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*

龙灵利[1] 王玉往[1] 王京彬[1] 王莉娟[1] 李秋立[2] 王书来[1] 蒲克信[1] 张会琼[1] 廖震[1]

LONG LingLi[1], WANG YuWang[1], WANG JingBin[1], WANG LiJuan[1], LI QiuLi[2], WANG ShuLai[1], PU KeXin[1], ZHANG HuiQiong[1] and LIAO Zhen[1]

1. 北京矿产地质研究院,北京 100012

2. 中国科学院地质与地球物理研究所离子探针中心,北京 100029

1. *Beijing Institute of Geology for Mineral Resources*, *Beijing* 100012, *China*

2. *The Center of Ion Microprobe*, *Institute of Geology and Geophysics*, *Chinese Academy of Science*, *Beijing* 100029, *China*

2009-04-30 收稿, 2009-12-02 改回.

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

Abstract Lithological, mineral chemical and lithogeochemical characteristics of granodiorite and its enclaves from Xilekuduke Cu-Mo ore district in Fuyun County, northern Xinjiang and its field geological features indicate that they are the products of magma mixing. This paper got the zircon U-Pb ages of 326.8 ± 2.1Ma, 327.6 ± 2.4Ma, 329.3 ± 2.3Ma from the granodiorite and its mafic microgranular enclaves of basalt-andesite porphyrite and fine-grained grabbo-diorite, and the dating result provides the proof for magma mixing origin of granodiorite and its enclaves from the angle of chronology. That mixing between acid granodioritic magma and basic basalt-andesitic magma has produced andesitic porphyrite with 331.9 ± 2.1Ma.

Key words Magma mixing; Zircon U-Pb chronology; Xilekuduke Cu-Mo ore district; Xinjiang

摘 要 新疆北部富蕴县内希勒库都克铜钼矿区的花岗闪长岩及其包体岩相学、矿物化学和岩石地球化学特征及野外地质特征显示其为岩浆混合作用的结果。本文获得花岗闪长岩及其中暗色微粒包体玄武安山玢岩、细粒辉长闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 326.8 ± 2.1Ma、327.6 ± 2.4Ma、329.3 ± 2.3Ma,年龄值基本一致,这一结果从年代学角度为花岗闪长岩及其中暗色微粒包体的岩浆混合作用成因提供证据。偏酸性的花岗闪长质与偏基性玄武安山质岩浆混合作用形成了 331.9 ± 2.1Ma 的安山玢岩脉。

关键词 岩浆混合;锆石 U-Pb 年代学;希勒库都克铜钼矿区;新疆

中图法分类号 P588.122;P597.3

1 引言

岩浆混合作用既是再造新生岩浆又是开放体系下岩浆演化的重要岩浆作用,它已成为岩浆多元性和火成岩多样性的重要原因,且与成矿作用有着重要联系(Du *et al.*, 1999)。

花岗岩体中常含有不同数量、大小、形状和不同成分的暗色微粒包体(MME)(Didier, 1973; Vernon, 1983)。对此类包体的成因有不同认识:(1)源区岩石经部分熔融后形成的耐熔物质残留体(Chappell and White, 1991);(2)岩浆就位过程中捕获的围岩捕虏体;(3)岩浆作用过程中暗色矿物相对集中形成的析离体(Didier *et al.*, 1973);(4)注入花岗质岩浆中的基性岩浆团,即岩浆混合作用的产物(Didier and Barbarin, 1991)。要解决寄主岩与包体的成因问题,需要从岩石学、矿物学、地球化学等方面加以研究,而寄主岩与包体的年代学是其中的一个关键证据。如果包体是残留体或捕虏体,那么它们的形成年龄应当老于寄主岩石;如果是岩浆混合成因,则它们的形成年龄应当与寄主岩相近(刘成东

* 本文受国家重点基础研究发展规划项目(2007CB411304 和 2001CB409806)资助.

第一作者简介:龙灵利,女,1979 年生,博士,矿床学专业,E-mail:longlingli799@163.com

等,2004)。

新疆北部希勒库都克铜钼矿区含铜金矿化的花岗闪长岩中广泛发育暗色微粒包体,王玉往等(2008)通过对该区野外地质特征、花岗闪长岩及其包体岩相学、矿物化学和岩石地球化学的研究认为其为岩浆混合作用的结果。本文拟在前人研究的基础上,采用 CAMECA IMS-1280 二次离子质谱仪(SIMS)对研究区花岗闪长岩(寄主岩)和其中暗色微粒包体进行锆石 U-Pb 年代学的测定,从年代学方面对花岗闪长岩和其中暗色微粒包体的成因提供约束。

2 区域地质背景及矿床地质特征

2.1 区域地质背景

希勒库都克铜钼矿区地处中亚增生型造山带(Sengor *et al.*, 1993; Jahn *et al.*, 2000; Hu *et al.*, 2000; Zhao *et al.*, 2000; Jahn, 2004)中东准噶尔造山带内,位于准噶尔板块北缘,介于 NWW 向额尔齐斯断裂和乌伦古断裂之间。研究区位于东准噶尔北部阿尔曼太晚古生代岛弧带内,发育地层主要为石炭纪火山岩和火山碎屑岩。

2.2 矿区地质背景

矿区出露的地层主要为下石炭统南明水组,以及少量第三系、第四系的覆盖层(图 1)。下石炭统南明水组地层为一套滨海-浅海相的火山碎屑岩、陆源碎屑岩系,以凝灰质砂岩为主,夹粉砂岩、粉砂质泥灰岩、凝灰质泥板岩、玻屑凝灰岩、硅质岩、不纯大理岩等。矿区北部有大面积的花岗闪长岩出露,侵入到南明水组地层中,围岩发生角岩化和硅化等蚀变;岩石为灰白色,中粒结构,岩体中发育暗色微粒包体(王玉往等,2008),并有浸染状铜矿化;西南部出露较大面积的花岗闪长岩、花岗斑岩、石英闪长岩、安山玢岩;中北部亦出露有少量的安山玢岩,岩体周边有明显的褐铁矿氧化边(王书来和蒲克信,2008①)。

