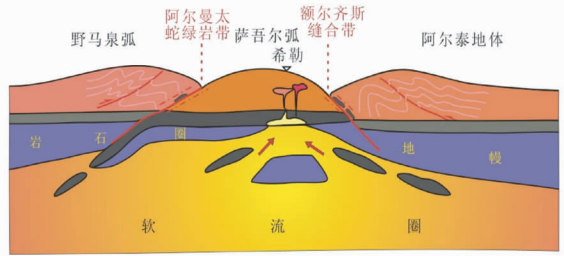
(b) 主碰撞期 (360-340Ma)



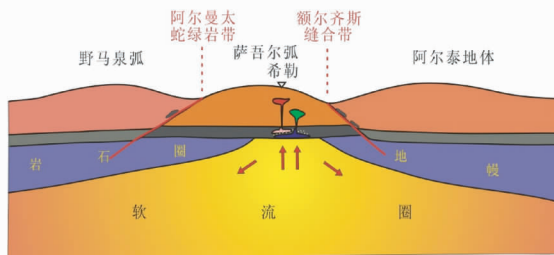
(c) 碰撞晚期 (340-330Ma)



(d) 后碰撞早期 (330-320Ma)



(e) 后碰撞伸展阶段 (320-280Ma)



图例



图 12 东准噶尔北部古生代萨吾尔大洋岛弧的形成及构造演化模式示意简图

Fig. 12 Formation and tectonic evolution model of Paleozoic Sawuer island arc in the northern area of East Junggar

岩及石英斑岩的 U-Pb 年龄分别为  $340.3 \pm 2.8 \text{ Ma}$ 、 $328.1 \pm 1.6 \text{ Ma}$ 、 $324.9 \pm 2.2 \text{ Ma}$ 、 $315.0 \pm 2.4 \text{ Ma}$ 。

(2) 矿区岩浆岩形成于三种不同的构造环境: 闪长玢岩形成于碰撞晚期环境, 具有典型的岛弧地球化学特征, 属准铝质岩石、无铷异常, 亏损 Nb、Ta、Ti, 无 P 亏损; 二长花岗岩、花岗斑岩形成于后碰撞早期环境, 其中二长花岗岩具有弧与后碰撞过渡的地球化学特征, 属弱过铝质岩石、弱正铷异常, 亏损 Nb、Ta、Ti, P 中等程度亏损; 花岗斑岩具有不典型后碰撞的地球化学特征, 属弱过铝质岩石、负铷异常, 明显亏损 Nb、Ta、Ti, 较强 P 亏损; 石英斑岩形成于后碰撞伸展阶段并具有后碰撞的地球化学特征, 属弱过铝质岩石、负铷异常, 亏损 Nb、Ta、Ti, 强 P 亏损。

(3) 矿区侵入岩具有较低的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  初始值 ( $0.702976 \sim 0.704306$ ) 和相对较高的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值 ( $+5.8 \sim +6.8$ ), 模式年龄 ( $t_{\text{DM}}$ ) 为  $524 \sim 588 \text{ Ma}$ , 矿区碰撞-后碰撞岩浆源自于早古生代洋壳的部分熔融。

(4) 建立萨吾尔大洋岛弧晚古生代的构造演化模式及成岩、成矿过程, 认为萨吾尔岛弧在晚古生代经历过俯冲期

(400 ~ 370Ma)、主碰撞期 (360 ~ 340Ma)、碰撞晚期 (340 ~ 330Ma)、后碰撞早期 (330 ~ 320Ma) 以及后碰撞伸展阶段 (320 ~ 280Ma) 五个阶段。

**致谢** 论文相关野外地质调查及样品采集工作得到了有色金属矿产地质中心 (北京) 驻新疆富蕴县希勒库都克铜钼金矿项目汪树栋高工、蒲克信高工及全体项目组工作人员的大力支持; 驻新疆富蕴县国家 305 项目课题组丁汝福教授、卫晓峰高工提供了生活上的悉心帮助。矿区研究工作得到了桂林理工大学宋慈安教授的指导。中国科学院地质与地球物理研究所主、微量实验室、固体同位素地球化学实验室、离子探针实验室、桂林矿产地质研究院测试中心、河北区域地质调查中心实验室给予了样品分选、制样、分析测试的大力帮助与支持。秦克章研究员、张连昌研究员在论文审阅和修改过程中提出了宝贵意见。在此一并感谢!

