

文章编号: 0258-7106(2014)02-0361-12

# 西藏雄村斑岩铜金矿床Ⅲ号矿体岩浆岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素及微量元素组成\*

黄勇<sup>1</sup>, 唐菊兴<sup>2</sup>, 张丽<sup>1</sup>, 郎兴海<sup>3</sup>

(1 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3 成都理工大学, 四川 成都 610081)

**摘要** 对雄村斑岩矿集区新发现的Ⅲ号矿体开展了斑岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄、原位 Hf 同位素以及微量元素分析。结果显示: Ⅲ号矿体的角闪石英闪长玢岩与石英闪长斑岩侵位时代相近, 分别为 $(171.2 \pm 2.2)$  Ma ( $1\sigma$ , MSWD=2.5) 和 $(171.0 \pm 1.9)$  Ma ( $1\sigma$ , MSWD=1.8), 形成时代与 I 号和 II 号矿体中的斑岩体类似; 角闪石英闪长玢岩的 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$  介于 0.282 959~0.283 162 之间,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  介于 10.217~17.436 之间, 二阶段模式年龄为 95~559 Ma; 石英闪长斑岩 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$  介于 0.282 949~0.283 123 之间,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  为 10.015~16.207, 二阶段模式年龄为 220~577 Ma。锆石原位 Hf 同位素结果表明角闪石英闪长玢岩与石英闪长斑岩的源区为亏损地幔, 与新特提斯洋向北俯冲的岛弧环境有关。角闪石英闪长玢岩、石英闪长斑岩的锆石 U-Pb 年龄与结晶温度  $T_z$  及与 Yb/Nd、Nb/Ta、Th/U 比值的关系统显示, 起源于亏损地幔的岩浆上涌过程中并没有经历过岩浆混合以及同化混染作用, 同时石英闪长斑岩晚期阶段明显比角闪石英闪长玢岩的 Th/U 比值增长范围大, 这可能与石英闪长斑岩岩浆更富含水, 并出溶较多的流体有关, 而岩浆-流体演化过程暗示着石英闪长斑岩与矿化关系更为密切, 这与地质观察事实相符。

**关键词** 地球化学; Hf 同位素; 锆石 U-Pb 年龄; 锆石微量元素; 雄村; 冈底斯; 西藏

中图分类号: P618.41; P618.51

文献标志码: A

## Zircon U-Pb dating and Hf isotopic and trace element composition of intrusions from No. Ⅲ orebody of Xiongacun porphyry copper-gold deposit, Tibet

HUANG Yong<sup>1</sup>, TANG JuXing<sup>2</sup>, ZHANG Li<sup>1</sup> and LANG XingHai<sup>3</sup>

(1 Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2 MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Institute of Mineral Resources, Beijing 100037, China; 3 Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

### Abstract

This paper reports the LA-ICP-MS zircon U-Pb age, Lu-Hf isotopic compositions and trace elements geochemistry of zircons from No. Ⅲ orebody of the Xiongacun porphyry copper-gold deposit. The results show that the ages of hornblende quartz diorite porphyrite and quartz diorite porphyry are  $(171.2 \pm 2.2)$  Ma (MSWD = 2.5) and  $(171.0 \pm 1.9)$  Ma (MSWD = 1.8) respectively, which are similar to the intrusion ages of No. I orebody and No. II orebody. The zircon Hf isotopic compositions of hornblende quartz diorite display  $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$  values ranging from 0.282 959 to 0.283 162, and  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values ranging from 10.217 to 17.436 with two-stage model ages being 95~559 Ma. The zircon Hf isotopic compositions of quartz diorite porphyrite display  $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$  values ranging from 0.282 949 to 0.283 123, and  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values ranging from 10.015 to

\* 本文得到国家自然科学基金(编号:41172077)和西藏大型矿床成矿专属性研究(编号:1212011221073)共同资助

第一作者简介 黄勇,男,1982年生,工程师,博士,矿物学、岩石学、矿床学专业。Email: yong.huang@hotmail.com

收稿日期 2013-05-28; 改回日期 2014-02-07。张绮玲编辑。

16.207 with two stage model ages being 220~577 Ma. The results indicate that the magma was derived from depleted mantle. The petrogenesis of intrusions was related to the Neo-Tethyan oceanic slab subduction towards the southern margin of the Asia Plate. U-Pb age and  $T_z$ , Yb/Nd, Nb/Ta, Th/U diagrams show that the magma hasn't experienced magma mixing and assimilation process. The Th/U increasing range of the late stage quartz diorite porphyry is higher than that of hornblende quartz diorite porphyrite, suggesting that the quartz diorite porphyry was more rich in fluid and more closely related to mineralization. The results agree with the geological observations.

**Key words:** geochemistry, zircon Hf isotope, zircon U-Pb age, trace elements of zircon, Xiongcu, Gangdese, Tibet

雄村斑岩铜金矿集区位于西藏谢通门县境内,东距日喀则市约 53 km,属雅鲁藏布江缝合带北侧的冈底斯造山带中段南缘。冈底斯造山带自石炭纪起,先后经历过 6 次造弧增生作用以及相关的弧-陆、陆-陆碰撞作用(潘桂堂等 2006),其中第 4 次早-中侏罗世造弧事件以及弧-陆俯冲作用以东段南侧发育的具有双峰式火山岩活动特征的叶巴火山弧为特征(耿全如等 2006)。在拉萨以西的尼木县附近以及乌郁盆地也见有早侏罗世岩浆活动的迹象,普遍认为上述产于冈底斯南缘的早-中侏罗世火山-岩浆岩形成于岛弧环境(Chu et al., 2006; 张宏飞等, 2007),但一直缺乏同期与弧-陆或弧-弧俯冲碰撞有关的弧岩浆环境斑岩铜矿的报道。雄村斑岩铜金矿床是目前冈底斯成矿带上唯一的产于早-中侏罗世的斑岩型铜金矿床(唐菊兴等, 2010; 杨志明等, 2011; 黄勇等 2013),近年来在该矿集区内先后发现了雄村 I 号、II 号、III 号矿体以及数个矿化体(如亚达、普钦木矿化体),并初步勾勒出一个极具找矿前景的与早-中侏罗世岩浆-热液有关的矿集区。本文通过对雄村矿集区新发现的 III 号矿体中与矿化关系密切的岩浆岩开展锆石阴极发光照相、LA-ICP-MS U-Pb 测年、原位 Hf 同位素以及微量元素分析,并将它们与 I 号和 II 号矿体的相关结果进行对比,探讨了矿区岩浆岩的形成时代、岩浆源区以及成岩过程。

## 1 地质背景

雄村矿集区出露的地层单元总共有 3 套,包括全新统洪积-冲积-崩积物、侏罗系复理石建造及下侏罗统火山-沉积岩,下侏罗统火山-沉积岩主要由安山质凝灰岩、火山角砾岩组成。安山质凝灰岩由微细粒至细粒的长石、黑云母、石英及微量的角闪石组成,局部见纹层结构,主要沿北西向分布,是矿区内

主要的赋矿围岩,据唐菊兴等(2010)及 Taft(2011)获得的年龄数据,该套火山岩形成于 186.9~181.8 Ma 之间。矿区内岩浆岩分布广泛,主要沿北西向分布,构成一条狭长的岩浆杂岩带(图 1)。依据前人及本次年代学研究结果,区内最早的岩浆活动为早-中侏罗世角闪石英闪长玢岩、石英闪长斑岩。角闪石英闪长玢岩斑晶由 5%~15% 的角闪石、40% 左右的斜长石以及少量的石英(<3%)组成。基质为石英、斜长石、角闪石、黑云母以及副矿物。石英闪长斑岩与角闪石英闪长玢岩的明显区别是含 5%~15% 的溶蚀状石英斑晶,斑晶粒径 0.5~1 cm,溶蚀石英斑晶呈近圆状、港湾状。石英闪长斑岩体蚀变强烈,并含有大量的石英-硫化物脉,蚀变与矿化围绕石英闪长斑岩呈环带状分布,因此,它是成矿斑岩体。早-中侏罗世岩浆岩被安山岩脉及闪长岩脉穿插,年代学资料表明安山岩脉形成于中侏罗世(郎兴海, 2012),闪长岩脉形成于中侏罗世晚期。安山岩/闪长岩脉宽度在 10 cm~10 m 之间,与矿区内脆性断层有关。矿区内出露面积最为广泛的岩浆岩为矿区东侧的始新世黑云母花岗闪长岩,其锆石年龄为  $(47.9 \pm 0.2)$  Ma(Taft et al., 2009),岩石新鲜无蚀变,由石英、钾长石、斜长石、黑云母、少量角闪石及副矿物组成,花岗等粒结构,并含有铁镁质包体。黑云母花岗闪长岩与早-中侏罗世火山-岩浆岩的接触带上发育有宽泛的角岩化以及矽卡岩化蚀变带,蚀变带最宽处达数十米。