矿区铜金矿化产于北部花岗闪长岩体东南边缘,地表矿化大约 100m、宽 40m;铜钼矿化与中南部花岗斑岩和石英闪长岩关系密切,以细脉浸染状、细脉状、浸染状产于花岗斑岩、石英闪长岩或其围岩南明水组石炭纪地层中。花岗闪长岩中的暗色微粒包体中常含有黄铁矿、磁铁矿,部分亦含有黄铜矿。从钻孔岩心看,矿化较好的部位,也是包体分布较为密集的部位。

矿区存在环带状蚀变分带,从内到外有黑云母、钾长石、石英、硫化物→石英、绢云母、硫化物→绿泥石、绿帘石的矿化分带,蚀变矿化组合与斑岩型矿床相似(王书来和蒲克信,2008;王玉往等,2008)。与典型的斑岩型矿床相比,该矿床石英中流体包裹体少而小,气体包裹体少,含 CO_2 包裹体及含子矿物包裹体发育,子矿物以 NaCl 为主,基本不出现 KCl 子矿物。钼的成矿温度为 280 ~ 530℃,集中在 300 ~ 400℃左右;铜主要成矿温度低于 350℃;晚期流体的成矿温度为 180 ~ 300℃左右(王莉娟等,2009)。

矿区以 Mo 矿化为主,主要发育以下几种含钼矿石类型:石英-辉钼矿-黄铁矿脉、石英-辉钼矿-黄铜矿-黄铁矿脉、纯辉钼矿脉、石英-辉钼矿脉、石膏-黄铜矿-辉钼矿脉和浸染状辉钼矿。其中石英-辉钼矿脉为矿区主要的矿化类型,辉钼矿主要分布在石英脉壁上。

3 样品描述

花岗闪长岩(X5612-18):为矿区的主要侵入岩。新鲜的花岗闪长岩呈浅灰色中粗粒块状,蚀变后略显粉红色。岩石具花岗结构,粒度可从 0.5 ~ 6mm,一般为 1 ~ 3mm。主要由石英(35% ~ 40%)、中长石(30% ~ 35%)、钾长石(10% ~ 15%)、角闪石(5% ~ 10%)和黑云母(5% ~ 10%)组成,副矿物由磁铁矿、榍石、角闪石等组成。中长石部分泥化和绢云母化,角闪石和黑云母绿泥石化、绿帘石化。

玄武安山玢岩(暗色包体,X5612-4):为花岗闪长岩中第 IV 类包体(王玉往等,2008)。岩石呈灰黑-灰绿色,具斑状结构。斑晶 15% ~ 20%,1 ~ 3mm,半自形-自形,主要由更长石组成,少量石英和蚀变角闪石,角闪石阳起石化、黑云母化;基质具细粒-间粒间隐结构,主要由斜长石(35% ~ 40%)、角闪石(30% ~ 35%)、黑云母(5% ~ 10%)和石英、磁铁矿(5% ~ 10%)组成,斜长石强粘土化、绢云母化。

细粒辉长闪长岩(暗色包体,X5612-9):为花岗闪长岩中第 II 类包体(王玉往等,2008)。岩石呈浅灰色,具似斑状结构(0.3 ~ 2mm,中长石呈板条状,部分钾长石呈斑状)、嵌晶包含结构(石英包裹中长石、斜长石和石英包含针状磷灰石等)。主要由中长石(40% ~ 45%)、绿色角闪石(35% ~ 40%)、石英(10% ~ 15%)、正长石(5% ~ 10%)、磁铁矿(4% ~ 7%)组成。副矿物由磷灰石、榍石、绿帘石等组成。斜长石糙化,角闪石阳起石化绿泥石化、绿帘石化。

安山玢岩(脉,X5612-14):呈不规则脉状穿于花岗闪长岩体中,在岩体外围地层中亦常见。岩石灰白色,具多斑-聚斑状结构。斑晶 30% ~ 40%,大多 1.5 ~ 4mm,近自形,主要由斜长石和少量褐黄色角闪石、石英、黑云母等集合体组成。基质细粒似交织状,大多 < 0.3mm,主要由他形板条状斜长石、水黑云母、石英、褐黄色角闪石组成。其可能为酸性的花岗闪长质与基性玄武安山质岩浆混合作用进一步演化形成的(王玉往等,2008)。

4 分析方法

采用常规方法对岩石样品进行粉碎和锆石的挑选。将

① 王书来,蒲克信. 2008. 新疆富蕴县希勒库都克铜钼金矿普查报告. 北京矿产地质研究院(内部资料)