## References

Cai JH, Yan GH, Mu BL, Ren KX, Song B and Li FT. 2005. Zircon U-

- Pb age, Sr-Nd-Pb isotopic compositions and trace element of Fangshan complex in Beijing and their petrogenesis significance. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (3): 776 – 788 (in Chinese with English abstract)
- Cao JY, Li CX, You J and Ding RF. 2012. Geochemical characteristics of the Xilekuduke Mo-Cu deposit in Fuyun County, Xinjiang. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 36(3): 344 – 349 (in Chinese with English abstract)
- Chappell BW and White AJR. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8: 173 – 174
- Chen B and Arakawa Y. 2005. Elemental and Nd-Sr isotopic geochemistry of granitoids from the West Junggar foldbelt (NW China), with implications for Phanerozoic continental growth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(5): 1307 – 1320
- Chen S, Zhang YY and Guo ZJ. 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating and its implications of post-collisional volcanic rocks in Santanghu basin, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3): 527 – 538 (in Chinese with English abstract)
- Ding RF, You J and Li CX. 2011. Selection and evaluation of Xilekuduke Cu-Mo-Au prospecting target in Xinjiang. *Mineral Exploration*, 2(6): 740 – 748 (in Chinese with English abstract)
- Dong LH, Xu XW, Qu X and Li GM. 2009. Tectonic setting and formation mechanism of the circum-Junggar porphyritic copper deposit belts. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 713 – 737 (in Chinese with English abstract)
- Frei D and Gerdes A. 2009. Precise and accurate in situ U-Pb dating of zircon with high sample throughput by automated LA-SF-ICP-MS. *Chemical Geology*, 261(3–4): 261 – 270
- Gan L, Tang HF and Han YJ. 2010. Geochronology and geochemical characteristics of the Yemaquan granitic pluton in East Junggar, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2374 – 2388 (in Chinese with English abstract)
- Goldstein SL, O' Nions RK and Hamilton PJ. 1984. A Sm-Nd isotopic study of atmospheric dusts and particulates from major river systems. *Earth and Planetary Science Letters*, 70(2): 221 – 236
- Guo FF, Jiang CY, Lu RH, Xia ZD, Ling JL and Guo NX. 2010. Petrogenesis of the Huangyangshan alkali granites in Kalamaili area, northern Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2357 – 2373 (in Chinese with English abstract)
- Guo FJ, Ding RF, You J and Liu M. 2012. The geochemical characteristics and causes of Xilekuduke Mo-Cu deposit in Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 30(1): 40 – 45 (in Chinese with English abstract)
- Han BF, He GQ and Wang SG. 1999. Postcollisional mantle-derived magmatism, underplating and implications for basement of the Junggar Basin. *Science in China (Series D)*, 42(2): 113 – 119
- Han BF, Ji JQ, Song B, Chen LH and Zhang L. 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1077 – 1086 (in Chinese with English abstract)
- Han BF. 2007. Diverse post-collisional granitoids and their tectonic setting discrimination. *Earth Science Frontiers*, 14(3): 64 – 72 (in Chinese with English abstract)
- Han BF, Guo ZJ, Zhang ZC, Zhang L, Chen JF and Song B. 2010. Age, geochemistry, and tectonic implications of a Late Paleozoic stitching pluton in the North Tian Shan suture zone, western China. *Geological Society of America Bulletin*, 122(3–4): 627 – 640
- Han BF, He GQ, Wang XC and Guo ZJ. 2011. Late Carboniferous collision between the Tarim and Kazakhstan-Yili terranes in the western segment of the South Tian Shan Orogen, Central Asia, and implications for the northern Xinjiang, western China. *Earth-Science Reviews*, 109(3–4): 74 – 93
- Han YJ, Tang HF and Gan L. 2012. Zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of the Laoyaquan A-type granites in East Junggar, North Xinjiang, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 32(2): 193 – 199 (in Chinese with English abstract)