雄村矿集区由 3 个主矿体及数个矿化体组成。3 个矿体沿北西向呈等距串珠状分布(图 1)。I 号矿体平面呈北西走向的透镜体状,长约 1.2 km,宽约 0.65 km,剖面上呈厚板状。F1 以及 F2 断层为成矿期后断层,夹持于其间的安山质凝灰岩以及石英闪长斑岩全岩矿化。II 号矿体矿化基本分布在角闪石英闪长玢岩和石英闪长斑岩中,矿区北东侧见有

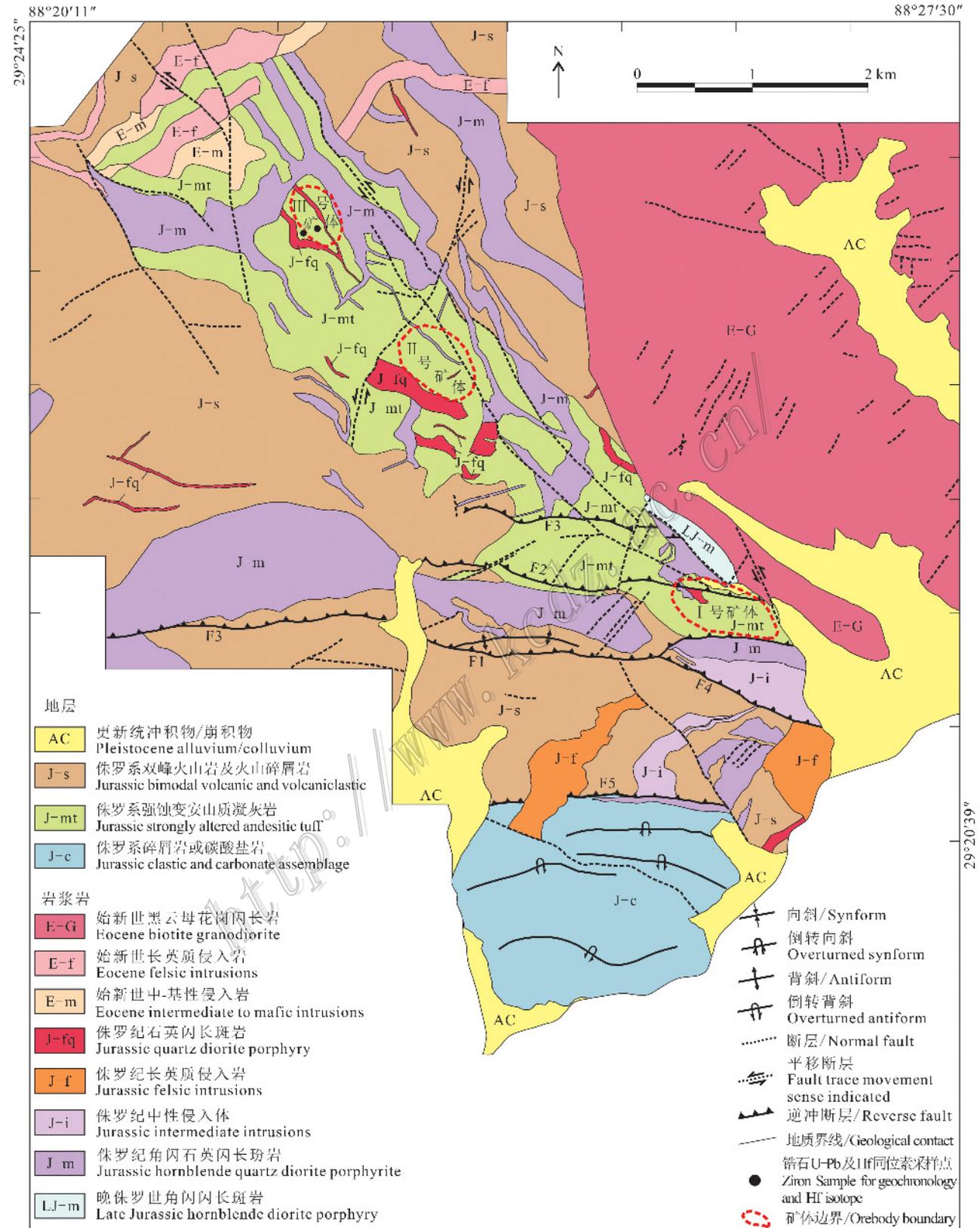


图 1 雄村矿区地质简图(据 Oliver, 2006; Tafti, 2011 修改)

Fig. 1 Geological map of the Xiongcu deposit(after Oliver, 2006; Tafti, 2011)

少量的似层状安山质凝灰岩。平面上,矿体呈北西走向的透镜体状,沿走向方向矿体长度约为1 km,深部延伸大于0.7 km。Ⅲ号矿体位于Ⅱ号矿体北西侧1.2 km处,其矿化特征与Ⅱ号矿体类似,矿化主要发生在角闪石英闪长玢岩和石英闪长斑岩中,矿化较为连续,但金品位较低,多数低于0.15 g/t,矿体中铜的平均品位为0.19%。

## 2 样品情况及测试方法

锆石样品采集自雄村Ⅲ号矿体钻孔中的角闪石英闪长玢岩(J-m)和石英闪长斑岩(J-fq),采样位置见图1。锆石由河北廊坊区域地质调查实验室按照标准流程挑选,将挑选好的待测锆石颗粒置于环氧树脂制靶,然后研磨至一半,通过锆石透射光、CL照相分析后选择无包裹体部位开展U-Pb定年、微量元素、Hf同位素分析。锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄及微量元素测试在武汉地质大学成矿过程与成矿动力学国家重点实验室完成,仪器型号为Agilent 7700型ICP-MS,激光斑束直径为32 μm,剥蚀深度为20~40 μm,采用He作为剥蚀物质的载气,测试过程中采用每隔5个测点中插入一个标准样品点,测试样品之前和之后分别插入2个91500和GJ-1测点。运用武汉地质大学开发的ICPMSData Cal 8.3处理信号,数据处理过程中采用91500标准锆石作为外标,<sup>29</sup>Si作为内标,样品协和图解和加权平均年龄采用

Isoplot 3.0完成(Ludwig, 2001)。

锆石原位Hf同位素在中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成,仪器为Neptune激光剥蚀等离子体质谱仪,实验过程采用He作为剥蚀物质载气,激光斑束为55 μm,使用国际GJ1标准锆石作为参考标样,2个岩石样品(J-m和J-fq)的分析点位见图2。相关仪器运行条件以及详细的测试分析过程见侯可军等(2007)文献。<sup>176</sup>Lu衰变系数采用 $1.865 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ (Scherer et al., 2001)。分析过程中锆石标准GJ1的<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf测试加权平均值为 $0.282\ 003 \pm 0.000\ 018$ ( $n=7$ ),与文献报道值(侯可军等, 2007; Elhlou et al., 2006)在误差范围内完全一致。在初始同位素<sup>176</sup>Hf/<sup>177</sup>Hf比值和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值计算中,采用Blichert-Toft等(1997)推荐的球粒陨石值。

## 3 分析结果

锆石LA-ICP-MS U-Pb测年结果见表1。角闪石英闪长玢岩J-m样品中的锆石多为短柱状,长宽比约为1.5~2.5之间,锆石粒径约为50~200 μm,除极少部分锆石具有核边结构(如13.1, 19.1)外(图2),绝大部分锆石具有清晰的环带结构。锆石U、Th含量变化较大, $w(\text{Th})$ 介于 $248 \times 10^{-6} \sim 1204 \times 10^{-6}$ , $w(\text{U})$ 介于 $552 \times 10^{-6} \sim 1526 \times 10^{-6}$ ,除19.1号点Th/U比值为0.24外,其余锆石测点的Th/U