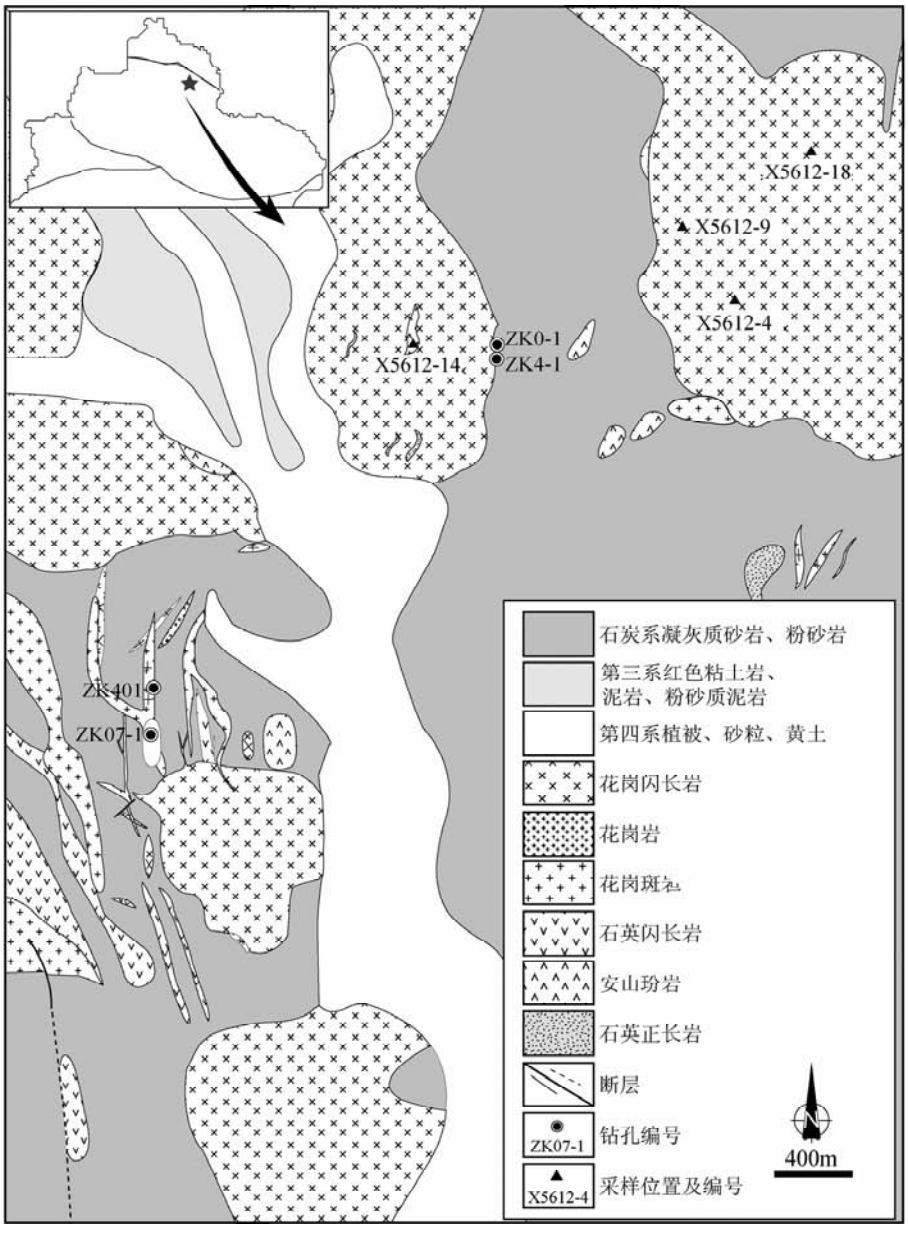


图 1　希勒库都克铜钼矿区地质简图(据王书来和蒲克信,2008)

Fig. 1　Sketch map showing geology of the Xilekuduke Cu-Mo ore district in Xinjiang

锆石样品颗粒以及锆石标样 Temora 粘贴在环氧树脂靶上,然后对其抛光直至锆石露出一半晶面。在上机分析前,先在显微镜下为其进行透射光、反射光照相和阴极发光(CL)照相,以检查锆石的内部结构;对阴极发光图像进行分析,结合透、反射光图像,选定最佳的待测锆石部位。样品靶在真空下镀金以备分析。锆石的阴极发光(CL)图像分析在中国科学院地质与地球物理研究所扫描电镜实验室采用德国 LEO1450VP 扫描电子显微镜(SEM)及 MiniCL 阴极放光装置完成。

锆石 U、Th、Pb 的分析在中国科学院地质与地球物理研究所采用 CAMECA IMS-1280 二次离子质谱仪(SIMS)完成。锆石标样与待测锆石样品以 1∶3 比例交替测定,锆石样品的 U-Th-Pb 同位素比值用标准锆石 Temora 校正获得(Black *et al.*, 2004),U、Th 浓度用标准锆石 91500 校正获得(Wiedenbeck *et al.*, 1995),详细的分析方法见 Li *et al.* (2009)。普通 Pb 校正采用实测^{204}Pb 值。由于测得的普通 Pb 含量非常低,可以认为普通 Pb 主要来源于制样过程中带入的表面 Pb 污染,因此用现代地壳的平均 Pb 同位素组成(Stacey and Kramers, 1975)作为普通 Pb 组成进行校正。单点分析的同位素比值及年龄误差为 1σ,加权平均值误差为 2σ,U/Pb (和 Pb/Pb) 平均年龄误差为 95% 置信度。年龄计算和图解采用 ISOPLOT 软件(Ludwig, 2001)完成。

