

西藏波龙斑岩铜金矿床成矿斑岩年代学、 岩石化学特征及其成矿意义

陈华安¹⁾, 祝向平¹⁾, 马东方¹⁾, 黄瀚霄¹⁾, 李光明¹⁾, 李玉彬²⁾, 李玉昌²⁾, 卫鲁杰²⁾, 刘朝强²⁾

1) 成都地质矿产研究所, 成都, 610081;

2) 西藏地质矿产勘查开发局第五地质大队, 青海格尔木, 816000

内容提要:波龙斑岩铜金矿床是近年来在青藏高原中部发现的最大的斑岩型矿床, 波龙矿床发育 3 期花岗闪长斑岩, 前两期花岗闪长斑岩是波龙矿床的成矿斑岩。本文开展了波龙矿床 3 期斑岩锆石 U-Pb 年龄、全岩岩石地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素组成分析。锆石 U-Pb 测年结果显示, 3 期斑岩在 119~120 Ma 集中侵位。前两期花岗闪长斑岩均富集轻稀土、大离子亲石元素, 亏损重稀土、高场强元素, Eu 异常不明显, 显示出岛弧岩浆岩的特征; 前两期花岗闪长斑岩的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i 值分别为 0.70562~0.70711 和 0.70567~0.70850, $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$ 分别为 -4.0~-3.1 和 -8.0~-2.4, $\epsilon_{\text{Hf}(t)}$ 值分别变化于 2.5~6.9 和 3.3~6.9 之间, 表明前两期花岗闪长斑岩起源于新生的下地壳; 第三期花岗闪长斑岩也具有岛弧岩浆岩的岩石化学特征, 但其具有较高 $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$ 值 (-0.7~-0.2) 和 $\epsilon_{\text{Hf}(t)}$ 值 (1.3~12.2), 可能表明第三期花岗闪长斑岩也起源于下地壳, 但有更多幔源物质混入。波龙斑岩铜金矿床形成于班公湖-怒江洋壳向北俯冲末期, 其成岩-成矿可能与洋壳俯冲密切相关。

关键词:波龙斑岩铜矿; 班公湖-怒江成矿带; 岩浆演化; 锆石 U-Pb 年龄

波龙斑岩铜金矿床位于西藏阿里地区改则县境内, 紧邻多不杂斑岩铜金矿床, 是近几年在青藏高原中部发现的最大的斑岩铜矿。波龙矿床被确定为独立的斑岩铜矿后备受关注, 但波龙矿床的研究工作尚显不足, 目前仅开展了波龙矿床的成矿年龄(祝向平等, 2011)、地表第三期花岗闪长斑岩成岩年龄(余宏全等, 2009; Li jinxiang et al., 2011)等方面研究, 本文在波龙钻孔观察的基础上, 厘定出波龙矿床各期斑岩侵入的序次, 开展了各期斑岩的年代学、岩石化学和 Sr-Nd-Hf 同位素组成分析, 研究波龙矿床的岩浆演化与成矿动力学过程。

1 地质背景

中生代班公湖-怒江洋向南(潘桂棠等, 2004, 2006; 邱瑞照等, 2004; Zhu Dicheng et al., 2009)和向北俯冲(Shi Rendeng et al., 2007, 2008), 诱发了燕山期大规模岩浆作用, 伴生了大量铜、铁、金等矿床, 构成了班公湖-怒江成矿带(曲晓明等, 2006)。伴随班公湖-怒江洋侏罗纪向北俯冲(Shi

Rendeng et al., 2007, 2008), 在南羌塘陆块南缘增生形成了楔形增生体(李光明等, 2011), 发育大量中酸性侵入体, 构成了班公湖-怒江西段的构造-岩浆弧。波龙和多不杂斑岩铜金矿床所属的多龙矿集区就位于班公湖-怒江西段的构造-岩浆弧中。

多龙矿集区内主要出露的地层有上三叠统日干配组(T_3r)碳酸盐岩, 下侏罗统曲色组(J_1q)浅变质泥质砂岩夹基性火山岩、硅质岩, 中侏罗统色哇组(J_2s)为互层的粉砂岩与泥岩, 下白垩统美日切组(K_1m)紫红色安山岩、英安岩和新近系中新统的康托组(N_1k)砾岩, 地表多有第四系残坡积物覆盖。多龙矿集区内先后发育 4 组逆断层, 依次为近东西向北倾逆断层、北东向逆断层、北西向逆断层和近东西向南倾逆断层。矿集区内发育多个斑岩侵入体, 多沿北东向和北西向逆断层侵位; 已发现的多不杂、波龙、那顿、拿若等矿床(点)均沿北东向断层展布(图 1), 与沿北东向逆断层侵位的中酸性斑岩侵入体关系密切, 表明北东向断层为多龙矿集区的控岩-控矿断层。

注: 本文为国家 973 项目“青藏高原南部大陆聚合与成矿作用”(2011CB403105)、国家自然科学基金项目(编号 41202049, 41272091)和中国地质调查局地质矿产调查评价专项(1212011086074, 12120113037000)联合资助成果。

收稿日期: 2012-07-16 改回日期: 2013-05-26 责任编辑: 郝梓国, 黄敏。

第一作者简介: 陈华安, 男, 1964 年生。本科, 高级工程师, 从事地质普查与勘探工作。电话: 13541311005, Email: ckscha@sina.com。通讯作者: 祝向平, 男, 1979 年生。博士, 高级工程师, 从事矿物学、岩石学、矿床学研究。电话: 13980890287, Email: zhuxiangping3@gmail.com。

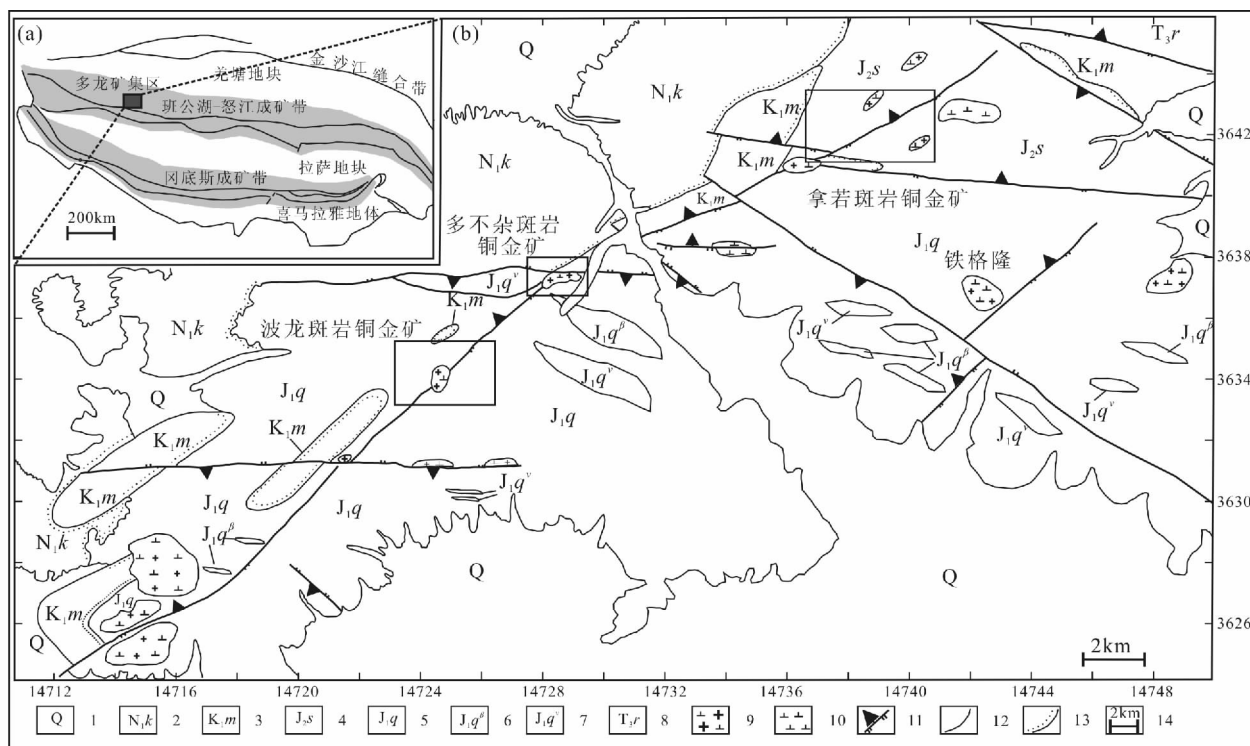


图 1 西藏多龙矿集区构造背景简图(a)和多龙矿集区地质简图(b)

Fig. 1 Tectonic setting map of Duolong metallogenic district (a) and geological schematic map of Duolong metallogenic district (b) in Tibet

1—第四系沉积物;2—中新统康托组;3—下白垩统美日切错组;4—中侏罗统色哇组;5—下侏罗统曲色组;6—下侏罗统曲色组玄武岩;7—下侏罗统曲色组辉长岩;8—上三叠统日干配错组;9—花岗闪长斑岩;10—闪长岩;11—逆断层;12—地质界线;13—不整合界线;14—比例尺
1—Quaternary; 2—Miocene Kangtuo Formation; 3—Lower Cretaceous Meiriquicuo Formation; 4—Middle Jurassic Sewa Formation; 5—Lower Jurassic Quse Formation; 6—Lower Jurassic basalt; 7—Lower Jurassic gabbro; 8—Upper Triassic Riganpeicuo Formation; 9—granodiorite porphyry; 10—diorite; 11—thrust faults; 12—geological boundary; 13—unconformity geological boundary; 14—scale

2 矿床地质特征

波龙矿床位于多龙矿集区中偏南部,矿床内出露的地层主要为下侏罗统曲色组(J_1q)和下白垩统美日切错组(K_1m)。下侏罗统曲色组(J_1q)主要为变长石石英砂岩,是波龙矿床的主要围岩;下白垩统美日切错组(K_1m)岩性为安山岩。

依据波龙斑岩铜金矿床钻孔中发现的斑岩中斑晶含量及其矿物组成、岩石的交切关系、发育的蚀变类型及特征,波龙矿床内发育的斑岩可分为3期,均为花岗闪长斑岩。3期花岗闪长斑岩中斑晶均含有斜长石、石英、角闪石、黑云母等,基质为隐晶质。角闪石多黑云母化、绿泥石化,仅保留其假象;斜长石多绢云母化;黑云母多局部绿泥石化、绢云母化。第一期花岗闪长斑岩斑晶含量较高,可达40%~50%,且斑晶粒径较大,较大的角闪石斑晶粒径可达1cm(图2a);第二期花岗闪长斑岩斑晶含量20%~30%,斑晶粒径多小于5mm(图2b);第二期花岗闪

长斑岩中可见第一期花岗闪长斑岩的捕虏体(图2d)。两期花岗闪长斑岩均在钻孔中发现,均发育钾化,叠加绢英岩化。晚期侵位的第三期花岗闪长斑岩在矿床中部地表见有露头,部分钻孔内也可见,斑晶含量10%~15%,主要为斜长石(2~4mm,8%~10%)和石英(0.5~2mm,3%~5%),含有少量黑云母(1~2mm,1%~3%)和角闪石,基质为隐晶质;多有强绢云母化、高岭石化,伴生大量黄铁矿矿化,极少见黄铜矿矿化(图2c)。

波龙矿床为半隐伏矿床,地表蚀变分带不明显,仅发育明显绢英岩化,可划分为强绢英岩化带和弱绢英岩化带(图3),强绢英岩化带主要表现为强硅化、绢云母化、褐铁矿化、绿泥石化,伴生较多石英-硫化物(硫化物多褐铁矿化)脉;弱绢英岩化主要蚀变矿物组合为石英、绢云母、褐铁矿、绿泥石,局部可见少量绿帘石化,极少见石英-硫化物脉产出。强绢英岩化带位于矿床中部,由地表向深部,由强绢英岩化带过渡到以钾长石化、黑云母化为特征的钾化带