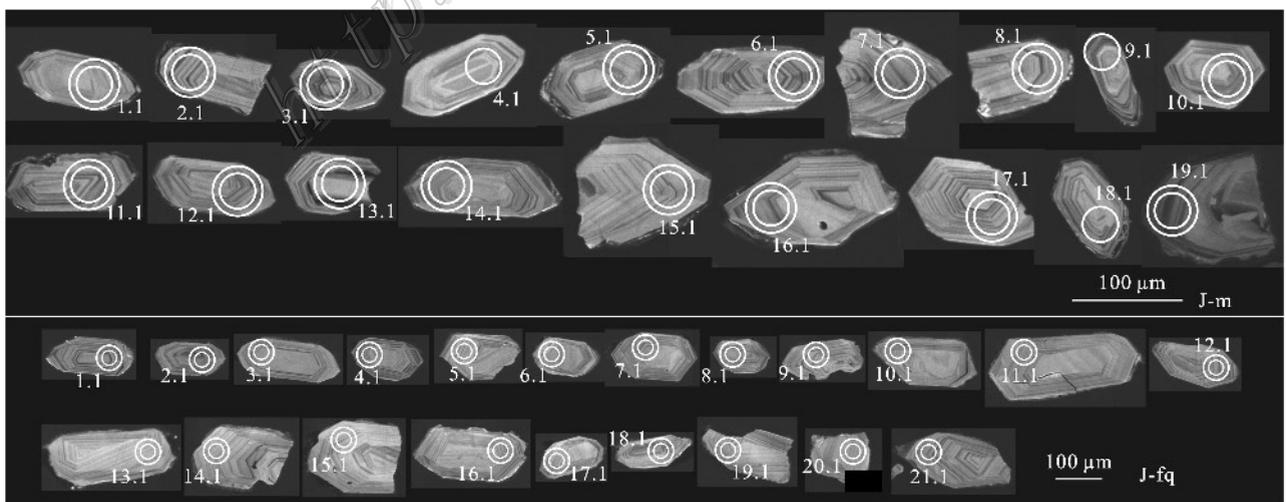


图2 锆石阴极发光图像(小实圈表示U-Pb测试点位,大实圈表示Hf同位素测试点位)

Fig. 2 CL images of zircons, small circles signifying the locations of U-Pb analyses, larger circles standing for Hf analyses, respectively

表 1 雄村Ⅲ号矿体角闪石英闪长玢岩(J-m)和石英闪长斑岩(J-fq)的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析数据

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of hornblende quartz diorite porphyrite (J-m) and quartz diorite porphyry (J-fq) from Xiongcu No. Ⅲ orebody

点号	$\epsilon(\text{B}) \times 10^{-6}$		同位素比值								年龄/Ma			
	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 $\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 $\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 $\sigma$	
J-m														
1.1	398	631	0.0565	0.0038	0.2175	0.0142	0.0286	0.0004	0.0091	199.8	11.9	181.9	2.8	
2.1	899	1251	0.0534	0.0027	0.1980	0.0098	0.0270	0.0004	0.0089	183.4	8.3	171.6	2.4	
3.1	889	1233	0.0485	0.0025	0.1796	0.0089	0.0269	0.0003	0.0082	167.7	7.6	171.0	2.2	
4.1	550	552	0.0650	0.0041	0.2308	0.0157	0.0268	0.0006	0.0084	210.9	12.9	170.3	3.9	
5.1	637	930	0.0495	0.0028	0.1801	0.0104	0.0264	0.0004	0.0080	168.2	8.9	168.0	2.7	
6.1	1204	1526	0.0465	0.0024	0.1660	0.0086	0.0260	0.0004	0.0078	155.9	7.5	165.3	2.4	
7.1	573	980	0.0479	0.0031	0.1802	0.0122	0.0271	0.0004	0.0085	168.3	10.5	172.2	2.8	
8.1	569	987	0.0568	0.0031	0.2151	0.0114	0.0275	0.0004	0.0096	197.8	9.5	174.6	2.5	
9.1	589	911	0.0484	0.0031	0.1820	0.0116	0.0274	0.0004	0.0091	169.8	10.0	174.1	2.7	
10.1	438	635	0.0589	0.0035	0.2201	0.0126	0.0274	0.0005	0.0080	202.0	10.5	174.2	3.2	
11.1	690	1057	0.0468	0.0026	0.1692	0.0096	0.0258	0.0004	0.0081	158.7	8.3	164.2	2.3	
13.1	248	369	0.0562	0.0040	0.2219	0.0128	0.0304	0.0007	0.0096	203.5	10.6	192.9	4.2	
14.1	599	1036	0.0482	0.0030	0.1829	0.0110	0.0273	0.0004	0.0083	170.6	9.4	173.6	2.5	
15.1	386	717	0.0560	0.0037	0.1999	0.0125	0.0265	0.0005	0.0078	185.1	10.5	168.9	3.0	
16.1	644	949	0.0510	0.0029	0.1913	0.0112	0.0269	0.0004	0.0084	177.7	9.5	170.8	2.7	
17.1	502	826	0.0527	0.0033	0.1939	0.0120	0.0268	0.0004	0.0086	179.9	10.2	170.2	2.7	
18.1	1149	1286	0.0478	0.0028	0.1783	0.0102	0.0270	0.0004	0.0078	166.6	8.8	171.6	2.4	
19.1	264	1122	0.0485	0.0024	0.2748	0.0135	0.0411	0.0005	0.0120	246.5	10.8	259.5	3.1	
J-fq														
1.1	357	731	0.0655	0.0045	0.2577	0.0197	0.0280	0.0005	0.0120	232.8	15.9	177.7	3.0	
2.1	1126	1235	0.0509	0.0026	0.1826	0.0091	0.0261	0.0004	0.0079	170.3	7.8	166.0	2.4	
3.1	743	1115	0.0580	0.0033	0.2093	0.0112	0.0266	0.0004	0.0085	193.0	9.4	169.4	2.6	
4.1	364	716	0.0594	0.0045	0.2217	0.0158	0.0278	0.0005	0.0105	203.3	13.1	176.8	3.0	
5.1	288	651	0.0631	0.0042	0.2299	0.0144	0.0269	0.0005	0.0081	210.1	11.9	171.3	3.3	
6.1	307	661	0.0583	0.0043	0.2120	0.0146	0.0272	0.0005	0.0081	195.2	12.2	172.9	3.3	
7.1	447	726	0.0512	0.0029	0.1832	0.0105	0.0258	0.0005	0.0077	170.8	9.0	164.1	2.9	
8.1	597	916	0.0572	0.0033	0.2222	0.0125	0.0282	0.0005	0.0100	203.8	10.4	179.4	3.2	
9.1	342	601	0.0606	0.0045	0.2235	0.0161	0.0274	0.0006	0.0091	204.8	13.4	174.1	3.6	
10.1	338	590	0.0559	0.0044	0.2019	0.0154	0.0269	0.0005	0.0081	186.8	13.0	171.4	3.2	
11.1	222	585	0.0554	0.0040	0.2057	0.0137	0.0277	0.0006	0.0094	189.9	11.6	176.4	3.6	
12.1	339	708	0.0585	0.0039	0.2128	0.0128	0.0271	0.0005	0.0094	195.9	10.7	172.3	3.2	
13.1	218	540	0.0560	0.0039	0.2044	0.0132	0.0272	0.0005	0.0093	188.9	11.1	172.7	3.2	
14.1	282	643	0.0544	0.0035	0.1967	0.0119	0.0268	0.0005	0.0087	182.4	10.1	170.4	3.3	
15.1	212	504	0.0628	0.0044	0.2260	0.0171	0.0260	0.0006	0.0096	206.9	14.1	165.8	3.5	
16.1	391	755	0.0565	0.0037	0.2003	0.0123	0.0263	0.0005	0.0082	185.4	10.4	167.2	3.0	
17.1	504	838	0.0596	0.0034	0.2166	0.0119	0.0265	0.0004	0.0085	199.1	9.9	168.6	2.5	
18.1	562	1051	0.0484	0.0030	0.1783	0.0109	0.0265	0.0004	0.0083	166.6	9.4	168.9	2.7	
19.1	316	706	0.0546	0.0038	0.2041	0.0148	0.0271	0.0005	0.0081	188.6	12.5	172.7	3.4	
20.1	132	394	0.0685	0.0062	0.2311	0.0200	0.0270	0.0007	0.0094	211.1	16.5	172.0	4.1	
21.1	422	865	0.0506	0.0035	0.1843	0.0134	0.0266	0.0005	0.0084	171.8	11.5	169.0	3.1	