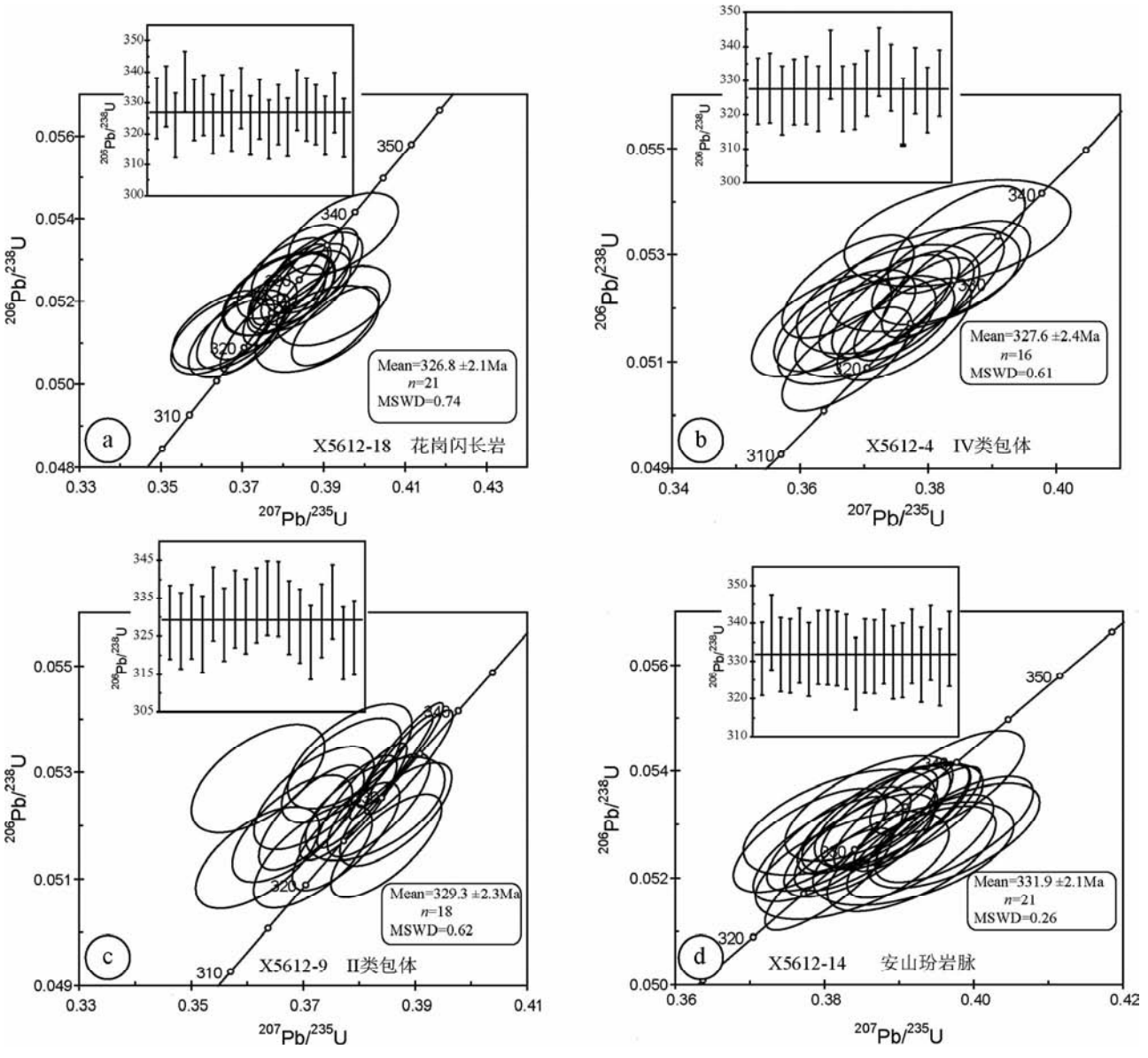


图 2 希勒库都克花岗闪长岩及其中暗色包体、安山玢岩锆石 U-Pb 谐和年龄图

Fig. 2 U-Pb concordia diagram of zircons from grandiorite and its enclaves and andesite porphyrite

5 分析结果

花岗闪长岩 (X5612-18),该样品共进行了 22 粒锆石的 U,Th,Pb 同位素分析,分析结果见表 1。在谐和年龄图中(图 2a),除 X5612-18.3 数据点偏离谐和线较远,其余 21 个数据点较为集中,分布在谐和线上或其附近。对这 21 个数据点进行加权平均年龄的计算,结果为 326.8 ± 2.1Ma。锆石晶体形态较好,短柱状,100 ~ 200μm,阴极发光图像中(图 3)可见清楚的韵律环带。锆石 Th/U 比值大多介于 0.40 ~ 0.78 之间(仅一个比值为 0.30),大于 0.4,表现为岩浆锆石特征。一般而言,岩浆成因的锆石 Th/U 值大于 0.4,而变质成因的锆石 Th/U 小于 0.1(吴元保和郑永飞,2004)。该年龄 326.8 ± 2.1Ma 可能代表了花岗闪长岩的形成年龄。

玄武安山玢岩(暗色包体,X5612-4)共选择了 18 粒锆石进行测试,测试数据点主要分布在 310 ~ 340Ma 之间(图 2b),由于 X5612-4.14、X5612-4.16 两个数据点的单点分析误差较大(见表 1),故不参与计算,其余 16 个数据点的加权平均值为 327.6 ± 2.4Ma。锆石颗粒约 50 ~ 200μm,100μm 居多,晶体形态为短柱状或近等轴状,发育清楚的韵律环带,Th/U > 0.4(0.41 ~ 0.83),反映其具岩浆锆石的特征。测试结果 327.6 ± 2.4Ma 可能为暗色包体的形成年龄。

细粒辉长闪长岩(暗色包体,X5612-9)共有 18 个数据点,结果见表 1,主要集中在 320 ~ 340Ma 间,位于谐和线上或

表 1　希勒库都克花岗闪长岩及其中暗色包体、安山玢岩锆石 U-Pb 年龄数据

Table 1　Zircon U-Pb data for grandiorite and its enclaves and andesite porphyrite in Xilekuduke