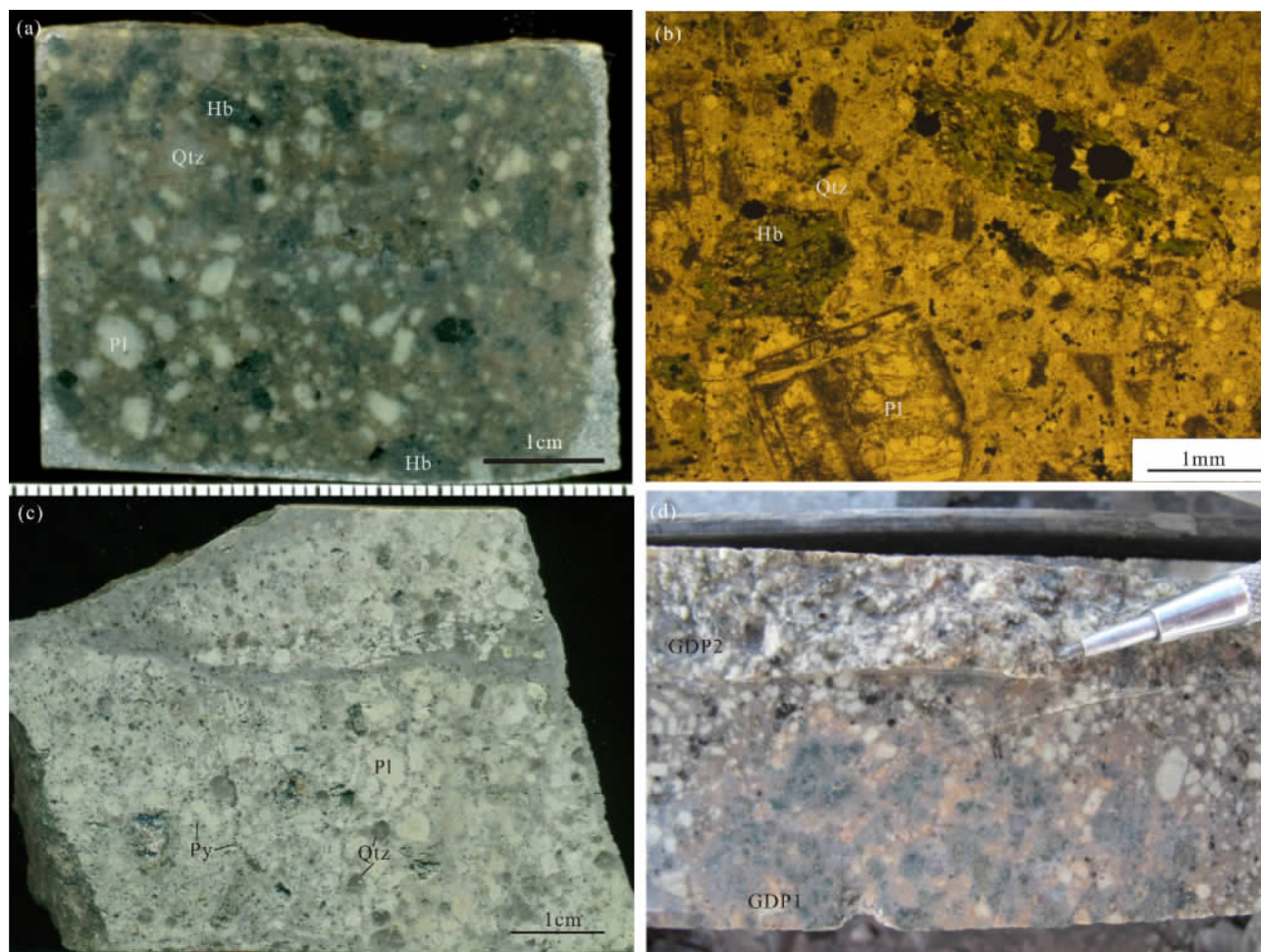


图 2 西藏波龙斑岩铜金矿床各期斑岩照片

Fig. 2 Photographs of porphyries in Bolong porphyry deposit, Tibet

(a)—第一期花岗闪长斑岩(GDP1);(b)—第二期花岗闪长斑岩显微照片(GDP2);(c)—第三期花岗闪长斑岩(GDP3);

(d)—第二期花岗闪长斑岩(GDP2)中含第一期花岗闪长斑岩(GDP1)捕虏体;Hb—角闪石;Pl—斜长石;Qtz—石英;Py—黄铁矿

(a)—The first stage of granodiorite porphyry; (b)—the second stage of granodiorite porphyry; (c)—the third stage of granodiorite porphyry; (d)—the first stage of granodiorite porphyry xenolith in the second stage of granodiorite porphyry; Hb—hornblende; Pl—plagioclase; Qtz—quartz; Py—pyrite

(图 3), 并伴生绿泥石化、黄铜矿化、磁铁矿化和较多石英-磁铁矿脉、石英-黄铜矿±黄铁矿脉等。波龙矿床的主要矿石矿物有黄铜矿、黄铁矿、辉钼矿等硫化物, 在变长石石英砂岩中主要以石英-硫化物细脉呈网脉状产出, 在花岗闪长斑岩中以浸染状矿化和石英+硫化脉产出。

3 样品与测试方法

第一期花岗闪长斑岩岩石样品均采于钻孔 ZK15502 中, 第二期花岗闪长斑岩岩石样品采于 ZK15502 和 ZK17103 中, 第三期花岗闪长斑岩岩石样品采于钻孔 ZK15507 中, 其中第一期和第二期花岗闪长斑岩发育钾化, 部分样品叠加较强绢英岩化,

第三期花岗闪长斑岩普遍发育较强绢英岩化。

锆石单矿物挑选在河北廊坊物化勘查研究所采用浮选和电磁选方法完成的。锆石阴极发光(CL)显微照相在西北大学电子探针实验室完成, 工作电压为 15kV, 电流为 4nA。锆石 U-Pb 同位素定年在 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用 LA-ICP-MS 分析完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal (Liu Yongsheng et al., 2008, 2010a)完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法

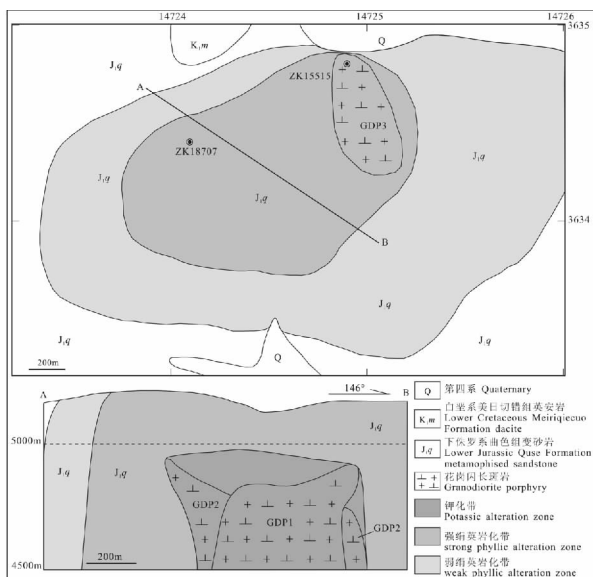


图3 西藏波龙斑岩铜金矿床地质简图及 A-B 地质剖面图

Fig. 3 Geological schematic map and section A-B of Bolong porphyry copper-gold deposit in Tibet

同 Liu Yongsheng 等(2008,2010a,2010b)。测试结果采用普通铅校正(Andersen, 2002)。

波龙矿床的各期斑岩岩石样品在成都地质矿产研究所实验室进行主量元素测试,在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室测定微量元素和 Sr-Nd 同位素组成。主量元素采用 XRF 法测试,FeO 含量分析采用化学滴定法;微量元素采用 Agilent7500a 等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,分析精度优于 5%~10%,测试过程中每 10 个样品选取一个进行重复测定,共测定 4 份标准样来监测测试精度:AGV-2, BHVO-2, BCR-2, GSR-1, 详细的测试方法和分析流程见 Gao Shan 等(2002)。全岩 Sr-Nd 同位素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室采用 MAT261 仪器测试,分析流程见 Zhang Hongfei 等(2002),采用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ 和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 分别对 Sr 和 Nd 同位素比值标准化,标样 LaJolla 的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 $0.511853 \pm 9(2\sigma)$,标样 BCR-2 的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值为 $0.512638 \pm 5(2\sigma)$,Sr 和 Nd 空白值分别 $<1\text{ng}$ 和 $<50\text{pg}$ 。

锆石 Hf 同位素测试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 Neptune 多接收等离子质谱和 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)上进行的,实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气,剥蚀直径采用 $55\mu\text{m}$,测定时使用锆石国际标样 GJ1 和

Plesovice 作为参考物质,分析点与 U-Pb 定年分析点为同一位置。相关仪器运行条件及详细分析流程见侯可军等(2007)。分析过程中锆石标准 GJ1 和 Plesovice 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值分别为 $0.282007 \pm 0.000007(2\sigma, n=36)$ 和 $0.282476 \pm 0.000004(2\sigma, n=27)$,与文献报道值(侯可军等, 2007; Morel et al., 2006, Sláma et al., 2008)在误差范围内完全一致。

4 分析测试结果

4.1 锆石 U-Pb 年龄

本文分别采取了波龙矿床 3 期斑岩进行了锆石 U-Pb 测年,分析结果见表 1 和图 4。样品粉碎和锆石分离之后,开展锆石样品的透射光、反射光和阴极发光分析,选择锆石颗粒形状规则、晶形完整、环带发育的岩浆成因锆石进行测试。

3 期斑岩中锆石呈无色长柱状自形晶,长宽比 $2:1 \sim 4:1$,振荡环带环带发育, Th/U 比值介于 $0.23 \sim 1.38$,多集中于 $0.4 \sim 0.7$,表明 3 期斑岩中锆石均为岩浆成因锆石(吴元保等, 2004)。

第一期花岗闪长斑岩(ZK15502-288)样品 24 个测点的加权平均年龄为 $120.2 \pm 2.0\text{Ma}$ (MSWD=6.8),22 个测点位于谐和线附近。第二期花岗闪长斑岩(ZK15502-458)样品 25 个测点中 24 颗锆石的加权平均年龄为 $119.5 \pm 0.9\text{Ma}$ (MSWD=1.1),24 个测点位于谐和线附近。第三期花岗闪长斑岩(ZK15507-5)样品 25 个测点中 24 颗锆石的加权平均年龄为 $119.3 \pm 1.3\text{Ma}$ (MSWD=1.6),23 个测点位于谐和线附近。

4.2 岩石化学分析结果

波龙矿床 3 期斑岩的全岩岩石化学分析结果和 Sr-Nd 同位素组成见表 2。

波龙矿床第一期和第二期花岗闪长斑岩 SiO_2 含量分别为 $59.16\% \sim 64.55\%$ 和 $57.31\% \sim 66.27\%$,以高 K_2O ($3.77\% \sim 5.49\%$ 和 $3.32\% \sim 6.55\%$)、高 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ($1.3 \sim 15.7$ 和 $1.6 \sim 13.5$) 和低 P_2O_5 ($0.08\% \sim 0.18\%$ 和 $0.08\% \sim 0.21\%$) 为特征, Al_2O_3 含量多高于 15% , MgO 含量多低于 3% , $\text{Mg}^\#$ 多低于 40。岩石化学成分上落入花岗闪长斑岩区域内(图 5a),多属于富钾系列(图 5b)。第三期花岗闪长斑岩 SiO_2 含量为 $58.50\% \sim 62.00\%$,相对富 Al_2O_3 ($17.53\% \sim 18.25\%$) 低 K_2O ($1.49\% \sim 2.23\%$),具较低 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比 ($1.3 \sim 1.9$), $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 投图结果显示落入花岗闪