比值介于 0.54~1.00。因此剔除上述 19.1、13.1 两个测点,以及协方差较低点 12.1,其余 16 个点的加权平均年龄为  $(171.2 \pm 2.2) \text{Ma}$  (1 $\sigma$ , MSWD=2.5),代表了角闪石英闪长玢岩的结晶年龄(图 3 左)。

石英闪长斑岩 J-fq 样品中的锆石形态特征与 J-m 样品中的锆石形态相似,均为短柱状,但粒径较粗

大约在 100~300  $\mu\text{m}$ (图 2), $\epsilon(\text{Th})$ 为  $132 \times 10^{-6}$ ~ $1126 \times 10^{-6}$ , $\epsilon(\text{U})$ 为  $394 \times 10^{-6}$ ~ $1235 \times 10^{-6}$ , Th/U 比值介于 0.34~0.91,韵律环带清晰,未发现继承核以及变质核边结构。21 颗锆石测点的加权平均年龄为  $(171.0 \pm 1.9) \text{Ma}$  (1 $\sigma$ , MSWD=1.8),代表了石英闪长斑岩的结晶年龄(图 3 右)。

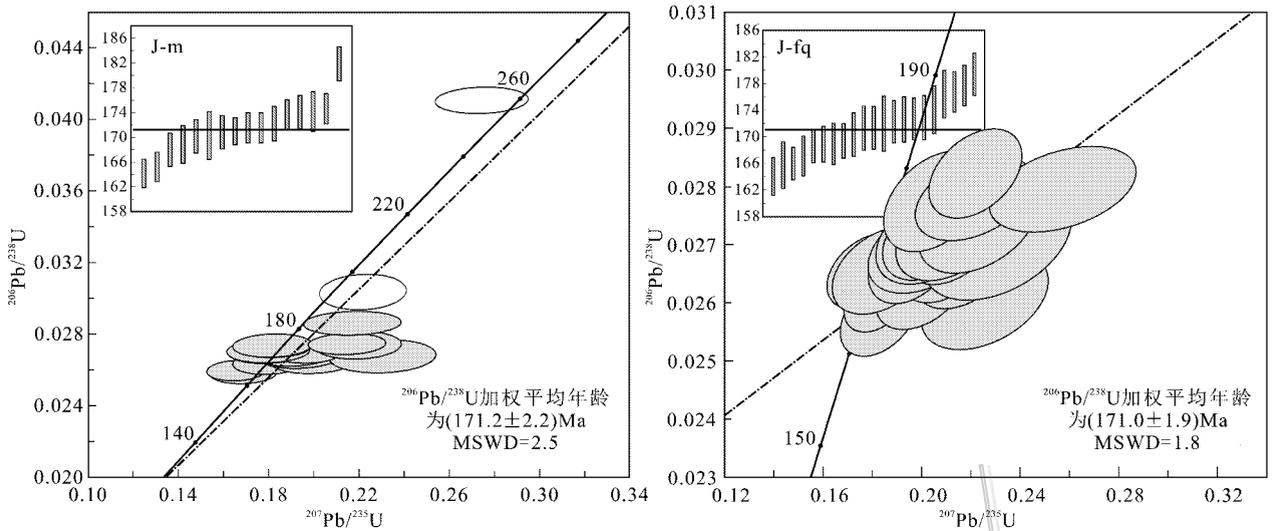


图3 雄村Ⅲ号矿体角闪石英闪长玢岩(左)和石英闪长斑岩(右)的锆石 U-Pb 协和年龄图解

Fig. 3 Concordia plot of zircon U-Pb ages of hornblende quartz diorite porphyrite (left) and quartz diorite porphyry (right) from Xiongcu No. III orebody

对上述锆石开展 LA-ICP-MS U-Pb 测年后,选择粒径较大的锆石进行锆石原位 Hf 同位素分析,锆石原位 Hf 同位素结果(表 2)显示 J-m 样品中绝大部分锆石  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值小于 0.003, J-fq 样品中绝大部分锆石  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值小于 0.002, 显示出锆石在结晶之后具有较少放射性成因 Hf 的累积;依据单颗粒锆石年龄计算得出 J-m 样品中 11 颗锆石的 ( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ) 介于 0.282 959 ~ 0.283 162 之间,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  介于 10.217 ~ 17.436 之间, 二阶段模式年龄为 95 ~ 559 Ma, J-fq 样品中 19 颗锆石的 ( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ) 介于 0.282 949 ~ 0.283 123 之间,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  为 10.015 ~ 16.207, 二阶段模式年龄为 220 ~ 577 Ma。如图 4 所示, 上述岩体 Hf 同位素组成位于亏损地幔演化线上或其附近, 由此判断Ⅲ号矿体中角闪石英闪长玢岩与石英闪长斑岩岩浆源区一致, 均来自亏损地幔或初生地壳物质。由于  $f_{\text{Lu}/\text{Hf}}$  均低于 -0.98, 显著小于大陆地壳, 因此二阶段模式年龄能更客观的反映岩体源区物质从亏损地幔被抽取的地壳平均存留年龄(曹殿华等 2009)。上述 Hf 亏损地幔模式年龄的计算采用现今的亏损地幔  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.283 25$  和  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0384$  (Vervoort et al., 1999),  $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ 。

本文在 LA-ICP-MS U-Pb 测年的同时, 还对锆石进行了原位 LA-ICP-MS 微量元素分析, 获得了角闪石英闪长玢岩 (J-m) 和石英闪长斑岩 (J-fq) 中锆石

Ti、Hf、Ta、Nb、Nd、Yb、Th、U、REE 成分(表 3)。

## 4 讨论

### 4.1 岩体形成时代与岩石成因

Ⅲ号矿体出露的角闪石英闪长玢岩、石英闪长斑岩的特征与Ⅰ号和Ⅱ号矿体类似, 金属矿化主要分布在角闪石英闪长玢岩和石英闪长斑岩体内, 两类岩体锆石结晶年龄在误差范围内一致, 并具有相似的 Hf 同位素组成, 且 Hf 同位素组成与Ⅰ号和Ⅱ号矿体中成矿斑岩体类似(黄勇, 2013), 锆石结晶年龄与辉钼矿 Re-Os 年龄一致( ~ 172 Ma )(黄勇等, 2013)。同时野外地质观察以及大量的岩芯编录结果显示, Ⅲ号矿体和Ⅱ号矿体内均观察到角闪石英闪长玢岩被石英闪长斑岩穿切的现象, 因此两类岩体应起源于同源岩浆房, 为基本同期的复式侵入体, 石英闪长斑岩的形成时代稍晚于角闪石英闪长玢岩的形成时代。角闪石英闪长玢岩和石英闪长斑岩高度亏损的 Hf 同位素组成指示岩浆源区为亏损地幔的部分熔融。

关于冈底斯成矿带南缘早-中侏罗世期间的岩浆事件的构造背景目前仍然存在争议, 主要的观点有: ① 受控于新特提斯洋向北俯冲的岛弧环境(张宏飞等 2007; Chu et al., 2006;); ② 班公湖-怒江洋盆向南俯冲的弧后裂谷环境(Zhu et al., 2011; Tafti,

表 2 雄村Ⅲ号矿体角闪石英闪长玢岩(J-m)和石英闪长斑岩(J-fq)的锆石 Hf 同位素分析数据  
Table 2 Hf isotopic data of zircons of hornblende quartz diorite porphyrite (J-m) and quartz diorite porphyry (J-fq) from Xionggun No. Ⅲ orebody