分析号	U ($\times10^{-6}$)	Th ($\times10^{-6}$)	Th/U	$f_{206}^{\#}$ (%)	$^{207}Pb/^{206}Pb$	±1σ (%)	$^{207}Pb/^{235}U$	±1σ (%)	$^{206}Pb/^{238}U$	±1σ (%)	$t_{207/235}$ (Ma)	±1σ	$t_{206/238}$ (Ma)	±1σ
闪长玢岩 IV 类包体(X5612-4)														
X5612-4.1	72	41	0.57	0.11	0.0520	1.69	0.373	2.27	0.0520	1.51	322.1	6.3	326.9	4.8
X5612-4.2	52	22	0.42	0.18	0.0520	2.68	0.374	3.12	0.0522	1.59	322.4	8.6	327.8	5.1
X5612-4.3	59	28	0.48	0.20	0.0519	2.23	0.369	2.73	0.0516	1.59	318.8	7.5	324.2	5.0
X5612-4.4	110	54	0.49	0.02	0.0527	1.35	0.378	2.02	0.0520	1.51	325.4	5.6	326.7	4.8
X5612-4.5	90	37	0.41	0.02	0.0522	1.51	0.375	2.17	0.0521	1.56	323.3	6.0	327.2	5.0
X5612-4.6	78	40	0.51	0.20	0.0510	1.93	0.363	2.45	0.0517	1.51	314.7	6.7	324.8	4.8
X5612-4.7	101	75	0.74	0.11	0.0523	1.67	0.384	2.27	0.0533	1.54	330.3	6.4	334.7	5.0
X5612-4.8	53	29	0.53	0.23	0.0522	2.29	0.372	2.74	0.0517	1.50	320.9	7.6	324.7	4.8
X5612-4.9	69	32	0.47	0.16	0.0514	1.95	0.367	2.46	0.0518	1.50	317.4	6.7	325.4	4.8
X5612-4.10	94	59	0.63	0.12	0.0509	1.73	0.367	2.29	0.0524	1.50	317.8	6.3	329.2	4.8
X5612-4.11	25	14	0.54	0.29	0.0522	3.43	0.385	3.76	0.0534	1.53	330.4	10.6	335.4	5.0
X5612-4.12	56	46	0.83	0.19	0.0528	2.15	0.384	2.63	0.0527	1.51	329.7	7.4	330.8	4.9
X5612-4.13	108	78	0.73	0.12	0.0522	1.62	0.367	2.24	0.0510	1.55	317.6	6.1	320.9	4.9
X5612-4.14	72	31	0.43	0.88	0.0529	7.13	0.379	7.29	0.0520	1.53	326.3	20.6	326.6	4.9
X5612-4.15	60	28	0.46	0.17	0.0524	2.83	0.379	3.21	0.0525	1.51	326.6	9.0	330.0	4.9
X5612-4.16	88	45	0.52	2.47	0.0499	5.62	0.335	5.82	0.0487	1.51	293.1	14.9	306.4	4.5
X5612-4.17	130	102	0.78	0.02	0.0529	1.70	0.376	2.27	0.0516	1.51	324.3	6.3	324.4	4.8
X5612-4.18	122	97	0.79	0.07	0.0529	1.37	0.382	2.04	0.0524	1.51	328.7	5.7	329.3	4.9
闪长岩 II 类包体(X5612-9)														
X5612-9.1	39	18	0.46	0.14	0.0531	2.18	0.383	2.66	0.0523	1.51	329.1	7.5	328.7	4.8
X5612-9.2	59	31	0.53	0.09	0.0514	1.79	0.368	2.38	0.0519	1.57	318.2	6.5	326.4	5.0
X5612-9.3	189	147	0.78	0.08	0.0524	1.08	0.378	1.87	0.0523	1.53	325.6	5.2	328.8	4.9
X5612-9.4	106	73	0.69	0.03	0.0529	1.33	0.378	2.07	0.0518	1.59	325.3	5.8	325.5	5.0
X5612-9.5	862	49	0.06	0.01	0.0527	0.47	0.386	1.57	0.0531	1.50	331.3	4.5	333.5	4.9
X5612-9.6	96	69	0.72	0.09	0.0537	1.48	0.387	2.11	0.0522	1.51	331.8	6.0	328.1	4.8
X5612-9.7	58	37	0.64	0.20	0.0496	2.18	0.362	2.69	0.0529	1.57	313.7	7.3	332.2	5.1
X5612-9.8	641	772	1.21	0.03	0.0525	0.80	0.381	1.72	0.0526	1.53	327.4	4.8	330.2	4.9
X5612-9.9	79	68	0.86	0.13	0.0515	1.75	0.377	2.31	0.0530	1.52	324.7	6.5	333.1	4.9
X5612-9.10	715	595	0.83	0.08	0.0527	0.59	0.387	1.61	0.0533	1.50	332.4	4.6	334.9	4.9
X5612-9.11	76	47	0.62	0.15	0.0515	1.86	0.378	2.39	0.0533	1.50	325.8	6.7	334.8	4.9
X5612-9.12	75	48	0.65	0.18	0.0514	1.81	0.372	2.35	0.0525	1.50	321.1	6.5	329.9	4.8
X5612-9.13	94	41	0.44	0.04	0.0517	1.39	0.372	2.07	0.0522	1.53	320.8	5.7	327.7	4.9
X5612-9.14	146	92	0.63	0.04	0.0524	1.74	0.372	2.33	0.0514	1.54	321.0	6.4	323.3	4.9
X5612-9.15	112	79	0.71	0.00	0.0531	1.25	0.383	1.96	0.0524	1.51	329.6	5.5	329.1	4.8
X5612-9.16	405	467	1.15	0.00	0.0530	0.69	0.389	1.65	0.0532	1.50	333.5	4.7	334.1	4.9
X5612-9.17	66	36	0.54	0.20	0.0511	1.98	0.362	2.49	0.0514	1.52	313.6	6.7	323.1	4.8
X5612-9.18	88	63	0.72	0.04	0.0541	1.44	0.385	2.10	0.0516	1.53	330.6	5.9	324.5	4.8
安山玢岩(X5612-14)														
X5612-14.1	95	52	0.55	0.04	0.1629	0.55	9.985	1.62	0.4446	1.52	2433.4	15.1	2371.3	30.3
X5612-14.2	386	181	0.47	0.14	0.0530	1.53	0.385	2.14	0.0526	1.50	330.5	6.1	330.5	4.8
X5612-14.3	280	137	0.49	0.00	0.0535	1.51	0.396	2.13	0.0538	1.50	339.1	6.2	337.7	4.9