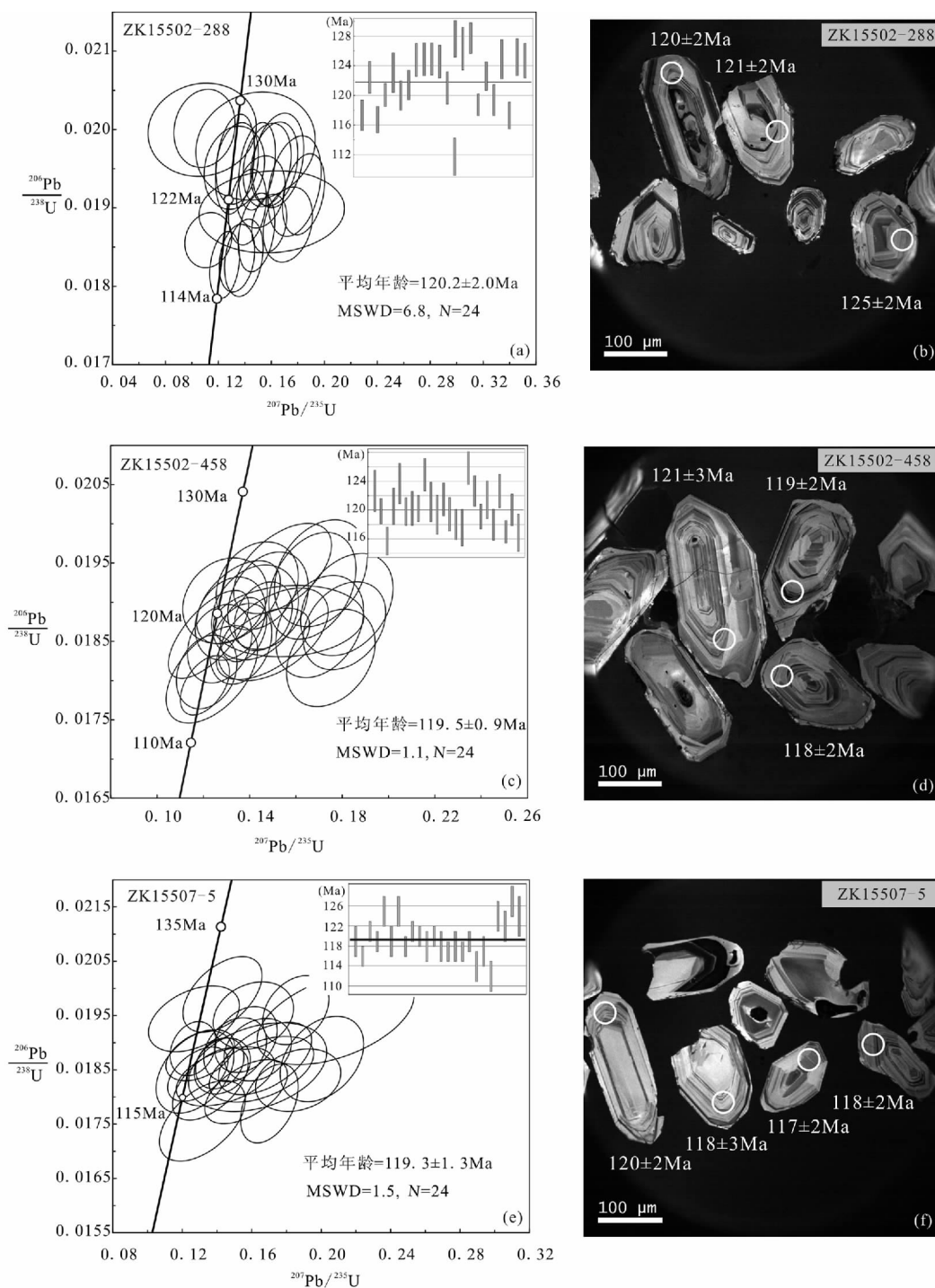


图 4 西藏波龙矿床 3 期斑岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图和阴极发光照片

Fig. 4 Cathodoluminescence images and LA-ICP-MS U-Pb concordia diagram for zircons

from three stages of porphyries of Bolong porphyry Cu-Au deposit in Tibet

(a)—第一期花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 年龄谐和图; (b)—第一期花岗闪长斑岩锆石的阴极发光图像和测点年龄; (c)—第二期花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 年龄谐和图; (d)—第二期花岗闪长斑岩锆石的阴极发光图像和测点年龄; (e)—第三期花岗闪长斑岩锆石 U-Pb 年龄谐和图; (f)—第三期花岗闪长斑岩锆石的阴极发光图像和测点年龄

(a)—U-Pb concordia diagram for zircons from the first stage of granodiorite porphyry; (b)—cathodoluminescence images for zircons from the first stage of granodiorite porphyry; (c)—U-Pb concordia diagram for zircons from the second stage of granodiorite porphyry; (d)—cathodoluminescence images for zircons from the second stage of granodiorite porphyry; (e)—U-Pb concordia diagram for zircons from the third stage of granodiorite porphyry; (f)—cathodoluminescence images for zircons from the third stage of granodiorite porphyry

表 1 西藏波龙矿床三期斑岩的锆石 U-Pb 测试结果

Table 1 Zircon U-Pb date of the porphyries in the Bolong porphyry copper-gold deposit, Tibet

点	Pb $\times 10^{-6}$	Th $\times 10^{-6}$	U $\times 10^{-6}$	Th/U	207Pb/206Pb	1 σ	207Pb/235U	1 σ	206Pb/238U		207Pb/206Pb	1 σ	207Pb/235U		206Pb/238U	
ZK15502-288-01	6.73	169	293	0.58	0.0561	0.0039	0.1392	0.0096	0.0184	0.0003	191	201	120	10	117	2
ZK15502-288-02	4.42	92.7	181	0.51	0.0712	0.0041	0.1843	0.0105	0.0192	0.0003	664	191	152	12	121	2
ZK15502-288-03	7.05	186	303	0.61	0.0500	0.0031	0.1247	0.0074	0.0183	0.0003	197	108	119	7	117	2
ZK15502-288-04	7.64	79.9	341	0.23	0.0620	0.0036	0.1584	0.0087	0.0188	0.0002	269	163	126	8	119	2
ZK15502-288-05	4.23	113	172	0.66	0.0697	0.0055	0.1775	0.0132	0.0193	0.0004	469	265	140	15	121	3
ZK15502-288-07	4.50	108	198	0.55	0.0680	0.0049	0.1724	0.0123	0.0188	0.0003	868	120	162	11	120	2
ZK15502-288-08	6.60	193	279	0.69	0.0561	0.0040	0.1419	0.0094	0.0190	0.0003	458	117	135	8	121	2
ZK15502-288-09	4.45	94.6	188	0.50	0.0596	0.0046	0.1568	0.0120	0.0195	0.0004	590	136	148	11	125	2
ZK15502-288-10	5.11	117	217	0.54	0.0600	0.0043	0.1622	0.0118	0.0196	0.0004	604	126	153	10	125	2
ZK15502-288-11	5.09	104	216	0.48	0.0483	0.0040	0.1341	0.0106	0.0196	0.0003	114	143	128	9	125	2
ZK15502-288-12	2.94	57.9	127	0.46	0.0473	0.0062	0.1353	0.0152	0.0195	0.0004	-5	206	126	14	125	2
ZK15502-288-13	14.3	791	573	1.38	0.0495	0.0089	0.1276	0.0175	0.0167	0.0003	24	224	118	15	112	1
ZK15502-288-14	6.72	213	278	0.77	0.0491	0.0136	0.1600	0.0361	0.0189	0.0003	153	376	151	31	121	2
ZK15502-288-15	12.88	624	544	1.15	0.0306	0.0114	0.0930	0.0224	0.0168	0.0002	313	689	151	32	121	2
ZK15502-288-16	3.84	87.6	164	0.53	0.0294	0.0111	0.1035	0.0259	0.0197	0.0004	-263	270	104	25	128	2
ZK15502-288-17	3.20	64.9	137	0.47	0.0484	0.0132	0.1498	0.0299	0.0198	0.0005	95	328	140	26	126	3
ZK15502-288-18	13.02	432	508	0.85	0.0343	0.0062	0.1082	0.0150	0.0201	0.0003	-84	203	105	14	128	2
ZK15502-288-19	9.12	302	374	0.81	0.0400	0.0049	0.1114	0.0115	0.0185	0.0002	-269	174	108	11	119	1
ZK15502-288-20	5.57	151	229	0.66	0.0543	0.0046	0.1482	0.0120	0.0192	0.0003	449	151	144	11	123	2
ZK15502-288-21	5.63	161	236	0.68	0.0605	0.0040	0.1508	0.0093	0.0187	0.0003	584	103	141	8	119	2
ZK15502-288-22	3.90	82.7	167	0.50	0.0479	0.0036	0.1319	0.0098	0.0198	0.0004	129	125	126	9	125	3
ZK15502-288-23	5.57	139	242	0.57	0.0528	0.0035	0.1341	0.0089	0.0184	0.0003	320	122	128	8	117	2
ZK15502-288-24	4.78	124	190	0.65	0.0641	0.0051	0.1650	0.0128	0.0196	0.0004	239	248	129	13	124	3
ZK15502-288-25	4.80	120	197	0.61	0.0563	0.0035	0.1492	0.0092	0.0195	0.0004	465	102	141	8	125	2
ZK15507-5-1	3.79	77.6	161	0.48	0.0821	0.0056	0.2080	0.0145	0.0191	0.0004	775	194	157	15	115	3
ZK15507-5-2	5.15	152	213	0.71	0.0734	0.0054	0.1822	0.0131	0.0183	0.0004	702	185	148	14	116	2
ZK15507-5-3	5.06	120	213	0.56	0.0483	0.0033	0.1262	0.0087	0.0189	0.0003	116	140	121	8	121	2
ZK15507-5-4	5.60	181	232	0.78	0.0570	0.0042	0.1430	0.0107	0.0186	0.0003	491	152	136	9	119	2
ZK15507-5-5	2.75	52.2	86.2	0.61	0.9145	0.8456	1.6657	1.4787	0.0200	0.0005	5111	5543	996	663	128	3
ZK15507-5-6	3.33	64.4	141	0.46	0.0693	0.0048	0.1854	0.0126	0.0196	0.0004	907	126	173	11	125	3
ZK15507-5-7	2.29	57.3	98.6	0.58	0.0865	0.0084	0.2005	0.0159	0.0187	0.0005	1350	136	186	13	119	3
ZK15507-5-8	3.65	97.5	145	0.67	0.0603	0.0060	0.1609	0.0153	0.0195	0.0004	614	214	152	13	125	3
ZK15507-5-9	5.57	154	225	0.68	0.0656	0.0044	0.1676	0.0108	0.0188	0.0003	231	172	123	10	118	2
ZK15507-5-10	3.24	54.6	148	0.37	0.0604	0.0052	0.1505	0.0120	0.0189	0.0004	619	158	142	11	121	2
ZK15507-5-11	7.95	183	291	0.63	0.0847	0.0052	0.2283	0.0137	0.0196	0.0003	212	194	124	12	120	2

续表 1

ZK15507-5-12	2.03	36.2	93.9	0.39	0.0904	0.0110	0.2162	0.0263	0.0190	0.0005	738	312	154	23	118	3
ZK15507-5-13	3.47	69.8	154	0.45	0.0641	0.0049	0.1635	0.0129	0.0189	0.0004	744	153	154	11	120	2
ZK15507-5-14	1.81	30.5	85.3	0.36	0.0716	0.0071	0.1818	0.0173	0.0189	0.0005	198	218	122	13	118	3
ZK15507-5-15	2.41	63.2	107	0.59	0.0716	0.0060	0.1868	0.0162	0.0183	0.0004	976	165	174	14	117	2
ZK15507-5-16	4.03	69.0	168	0.41	0.0914	0.0061	0.2413	0.0165	0.0192	0.0004	771	228	156	17	118	3
ZK15507-5-17	6.31	135	240	0.56	0.0899	0.0063	0.2370	0.0171	0.0192	0.0004	496	251	137	17	117	2
ZK15507-5-18	5.26	173	216	0.80	0.0565	0.0039	0.1416	0.0092	0.0186	0.0003	470	132	134	8	119	2
ZK15507-5-19	2.96	74.6	135	0.55	0.0729	0.0053	0.1702	0.0110	0.0179	0.0005	1011	133	160	10	114	3
ZK15507-5-20	3.65	83.7	157	0.53	0.0664	0.0047	0.1636	0.0113	0.0185	0.0004	377	199	130	13	117	3
ZK15507-5-21	2.10	47.3	97.7	0.48	0.0761	0.0078	0.1703	0.0146	0.0179	0.0005	385	233	1256	15	112	3
ZK15507-5-22	4.21	65.4	152	0.43	0.0945	0.0065	0.2688	0.0187	0.0207	0.0004	64	239	121	16	124	3
ZK15507-5-23	3.91	78.2	168	0.47	0.0626	0.0053	0.1566	0.0119	0.0191	0.0004	693	149	148	10	122	3
ZK15507-5-24	2.87	53.1	115	0.46	0.0706	0.0057	0.1893	0.0135	0.0203	0.0005	294	208	136	13	127	3
ZK15507-5-25	3.01	58.8	125	0.47	0.0919	0.0083	0.2579	0.0257	0.0199	0.0005	1138	263	192	25	118	3
ZK15502-458-1	3.47	80.9	147	0.55	0.0666	0.0053	0.1671	0.0124	0.0192	0.0005	827	145	157	11	123	3
ZK15502-458-2	7.98	224	321	0.70	0.0710	0.0049	0.1795	0.0114	0.0188	0.0003	500	182	138	10	118	2
ZK15502-458-3	6.03	156	265	0.59	0.0495	0.0037	0.1215	0.0087	0.0181	0.0003	172	150	116	8	116	2
ZK15502-458-4	4.17	122	178	0.69	0.0554	0.0048	0.1423	0.0124	0.0189	0.0004	430	185	135	11	121	3
ZK15502-458-5	4.33	138	173	0.80	0.0680	0.0060	0.1708	0.0133	0.0194	0.0004	867	152	160	12	124	3
ZK15502-458-6	6.92	178	298	0.60	0.0584	0.0068	0.1568	0.0215	0.0188	0.0003	547	296	148	19	120	2
ZK15502-458-7	3.70	79.9	162	0.49	0.0711	0.0058	0.1778	0.0139	0.0188	0.0004	552	207	142	14	119	2
ZK15502-458-8	8.03	235	335	0.70	0.0556	0.0032	0.1459	0.0083	0.0188	0.0003	438	119	138	7	120	2
ZK15502-458-9	6.16	134	228	0.59	0.0575	0.0038	0.1713	0.0112	0.0219	0.0004	509	136	161	10	139	3
ZK15502-458-10	17.64	678	610	1.11	0.0902	0.0043	0.2351	0.0099	0.0196	0.0004	84	169	117	10	119	3
ZK15502-458-11	3.63	79.5	162	0.49	0.0718	0.0053	0.1820	0.0132	0.0190	0.0004	981	138	170	11	121	3
ZK15502-458-12	3.10	73.0	140	0.52	0.0706	0.0057	0.1703	0.0125	0.0187	0.0004	945	141	160	11	119	3
ZK15502-458-13	4.69	120	206	0.58	0.0511	0.0048	0.1294	0.0121	0.0190	0.0004	247	200	124	11	121	2
ZK15502-458-14	4.05	97.5	176	0.55	0.0696	0.0044	0.1809	0.0118	0.0187	0.0004	916	125	169	10	119	2
ZK15502-458-15	5.79	160	256	0.63	0.0508	0.0038	0.1270	0.0092	0.0185	0.0003	233	155	121	8	118	2
ZK15502-458-16	3.60	86.9	157	0.55	0.0665	0.0060	0.1606	0.0128	0.0184	0.0004	176	204	118	12	116	3
ZK15502-458-17	4.62	97.2	192	0.51	0.0689	0.0044	0.1872	0.0120	0.0197	0.0004	514	179	146	12	124	2
ZK15502-458-18	5.16	117	217	0.54	0.0614	0.0045	0.1600	0.0113	0.0192	0.0003	268	178	129	11	121	2
ZK15502-458-19	11.40	337	488	0.69	0.0540	0.0028	0.1373	0.0066	0.0186	0.0003	373	101	131	6	119	2
ZK15502-458-20	3.84	169	256	0.50	0.0589	0.0049	0.1479	0.0115	0.0190	0.0004	565	160	140	10	121	3
ZK15502-458-21	5.92	171	256	0.67	0.0544	0.0034	0.1362	0.0088	0.0185	0.0003	387	143	130	8	118	2
ZK15502-458-22	5.24	115	225	0.51	0.0545	0.0043	0.1433	0.0117	0.0192	0.0004	390	175	136	10	123	2
ZK15502-458-23	14.35	225	652	0.35	0.0654	0.0028	0.1639	0.0071	0.0183	0.0002	138	114	116	6	115	2
ZK15502-458-24	4.90	116	216	0.54	0.0515	0.0040	0.1316	0.0100	0.0188	0.0003	264	163	126	9	120	2
ZK15502-458-25	4.75	104.9	214	0.49	0.0724	0.0056	0.1751	0.0126	0.0183	0.0004	997	137	164	11	117	3