- Harris NBW, Pearce JA and Tindle AG. 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward MP and Rise AC (eds.). *Collision Tectonics*. Geological Society, London, Special Publication, 19: 67 – 81
- Hong T, Xiang P, You J, Zhang LC, Wu C, Wu Q and Xu XW. 2015. Texture and formation age of the eastern Irtysh collision belt. *Acta Petrologica Sinica*, 31(2): 571 – 593 (in Chinese with English abstract)
- Hu AQ, Borming J and Zhang GX. 2000. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotopic evidence. Part I: Isotopic characterization of basement rocks. *Tectonophysics*, 328(1–2): 15 – 51
- Huang G, Niu GZ, Wang XL, Guo J and Yu F. 2012. Formation and emplacement age of Karamaili ophiolite: LA-ICP-MS zircon U-Pb age evidence from the diabase and tuff in eastern Junggar, Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 31(8): 1267 – 1278 (in Chinese with English abstract)
- Johnston S, Gehrels G, Valencia V and Ruiz J. 2009. Small-volume U-Pb zircon geochronology by laser ablation-multicollector-ICP-MS. *Chemical Geology*, 259(3–4): 218 – 229
- Li CF, Li XH, Li QL, Guo JH, Li XH and Yang YH. 2012a. Rapid and precise determination of Sr and Nd isotopic ratios in geological samples from the same filament loading by thermal ionization mass spectrometry employing a single-step separation scheme. *Analytica Chimica Acta*, 727: 54 – 60
- Li CF, Li XH, Li QL, Guo JH, Li XH, Feng LJ and Chu ZY. 2012b. Simultaneous determination of  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  and  $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  ratios and Sm-Nd contents from the same filament loaded with purified Sm-Nd aliquot from geological samples by isotope dilution thermal ionization mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta*, 727: 54 – 60
- Li D, He DF, Fan C, Xiang K and Jin LY. 2013. Early Permian post-collisional magmatic events, East Junggar: Constraints from zircon SHRIMP U-Pb age, geochemistry and Hf isotope of rhyolite in the Yundukala area. *Acta Petrologica Sinica*, 29(1): 317 – 337 (in Chinese with English abstract)
- Li D, He DF, Santosh M and Tang JY. 2014. Petrogenesis of late Paleozoic volcanics from the Zhaheba depression, East Junggar: Insights into collisional event in an accretionary orogen of Central Asia. *Lithos*, 184 – 187: 167 – 193
- Li JY, Zhu BQ and Feng YM. 1989. Confirmation of the unconformable relationships between the Nanmingshui Formation and ophiolites and their significance. *Regional Geology of China*, (3): 250 – 255 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Liu Y, Tu XL, Hu GQ and Zeng W. 2002. Precise determination of chemical compositions in silicate rocks using ICP-AES and ICP-MS: A comparative study of sample digestion techniques of alkali fusion and acid dissolution. *Geochimica*, 31(3): 289 – 294 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Liu Y, Li QL, Guo CH and Chamberlain KR. 2009. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multicollector SIMS without external standardization. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(4): Q04010
- Li YC, Yang FQ, Zhao CS, Zhang Y, Yan SH, Dai JZ and Xu LG. 2007. SHRIMP U-Pb zircon dating of the Beilekuduk pluton in Xinjiang and its geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2483 – 2492 (in Chinese with English abstract)
- Li ZH, Han BF and Song B. 2004. SHRIMP zircon U-Pb dating of the Ertaipei granodiorite and its enclaves from eastern Junggar, Xinjiang, and geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 20(5): 1263 – 1270 (in Chinese with English abstract)
- Lin JF, Yu HX, Yu XQ, Di YJ and Tian JT. 2007. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geological implication of the Sabei alkali-rich granite from eastern Junggar of Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1876 – 1884 (in Chinese with English abstract)
- Liu JY and Yuan KR. 1996. A discussion on the genesis and tectonic setting of alkali granites in the Ulungur alkali-rich granite belt, Xinjiang. *Geological Journal of China Universities*, 2(3): 257 – 272 (in Chinese with English abstract)