样号及测点	<i>t</i> /Ma	<sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf	2σ	<sup>176</sup> Lu/ <sup>177</sup> Hf	2σ	<sup>176</sup> Yb/ <sup>177</sup> Hf	2σ	( <sup>176</sup> Hf/ <sup>177</sup> Hf) <sub>ε<sub>Hf</sub>(<i>t</i>)</sub>	<i>T</i> <sub>DM</sub>	<i>T</i> <sub>DMC</sub>	<i>f</i> <sub>Lu/Hf</sub>	
J-m												
2.1	171.6	0.283140	0.000039	0.002604	0.000040	0.095129	0.001337	0.283132	16.495	164.2	160	-0.92156
5.1	168.0	0.283084	0.000043	0.001799	0.000016	0.071902	0.000590	0.283078	14.531	242.2	284	-0.94582
6.1	165.3	0.283168	0.000059	0.002017	0.000027	0.076001	0.001129	0.283162	17.436	119.8	95	-0.93926
7.1	172.2	0.283093	0.000061	0.002344	0.000053	0.078649	0.001776	0.283086	14.888	232.0	264	-0.9294
8.1	174.6	0.283013	0.000050	0.001767	0.000024	0.067313	0.001069	0.283007	12.163	345.2	442	-0.94676
10.1	174.2	0.283068	0.000036	0.001715	0.000017	0.065835	0.000634	0.283062	14.089	265.5	317	-0.94834
11.1	164.2	0.282968	0.000047	0.002882	0.000048	0.107073	0.001298	0.282959	10.217	424.0	559	-0.91318
12.1	170.0	0.282995	0.000040	0.002694	0.000015	0.100133	0.000727	0.282986	11.320	381.1	492	-0.91885
14.1	173.6	0.283024	0.000040	0.001629	0.000019	0.065748	0.000616	0.283018	12.526	328.8	417	-0.95094
15.1	168.9	0.283004	0.000046	0.001254	0.000003	0.052548	0.000190	0.283000	11.786	353.2	461	-0.96223
16.1	170.8	0.283022	0.000039	0.001033	0.000028	0.042836	0.001152	0.283019	12.488	325.5	418	-0.96888
J-fq												
1.1	177.7	0.282967	0.000030	0.001878	0.000018	0.079143	0.000994	0.282961	10.599	412.7	545	-0.94345
2.1	166.0	0.282987	0.000028	0.002210	0.000028	0.099699	0.001553	0.282980	11.022	387.3	508	-0.93342
3.1	169.4	0.283111	0.000027	0.001619	0.000027	0.068685	0.001045	0.283106	15.537	201.9	220	-0.95123
4.1	176.8	0.283011	0.000036	0.001542	0.000011	0.067389	0.000574	0.283006	12.159	346.2	444	-0.95357
5.1	171.3	0.283058	0.000039	0.001672	0.000012	0.073132	0.000628	0.283052	13.682	279.7	341	-0.94963
6.1	172.9	0.282958	0.000042	0.001616	0.000023	0.071943	0.001040	0.282953	10.210	422.8	566	-0.95131
7.1	164.1	0.283026	0.000037	0.001340	0.000016	0.061067	0.000905	0.283022	12.447	322.6	415	-0.95964
8.1	179.4	0.282970	0.000039	0.001551	0.000014	0.066603	0.000911	0.282965	10.764	405.4	535	-0.95327
9.1	174.1	0.283040	0.000040	0.001418	0.000010	0.061763	0.000465	0.283036	13.151	302.9	378	-0.9573
10.1	171.4	0.282952	0.000042	0.001185	0.000009	0.049441	0.000508	0.282949	10.015	426.5	577	-0.96431
11.1	176.4	0.283008	0.000040	0.001555	0.000027	0.067348	0.001293	0.283003	12.035	351.0	451	-0.95316
13.1	172.7	0.283128	0.000036	0.001427	0.000013	0.054131	0.000536	0.283123	16.207	177.1	180	-0.95701
15.1	165.8	0.282988	0.000037	0.001310	0.000005	0.060879	0.000344	0.282983	11.122	377.7	502	-0.96054
16.1	167.2	0.283008	0.000034	0.001542	0.000013	0.067752	0.000584	0.283003	11.841	350.9	457	-0.95354
17.1	168.6	0.283000	0.000039	0.001501	0.000015	0.065699	0.000937	0.282995	11.607	361.5	473	-0.9548
18.1	168.9	0.283040	0.000027	0.001516	0.000017	0.059979	0.000692	0.283035	13.022	304.1	382	-0.95433
19.1	172.7	0.282983	0.000020	0.001450	0.000012	0.062222	0.000662	0.282978	11.094	385.5	509	-0.95633
20.1	172.0	0.283050	0.000019	0.001195	0.000012	0.051182	0.000303	0.283046	13.468	287.5	356	-0.96402
21.1	169.0	0.283059	0.000020	0.001575	0.000013	0.065740	0.000572	0.283054	13.685	277.2	33	-0.95256

2011)。上述问题同样涉及到新特提斯洋何时打开,何时消减等热点问题。上个世纪 90 年代,众多学者提出新特提斯洋向北的初始俯冲时间是早白垩世,并指出桑日群火山岩是对这一事件的响应(Aitchison et al., 2000)。但随后在南冈底斯陆续发现了早-中侏罗世火山-岩浆岩活动的证据,人们普遍认为著名的叶巴组火山岩具有岛弧环境式双峰火山岩的特征,此外,休古嘎布、罗布莎岩体辉长岩 Sm-Nd 等时线年龄分别为 177 Ma 和 173 Ma(Zhou et al., 2002),在冈底斯东段超铁镁质岩中获得的辉石<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 冷却年龄为(200 ± 4) Ma(潘桂堂等, 2006),在乌郁盆地获得的黑云母花岗岩锆石 U-Pb 年龄值为(188 ± 20) Ma(Chu et al., 2006)。这些年代学结果表明冈底斯南缘存在一期早-中侏罗世岩浆活动。

在同位素方面,张宏飞等(2007)报道的冈底斯南缘同期变形花岗岩(~178 Ma)锆石 ε<sub>Hf</sub>(*t*)值为 +14.1 ~ +17.1,Chu 等(2006)测试的冈底斯南缘早侏罗世花岗岩(~188 Ma)锆石 ε<sub>Hf</sub>(*t*)值为 +10.4 ~ +16.8, Liang 等(2004)报道的雅鲁藏布江沉积碎屑物中早侏罗世锆石(182~175 Ma)ε<sub>Hf</sub>(*t*)值为 +15。上述强烈亏损的 Hf 同位素特征暗示这一期岩浆事件具有相同的亏损地幔岩浆源区特征与构造背景。而本文获得的年龄值与上述早-中侏罗世岩浆事件一致,因此部分学者提出新特提斯洋的初始俯冲应该提前到早侏罗世,甚至到晚三叠世,而新特提斯洋的裂离时间会更早(董彦辉等, 2006; 张宏飞等, 2007)。但部分学者对上述模式提出质疑(Zhu et al., 2011; Tafti, 2011),其中最难解释的问题在于长

表3 雄村Ⅲ号矿体角闪石英闪长玢岩(J-m)和石英闪长斑岩(J-fq)的锆石微量元素分析数据( $w_B/10^{-6}$ )

Table 3 Trace element data of hornblende quartz diorite porphyrite (J-m) and quartz diorite porphyry (J-fq) from Xionggun No. Ⅲ orebody ( $w_B/10^{-6}$ )