续表 1

Continoued Table 1

分析号	U (×10⁻⁶)	Th (×10⁻⁶)	Th/U	f_{206} # (%)	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	±1σ (%)	$\frac{^{207}Pb}{^{235}U}$	±1σ (%)	$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	±1σ (%)	$t_{207/235}$ (Ma)	±1σ	$t_{206/238}$ (Ma)	±1σ
X5612-14.4	197	154	0.78	0.10	0.0546	1.83	0.397	2.37	0.0528	1.51	339.7	6.9	331.6	4.9
X5612-14.5	413	241	0.58	0.06	0.0530	1.36	0.386	2.03	0.0527	1.51	331.1	5.8	331.3	4.9
X5612-14.6	314	224	0.71	0.06	0.0531	1.46	0.390	2.10	0.0532	1.51	334.1	6.0	334.0	4.9
X5612-14.7	364	261	0.72	0.07	0.0542	1.38	0.393	2.04	0.0526	1.51	336.4	5.9	330.4	4.9
X5612-14.8	752	283	0.38	0.01	0.0536	0.94	0.392	1.77	0.0531	1.50	336.2	5.1	333.6	4.9
X5612-14.9	516	276	0.54	0.04	0.0528	1.45	0.387	2.10	0.0531	1.52	332.1	6.0	333.5	4.9
X5612-14.10	372	217	0.58	0.05	0.0527	1.30	0.386	1.99	0.0531	1.51	331.3	5.6	333.3	4.9
X5612-14.11	260	226	0.87	0.03	0.0545	1.56	0.397	2.18	0.0529	1.53	339.7	6.3	332.4	4.9
X5612-14.12	629	471	0.75	0.00	0.0531	1.04	0.381	1.83	0.0520	1.50	327.4	5.1	326.6	4.8
X5612-14.13	436	346	0.79	0.12	0.0525	1.40	0.382	2.06	0.0527	1.51	328.5	5.8	331.3	4.9
X5612-14.14	291	249	0.85	0.09	0.0520	1.63	0.378	2.21	0.0527	1.50	325.6	6.2	331.1	4.9
X5612-14.15	499	265	0.53	0.02	0.0533	1.16	0.390	1.90	0.0531	1.50	334.6	5.4	333.7	4.9
X5612-14.16	258	225	0.87	0.25	0.0542	2.36	0.392	2.81	0.0525	1.51	335.8	8.1	329.6	4.8
X5612-14.17	303	241	0.79	0.05	0.0525	1.51	0.381	2.16	0.0525	1.53	327.4	6.1	330.1	4.9
X5612-14.18	394	271	0.69	0.00	0.0532	1.83	0.390	2.36	0.0532	1.50	334.3	6.8	333.9	4.9
X5612-14.19	271	139	0.52	0.13	0.0543	1.79	0.392	2.36	0.0524	1.54	335.6	6.8	329.0	4.9
X5612-14.20	314	211	0.67	0.15	0.0525	1.84	0.386	2.38	0.0533	1.51	331.4	6.7	334.7	4.9
X5612-14.21	193	120	0.62	0.05	0.0533	2.26	0.384	2.76	0.0522	1.59	329.8	7.8	328.2	5.1
X5612-14.22	137	107	0.78	0.16	0.0522	2.29	0.382	2.75	0.0530	1.51	328.5	7.7	333.2	4.9
花岗闪长岩(X5612-18)														
X5612-18.1	126	55	0.44	0.13	0.0533	2.20	0.384	2.67	0.0522	1.52	330.0	7.6	328.3	4.9
X5612-18.2	180	90	0.50	0.07	0.0526	1.86	0.383	2.39	0.0529	1.50	329.6	6.8	332.2	4.9
X5612-18.3	138	64	0.46	0.33	0.0483	3.08	0.341	3.43	0.0512	1.51	297.9	8.9	322.0	4.7
X5612-18.4	81	42	0.52	0.15	0.0549	2.73	0.388	3.19	0.0513	1.65	333.2	9.1	322.7	5.2
X5612-18.5	194	89	0.46	0.07	0.0534	2.34	0.395	2.78	0.0536	1.50	337.9	8.0	336.8	4.9
X5612-18.6	105	54	0.51	0.18	0.0527	2.47	0.379	2.91	0.0522	1.54	326.3	8.2	327.8	4.9
X5612-18.7	302	230	0.76	0.05	0.0529	1.28	0.382	1.98	0.0524	1.51	328.4	5.6	329.2	4.9
X5612-18.8	178	50	0.28	0.03	0.0554	1.65	0.393	2.23	0.0514	1.51	336.5	6.4	323.2	4.8
X5612-18.9	166	90	0.55	0.04	0.0534	1.74	0.386	2.31	0.0524	1.52	331.1	6.5	329.3	4.9
X5612-18.10	182	82	0.45	0.06	0.0524	1.72	0.373	2.30	0.0516	1.53	321.8	6.4	324.2	4.8
X5612-18.11	260	106	0.41	0.04	0.0534	1.44	0.389	2.08	0.0528	1.50	333.3	5.9	331.5	4.9
X5612-18.12	194	91	0.47	0.14	0.0523	1.89	0.370	2.42	0.0513	1.51	319.5	6.6	322.7	4.8
X5612-18.13	244	111	0.45	0.02	0.0530	1.52	0.381	2.14	0.0522	1.50	328.0	6.0	328.0	4.8
X5612-18.14	251	195	0.78	0.14	0.0523	2.11	0.369	2.60	0.0511	1.52	318.6	7.1	321.4	4.8
X5612-18.15	159	75	0.47	0.04	0.0548	2.48	0.392	2.90	0.0519	1.51	336.1	8.3	326.1	4.8
X5612-18.16	634	384	0.60	0.06	0.0528	1.09	0.373	1.86	0.0512	1.50	321.9	5.1	322.1	4.7
X5612-18.17	187	92	0.49	0.13	0.0534	2.01	0.388	2.51	0.0527	1.51	332.6	7.2	331.0	4.9
X5612-18.18	106	42	0.40	0.04	0.0527	2.54	0.379	2.99	0.0522	1.58	326.3	8.4	327.9	5.1
X5612-18.19	310	200	0.64	0.02	0.0531	1.56	0.380	2.17	0.0519	1.51	327.3	6.1	326.2	4.8
X5612-18.20	173	83	0.48	0.25	0.0516	2.37	0.365	2.81	0.0513	1.50	316.2	7.7	322.6	4.7
X5612-18.21	199	103	0.51	0.00	0.0525	1.96	0.380	2.47	0.0525	1.51	327.3	6.9	330.1	4.9
X5612-18.22	300	189	0.63	0.19	0.0517	2.26	0.365	2.71	0.0512	1.51	315.7	7.4	321.8	4.7