- Liu M, You J and Ding RF. 2012. Characteristics of geophysical and geochemical anomalies and prospecting model of Xilekuduke Mo-Cu ore deposit, Altai, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 30(1): 46–51 (in Chinese with English abstract)
- Liu W, Liu XJ and Xiao WJ. 2012. Massive granitoid production without massive continental-crust growth in the Chinese Altay: Insight into the source rock of granitoids using integrated zircon U-Pb age, Hf-Nd-Sr isotopes and geochemistry. *American Journal of Science*, 312(6): 629–684
- Liu XM, Gao S, Diwu CR, Yuan HL and He ZC. 2007. Simultaneous in-situ determination of U-Pb age and trace elements in zircon by LA-ICP-MS in 20 $\mu$ m spot size. *Chinese Science Bulletin*, 52(9): 228–235 (in Chinese)
- Long LL, Wang JB, Wang YW, Wang LJ, Wang SL and Pu KX. 2009. Geochronology and geochemistry of the ore-bearing porphyry in Xilekuduke Cu-Mo deposit, Fuyun area, Xinjiang, China. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1840–1851 (in Chinese with English abstract)
- Long LL, Wang YW, Wang JB, Wang LJ, Li QL, Wang SL, Pu KX, Zhang HQ and Liao Z. 2010. Magma mixing in the Xilekuduke Cu-Mo ore district in Xinjiang: Evidence from zircon U-Pb chronology. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 449–456 (in Chinese with English abstract)
- Long LL, Wang YW, Du AD, Wang JB, Wang LJ, Wang SL, Pu KX and Qu WJ. 2011. Molybdenite Re-Os age of Xilekuduke Cu-Mo deposit in Xinjiang and its geological significance. *Mineral Deposits*, 30(4): 635–644 (in Chinese with English abstract)
- Lu YF. 2004. Geokit: A geochemical toolkit for Microsoft excel. *Geochimica*, 33(5): 459–464 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2003. ISOPLOT 3. 0-A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, (4): 1–70
- Middlemost EAK. 1985. *Magma and Magmatic Rocks: An Introduction to Igneous Petrology*. London: Longman, 1–266
- Pearce JA. 1996. Sources and settings of granitic rocks. *Episodes*, 19(4): 120–125
- Peccerillo A and Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81
- Richards JP and Kerrich R. 2007. Special paper: Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis. *Economy Geology*, 102(4): 537–576
- Shen XM, Zhang HX, Wang Q, Wyman DA and Yang YH. 2011. Late Devonian-Early Permian A-type granites in the southern Altay Range, Northwest China: Petrogenesis and implications for tectonic setting of “A2-type” granites. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(5): 986–1007
- Sláma JK, Košler J, Condon DJ *et al.* 2008. Plešovice zircon: A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249(1–2): 1–35
- Su YP, Tang HF and Cong F. 2008. Zircon U-Pb age and petrogenesis of the Huangyangshan alkaline granite body in East Junggar, Xinjiang. *Acta Mineralogica Sinica*, 28(2): 117–126 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magma-tism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313–345
- Tong Y, Hong DW, Wang T, Wang SG and Han BF. 2006a. TIMS U-Pb zircon ages of Fuyun post-orogenic linear granite plutons on the southern margin of Altay orogenic belt and their implications. *Acta Petrologica et Mineralogica* 25(2): 85–89 (in Chinese with English abstract)
- Tong Y, Wang T, Kovach VP, Hong DW and Han BF. 2006b. 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. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1267–1278 (in Chinese with English abstract)
- Tong Y, Wang T, Siebel W, Hong DW and Sun M. 2012. Recognition of early Carboniferous alkaline granite in the southern Altai orogen: Post-orogenic processes constrained by U-Pb zircon ages, Nd isotopes, and geochemical data. *International Journal of Earth Sciences*, 101(4): 937–950