表 2 西藏波龙矿床的全岩岩石化学数据
Table 2 Bulk-rock major, trace element and Sr-Nd isotopic of the three stages of porphyries in the Bolong porphyry Cu-Au deposit, Tibet

	ZK15502 -265	ZK15502 -274	ZK15502 -285	ZK15502 -300	ZK15502 -452	ZK15502 -458	ZK15502 -529	ZK15502 -532	ZK15502 -563	ZK15507 -18	ZK15507 -24	ZK15507 -25	ZK15507 -28	ZK17103 -364	ZK17103 -372	ZK17103 -449
	GDP2	GDP2	GDP2	GDP2	GDP1	GDP1	GDP1	GDP1	GDP1	GDP3	GDP3	GDP3	GDP3	GDP2	GDP2	GDP2
主量元素 (wt. %)																
SiO ₂	66.27	64.80	59.41	57.31	60.46	62.62	59.16	64.26	64.55	58.50	61.31	60.66	59.71	62.00	62.70	65.46
Al ₂ O ₃	17.05	16.14	15.76	14.08	15.03	15.72	16.30	16.37	16.34	17.53	18.07	18.25	17.91	14.60	13.47	15.06
Fe ₂ O ₃	2.23	3.00	3.40	4.08	6.27	3.15	8.07	3.13	3.63	8.40	6.35	6.56	7.86	7.17	6.09	4.86
FeO	1.56	1.24	2.15	0.68	0.80	3.60	1.29	1.42	0.30	0.44	0.82	0.49	0.30	2.44	1.78	0.79
CaO	1.04	1.74	3.01	4.87	2.41	0.97	1.55	2.18	2.70	0.61	0.55	0.52	0.39	1.54	2.15	2.90
MgO	1.15	1.66	2.55	3.68	2.44	2.24	1.53	1.28	1.26	2.16	1.75	2.22	1.74	2.40	1.68	1.36
K ₂ O	3.21	3.42	3.32	4.90	5.49	5.18	3.81	4.03	3.77	1.49	1.90	1.81	2.23	3.79	6.55	4.14
Na ₂ O	0.48	0.49	0.44	0.46	0.61	0.33	0.37	1.26	2.34	1.12	1.17	1.17	1.19	0.28	0.70	2.50
TiO ₂	0.39	0.40	0.35	0.32	0.39	0.38	0.39	0.38	0.38	0.69	0.71	0.74	0.75	0.44	0.38	0.32
P ₂ O ₅	0.12	0.18	0.11	0.21	0.083	0.078	0.18	0.11	0.14	0.047	0.055	0.057	0.042	0.076	0.12	0.13
MnO	0.12	0.61	0.11	0.058	0.062	0.14	0.14	0.055	0.043	0.014	0.011	0.015	0.010	0.23	0.077	0.029
LOI	6.18	6.68	9.08	9.21	5.77	5.10	7.00	5.31	4.42	8.94	7.17	7.41	7.80	4.68	4.00	2.22
Mg#	36	43	47	60	40	38	24	35	39	32	32	38	30	32	29	32
微量元素 ($\times 10^{-6}$)																
Li	52.6	28.2	24.6	12.9	10.0	18.3	20.2	20.2	21.9	44.0	34.6	34.5	28.7	38.7	32.6	25.7
Be	3.30	2.60	3.50	1.48	1.57	1.58	1.93	1.27	1.45	1.04	1.19	0.97	1.12	1.24	0.87	1.14
Sc	8.43	10.6	9.37	6.41	10.5	9.20	9.29	9.01	9.39	16.4	18.2	16.3	17.8	11.0	10.5	6.83
V	80.3	98.7	91.1	67.8	118	86.5	91.1	87.2	78.4	140	191	147	162	114	104	60.5
Cr	5.48	3.66	3.47	2.68	3.50	3.25	3.55	3.30	3.35	14.1	15.8	14.8	14.3	4.33	8.04	3.13
Co	18.0	17.7	9.25	5.38	5.29	8.70	10.5	12.6	3.52	20.9	15.7	15.0	18.9	4.74	7.64	4.45
Ni	28.5	25.2	28.5	45.4	29.5	29.5	29.6	16.1	8.62	13.9	10.3	11.1	11.8	32.4	28.7	5.03
Cu	5068	1392	4929	8207	2513	2008	4394	4934	4299	453	266	644	89.8	1178	4556	1547
Zn	28.0	19.9	50.2	27.7	40.3	49.0	66.5	24.1	28.9	11.4	8.63	11.1	8.89	90.2	51.9	25.7
Ga	17.4	16.6	15.5	13.1	17.3	15.5	17.6	17.2	15.8	16.5	18.6	16.3	17.6	21.5	15.1	15.6
Rb	103	112	95.6	144	150	170	139	137	134	76.8	102	97.1	101	172	173	163
Sr	36.8	126	71.3	112	137	64.2	31.4	111	223	152	152	146	125	31.2	175	378
Y	13.4	12.9	12.0	6.20	15.9	17.5	11.9	10.9	13.8	17.2	24.4	20.1	20.3	15.4	14.8	9.82
Zr	109	84.4	129	142	83.3	74.6	70.0	72.1	71.1	63.5	68.3	67.1	70.3	66.1	71.7	71.6
Nb	6.26	5.95	5.17	4.63	5.92	5.76	5.66	5.82	5.75	4.27	4.37	4.20	4.40	5.94	5.64	5.86
Mo	29.5	7.99	31.4	70.0	24.3	23.2	43.9	45.5	18.5	2.72	0.95	0.49	0.73	1.36	0.89	0.68
Sn	4.10	4.39	3.03	4.80	2.29	2.92	2.32	2.64	2.24	3.68	3.55	3.47	4.09	2.83	2.02	1.15
Cs	5.15	7.36	4.71	6.09	4.43	5.81	12.3	19.2	12.9	3.80	3.93	3.90	2.48	7.53	14.6	25.5

续表 2

Ba	296	400	307	397	739	676	489	527	586	94.0	139	106	280	488	813	1068
La	18.0	17.2	18.4	17.2	30.1	26.0	13.8	19.3	15.5	3.43	6.20	3.53	7.24	18.4	10.7	8.34
Ce	34.2	30.5	32.9	31.1	56.6	47.4	23.9	34.0	26.8	9.84	15.2	8.69	14.6	32.1	20.1	15.4
Pr	3.90	3.35	3.65	3.29	6.07	5.31	2.67	3.74	2.97	1.93	2.75	1.99	1.87	3.66	2.48	1.88
Nd	14.9	12.6	13.3	11.4	23.0	19.7	9.81	13.5	10.8	12.0	14.8	13.0	8.74	14.2	10.3	7.70
Sm	2.98	2.38	2.46	2.03	4.22	3.65	1.90	2.43	1.99	2.04	2.69	2.18	2.21	2.80	2.16	1.61
Eu	0.88	0.66	0.75	0.89	1.05	0.98	0.68	0.76	0.68	0.43	0.60	0.54	0.73	0.67	0.73	0.62
Gd	2.69	2.24	2.29	1.74	3.62	3.22	1.82	2.08	2.07	1.57	2.38	2.00	2.48	2.59	2.27	1.59
Tb	0.42	0.37	0.37	0.28	0.53	0.52	0.32	0.33	0.36	0.35	0.54	0.44	0.49	0.43	0.39	0.27
Dy	2.43	2.27	2.23	1.50	2.95	3.00	2.04	1.97	2.17	2.67	3.73	3.20	3.35	2.52	2.38	1.56
Ho	0.46	0.46	0.44	0.26	0.58	0.59	0.40	0.37	0.47	0.59	0.82	0.70	0.72	0.48	0.47	0.30
Er	1.35	1.34	1.28	0.70	1.58	1.77	1.17	1.17	1.43	1.84	2.59	2.19	2.25	1.48	1.38	0.99
Tm	0.22	0.21	0.20	0.12	0.25	0.27	0.20	0.19	0.24	0.31	0.42	0.35	0.36	0.23	0.21	0.16
Yb	1.37	1.40	1.36	0.76	1.51	1.84	1.24	1.19	1.55	2.00	2.66	2.31	2.41	1.46	1.32	1.06
Lu	0.20	0.21	0.21	0.12	0.25	0.27	0.19	0.18	0.24	0.32	0.41	0.35	0.37	0.22	0.19	0.17
Hf	3.40	2.65	3.36	3.34	2.07	2.11	2.10	2.22	2.14	1.92	2.03	1.97	2.02	1.96	2.08	2.14
Ta	0.54	0.50	0.46	0.39	0.51	0.47	0.47	0.53	0.48	0.30	0.31	0.32	0.31	0.55	0.45	0.57
Tl	0.69	0.75	0.73	0.96	0.98	1.25	1.04	1.08	1.04	0.80	0.94	0.96	0.75	1.64	1.69	1.89
Pb	2.91	3.10	3.77	4.70	13.2	6.64	4.34	7.65	9.97	2.92	2.14	2.39	2.32	17.0	15.5	15.4
Th	6.76	6.32	6.33	6.22	5.15	5.98	6.20	6.79	6.39	1.60	2.15	1.97	2.09	6.61	5.92	7.17
U	2.43	2.20	1.92	3.60	2.47	1.88	1.33	1.73	1.88	0.84	0.92	0.94	1.32	1.38	0.96	1.07
Eu/Eu*	1.18	0.93	0.86	0.96	1.40	0.80	0.85	1.10	1.01	1.01	0.71	0.71	0.78	0.95	0.75	1.00