注：f_{206} # 为普通 ^{206}Pb 占总 ^{206}Pb 的比例

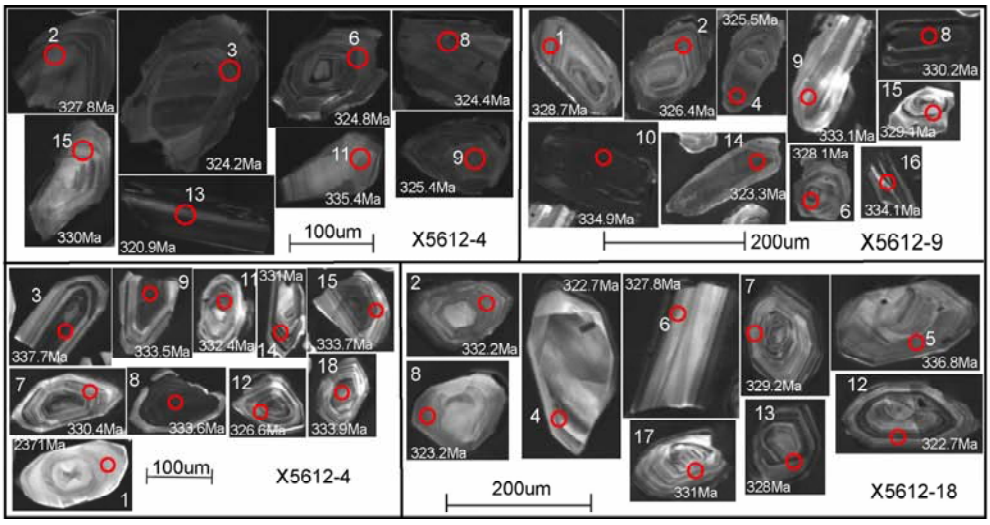


图 3 希勒库都克花岗闪长岩及其中暗色包体、安山玢岩锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 3 Zircon CL images of granodiorite and its enclaves and andesite porphyrite in Xilekuduke

其附近(图 2c)。18 个数据点的加权平均年龄为 329.3 ± 2.3Ma。该样品锆石大小约 120μm,锆石形态呈近等轴状或板条状,阴极发光图像中(图 3)近等轴状锆石具清晰的韵律环带,板条状锆石呈明暗相间的条带,其 Th/U 大都介于 0.41 ~ 0.83 之间,表现为岩浆锆石特征。综合分析,329.3 ± 2.3Ma 为辉长闪长岩的形成年龄。

安山玢岩(脉,X5612-14),该样品共有 22 个数据点,其中 X5612-14.1 数据点结果为 2173Ma,可能为一老的继承锆石年龄;其余 21 个测试点集中在 320 ~ 340Ma 之间,且主要位于谐和线上或其附近(图 2d),对其进行加权平均年龄计算,结果为 331.9 ± 2.1Ma。锆石大小约 50 ~ 200μm,大多 100μm 左右,晶形为短柱状或浑圆状,Th/U 介于 0.40 ~ 0.87 之间,均显示岩浆锆石特征。CL 图像中(图 3)X5612-14.1 测点锆石与其它锆石特征存有不同,其发育环带,但环带间界限不截然,锆石 U 含量偏低,可能为一老的继承锆石。331.9 ± 2.1Ma 可能代表了安山玢岩脉的形成年龄。

6 讨论

研究区野外地质特征、花岗闪长岩及其包体岩相学、矿物化学和岩石地球化学的特征显示偏酸性的花岗质岩浆和偏基性的玄武安山质岩浆发生了混合作用(王玉往等,2008),本文获得希勒库都克铜钼矿区花岗闪长岩及其中暗色微粒包体(玄武安山玢岩、细粒辉长闪长岩)的锆石 U-Pb 年龄分别为 326.8 ± 2.1Ma、327.6 ± 2.4Ma 和 329.3 ± 2.3Ma,它们较为接近,在误差范围内是一致的,表明花岗闪长岩和其中的暗色微粒包体形成于同一地质时期。这就排除了花岗闪长岩中的暗色微粒包体为源区的固态难熔残余或围岩捕虏体,因为不论是花岗质岩浆的原岩还是围岩的捕虏体,其形成年龄应早于花岗岩浆的形成年龄。该年代学结果进一步佐证了花岗闪长岩及其中的暗色微粒包体为岩浆混合作用的产物。

侵入到花岗闪长岩中的脉状安山玢岩锆石 U-Pb 年龄为 331.9 ± 2.1Ma,这与花岗闪长岩及其中暗色包体相近,在误差范围内它们的锆石 U-Pb 年龄近一致,由此推测可能在花岗闪长质岩浆和玄武安山质岩浆发生混合作用形成岩浆混合岩的同时就形成了安山玢岩。

本文获得锆石 U-Pb 年龄结果(约 330Ma)显示研究区岩浆混合作用发生于早石炭世中晚期,这一时期东准噶尔地区后碰撞深成岩浆活动强烈(330 ~ 310Ma)(韩宝福等,2006),同时这地质历史时期也是壳幔相互作用的激烈期和大规模成矿的高峰期(340 ~ 330Ma)(王京彬和徐新,2006)。希勒库都克铜钼矿区花岗闪长岩及其包体可能就是在壳幔源岩浆强烈相互作用的背景下岩浆混合作用形成的,本区成矿流体研究结果也反映了壳源与幔源流体混合的特征(王莉娟等,2009),推测本区的成矿作用与岩浆混合作用存在某中内在联系。