- Wang BY, Jiang CY, Li YJ and Wu HE. 2011. Geochemical characteristics and tectonic implications of Karamaili Jiangbasitao Formation volcanic rock in Xinjiang. *Journal of Earth Science and Environment*, 33(3): 237–245 (in Chinese with English abstract)
- Wang JB and Xu X. 2006. Post-collisional tectonic evolution and metallogenesis in northern Xijiang, China. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 23–31 (in Chinese with English abstract)
- Wang L, Yang LQ, Wang YP, Zhang Y, Cheng X, Feng L and Chen ZS. 2012. In situ U-Pb dating and trace element simultaneity determination of zircon by LA-ICP-MS. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(5): 763–772 (in Chinese with English abstract)
- Wang LJ, Wang JB, Wang YW, Long LL, Wang SL and Pu KX. 2009. Geology and ore-forming fluids of Xilekuduke porphyry Cu-Mo deposit in northern Junggar. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 944–954 (in Chinese with English abstract)
- Wang LJ, Wang JB, Wang YW, Long LL and Jin SY. 2010. Host rock and ore-forming fluid of Xilekuduke porphyry copper-molybdenum deposit in North Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 28(4): 393–401 (in Chinese with English abstract)
- Wang YW, Wang JB, Wang SL, Wang LJ, Ding RF and Pu KX. 2008. Magma mixing in the Xilekuduke area Fuyun County, Xinjiang and its mineralization significance. *Acta Geologica Sinica*, 82(2): 221–233 (in Chinese with English abstract)
- Wang YW, Wang JB, Wang SL, Long LL, Wang LJ, Pu KX, Wang SD and Tang PZ. 2010. Geological characteristics and genesis of the Xilekuduke Cu-Mo deposit, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 28(4): 370–376 (in Chinese with English abstract)
- Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, Griffin WL, Meier M, Oberli F, Von Quadt A, Roddick JC and Spiegel W. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Newsletter*, 19(1): 1–23
- Winter JD. 2001. *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 150–210
- Wu Q, Qu X, Chang GH, Zhang Y, Dong LH and Xu XW. 2012. Geochronology of the Hongliuxia ductile shear zone and its constraint on the closure time of the Junggar Ocean. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8): 2331–2339 (in Chinese with English abstract)
- Xie LW, Zhang YB, Zhang HH, Sun JF and Wu FY. 2008. In situ simultaneous determination of trace elements, U-Pb and Lu-Hf isotopes in zircon and baddeleyite. *Chinese Science Bulletin*, 53(2): 220–228 (in Chinese)
- Xu XW, Jiang N, Li XH, Qu X, Yang YH, Mao Q, Wu Q, Zhang Y and Dong LH. 2013. Tectonic evolution of the East Junggar terrane: Evidence from the Taheir tectonic window, Xinjiang, China. *Gondwana Research*, 24(2): 578–600
- Yang FQ, Zhang ZX, Liu GR, Qu WJ, Zhang LW, Wei GZ, Liu F and Chai FM. 2012. Geochronology of Yulekenhalasu porphyry copper deposit in northern Junggar area, Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 28(7): 2029–2042 (in Chinese with English abstract)
- Yang GX, Li YJ, Wu HE, Si GH, Jin Z and Zhang YZ. 2009a. LA-ICP-MS Zircon U-Pb dating of the Huangyangshan pluton and its enclaves from Kalamaili area eastern Junggar, Xinjiang, and geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(12): 3197–3207 (in Chinese with English abstract)
- Yang GX, Li YJ, Wu HE, Si GH and Jin Z. 2009b. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating from granite-porphry rocks in Xikuangbei, East Junggar, Xinjiang, China. *Geological Bulletin of China*, 28(5): 572–577 (in Chinese with English abstract)
- Yang GX, Li YJ, Si GH, Wu HE, Jin Z and Zhang YZ. 2010. LA-ICP-MS U-Pb zircon dating of the Beilekuduke granite in Kalamaili area, East Junggar, Xinjiang, China and its geological implication. *Geotectonica et Metallogenia*, 34(1): 133–138 (in Chinese with English abstract)