Sr-Nd 元素成分

$(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr})_m$	2.6640	3.9972	3.8168	3.2824	7.8920	13.1943	3.7054	1.5096	1.9984	1.9832	16.4772	2.9409	1.2818
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_m$	0.712244	0.714944	0.715006	0.712707	0.720532	0.728119	0.713184	0.710065	0.710754	0.710847	0.734152	0.712414	0.707856
$(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_m$	0.1144	0.1120	0.1078	0.1110	0.1120	0.1168	0.1083	0.1026	0.1101	0.1011	0.1193	0.1267	0.1261
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_m$	0.512451	0.512391	0.512159	0.512366	0.512380	0.512405	0.512408	0.512543	0.512534	0.512552	0.512442	0.512299	0.512431
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.70770	0.70813	0.70850	0.70711	0.70707	0.70562	0.70686	0.70749	0.70735	0.70746	0.70605	0.70740	0.70567
$\epsilon\text{Nd}(0)$	-3.6	-4.8	-9.3	-5.3	-5.0	-4.5	-4.5	-1.9	-2.0	-1.7	-3.8	-6.6	-4.0
$\epsilon\text{Nd}(t)$	-2.4	-3.5	-8.0	-4.0	-3.7	-3.3	-3.1	-0.4	-0.7	-0.2	-2.6	-5.5	-3.0
$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	-0.42	-0.43	-0.45	-0.44	-0.43	-0.41	-0.45	-0.48	-0.44	-0.49	-0.39	-0.36	-0.36
$T_{\text{DM}}(\text{Ga})$	1.1	1.1	1.4	1.2	1.2	1.2	1.1	0.8	0.9	0.8	1.1	1.5	1.2
$T_{2\text{DM}}(\text{Ga})$	1.11	1.20	1.6	1.2	1.2	1.2	1.2	0.9	1.0	0.9	1.1	1.4	1.2
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	0.51236	0.51230	0.51207	0.51228	0.51229	0.51231	0.51232	0.51246	0.51245	0.51247	0.51235	0.51220	0.51233

同位素校正公式: $t = 120\text{Ma}$, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{样品}} - ^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} \times (e^{\lambda_1 t} - 1)$, $\lambda_1 = 1.42 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = \text{Rb}/\text{Sr} \times 2.981$; $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i = (^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{样品}} + ^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} \times (e^{2\lambda_2 t} - 1)$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = \text{Sm}/\text{Nd} \times [0.531497 + 0.142521 \times ((^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{样品}} - 0.512638) / ((^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{样品}} - 0.512638) - 0.1967 \times (e^{2\lambda_2 t} - 1)]$; $T_{\text{DM}} = 1/\lambda_2 \times \ln(1 + [((^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_{\text{样品}} - 0.51315) / ((^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_{\text{样品}} - 0.21317)])$, $\lambda_2 = 6.54 \times 10^{-12} \text{a}^{-1}$; $T_{\text{DM}2}$ 为二阶段模式年龄, 参数见 Keto 等(1987)。

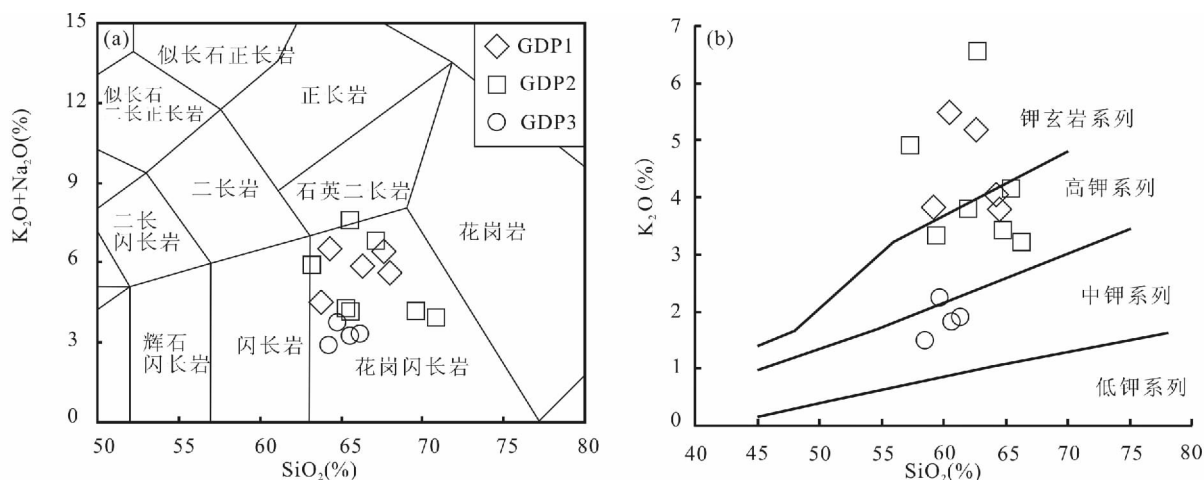


图 5 西藏波龙矿床三期斑岩的(a)SiO₂-K₂O+Na₂O图解(after Middlemost, 1994)

和(b) SiO₂-K₂O图解(after Peccerillo et al., 1976)

Fig. 5 Porphyry samples from the Bolong porphyry deposit plotted on SiO₂-K₂O+Na₂O(a) (after Middlemost, 1994) and SiO₂-K₂O(b) (after Peccerillo et al., 1976) diagrams in Tibet

长斑岩范围内(图 5a), SiO₂-K₂O 投图落入中钾系列岩石区域内(图 5b)。

第一期和第二期花岗闪长斑岩富集轻稀土, 亏损重稀土(图 6), (La/Yb)_N 分别为 7.2~14.3 和 5.6~16.2, Eu 异常不明显, 分别为 0.85~1.10 和 0.75~1.40; 球粒陨石标准化微量元素蛛网图(图6)显示, 两期花岗闪长斑岩均富集大离子亲石元素(Rb, Ba, Th, U), 亏损重稀土和 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素。两期花岗闪长斑岩具有较低的 Y(<18×10⁻⁶), Yb(<1.5×10⁻⁶) 含量, 不相容元素 Cr (3.25×10⁻⁶~3.55×10⁻⁶, 2.68×10⁻⁶~8.04×10⁻⁶), Ni(8.62×10⁻⁶~29.5×10⁻⁶, 5.03×10⁻⁶~45.4×10⁻⁶) 含量也较低。第三期花岗闪长斑岩稀土分馏不明显, 也亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素(图 6), 其 Y(17.2×10⁻⁶~24.4×10⁻⁶), Yb(2.00×10⁻⁶~2.66×10⁻⁶), Cr(14.1×10⁻⁶~15.8×10⁻⁶) 含量略高于花岗闪长斑岩。

4.3 Sr-Nd 同位素组成

第一期花岗闪长斑岩 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 值为 0.70562~0.70711, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_i 值为 0.51228~0.51232, ε_{Nd(t)} = -4.0~-3.1; 二阶模式年龄值为 1.2Ga, 与其一阶模式年龄值类似。第二期花岗闪长斑岩 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i = 0.70567~0.70850, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_i 值为 0.51207~0.51236, ε_{Nd(t)} = -8.0~-2.4, 其二阶模式年龄和一阶模式年龄值均介于 1.1~1.5Ga 之间。第三期花岗闪长斑岩 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 值为 0.70735~0.70749, (¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)_i 值为

0.51245~0.51247, ε_{Nd(t)} = -0.2~-0.7, 二阶模式年龄和一阶模式年龄值均变化于 0.8~0.9Ga。

4.4 锆石 Hf 同位素结果

3 期花岗闪长斑岩锆石 Hf 同位素测试结果见表 3 和图 7。第一期花岗闪长斑岩 15 个锆石测点 ε_{Hf(t)} = 2.5~6.9, 地壳模式年龄 T_{DM^c} = 743~1018Ma, 略小于 Nd 同位素的模式年龄。第二期花岗闪长斑岩 17 个测点 ε_{Hf(t)} 值多介于 3.3~6.9, 地壳模式年龄变化于 738~973Ma, 仅有一个测点测得 ε_{Hf(t)} = -7.8, T_{DM^c} = 1678Ma。第三期花岗闪长斑岩 15 个锆石测点的 ε_{Hf(t)} = 1.3~12.2, 变化范围 10.9 个 ε 单位, 明显高于测试过程引起的变化范围, 15 颗锆石的地壳模式年龄值变化于 394~1107Ma, 多略小于 Nd 同位素二阶模式年龄。

5 讨论

5.1 波龙斑岩铜金矿床的成岩时代

班龙矿床 3 期斑岩的样品中的锆石均为岩浆成因锆石, 因此, 其锆石 U-Pb 年龄即代表了 3 期斑岩的成岩年龄。波龙矿床 3 期岩石的成岩年龄相似, 3 期花岗闪长斑岩同期成岩, 成岩时代集中于 119~120Ma, 与波龙矿床的成矿年龄(Re-Os 年龄 118~119Ma, 祝向平等, 2011) 同期, 表明波龙斑岩铜金矿的成岩-成矿受控于一个持续的岩浆-热液过程。波龙矿床的成岩年龄和成矿年龄与紧邻的多不杂斑岩铜金矿(李金祥等, 2008a; 余宏全等, 2009; Li Jinxiang et al., 2011) 一致, 表明波龙斑岩铜金矿床

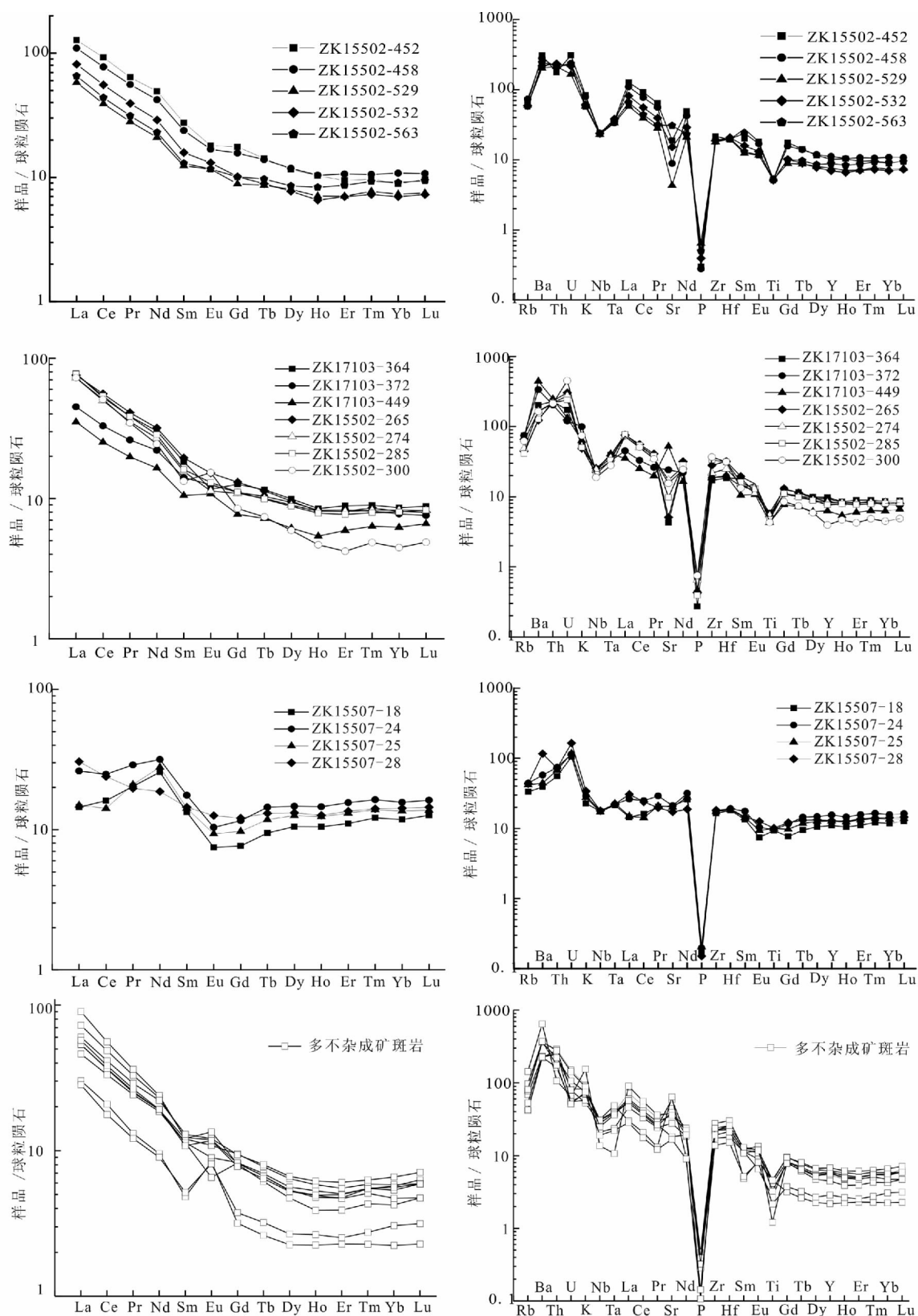


图 6 球粒陨石标准化微量元素蛛网图和稀土元素配分模式(标准化数据引自 Sun et al. , 1989, 多不杂斑岩铜矿成矿岩石数据引自李金祥, 2008b)