点号	Ti	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Th	U
J-m																					
2.1	4.23	2177	6.60	0.027	63.2	0.064	0.65	3.18	1.55	23.0	8.12	119	56.4	352	90.0	1229	290	31803	0.83	899	1251
3.1	8.43	2481	5.56	0.61	68.8	0.24	2.04	3.63	2.75	25.9	9.99	141	64.4	386	99.3	1378	325	32038	0.97	889	1233
5.1	8.05	1689	5.02	0.0000	50.1	0.018	0.91	1.13	1.70	18.0	6.63	96.9	45.3	267	68.9	948	224	32414	0.88	637	930
6.1	4.92	1910	5.10	0.041	62.1	0.11	0.83	2.57	2.07	20.9	7.15	110	48.8	294	77.5	1051	246	32387	0.88	1204	1526
7.1	4.86	2027	5.70	0.0000	52.7	0.059	0.98	2.71	1.40	21.8	7.74	110	52.9	323	86.1	1193	287	33568	0.81	573	980
8.1	6.87	1919	4.91	0.054	53.2	0.046	1.36	1.45	1.16	15.1	6.35	99.4	48.8	309	82.6	1171	284	33114	0.86	569	987
9.1	7.99	176	5.16	0.041	50.1	0.074	1.38	2.75	1.72	21.4	8.35	119	55.0	340	86.9	1199	280	32775	0.87	589	911
10.1	7.83	1475	3.88	0.0000	40.1	0.021	1.08	3.70	1.18	20.2	6.19	91.5	40.0	225	56.5	737	163	31628	1.42	438	635
11.1	4.52	2234	5.27	0.040	53.2	0.073	1.69	3.98	2.58	24.5	8.42	131	58.5	354	92.3	1244	296	31297	0.81	690	1057
14.1	4.60	1774	4.75	0.13	48.0	0.064	0.76	1.51	1.43	16.7	5.89	94.1	44.5	276	75.8	1049	258	31593	0.98	599	1036
16.1	5.19	1280	3.63	0.027	41.9	0.028	1.30	1.33	1.53	11.1	4.20	69.9	32.7	200	52.0	714	169	31671	0.73	644	949
17.1	8.21	1623	3.71	0.013	43.5	0.054	1.55	2.08	1.05	15.7	5.66	89.2	41.5	259	68.0	928	224	30704	0.79	502	826
18.1	9.63	2294	6.15	0.026	66.5	0.080	1.16	3.97	2.21	29.3	8.97	135	59.9	353	90.4	1160	278	29720	0.98	1149	1286
J-fq																					
2.1	9.7	1685	5.06	0.000	59.82	0.01	0.95	2.27	1.69	17.4	6.7	97	42	253	65	883	206	31526	0.71	1126	1235
3.1	7.8	2141	5.99	0.000	59.26	0.03	1.00	2.75	1.78	22.2	7.5	113	53	328	85	1168	282	31227	0.71	743	1115
4.1	10.4	1877	2.76	0.333	37.55	0.17	1.51	2.86	1.84	18.6	7.1	103	46	285	74	1046	257	30956	0.54	364	716
5.1	5.0	1569	3.54	0.000	37.34	0.01	0.27	2.09	1.09	12.7	5.5	76	39	244	67	952	233	30448	0.52	288	651
6.1	9.9	1914	5.05	0.000	38.84	0.06	0.91	2.68	1.59	17.8	7.5	112	49	287	76	1028	244	31108	0.85	307	661
7.1	1.5	2501	2.10	0.013	32.94	0.18	3.09	5.62	3.28	35.8	10.7	148	62	372	94	1264	291	31682	0.57	447	726
8.1	5.9	1645	3.85	0.000	44.13	0.05	0.85	2.14	1.29	17.1	5.7	90	41	250	68	934	224	28821	0.69	597	916
9.1	9.1	1946	2.27	0.599	30.81	0.19	2.44	4.88	2.32	26.6	8.4	114	52	295	77	1008	236	30735	0.38	342	601
10.1	6.1	1085	2.32	0.027	33.02	0.05	0.98	1.82	1.28	13.2	4.2	57	27	170	46	659	163	31943	0.49	338	590
11.1	3.7	1452	3.97	0.000	31.34	0.03	0.44	1.10	1.15	10.2	4.4	69	35	233	64	941	237	31428	0.71	222	585
12.1	3.0	1552	4.19	0.000	37.92	0.02	1.14	2.11	1.17	11.3	5.0	79	37	238	65	917	225	31302	0.58	339	708
13.1	7.7	1249	2.37	0.000	25.04	0.02	0.55	1.11	0.88	9.6	3.8	63	30	196	55	824	206	31821	0.52	218	540
14.1	9.7	1203	2.55	0.000	32.72	0.08	0.30	1.04	0.91	9.8	3.9	59	31	189	51	726	180	32083	0.59	282	643
15.1	9.8	1383	2.82	9.564	44.85	1.81	6.16	3.40	1.01	11.5	4.4	71	34	224	59	861	206	31360	0.69	212	504
16.1	8.2	1558	4.21	0.000	36.98	0.06	0.66	1.71	1.13	14.5	5.7	79	37	242	65	892	218	30795	0.79	391	755
17.1	3.6	1368	3.87	0.123	42.75	0.05	0.88	1.40	1.25	14.9	4.6	70	34	209	56	779	188	32270	0.69	504	838
18.1	6.8	1539	3.88	0.000	40.64	0.06	0.83	1.74	1.23	14.7	5.6	82	37	238	63	907	228	33527	0.75	562	1051
19.1	5.3	1642	4.22	0.000	33.71	0.04	0.11	1.38	1.19	12.7	4.9	83	39	257	71	1005	252	31039	0.57	316	706
20.1	5.8	949	1.71	0.000	19.21	0.01	0.40	1.27	0.71	7.3	3.0	46	23	150	44	627	163	33128	0.47	132	394
21.1	9.0	2070	6.51	0.000	49.60	0.02	0.51	1.45	1.16	17.9	6.5	101	49	322	87	1254	308	32984	0.90	422	865

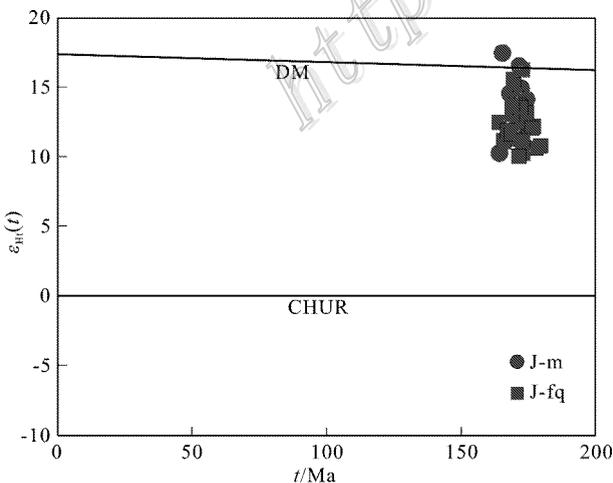


图4 雄村Ⅲ号矿体斑岩体  $\epsilon_{Hf}(t)-t$  图解

Fig. 4  $\epsilon_{Hf}(t)$  versus  $t$  diagram of porphyries from Xionggun No. Ⅲ orebody

达 150 Ma 期间的俯冲历史中(这里假设 200 Ma 初始俯冲 50 Ma 完全碰撞,平均俯冲消减速率为 5~10 cm/a),至少需要消减掉 7500 km 到 15 000 km 宽的洋壳,如此宽泛的广袤大洋需要多长时间才能打开?因此提出南缘早-中侏罗世火山-岩浆岩受控于班公湖-怒江洋盆向南俯冲的弧后裂谷环境。虽然 Zhu 等(2011)提出的模式图可以较好地解释上述问题,但同时也存在如下问题:①冈底斯南缘早侏罗世火山岩分布较为宽广,但形成时间相对集中,如叶巴组火山岩[(181±5)Ma,耿全如等,2006],雄村矿区安山质火山岩[(186.9~181.8)Ma],上述火山岩并未连续分布,而是相隔数百公里(约 322 km)。同时雄村矿区的火山-岩浆岩距离班公湖-怒江带近 300 km,考虑到板块的俯冲、碰撞作用,实际距离可能大于 500 km(董彦辉等,2006),因此很难用班公

湖-怒江洋盆向南俯冲的弧后裂谷环境来解释;②形成于裂谷环境的岩浆岩通常具有高碱特征(Wilson, 1989),而南冈底斯普遍分布的这一时期岩浆岩不具有高碱特征。另外,这一时期的岩浆岩明显亏损 HFSE 元素、富集大离子亲石元素的特征也与裂谷环境不符。同时,雅鲁藏布江蛇绿岩的研究也表明新特提斯洋在中侏罗世进入转折时期(McDermid et al., 2002; 钟立峰等, 2006; Zhou et al., 2002; 董彦辉等, 2006)。综上所述,笔者认为早-中侏罗世期间,新特提斯洋可能处于中心快速扩张期,而边缘逐渐消减,产生洋内俯冲,整体上处于威尔逊旋回的初始阶段到成熟阶段之间的过渡阶段,而雄村矿区火山-岩浆岩便起源于新特提斯洋向北俯冲的不成熟岛弧环境。