## English abstract)

- Yang YH, Zhang HF, Chu ZY, Xie LW and Wu FY. 2010. Combined chemical separation of Lu, Hf, Rb, Sr, Sm and Nd from a single rock digest and precise and accurate isotope determinations of Lu-Hf, Rb-Sr and Sm-Nd isotope systems using Multi-Collector ICP-MS and TIMS. *International Journal of Mass Spectrometry*, 290(2-3): 120-126
- Yuan F, Zhou TF, Tan LG, Fan Y, Yang WP, He LX and Yue SC. 2006. Isotopic ages of the I-type granites in Sawuer region, West Junggar. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1238-1248 (in Chinese with English abstract)
- Yuan HL, Gao S, Liu XM, Li HM, Günther D and Wu FY. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 353-370
- Zhang HY, Niu HC, Hiroaki S, Shan Q, Yu XY, Jun'ichi I and Zhang Q. 2004. Late Paleozoic adakite and Nb-enriched basalt from northern Xinjiang: Evidence for the southward subduction of the Paleo-Asian ocean. *Geological Journal of China Universities*, 10(1): 106-113 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Y, Pe-Piper G, Piper DJW and Guo Z. 2013. Early Carboniferous collision of the Kalamaili orogenic belt, North Xinjiang, and its implications: Evidence from molasse deposits. *The Geological Society of America Bulletin*, 125(5-6): 932-944
- Zhang YY, Chen S, Guo ZJ and Fang SH. 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the latest Paleozoic volcanic rocks in Zhaheba area, eastern Junggar and its geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 25(3): 506-514 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZC, Yan SH, Chen BL, Zhou G, He YK, Chai FM, He LX and Wan YS. 2006. SHRIMP zircon U-Pb dating for subduction-related granitic rocks in the northern part of East Junggar, Xinjiang. *Chinese Science Bulletin*, 51(13): 1565-1574 (in Chinese)
- Zhao ZH. 2007. How to use the trace element diagrams to discriminate tectonic settings. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(1): 92-103 (in Chinese with English abstract)
- Zhou G, Zhang ZC, Gu GZ, Yang WP, He B, Zhang XL, Luo SB, Wang X and He YK. 2006. Dating of granitic plutons and its geological implications in the lower reaches of the Qinggeli River in the northern part of East Junggar, Xinjiang. *Geoscience*, 20(1): 141-150 (in Chinese with English abstract)
- Zhou G, Zhang ZC, Luo SB, He B, Wang X, Ying LJ, Zhao H, Li AH and He YK. 2007. Confirmation of high temperature strongly peraluminous Mayin' ebo granites in the south margin of Altay, Xinjiang: Age, geochemistry and tectonic implication. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1909-1920 (in Chinese with English abstract)