Fig. 6 Chondrite-normalized Rare Earth elements patterns and trace element spidergrams and Bolong porphyry intrusions (normalized data from Sun et al. , 1989; petrological data of mineralized porphyries from Li, 2008)

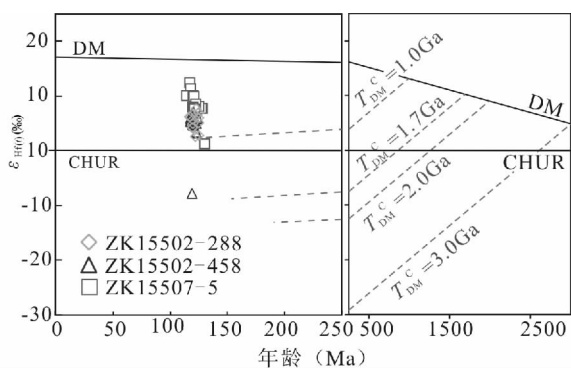


图 7 波龙斑岩铜金矿床各期斑岩中
锆石的 Age- $\epsilon_{\text{Hf}(t)}$ 图解

Fig. 7 Age- $\epsilon_{\text{Hf}(t)}$ diagram for zircons from
porphyries of Bolong porphyry deposit

与多不杂斑岩铜金矿床的成岩-成矿受控于相同的深部成矿动力学过程。

5.2 岩石成因

岩石中因含有 H_2O 、 CO_2 等挥发份灼烧时逃逸造成烧失量 (Loss on ignition, LOI), 岩石中 CO_2 常以 CaCO_3 形式存在, 岩石中含有较多碳酸盐矿物能造成岩石烧失量较大; 此外斑岩铜矿发育的绢英岩化等蚀变形成的含水矿物也能造成烧失量较高。波龙矿床 3 期花岗闪长斑岩全岩烧失量均较高, 但 3 期花岗闪长斑岩的 Harker 图解 (图 8) 中 CaO 的含量与 LOI 呈负相关关系, 表明波龙矿床各期岩石较高的烧失量均由因岩石发生不同程度蚀变所致。波龙矿床 3 期花岗闪长斑岩的 Harker 图解 (图 8) 显示, 较高的 LOI 会导致 K、Na、Rb、Sr 等活泼元素流失, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 与 LOI 呈正相关关系, 但稀土元素和 $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$ 等与 LOI 无明显相关性, 因此稀土元素含量和 Nd 同位素组成等数据可信度较高。斑岩铜矿内钾化会导致岩石中 K 和 Si 含量增加, Ca、Na、Sr 等降低, 绢英岩化会主要导致 Mg、Na、Sr 等含量降低 (Ulrich et al., 2001)。因此波龙矿床 3 期花岗闪长斑岩较高 K_2O 和较低 Na_2O 含量可能因钾化和绢英岩化造成。 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 随 LOI 增加而增大可能因绢英岩化水解反应导致少量围岩物质混入造成, 因此较低的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 更接近侵入岩的 Sr 同位素组成。

波龙矿床前两期花岗闪长斑岩轻稀土分馏明显, 重稀土亏损 (图 6), 低 Y 和低 Yb 含量暗示源区内有石榴石残余 (Defent et al., 1990; Castillo, 2006; Davidson, 2007)。前两期花岗闪长斑岩均亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素, 显示出岛弧岩浆岩的

特征 (Tatsumi et al., 1986; Foley et al., 1990; Richards, 2003), 表明源区中有金红石残余 (Xiong Xiaolin et al., 2005); 前两期斑岩富集大离子亲石元素, 表明前两期花岗闪长斑岩成岩源区有经受流体的交代 (Tatsumi et al., 1986; Davidson, 1996); 其 La-La/Sm 图解 (图 9) 显示形成前两期花岗闪长斑岩的岩浆均由源区物质部分熔融形成。前两期花岗闪长斑岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值均介于 0.7056 ~ 0.7085, $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$ 多为较小的负值, 在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$ 图解 (图 10) 中虽然 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值均有不同程度右移, 但多集中于部分代表斑公湖-怒江洋洋壳成分的洞错岛弧玄武岩 (鲍佩声, 2007) 与下地壳混合线附近, 表明前两期花岗闪长斑岩均起源于下地壳, 可能有俯冲洋壳熔融物质混入。在俯冲带内由于俯冲洋壳部分熔融形成的熔体会对 Hf 的同位素组成造成一定影响 (Barry, 2006; Woodhead, 2011) 致使与 Nd 同位素组成失耦, 波龙矿床内两期花岗闪长斑岩具有正的 $\epsilon_{\text{Hf}(t)}$ 值和较小的 T_{DM}^C (图 7), 可能也表明形成两期花岗闪长斑岩的岩浆来自于新生下地壳的部分熔融, 源区内有深源熔体加入。

第三期花岗闪长斑岩也具有岛弧岩浆岩的特征, 与两期花岗闪长斑岩具有相似的 Sr-Nd 同位素组成, 但其 $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$ 值明显大于前两期花岗闪长斑岩 (图 10), $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值较高, 可能是因其较强的绢英岩化中有更多地壳物质混入。第三期花岗闪长斑岩的 $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$ 值变化范围明显高于两期花岗闪长斑岩 (图 10), 可能表明第三期花岗闪长斑岩成岩过程中有更多深源物质和地壳物质混入。

波龙斑岩铜矿紧邻多不杂斑岩铜矿, 两个矿床的成矿斑岩成岩年龄和成矿年龄相似, 波龙矿床与多不杂斑岩铜金矿的成矿斑岩岩石化学特征和 Sr-Nd 同位素组成 (图 6、图 10, 李金祥, 2008b; 辛洪波等, 2009) 相似, 因此, 波龙斑岩铜金矿床与多不杂斑岩铜金矿床的成矿斑岩可能具有相似的源区和岩石成因。多不杂矿床的成矿斑岩含有较多放射性成因 Pb, 有地幔 Pb 和下地壳 Pb 混合 (辛洪波等, 2009), 表明多不杂成矿的岩浆起源于下地壳, 有幔源物质的混入; 与之相似, 波龙矿床的成矿斑岩的 Sr-Nd-Hf 同位素数据也表明形成波龙矿床花岗闪长斑岩的岩浆也起源于下地壳, 可能也有幔源物质混入, 岩浆演化至晚期, 可能有更多幔源物质的混入, 形成的最晚期的第三期花岗闪长斑岩有相对较高的 $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$ 和 $\epsilon_{\text{Hf}(t)}$ 值。波龙矿床第二期花岗闪长斑岩 $\epsilon_{\text{Hf}(t)}$ 值出现一个负值, 3 期花岗闪长斑岩均含有

表 3 西藏波龙矿床 3 期斑岩的锆石 Hf 同位素数据
Table 3 Zircons Hf isotopic data of the magmatic rocks in the Bolong porphyry copper-gold deposit, Tibet

年龄 (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\epsilon_{\text{Hf}(i)}$	$T_{\text{DM}}(\text{Ma})$	$T_{\text{DM}}^C(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
ZK15502-288-01	0.097073	0.002557	0.002734	0.000111	0.282880	0.000024	0.282874	3.8	553	781	-0.92
ZK15502-288-02	0.040593	0.000889	0.001054	0.000035	0.282771	0.000018	0.282768	0.0	684	1018	-0.97
ZK15502-288-03	0.054840	0.000770	0.001634	0.000020	0.282819	0.000024	0.282816	1.7	624	912	-0.95
ZK15502-288-04	0.027106	0.000713	0.000730	0.000028	0.282912	0.000022	0.282910	4.9	479	697	-0.98
ZK15502-288-05	0.042294	0.000593	0.001201	0.000034	0.282858	0.000019	0.282856	3.1	562	822	-0.96
ZK15502-288-06	0.073510	0.002973	0.002153	0.000108	0.282839	0.000023	0.282835	2.4	604	870	-0.94
ZK15502-288-07	0.085838	0.005433	0.002320	0.000164	0.282871	0.000024	0.282866	3.5	560	796	-0.93
ZK15502-288-08	0.049061	0.000145	0.001319	0.000006	0.282890	0.000018	0.282887	4.2	518	748	-0.96
ZK15502-288-09	0.028422	0.000229	0.000779	0.000004	0.282891	0.000021	0.282889	4.2	510	743	-0.98
ZK15502-288-10	0.040325	0.000174	0.001077	0.000002	0.282890	0.000022	0.282887	4.2	515	750	-0.97
ZK15502-288-11	0.044501	0.000537	0.001377	0.000034	0.282875	0.000019	0.282872	3.7	540	785	-0.96
ZK15502-288-12	0.021336	0.000122	0.000578	0.000007	0.282818	0.000019	0.282817	1.6	609	910	-0.98
ZK15502-288-13	0.048969	0.000586	0.001186	0.000011	0.282875	0.000019	0.282872	3.6	538	786	-0.96
ZK15502-288-14	0.057706	0.002304	0.001584	0.000073	0.282773	0.000026	0.282769	0.0	690	1014	-0.95
ZK15502-288-15	0.055488	0.000901	0.001516	0.000040	0.282844	0.000020	0.282840	2.5	588	854	-0.95
ZK15502-458-01	0.054265	0.002720	0.001463	0.000071	0.282791	0.000024	0.282788	0.7	662	973	-0.96
ZK15502-458-02	0.064768	0.002340	0.001850	0.000079	0.282861	0.000023	0.282857	3.2	567	819	-0.94
ZK15502-458-03	0.075959	0.002390	0.002081	0.000085	0.282846	0.000029	0.282841	2.6	594	855	-0.94
ZK15502-458-04	0.050538	0.000413	0.001303	0.000029	0.282864	0.000020	0.282861	3.2	555	808	-0.96
ZK15502-458-05	0.047983	0.001088	0.001189	0.000018	0.282879	0.000019	0.282877	3.8	531	774	-0.96
ZK15502-458-06	0.024525	0.000351	0.000625	0.000011	0.282832	0.000020	0.282830	2.1	590	879	-0.98
ZK15502-458-07	0.035640	0.000274	0.000903	0.000010	0.282868	0.000022	0.282866	3.4	543	798	-0.97
ZK15502-458-08	0.031800	0.000179	0.000835	0.000003	0.282851	0.000021	0.282849	2.8	567	837	-0.97
ZK15502-458-09	0.024829	0.000063	0.000652	0.000001	0.282889	0.000021	0.282887	4.1	511	751	-0.98
ZK15502-458-10	0.039406	0.000344	0.000963	0.000008	0.282826	0.000021	0.282824	1.9	603	893	-0.97
ZK15502-458-11	0.041357	0.000249	0.000944	0.000005	0.282479	0.000017	0.282477	-10.4	1093	1678	-0.97