7 结论

(1)本文获得希勒库都克铜钼矿区花岗闪长岩及其中的暗色微粒包体(玄武安山玢岩、细粒辉长闪长岩)锆石 U-Pb 年龄分别为 326.8 ± 2.1Ma、327.6 ± 2.4Ma 和 329.3 ± 2.3Ma,它们形成于近同一地质时期,表明花岗闪长岩及其中的暗色微粒包体为岩浆混合作用产物;

(2)331.9 ± 2.1Ma 的安山玢岩是由酸性的花岗闪长质与基性玄武安山质岩浆混合演化而来。

致谢 本文野外工作中得到北京矿产地质研究院希勒库都克铜钼矿项目组成员的大力帮助,锆石阴极发光实验过程中得到闫欣高级工程师的帮助,锆石 U-Pb 同位素测试实验过程中李献华研究员给予诸多指导、唐国强给予大量帮助,在此一并向他们表示感谢。同时,向两位匿名审稿人给予的诸多有益建议表示感谢。

References

Black LP, Kamo SL, Allen CM, Davis DW, Aleinikoff JN, Valley JW, Mundil R, Campbel IH, Korsch RJ, Williams IS and Foudoulis Chris. 2004. Improved $^{206}Pb/^{238}U$ microprobe geochronology by the monitoring of a trace-element-related matrix effect; SHRIMP, ID-TIMS, ELA-ICP-MS and oxygen isotope documentation for a series of zircon standards. Chemical Geology, 205: 115 – 140

Chappell BW and White AJR. 1991. Restgite enclaves and the restite model. In: Didier J and Barbarin B (eds.). Enclavesa and Granite Petrology. Amsterdam: Elsevier, 375 – 381

Didier J. 1973. Granites and their enclaves: The bearing of enclaves on the origin of granite. Development in Petrology. Amsterdam: Elsevier, 393

Didier J and Barbarin B. 1991. Enclaves and Granite Petrology. Amsterdam: Elsevier, 625

Du YS. 1999. Petrologic and mineralogic study of enclaves in plutons in the typical mining districts of Tongling, Anhui and its bearing on the process of magmatism-metallogeny. Chinese Journal of Geochemistry, 18(3): 208 – 218

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)

Hu AQ, John BM, Zhang G, Chen Y and Zhang Q. 2000. Crustal evolution and Phanerozoic crust growth in northern Xinjiang: Nd isotope evidence (Part I): Isotopic characterizationo of basement rocks. Tectoophysics, 328: 15 – 51

Jahn BM, Griffin WL and Windley B. 2000. Continental growth in the Phanerozoic: Evidence from Central Asia. Tectonophysics, 328: vii – x

Jahn BM. 2004. Phanerozoic continental growth in Central Asia. Jouranl of Asian Earth Sciences, 23: 599 – 603

Li XH, Liu Y, Li QL, Guo CH and Chamberlain KR. 2009. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multi-collector SIMS without external standardization. Geochemistry Geophysics Geosystems (G3), doi: 10.1029/2009GC002400

Liu CD, Mo XX, Luo ZH, Yu XH, Chen HW, Li SW and Zhao X. 2004. Mixing events between the crust- and mantle-derived magmas in eastern Kunlun: Evidence from zircon SHRIMP Ⅱ chronology. Chinese Science Bulletin, 49: 823 – 834

Ludwig KR. 2001. Users manual for Isoplot/Ex rev. 2.49. Berkeley Geochronology Centre Special Publication. No. 1a, 56

Sengor AMC, Natal'in BA and Burtman VS. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. Nature, 364: 299 – 307

Stacey JS and Kramers JD. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. Earth and Planetary Science Letters, 26: 207 – 221

Vernon RH. 1983. Restite, xenoliths and microgranitiod enclave in granites. Journal and Proceedings of The Royal Society of New South Wales, 116: 77 – 103

Wang JB and Xu X. 2006. Post-collisional tectonic evolution and metallogenesis in northern Xinjiang, China. Acta Geologica Sinica, 80(1): 23 – 31 (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 deposits, North Junggar. Acta Petrologica Sinica, 25(4): 944 – 954 (in Chinese with English abstract)

Wang YW, Wang JB, Wang SL, Wang LJ, Ding RF and Pu KX. 2008. Magma mixing in the Xilikuduke area, Fuyun County, Xinjiang and its mineralization significance. Acta Geologica Sinica, 82(2): 221 – 233 (in Chinese with English abstract)

Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, Griffin WL, Meier M, Oberli F, Vonquadt A, Roddick JC and Speigel W. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace-element and REE analyses. Geostandard Newsletter, 19: 1 – 23

Wu YB and Zheng YF. 2004. Zircon genetic mineralogy and its constraints on the explaining of the U-Pb age. Chinese Science Bulletin, 49(16): 1589 – 1604 (in Chinese)

Zhao ZH, Bai ZH, Xiong XL, Mei HJ and Wang YX. 2000. Geochemistry of alkali-rich igneous rocks of Northern Xinjiang and its implications for geodynamics. Acta Geologica Sinica, 74(2): 321 – 328

附中文参考文献

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

刘成东,莫宣学,罗照华,喻学惠,谌宏伟,李述为,赵欣. 2004. 东昆仑壳-幔岩浆混合作用:来自锆石 SHRIMP 年代学的证据. 科学通报,49(6): 596 – 602

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钼铜矿床地质与成矿流体. 岩石学报, 25(4): 944 – 954

王玉往,王京彬,王书来,王莉娟,丁汝福,蒲克信. 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

吴元保,郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报,49(16): 1589 – 1604