- Zhou G, Wu GG, Dong LH, Zhang ZC, Dong YG, Tong Y, He LX and Ying LJ. 2009. Formation time and geochemical feature of Wutubulak pluton in the northeastern margin of Junggar in Xinjiang and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1390-1402 (in Chinese with English abstract)
- Zhou TF, Yuan F, Fan Y, Tan LG and Yue SC. 2006. Geodynamic significance of the A-type granites in the Sawuer region in East Junggar, Xinjiang: Rock geochemistry and SHRIMP zircon age evidence. *Science in China (Series D)*, 49(2): 113-123
- Zhou TF, Yuan F, Fan Y, Zhang DY, Cooke D and Zhao GC. 2008. Granites in the Sawuer region of the West Junggar, Xinjiang Province, China: Geochronological and geochemical characteristics and their geodynamic significance. *Lithos*, 106(3-4): 191-206
- Zindler A and Hart S. 1986. Chemical geodynamics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14: 493-571
- 曹锦元, 李春霞, 游军, 丁汝福. 2012. 新疆富蕴县希勒库都克铜矿床地球化学特征. *物探与化探*, 36(3): 344-349
- 陈石, 张元元, 郭召杰. 2009. 新疆三塘湖盆地后碰撞火山岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. *岩石学报*, 25(3): 527-538
- 丁汝福, 游军, 李春霞. 2011. 新疆希勒库都克铜钼金矿靶区优选与评价. *矿产勘查*, 2(6): 740-748
- 董连慧, 徐兴旺, 屈迅, 李光明. 2009. 初论环准噶尔斑岩铜矿带的地质构造背景与形成机制. *岩石学报*, 25(4): 713-737
- 甘林, 唐红峰, 韩宇捷. 2010. 新疆东准噶尔野马泉花岗岩体的年龄和地球化学特征. *岩石学报*, 26(8): 2374-2388
- 郭芳放, 姜常义, 卢荣辉, 夏昭德, 凌锦兰, 郭娜欣. 2010. 新疆北部卡拉麦里地区黄羊山碱性花岗岩的岩石成因. *岩石学报*, 26(8): 2357-2373
- 郭方晶, 丁汝福, 游军, 刘猛. 2012. 希勒库都克铜钼矿床地球化学特征及成因. *新疆地质*, 30(1): 40-45
- 韩宝福, 何国琦, 王式洸. 1999. 后碰撞幔源岩浆活动、底垫作用及准噶尔盆地基底性质. *中国科学(D辑)*, 29(1): 16-21
- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 陈立辉, 张磊. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)——后碰撞深成岩浆活动的时限. *岩石学报*, 22(5): 1077-1086
- 韩宝福. 2007. 后碰撞花岗岩类的多样性及其构造环境判别的复杂性. *地学前缘*, 14(3): 64-72
- 韩宇捷, 唐红峰, 甘林. 2012. 新疆东准噶尔老鸦泉岩体的锆石 U-Pb 年龄和地球化学组成. *矿物学报*, 32(2): 193-199
- 洪涛, 相鹏, 游军, 张连昌, 吴楚, 吴琪, 徐兴旺. 2015. 额尔齐斯碰撞带东段结构与形成时代. *岩石学报*, 31(2): 571-593
- 黄岗, 牛广智, 王新录, 郭俊, 宇峰. 2012. 新疆东准噶尔卡拉麦里蛇绿岩的形成和侵位时限——来自辉绿岩和凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的证据. *地质通报*, 31(8): 1267-1278
- 李涂, 何登发, 樊春, 向奎, 金露英. 2013. 东准噶尔早二叠世后碰撞岩浆活动: 蕴都卡拉流纹岩 SHRIMP U-Pb 年代学、地球化学和 Hf 同位素的制约. *岩石学报*, 29(1): 317-337
- 李锦轶, 朱宝清, 冯益民. 1989. 南明水组 and 蛇绿岩之间不整合关系的确认及其意义. *中国区域地质*, (3): 250-255
- 李献华, 刘颖, 涂湘林, 胡光黔, 曾文. 2002. 硅酸盐岩石化学组成的 ICP-AES 和 ICP-MS 准确测定: 酸溶与碱熔分解样品方法的对比. *地球化学*, 31(3): 289-294
- 李月臣, 杨富全, 赵财胜, 张岩, 闫升好, 代军治, 徐林刚. 2007. 新疆贝勒库都克岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. *岩石学报*, 23(10): 2483-2492
- 李宗怀, 韩宝福, 宋彪. 2004. 新疆东准噶尔二台北花岗岩体和包体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *岩石学报*, 20(5): 1263-1270
- 林锦富, 喻亨祥, 余心起, 狄永军, 田建涛. 2007. 新疆东准噶尔萨北富碱花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年及其地质意义. *岩石学报*, 23(8): 1876-1884
- 刘家远, 袁奎荣. 1996. 新疆乌伦古富碱花岗岩带碱性花岗岩成因及其形成构造环境. *高校地质学报*, 2(3): 257-272
- 刘猛, 游军, 丁汝福. 2012. 希勒库都克铜钼矿床地球物理、地球化学异常特征与找矿模式. *新疆地质*, 30(1): 46-51
- 柳小明, 高山, 第五春容, 袁洪林, 胡兆初. 2007. 单颗粒锆石的