续表 3

ZK15502-458-12	118	0.030695	0.001034	0.000776	0.000023	0.282862	0.000021	0.282860	3.2	5.7	550	813	-0.98
ZK15502-458-13	118	0.051289	0.000400	0.001525	0.000027	0.282849	0.000022	0.282846	2.7	5.2	580	845	-0.95
ZK15502-458-14	123	0.039463	0.000677	0.001156	0.000037	0.282838	0.000019	0.282835	2.3	4.9	590	867	-0.97
ZK15502-458-15	121	0.059714	0.000825	0.001555	0.000027	0.282896	0.000018	0.282893	4.4	6.9	513	738	-0.95
ZK15502-458-16	118	0.049363	0.000318	0.001269	0.000007	0.282848	0.000021	0.282845	2.7	5.2	577	846	-0.96
ZK15502-458-17	121	0.048905	0.000290	0.001545	0.000008	0.282856	0.000016	0.282853	3.0	5.5	570	828	-0.95
ZK15507-5-01	122	0.047056	0.000626	0.001175	0.000016	0.282940	0.000020	0.282938	6.0	8.5	444	634	-0.96
ZK15507-5-02	117	0.112240	0.000930	0.002894	0.000061	0.283051	0.000023	0.283045	9.9	12.2	299	394	-0.91
ZK15507-5-03	119	0.051239	0.000340	0.001253	0.000013	0.282925	0.000023	0.282922	5.4	7.9	468	673	-0.96
ZK15507-5-04	125	0.061102	0.000719	0.001520	0.000017	0.282926	0.000022	0.282922	5.4	8.1	469	668	-0.95
ZK15507-5-05	120	0.040981	0.000240	0.001002	0.000008	0.282986	0.000021	0.282983	7.6	10.1	378	532	-0.97
ZK15507-5-06	121	0.050782	0.000580	0.001241	0.000018	0.282978	0.000024	0.282975	7.3	9.8	391	550	-0.96
ZK15507-5-07	121	0.041359	0.000357	0.001030	0.000007	0.282917	0.000022	0.282915	5.1	7.7	476	687	-0.97
ZK15507-5-08	121	0.031129	0.000358	0.000771	0.000009	0.282854	0.000025	0.282852	2.9	5.5	561	829	-0.98
ZK15507-5-09	122	0.057293	0.000569	0.001400	0.000016	0.282873	0.000019	0.282869	3.6	6.1	544	789	-0.96
ZK15507-5-10	119	0.102310	0.000581	0.002477	0.000013	0.282932	0.000022	0.282927	5.7	8.1	472	661	-0.93
ZK15507-5-11	118	0.088131	0.002497	0.002313	0.000090	0.283027	0.000020	0.283022	9.0	11.4	330	445	-0.93
ZK15507-5-12	114	0.035996	0.001087	0.000966	0.000036	0.282991	0.000021	0.282989	7.8	10.2	369	522	-0.97
ZK15507-5-13	130	0.051974	0.000099	0.001349	0.000005	0.282730	0.000023	0.282727	-1.5	1.3	747	1107	-0.96
ZK15507-5-14	127	0.035981	0.000327	0.000939	0.000006	0.282916	0.000021	0.282914	5.1	7.8	476	686	-0.97
ZK15507-5-15	128	0.047136	0.000903	0.001152	0.000017	0.282915	0.000020	0.282912	5.1	7.8	480	688	-0.97

注: $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = 10000 \times \{[(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}]\}$. $T_{\text{DM}}^{\text{C}} = T_{\text{DM}} - (T_{\text{DM}} - t) \times [(f_{\text{ce}} - f_{\text{s}}) / (f_{\text{ce}} - f_{\text{DM}})]$. $f_{\text{Lu/Hf}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1$, 其中: $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} \text{ a}$ (Söderlund et al., 2004); $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 和 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}}$ 为样品测量值; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.0332$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.282772$ (Blichert-Toft et al., 1997); $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.0384$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.28325$ (Griffin et al., 2000); $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{平均地壳}} = 0.015$; $f_{\text{ce}} = [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{mantle}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}] - 1$; $f_{\text{s}} = f_{\text{Lu/Hf}}$; $f_{\text{DM}} = [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}] - 1$; $t = 120 \text{ Ma}$, 为锆石结晶年龄。

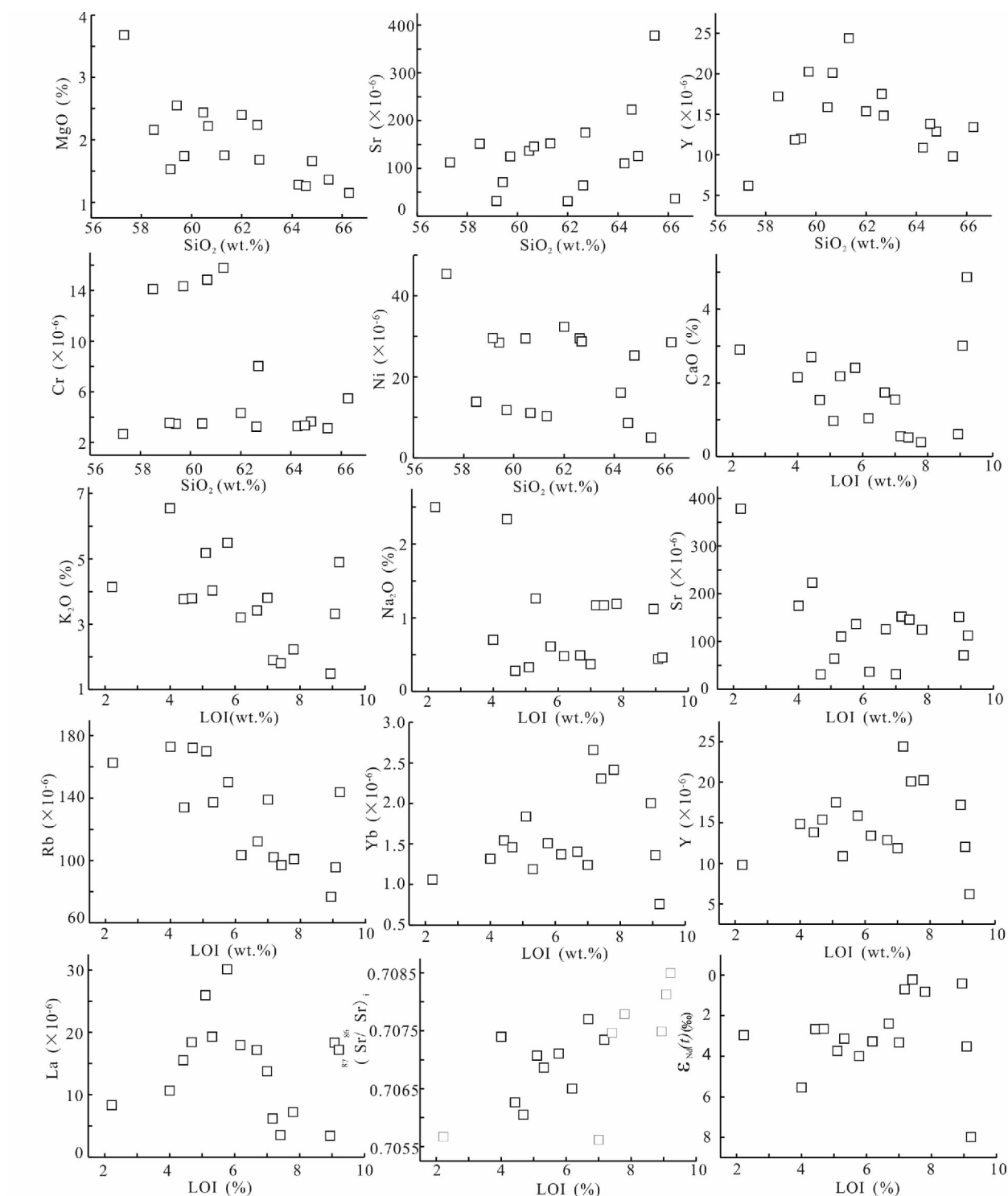


图 8 西藏波龙矿床 3 期花岗闪长斑岩的 Harker 图解

Fig. 8 Harker diagrams for three stages of granodiorite porphyry from Bolong deposit in Tibet

滞留锆石,可能也表明花岗闪长斑岩起源于下地壳。

5.3 矿床成因与成矿动力学过程

侏罗世至早白垩世班公湖-怒江洋持续向北俯冲(莫宣学等,2006; Shi Rendeng et al., 2007, 2008),南羌塘地块持续增生,在其缘形成了楔形增

生体,并形成了系列逆断层,洋壳俯冲诱发的岩浆岩多沿这些逆断层产出,不仅有中酸性侵入岩产出,还有基性火山岩和侵入岩沿这些逆断层发育。班公湖-怒江洋向北俯冲结束的时间尚存争议,目前基本认可班公湖-怒江洋的闭合是一个持续的过程,时间

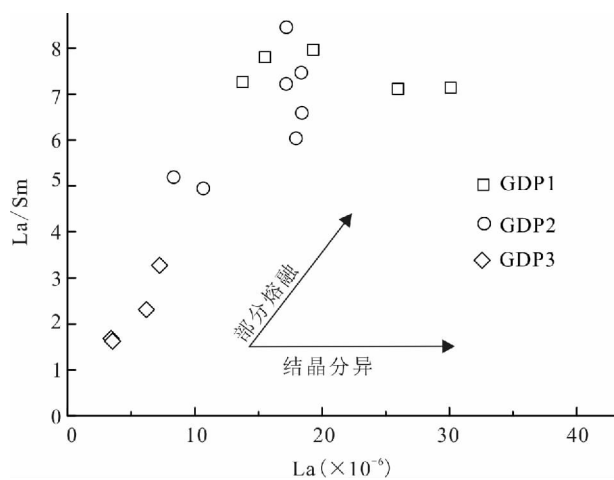


图 9 西藏波龙矿床 3 期斑岩的 La-Sm-La 图解

Fig. 9 La/Sm-La diagram for these porphyries in the Bolong porphyry deposit in Tibet, indicating their evolution is mainly controlled by partial melting

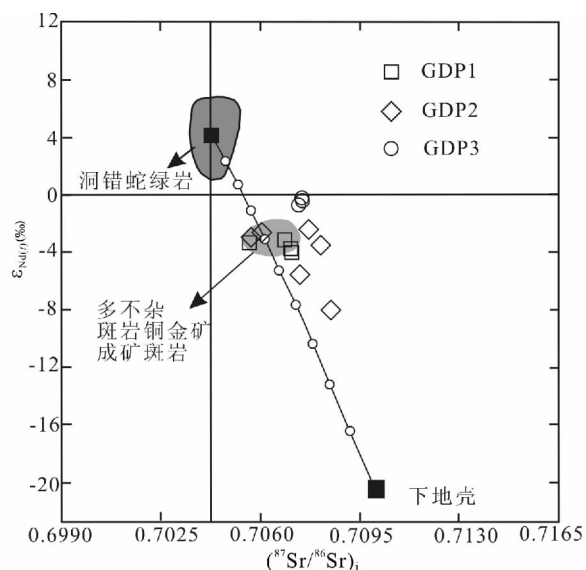


图 10 西藏波龙斑岩铜金矿床各期斑岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon_{\text{Nd}(t)}$ 图解(after Wang Baodi et al., 2010, 多不杂岩石数据来源于李金祥, 2008b 和辛洪波等, 2009)

Fig. 10 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon_{\text{Nd}(t)}$ diagram for three stages of porphyries of Bolong porphyry deposit in Tibet (after Wang Baodi et al., 2010, data of Duobuzha porphyries are from Li Jinxiang et al., 2008b and Xin Hongbo et al., 2009)

范围为 125 ~ 109Ma (Kapp et al., 2007; Zhu Dicheng et al., 2012; 曲晓明等, 2012)。

产出波龙和多不杂矿床的多龙矿集区内广泛分布增生杂岩(李光明等, 2011), 发育较多的玄武岩、辉绿岩(Ar-Ar 年龄 143Ma^①)、高 Nb 玄武岩(李金

祥等, 2008a), 玄武安山岩、安山岩(锆石 SHRIMP 年龄 $111 \pm 1.8\text{Ma}$, 黄瀚霄等, 待发表)等, 表明多龙矿集区处于岛弧环境 (Stern, 2004; 邓晋福等, 2007)。波龙斑岩铜矿成矿斑岩具有明显的岛弧岩浆岩特征, 且具有高 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 、低 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 和负 $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$ 值, 其 MgO 含量和 Cr、Ni 等相容元素含量也较低, 表明形成系列花岗闪长斑岩的岩浆起源于下地壳。多龙矿集区晚于成矿的安山岩 ($111 \pm 1.8\text{Ma}$) 为洋壳俯冲诱发的钠质岩浆岩 (黄翰霄等, 待发表), 表明在 120Ma 多龙矿集区深部仍有俯冲洋壳存在。因此, 波龙斑岩铜矿可能形成于班公湖-怒江洋俯冲末期, 其成矿环境可能为岛弧演化形成的陆缘弧环境。

早白垩世, 班公湖-怒江洋向北俯冲末期, 区域内构造应力机制发生转换, 形成了系列走滑断裂。俯冲洋壳脱水形成的流体交代楔形地幔并诱发部分熔融, 形成基性岩浆; 基性岩浆上涌在下地壳石榴石+金红石稳定区经历了熔化 (melting)、同化 (assimilation)、存储 (storage) 和均一 (homogenization) 的 MASH 过程 (Hildreth et al., 1988), 受压力差驱动上侵, 并部分熔化和同化部分下地壳岩石, 最终在浅部地壳内形成稳定的岩浆房; 基性熔体将成矿元素和 S、Cl 等挥发份携带至浅部岩浆房内 (Hattori et al., 2001), 使金属元素聚集, 成矿流体分凝; 岩浆房内岩浆沿走滑断裂脉动侵位, 在多龙矿集区内形成多个斑岩侵入体; 成矿流体携带成矿元素伴随岩浆侵位上涌, 最终在构造有利部位形成了波龙、多不杂等斑岩铜金矿床。