#### 4.2 锆石微量元素组成对成岩过程的约束

同位素分析测试结果限定了雄村矿区角闪石英闪长玢岩、石英闪长斑岩的岩浆起源与形成过程,而锆石原位 LA-ICP-MS 微量元素分析结果(表 3),则可通过其分布特征推测岩浆岩的成岩过程。

计算时剔除掉在年龄信号处理过程中协和度低于 85%,以及年龄计算过程中未参与权重计算和较老的年龄数据,如角闪石英闪长玢岩(J-m)的 1、4、12、13、15、19 号点以及石英闪长斑岩(J-fq)的 1 号点被剔除。其余符合要求的测点(表 3)采用 Watson 等(2005)通过实验结果推荐的  $T_i$  温度计计算方程式:  $\log(T_i/10^{-6}) = 6.01 \pm 0.03 - (5080 \pm 30)/T(K)$ , 计算出岩浆锆石的结晶温度  $T_z$ 。虽然 Ferriss 等(2008)指出,在压力大于 3.5 GPa 时该公式不适用,但Ⅲ号矿体的浅成岩体应在适用范围内,因此可以用  $T_i$  的含量估算岩浆锆石的结晶温度。除  $T_i$  外,本文还得到了锆石原位 Hf、Ta、Nb、Nd、Yb、Th、U、REE 的分析结果,其中 Th 与 U 以及 Nb 与 Ta 具有相似的地球化学特征,而 Yb/Nd、Nb/Ta 比值的增加可以指示 REE 的分馏。对筛选后的锆石 U-Pb 年龄与结晶温度  $T_z$ 、Yb/Nd、Nb/Ta、Th/U 比值进行了相关性研究,结果见图 5。

有效测点结果显示,角闪石英闪长玢岩的  $T_z$  以 700℃ 为界明显分为 2 段,上段温度高于 708℃,而下段温度低于 686℃(图 5a1),Yb/Nd(图 5a2)与 Th/U 比值(图 5a4)没有显示出明显的变化特征,但 Nb/Ta 比值显示出随时间的变新而逐渐升高的趋势。石英闪长斑岩  $T_z$ (图 5b1)与 Yb/Nd 比值(图 5b2)显示出随年龄的降低逐渐降低的趋势,Th/U 比值显示出先

降低后升高的趋势(图 5b4),Nb/Ta 比值没有明显的变化趋势(图 5b3)。

锆石的  $T_z$  值反映在锆石结晶温度上,显示出早期形成的角闪石英闪长玢岩有 2 组锆石结晶年龄,但 2 组锆石的环带宽度没有发现明显的变化,而锆石环带的宽窄主要受锆石结晶过程中的温度控制,高温环境下稀土元素与 U、Th 扩散速率高,因此环带较宽(Hanchar et al., 1993; 1995; Crofu et al., 2003),锆石环带特征与  $T_z$  值说明 50℃ 的结晶温度变化不足以引起锆石生长速率的明显变化,而引起结晶温度差异的原因可能包括岩浆混合、岩浆的脉动灌入、或者围岩的同化混染作用。前文已经否定了岩浆混合的可能性,地球化学特征也表明 Yb/Nd 比值不随时间变化而变化,Nb/Ta 比值则出现随时间升高变化的趋势(图 5a2、a3),因此也排除了围岩的同化混染,而此时早期岩浆的持续灌入发生在深部岩浆房。成矿期石英闪长斑岩的  $T_z$  随 U-Pb 年龄的降低而降低(图 5b1),如上所述,引起岩浆冷却的原因也可能是正常的岩浆演化冷却过程,或同化温度较低的围岩,但 Yb/Nd 比值随时间的变化而升高,而 Nb/Ta 比值没有显示出相关性(图 5b2、b3),表明晚期阶段也没有经过围岩的同化混染,而是以岩浆自身的降温过程为主。同时两类岩浆岩结晶晚期 Th/U 比值逐渐升高(图 5a4、b4),Th/U 比值对岩浆富水环境反映灵敏(Miller et al., 2003),而这一过程可能与熔浆发生过流体出溶有关,石英闪长斑岩晚期阶段明显比角闪石英闪长玢岩的 Th/U 比值增长范围大,可能与石英闪长斑岩岩浆更富含水,并出溶较多的流体有关,而岩浆-流体演化的这一过程同样暗示石英闪长斑岩与矿化关系密切,分析结果与地质现象相吻合。

## 5 结 论

(1) 雄村Ⅲ号矿体角闪石英闪长玢岩成岩时代为  $(171.2 \pm 2.2) \text{ Ma}$  ( $1\sigma$ , MSWD=2.5),石英闪长斑岩侵位时代为  $(171.0 \pm 1.9) \text{ Ma}$  ( $1\sigma$ , MSWD=1.8)。两类岩体的 Hf 同位素组成类似,角闪石英闪长玢岩 ( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ) 为 0.282 959~0.283 162,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  介于 10.217~17.436 之间,二阶段模式年龄为 95~559 Ma,石英闪长斑岩样品的 ( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ) 介于 0.282 949~0.283 123 之间,  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  为 10.015~16.207,二阶段模式年龄为 220~577 Ma,均具有高

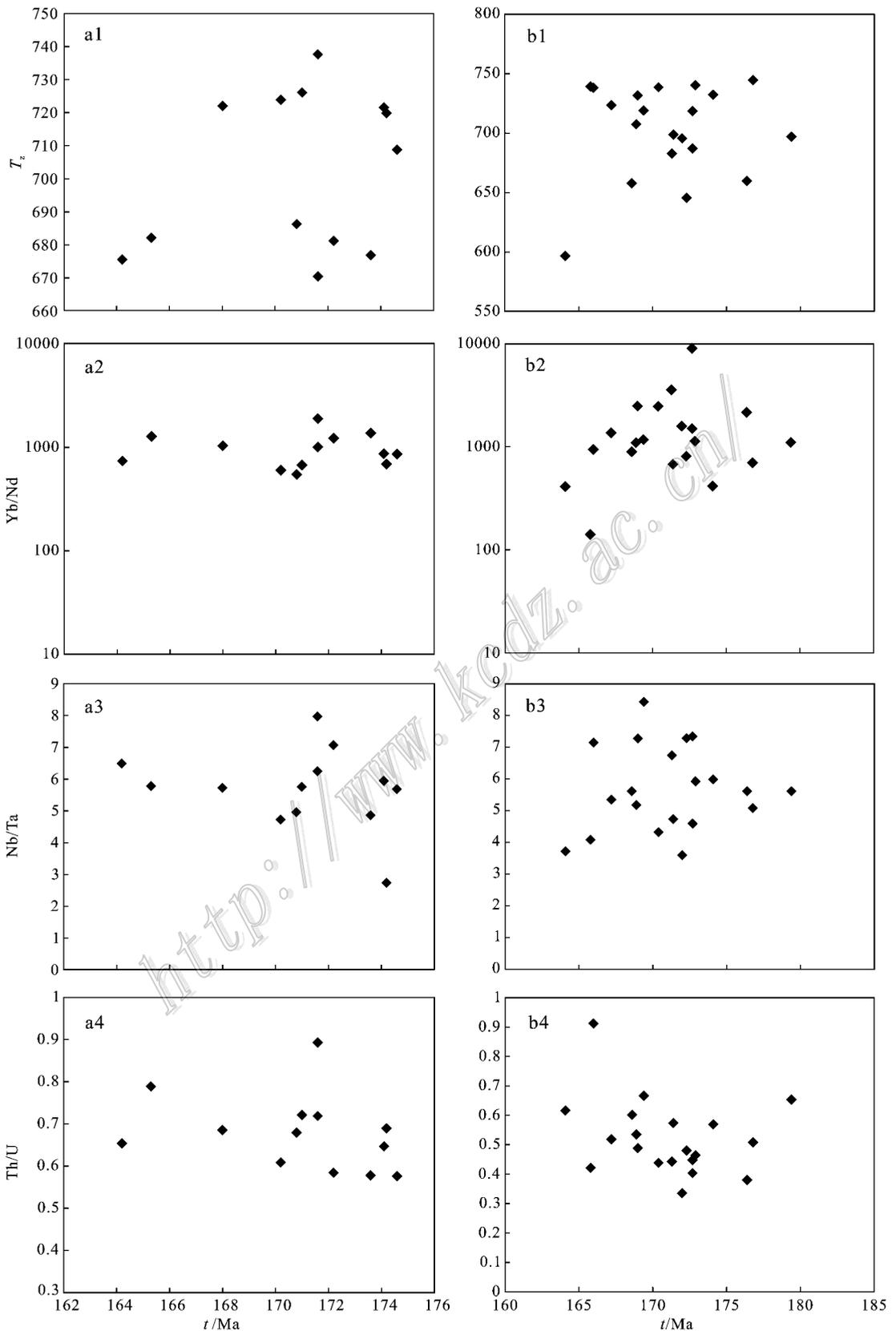


图 5 雄村Ⅲ号矿体角闪石英闪长玢岩(左)与石英闪长斑岩(右)锆石  $T_z$ 、微量元素比值与 U-Pb 年龄关系  
 Fig. 5  $T_z$ , trace element ratio versus U-Pb age diagrams of zircons of hornblende quartz diorite porphyrite (left) and quartz diorite porphyry (right) from Xiongcu No. III orebody