## 附中文参考文献

- 蔡剑辉, 阎国翰, 牟保全, 任康绪, 宋彪, 李凤荣. 2005. 北京房山岩体锆石 U-Pb 年龄和 Sr、Nd、Pb 同位素与微量元素特征及成因探讨. *岩石学报*, 21(3): 776-788



- 20 $\mu\text{m}$  小斑束原位微区 LA-ICP-MS U-Pb 年龄和微量元素的同时测定. 科学通报, 52(2): 228–235
- 龙灵利, 王京彬, 王玉往, 王莉娟, 王书来, 蒲克信. 2009. 新疆富蕴地区希勒库都克铜钼矿床含矿斑岩的年代学与地球化学特征. 地质通报, 28(12): 1840–1851
- 龙灵利, 王玉往, 王京彬, 王莉娟, 李秋立, 王书来, 蒲克信, 张会琼, 廖震. 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. 岩石学报, 26(2): 449–456
- 龙灵利, 王玉往, 杜安道, 王京彬, 王莉娟, 王书来, 蒲克信, 屈文俊. 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. 矿床地质, 30(4): 635–644
- 路远发. 2004. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包. 地球化学, 33(5): 459–464
- 苏玉平, 唐红峰, 丛峰. 2008. 新疆东准噶尔黄羊山碱性花岗岩体的锆石 U-Pb 年龄和岩石成因. 矿物学报, 28(2): 117–126
- 童英, 洪大卫, 王涛, 王式洗, 韩宝福. 2006a. 阿尔泰山造山带南缘富蕴后造山线形花岗岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 矿物岩石学杂志, 25(2): 85–89
- 童英, 王涛, Kovach VP, 洪大卫, 韩宝福. 2006b. 阿尔泰山中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. 岩石学报, 22(5): 1267–1278
- 汪帮耀, 姜常义, 李永军, 吴宏恩. 2011. 新疆卡拉麦里姜巴斯套组火山岩地球化学特征与构造意义. 地球科学与环境学报, 33(3): 237–245
- 王京彬, 徐新. 2006. 新疆北部后碰撞构造演化与成矿. 地质学报, 80(1): 23–31
- 王岚, 杨理勤, 王亚平, 张勇, 陈雪, 冯亮, 陈占生. 2012. 锆石 LA-ICP-MS 原位微区 U-Pb 定年及微量元素的同时测定. 地球学报, 33(5): 763–772
- 王莉娟, 王京彬, 王玉往, 龙灵利, 王书来, 蒲克信. 2009. 准噶尔北部希勒库都克斑岩铜钼矿床地质与成矿流体. 岩石学报, 25(4): 944–954
- 王莉娟, 王京彬, 王玉往, 龙灵利, 靳淑韵. 2010. 新疆北部希勒库都克斑岩铜钼矿床赋矿岩石及成矿流体. 新疆地质, 28(4): 393–401
- 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. 地质学报, 82(2): 221–233
- 王玉往, 王京彬, 王书来, 龙灵利, 王莉娟, 蒲克信, 汪树栋, 唐萍芝. 2010. 新疆希勒库都克铜钼矿床地质特征和成因探讨. 新疆地质, 28(4): 370–376
- 吴琪, 屈迅, 常国虎, 张永, 董连慧, 徐兴旺. 2012. 红柳峡韧性剪切带形成时代及其对准噶尔洋盆闭合时限的约束. 岩石学报, 28(8): 2331–2339
- 谢烈文, 张艳斌, 张辉煌, 孙金凤, 吴福元. 2008. 锆石/斜锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素以及微量元素成分的同时原位测定. 科学通报, 53(2): 220–228
- 杨富全, 张志欣, 刘国仁, 屈文俊, 张立武, 魏广智, 刘锋, 柴凤梅. 2012. 新疆准噶尔北缘玉勒肯哈腊苏斑岩铜矿床年代学研究. 岩石学报, 28(7): 2029–2042
- 杨高学, 李永军, 吴宏恩, 司国辉, 金朝, 张永智. 2009a. 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. 岩石学报, 25(12): 3197–3207
- 杨高学, 李永军, 吴宏恩, 司国辉, 金朝. 2009b. 新疆东准噶尔锡矿北花岗岩斑岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年. 地质通报, 28(5): 572–577
- 杨高学, 李永军, 司国辉, 吴宏恩, 金朝, 张永智. 2010. 东准噶尔卡拉麦里地区贝勒库都克岩体锆石 LA-ICPMS U-Pb 测年及地质意义. 大地构造与成矿学, 34(1): 133–138
- 袁峰, 周涛发, 谭绿贵, 范裕, 杨文平, 何立新, 岳书仓. 2006. 西准噶尔萨吾尔地区 I 型花岗岩同位素精确定年及其意义. 岩石学报, 22(5): 1238–1248
- 张海洋, 牛贺才, Sato H, 单强, 于学元, Ito J, 张旗. 2004. 新疆北部晚古生代埃达克岩、富铋玄武岩组合: 古亚洲洋板块南向俯冲的证据. 高校地质学报, 10(1): 106–113
- 张元元, 陈石, 郭召杰, 方世虎. 2009. 东准噶尔扎河坝地区古生代晚期火山岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义. 岩石学报, 25(3): 506–514
- 张招崇, 闫升好, 陈柏林, 周刚, 贺永康, 柴凤梅, 何立新, 万渝生. 2006. 新疆东准噶尔北部俯冲花岗岩的 SHRIMP U-Pb 锆石定年. 科学通报, 51(13): 1565–1574
- 赵振华. 2007. 关于岩石微量元素构造环境判别图解使用的有关问题. 大地构造与成矿学, 31(1): 92–103
- 周刚, 张招崇, 谷高中, 杨文平, 何斌, 张小林, 罗世宾, 王祥, 贺永康. 2006. 新疆东准噶尔北部青格里河下游花岗岩类的时代及地质意义. 现代地质, 20(1): 141–150
- 周刚, 张招崇, 罗世宾, 何斌, 王祥, 应立娟, 赵华, 李爱红, 贺永康. 2007. 新疆阿尔泰山南缘玛因鄂博高温型强过铝花岗岩: 年龄、地球化学特征及其地质意义. 岩石学报, 23(8): 1909–1920
- 周刚, 吴淦国, 董连慧, 张招崇, 董永观, 童英, 何立新, 应丽娟. 2009. 新疆准噶尔北东缘乌图布拉克岩体形成时代、地球化学特征及地质意义. 岩石学报, 25(6): 1390–1402
- 周涛发, 袁峰, 范裕, 谭绿贵, 岳书仓. 2006. 西准噶尔萨吾尔地区 A 型花岗岩的地球动力学意义: 来自岩石地球化学和锆石 SHRIMP 定年的证据. 中国科学(D 辑), 36(1): 39–48