6 结论

波龙斑岩铜金矿床中发育 3 期斑岩, 其中前两期花岗闪长斑岩是波龙矿床的主要成矿斑岩, 成岩年龄均集中于 119 ~ 120Ma。

波龙斑岩铜金矿床前两期花岗闪长斑岩均富集轻稀土、大离子亲石元素, 亏损重稀土和高场强元素, Eu 异常不明显, 具有高 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 、低 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 、负 $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$ 值和正 $\epsilon_{\text{Hf}(t)}$ 值, 表明形成两期花岗闪长斑岩的岩浆起源于新生的下地壳。中生代班公湖-怒江洋向北俯冲, 诱发了多龙矿集区大规模岩浆作用, 形成了波龙斑岩铜金矿床。

注 释

①四川省地质调查院, 2006, 1 : 25 万物玛幅区域地质调查报告。

参 考 文 献

- 侯可军. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. 岩石学报, 23(10): 2595~2604.
- 黄瀚霄, 李光明, 刘波, 陈华安, 祝向平, 范安辉, 李玉彬. 西藏多龙矿集区美日切错组安山岩年代学、地球化学及地质意义. 投稿中.
- 李光明, 段志明, 刘波, 张晖, 董随亮, 张丽. 2011. 西藏班公湖-怒江结合带北缘多龙地区侏罗纪增生杂岩的识别及意义. 地质通报, 30(8): 1256~1260.
- 李金祥, 李光明, 秦克章, 肖波. 2008a. 班公湖带多不杂富金斑岩铜矿床斑岩-火山岩的地球化学特征与时代: 对成矿构造背景的制约. 岩石学报, 24(3): 531~543.
- 李金祥. 2008b. 班公湖带多不杂超大型富金斑岩铜矿床的成岩成矿年代学、岩石学及高氧化岩浆-流体-成矿作用. 北京: 中国科学院研究生院博士学位论文, 1~225.
- 莫宣学, 潘桂棠. 2006. 从特提斯到青藏高原形成: 构造-岩浆事件的约束. 地学前缘, 13(6): 43~51.
- 潘桂棠, 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. 岩石学报, 22(3): 521~533.
- 潘桂棠, 朱弟成, 王立全, 廖忠礼, 耿全如, 江新胜. 2004. 班公湖-怒江缝合带作为冈瓦纳大陆北界的地质地球物理证据. 地学前缘, 11(4): 371~382.
- 邱瑞照, 周肃, 邓晋福, 李金发, 肖庆辉, 蔡志勇. 2004. 西藏班公湖-怒江西段舍马拉沟蛇绿岩中辉长岩年龄测定——兼论班公湖-怒江蛇绿岩带形成时代. 中国地质, 31(3): 262~268.
- 曲晓明, 辛洪波, 杜德道, 陈华. 2012. 西藏班公湖-怒江缝合带中段碰撞后 A-型花岗岩的时代及其对洋盆闭合时间的约束. 地球化学, 41(1): 1~4.
- 曲晓明, 辛洪波. 2006. 藏西班公湖斑岩铜矿带的形成时代与成矿构造环境. 地质通报, 25(7): 792~799.
- 余宏全, 李进文, 马东方, 李光明, 张德全, 丰成友, 屈文俊, 潘桂棠. 2009. 西藏多不杂斑岩铜矿床辉钼矿 Re-Os 和锆石 U-Pb SHRIMP 测年及地质意义. 矿床地质, 28(6): 737~746.
- 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.
- 辛洪波, 曲晓明, 王瑞江, 刘鸿飞, 赵元艺, 黄玮. 2009. 藏西班公湖斑岩铜矿带成矿斑岩地球化学及 Pb、Sr、Nd 同位素特征. 矿床地质, 28(6): 785~792.
- 祝向平, 陈华安, 马东方, 黄瀚霄, 李光明, 李玉彬, 李玉昌. 2011. 西藏波龙斑岩铜金矿床的 Re-Os 同位素年龄及其地质意义. 岩石学报, 27(7): 2159~2164.
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . Chemical Geology, 192: 59~79.
- Barry T L, Pearce J A, Leat P T, Millar I L, le Roex A P. 2006. Hf isotope evidence for selective mobility of high-field-strength elements in a subduction setting: South Sandwich Islands. Earth and Planetary Science Letters, 252: 223~244.
- Blichert-Toft J, Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. Earth and Planetary Science Letters, 148: 243~258.
- Davidson J P. 1996. Deciphering mantle and crustal signatures in subduction zone magmatism. Geophysical Monograph, 96: 251~262.
- Davidson J, Turner S, Handley H, Macpherson C, Dosseto A. 2007. Amphibole "sponge" in arc crust? Geology, 35: 787~790.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. Nature, 347: 662~665.
- Foley S F, Wheller G E. 1990. Parallels in the origin of the geochemical signatures of island arc volcanics and continental potassic igneous rocks-The role of residual titanites. Chemical Geology, 85: 1~18.
- Gao Shan, Liu Xiaoming, Yuan Honglin, Hattendorf B, Gunther D, Chen Liang, Hu Shenhong. 2002. Determination of forty-two major and trace elements in USGS and NIST SRM glasses by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. Geostandards Newsletter-Journal of Geostandards and Geoanalysis, 26: 191~196.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, Jackson S E, van Achterbergh E, O'Reilly S Y, Shee S R. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. Geochimica et Cosmochimica Acta, 64: 133~147.
- Hattori K. and Keith J. 2001. Contribution of mafic melt to porphyry copper mineralization: evidence from Mount Pinatubo, Philippines, and Bingham Canyon, Utah, USA. Mineralium Deposita, 36: 799~806.
- Hildreth W and Moorbath S. 1988. Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of Central Chile. Contributions to Mineralogy and Petrology, 98: 455~489.
- Kapp P, DeCelles P G, Gehrels G E, Heizler M, Ding L. 2007. Geological records of the Lhasa-Qiangtang and Indo-Asian collisions in the Nima area of central Tibet. Geological Society of America Bulletin, 119: 917~933.
- Keto L S, Jacobsen S B. 1987. Nd and Sr isotopic variations of Early Paleozoic oceans. Earth and Planetary Science Letters, 84: 27~41.
- Li Jinxiang, Qin Kezhang, Li Guangming, Xiao Bo, Zhao Junxing, Chen Lei. 2011. Magmatic-hydrothermal evolution of the Cretaceous Duolong gold-rich porphyry copper deposit in the Bangongco metallogenic belt, Tibet: Evidence from U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology. Journal of Asian Earth Sciences, 41: 525~536.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, Günthe, D, Xu Juan, Gao Chaogui, Chen Haihong. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. Chemical Geology, 257: 34~43.
- Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, Gao Changgui, Zong Keqing, and Wang Dongbin. 2010a. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths. Journal of Petrology, 51: 537~571.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zong Keqing, Gao Changgui, Gao Shan, Xu Juan, Chen Haihong. 2010b. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. Chinese Science Bulletin, 55: 1535~1546.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. Earth-Science Reviews, 37: 215~224.
- Morel M L A, Nebel O, Nebel-Jacobsen YJ, et al. Hafnium isotope characterization of the GJ-1 zircon reference material by solution and laser-ablation MC-ICPMS. Chemical geology, 2008, 255:

231~235.

- Peccerillo A, Taylor SR. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58: 63~81.
- Richards J P. 2003. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation. *Economic Geology*, 98: 1515~1533.
- Shi Rendeng, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Qi Xuxiang. 2008. The Bangong Lake ophiolite (NW Tibet) and its bearing on the tectonic evolution of the Bangong-Nujiang suture zone. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32: 438~457.
- Shi Rendeng. 2007. SHRIMP dating of the Bangong Lake SSZ-type ophiolite: Constraints on the closure time of the ocean in the Bangong Lake-Nujiang River, northwestern Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 52 (7): 936~941.
- Sláma J, Kosler J, Condon D J, Crowley J L, Gerdes A, Hancher J M, Horstwood M S A, Morris G A, Nasdala L, Norberg N, Schaltegger U, Schoene B, Tubrett M N and Whitehouse M J. 2008. Plesovice zircon-A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249: 1~35.
- Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, Isachsen C E. 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219: 311~324.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geological Society of London Special Publication* 42: 313~345.
- Tatsumi Y, Hamilton D L, Nesbitt R W. 1986. Chemical characteristics of fluid phase released from a subducted lithosphere and the origin of arc magmas: Evidence from high pressure experiments and natural rocks. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 29: 293~309.
- Ulrich T and Heinrich C A. 2001. Geology and alteration geochemistry of the porphyry Cu-Au deposit at Bajo de la Alumbrera, Argentina. *Economic Geology*, 96: 1719~1742.
- Wang Baodi, Chen Jianlin, Xu Jifeng, Wang Liquan, Zeng Qinggao, Dong Yanhui. 2010. Chronology and geochemistry of the Nadingcuo Volcanic rocks in the southern Qiangtang Region of the Tibet Plateau: Partial melting of the remnant Ocean crust along the Bangong-Nujiang suture. *Acta Geologica Sinica*, 84 (6): 1461~1473.
- Woodhead J, Hergt J, Greig A, Edwards L. 2011. Subduction zone Hf-anomalies: Mantle messenger, melting artefact or crustal process? *Earth and Planetary Science Letters*, 304: 231~239.
- Xiong Xiaolin, Adam T J, Green T H. 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis. *Chemical Geology*, 218: 339~359.
- Zhang Hongfei, Gao Shan, Zhong Zengqiu, Zhang Benren, Zhang Li, Hu Shenghong. 2002. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of Cretaceous granitoids: constraints on tectonic framework and crustal structure of the Dabieshan ultrahigh pressure metamorphic belt, China. *Chemical Geology*, 186: 281~299.
- Zhu Dicheng, Mo Xuanxue, Niu Yaoling, Zhao Zhidan, Wang Liquan, Liu Yongsheng and Wu Fuyuan. 2009. Geochemical investigation of Early Cretaceous igneous rocks along an east-west traverse throughout the central Lhasa Terrane, Tibet. *Chemical Geology*, 268: 298~312.
- Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, Niu Yaoling, Dilek Y, Hou Zengqian, Mo Xuanxue. 2012. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau. *Gondwana Research*, in press.

Geochronology and Geochemistry of the Bolong Porphyry Cu-Au Deposit, Tibet and Its Mineralizing Significance

CHEN Huaan¹⁾, ZHU Xiangping¹⁾, MA Dongfang¹⁾, HUANG Hanxiao¹⁾, LI Guangming¹⁾,
LI Yubin²⁾, Li Yuchang²⁾, WEI Lujie²⁾, LIU Chaoqiang²⁾

1) *Chengdu Institute of Geology and Mineral resources, Chengdu, 610081; 2) No. 5 Geological Party, Tibet Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Golmud, Qinghai, 816000*

Abstract

Bolong porphyry copper deposit is the largest newly discovered deposit in the middle of Tibet plateau. Three stages of granodiorite porphyries were emplaced in the Bolong porphyry deposit, and the former two stages of granodiorite porphyries are mineralized porphyries. Zircon U-Pb dating, bulk rock geochemical compositions and Sr-Nd-Hf isotopic compositions of these porphyries were analyzed. Zircon U-Pb dating results shows that all these porphyries were intruded at 119 ~ 120Ma. The former two stages of granodiorite porphyries are enriched in light rare earth elements and large ion lithophile elements, and depleted in heavy earth elements and high field-strength elements, with weak Eu anomalies, indicating that these granodiorite porphyries resemble arc magmas in composition. $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ values of the first and the second stage of granodiorite porphyry are 0.70562 ~ 0.70711 and 0.70567 ~ 0.70850 respectively, with $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$ ranges within -4.0 ~ -3.1 and -8.0 ~ -2.4, $\epsilon_{\text{Hf}(t)}$ varies within 2.5 ~ 6.9 and 3.3 ~ 6.9 respectively, suggesting that two stages of granodiorite porphyries were derived from juvenile lower crust. The third stage of granodiorite porphyry also shows arc magma affinities in composition, its higher $\epsilon_{\text{Nd}(t)}$ (-0.7 ~ -0.2) and $\epsilon_{\text{Hf}(t)}$ (1.3 ~ 12.2) might suggest that the third stage of granodiorite porphyry was also generate from lower crust with more mantle-derived materials. Bolong porphyry deposit were formed at the late stage of the northward subduction of the Bangong Lake Neo-Tethyan Ocean, and the magmatic activity in the Bolong deposit should have close relationship with oceanic subduction, melt generated from subducted oceanic crust and subarc mantle wedge was upwelled, which might triggered partial melting of juvenile lower crust and formed the Bolong porphyry copper deposit, imply that the southern Qiangtang terrane should be thickened at 120Ma.

Key words: Bolong porphyry deposit; Bangonghu-Nujiang metallogenic belt; magmatic evolution; zircon U-Pb age