度亏损的 Hf 同位素组成,以及相对年轻的二阶段模式年龄。

(2) 锆石原位 Hf 同位素以及微量元素测试结果显示,起源于深部同一岩浆房的角闪石英闪长玢岩和石英闪长斑岩均起源于亏损地幔的部分熔融,受控于新特提斯洋向北俯冲的不成熟岛弧环境,代表了冈底斯成矿带另外一起重要的成矿事件。

志 谢 感谢两位匿名评审专家对本文提出的宝贵意见。

#### 参考文献/References

曹殿华,王安建,黄玉凤,张维,侯可军,李瑞萍,李以科. 2009. 中甸弧雪鸡坪斑岩铜矿含矿斑岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成[J]. 地质学报, 83(10): 1430-1435.

董彦辉,许继峰,曾庆高,王强,毛国政,李杰. 2006. 存在比桑日群弧火山岩更早的新特提斯洋俯冲韵律么[J]? 岩石学报, 22(3): 661-668.

耿全如,潘桂堂,王立全,朱弟成,廖忠礼. 2006. 西藏冈底斯带叶巴组火山岩同位素地质年代[J]. 沉积与特提斯地质, 26(1): 1-7.

侯可军,李延河,邹天人,曲晓明,石玉若,谢桂青. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 23(10): 2595-2604.

黄勇. 2013. 西藏谢通门县雄村斑岩铜金矿床地质特征及成因研究[D]. 博士论文.

黄勇,唐菊兴,丁俊,张丽,郎兴海. 2013. 西藏雄村斑岩铜矿辉钼矿 Re-Os 同位素体系[J]. 中国地质, 40(1): 301-310.

郎兴海. 2012. 西藏雄村斑岩铜金矿集区成矿作用成矿预测[D]. 博士论文.

潘桂堂,莫宣学,侯增谦,朱弟成,王立全,李光明,赵志丹,耿全如,廖忠礼. 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. 岩石学报, 22(3): 521-533.

唐菊兴,黎风信,李志军,张丽,唐晓倩,邓起,郎兴海,黄勇,姚晓峰,王友. 2010. 西藏谢通门县雄村铜金矿主要地质体形成的时限: 锆石 U-Pb、辉钼矿 Re-Os 年龄的证据[J]. 矿床地质, 29(3): 461-475.

杨志明,侯增谦,江迎飞,张洪瑞,宋玉财. 2011. 西藏驱龙矿区早侏罗世斑岩的 Sr-Nd-Pb 及锆石 Hf 同位素研究[J]. 岩石学报, 27(7): 2003-2010.

张宏飞,徐旺春,郭建秋,宗克清,蔡宏明,袁洪林. 2007. 冈底斯南缘变形花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成: 新特提斯洋早侏罗世俯冲作用的证据[J]. 岩石学报, 23(6): 1347-1353.

钟立峰,夏斌,周国庆,张玉泉,王冉,韦栋梁,杨之青. 2006. 藏南罗布莎蛇纹岩辉绿岩中锆石 SHRIMP 测年[J]. 地质论评, 52

(2): 224-229.

Aitchison J C, Zhu Badeng, Davis A M, et al. 2000. Remnants of Cretaceous intra-oceanic subduction system within the Yarlung-Zangbo suture (southern Tibet) [J]. Earth and Planetary Science Letters, 183: 231-244.

Blichert-Toft J and Albarede F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system [J]. Earth and Planetary Science Letters, 148: 243-258.

Chu M F, Chung S L, Song B, Liu D, O'Reilly S Y, Pearson N J, Ji J and Wen D J. 2006. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of southern Tibet [J]. Geology, 34: 745-748.

Crofu F, Hancher J M, Hoskin P W O and Kinny P. 2003. Atlas of zircon textures [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53: 469-500.

Elhous S, Belousova E and Griffin W L. 2006. Trace element and isotopic composition of GJ-red zircon standard by laser ablation [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, (Suppl): A158.

Ferriss E D A, Essene E J and Becker U. 2008. Computational study of the effect of pressure on the Ti-in-zircon geothermometer [J]. European Journal of Mineralogy, 20(5): 745-755.

Hancher J M and Miller C F. 1993. Zircon zonation patterns as revealed by cathodoluminescence and backscattered electron images: Implications for interpretation of complex crustal histories [J]. Chemical Geology, 110: 1-13.

Hancher J M and Rudnick R L. 1995. Revealing hidden structures: The application of cathodoluminescence and back-scatter electrical imaging to dating zircons from lower crustal xenoliths [J]. Lithos, 36: 289-303.

Liang Y H, Chung S L, Liu D, O'Reilly S Y, Chu M F, Ji J, Song B and Pearson N J. 2004. Detrital zircon study along the Tsangpo River, SE Tibet [J]. Eos (Transactions, American Geophysical Union), v. 85, abs. T53A-0466.

Ludwig K R. 2001. Users manual for isoplot/Ex (rev. 2.49): A geochronological toolkit for Microsoft Excel [R]. Berkeley Geochronology Center, Special Publication No. 1a: 55.

McDermid I R C, Aitchison J C and Davis A M. 2002. The Zedong terrane: A late Jurassic intra-oceanic magmatic arc within the Yarlung-Tsangpo suture zone, southeastern Tibet [J]. Chemical Geology, 187: 267-277.

Oliver J. 2006. Geological mapping of the Xietongmen property and continuous areas, Tibet, People's Republic of China [R]. Private Report to Continental Minerals Corp. Xizang (Tibet) Tianyuan Minerals Exploration Ltd.

Miller C, Thfni M, Frank W, Schuster R, Melcher F and Meisel T. 2003. Geochemistry and tectono-magmatic affinity of the Yungb-

- waophiolite, SW Tibet [ J ]. *Lithos*, 66 : 155-172.
- Scherer E, Munker C and Mezger K. 2001. Calibration of the lutetium hafnium clock [ J ]. *Science*, 293 : 683-687.
- Tafti R and Mortensen J K. 2009. Jurassic U-Pb and Re-Os ages for the newly discovered Xietongmen Cu-Au porphyry district, Tibet, PRC : Implications for metallogenic epochs in the southern Gangdese belt [ J ]. *Econ. Geol.*, 104 : 127-136.
- Tafti R. 2011. Metallogeny, geochronology and tectonic setting of the Gangdese belt, southern Tibet, China [ D ]. PHD thesis.
- Vervoort J D and Blichert-Toft J. 1999. Evolution of the depleted mantle Hf isotope evidence from juvenile rocks through time [ J ]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63 : 533-556.
- Watson E B and Harrison T M. 2005. Zircon thermometer reveals minimum melting conditions on earliest Earth [ J ]. *Science*, 308 : 841-844.
- Wilson M. 1989. *Igneous petrogenesis* [ M ]. London : Allen and Unwin.
- Zhou S, Mo X X and Mahoney J J. 2002. Geochronology and Nd and Pb isotope characteristics of gabbro dikes in the Luobush ophiolite, Tibet [ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 47 : 143-146.
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, Mo X X, Chung S L, Hou Z Q, Wang L Q and Wu F Y. 2011. The Lhasa Terrane : Record of a microcontinent and its histories of drift and growth [ J ]. *Earth and Planetary Science Letters*, 301 : 241-255.

<http://www.kcdz.ac.cn/>