

编号: 0258-7106(2011)02-0266-13

邦铺钼(铜)矿床二长花岗斑岩、黑云二长花岗岩 锆石 Hf 同位素和 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值*

罗茂澄¹, 王立强², 冷秋锋³, 陈伟³

(1 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;
3 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘要 文章对邦铺钼(铜)矿区产出的中新世二长花岗斑岩(16.23 ± 0.19) Ma)及古新世黑云二长花岗岩(62.1 ± 1.9) Ma)的锆石进行了微量元素和 Hf 同位素组成的研究。锆石 Hf 原位分析表明,邦铺钼(铜)矿区含矿二长花岗斑岩、成矿前黑云二长花岗岩的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分别为 0.282 818~0.282 904 和 0.282 748~0.282 969, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 平均值分别为 +3.0 和 +3.1, 地壳 Hf 模式年龄平均值分别为 878 Ma 和 816 Ma。表明岩浆源区主要来源于年轻地幔的组分,但在岩浆演化中遭受了古老地壳物质的混染。通过理论计算,获得二长花岗斑岩、黑云二长花岗岩锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值分别为 557.53 和 239.5, 说明含矿岩体的氧逸度大于不含矿岩体的氧逸度。通过区域对比研究,从拉萨到工布江达,从雅鲁藏布江至念青唐古拉,冈底斯成矿带岩浆源区可能混染了越来越多的古老地壳物质,岩浆氧逸度逐渐增大。

关键词 地球化学; Hf 同位素; Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值; 二长花岗斑岩; 黑云二长花岗岩; 邦铺钼(铜)矿; 冈底斯; 西藏
中图分类号: P618.65; P618.41 文献标志码: A

Zircon Hf isotope and Ce^{4+}/Ce^{3+} ratio of the monzogranite porphyry and biotite monzonitic granite in Bangpu Mo(Cu) deposit, Tibet

LUO MaoCheng¹, WANG LiQiang², LENG QiuFeng³ and CHEN Wei³

(1 School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3 College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract

This paper reports trace element compositions and Hf isotope compositions of zircons from Miocene monzogranite porphyry (16.23 ± 0.19 Ma) and Paleocene biotite monzonitic granite (62.1 ± 1.9 Ma) in the Bangpu Mo(Cu) deposit, Tibet. LA-MC-ICP-MS in-situ Lu-Hf isotope analysis of zircon grains from the ore-bearing monzogranite porphyry and the pre-mineralization biotite monzonitic granite gave $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ratios ranging from 0.282 818 to 0.282 904 and from 0.282 748 to 0.282 969, the average $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ of 3.0 and 3.1 and the average T_{DM2} of 878 and 816 Ma, respectively, suggesting that their parental magmas were mainly derived from a young mantle and partly mixed with old continental crust rock during the evolution. The Ce^{4+}/Ce^{3+} ratios of

* 本文为国土资源部公益性行业科研专项(200911007-02)国家基础研究计划“973”项目(2011CB403100)和中国地质调查局青藏高原专项(1212010012005)资助的成果

第一作者简介 罗茂澄,男,1986年生,在读硕士研究生,矿物学、岩石学、矿床学专业,主要从事成矿系统和区域成矿学研究。Email: luomaocheng@gmail.com

收稿日期 2010-12-17; 改回日期 2011-03-06。张绮玲编辑。

the same zircons were 557.53 and 239.5, indicating that ore-bearing rocks were in higher oxygen fugacity than barren ones. From Lhasa to Gongbo'gyamds and from Yarlung Zangbo suture to Nyainqentanqha, the magmas in Gangdese metallogenic belt were increasingly contaminated by old crust material, accompanied by the increase of their oxygen fugacity.

Key words: geochemistry, Hf isotope, Ce^{4+}/Ce^{3+} ratio, monzogranite porphyry, biotite monzonitic granite, Bangpu Mo(Cu) deposit, Gangdese, Tibet

邦铺钼(铜)矿床位于冈底斯成矿带东段驱龙-甲玛铜钼多金属矿集区内(唐菊兴等 2009)地理位置上距离甲玛铜多金属矿床、驱龙斑岩型铜钼矿床分别为 30 km、45 km(图 1),是藏中有色金属开发区内的一个重要矿床。2007 年以前,人们主要针对邦铺一带花岗质岩体外围接触带的矽卡岩型、热液脉型铅锌矿开展勘查和研究,由宝民矿业公司探查和开发矽卡岩型-热液脉型铅锌矿。2007 年开始,由天仁矿业公司委托西藏地热队在该区开展详细的地质勘查,同时,相关的研究工作开始介入,对成岩成矿时代、成矿流体性质进行了有益的探讨(孟祥金等 2003;周雄 2009),但一些关键性的问题,如岩浆

起源、深部过程及成矿流体的演化过程等方面,还缺乏研究。

锆石是岩浆岩中最重要的副矿物,随着单颗粒锆石成分、同位素和微量元素原位分析技术的迅速发展,使得与岩石成因有关的一系列重要地质问题的研究大大加快,如锆石 Lu-Hf 同位素为探讨地幔在花岗岩形成过程中的作用提供了新途径(吴福元等 2007a),锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值是含矿岩体的相对氧逸度研究的有效指示(赵振华 2010)。因此,本文通过分析邦铺矿区含矿二长花岗斑岩、成矿前黑云二长花岗岩中锆石的 Hf 同位素组成和微量元素特征,并与同一成矿带内的驱龙、拉抗俄、南木、亚贵拉

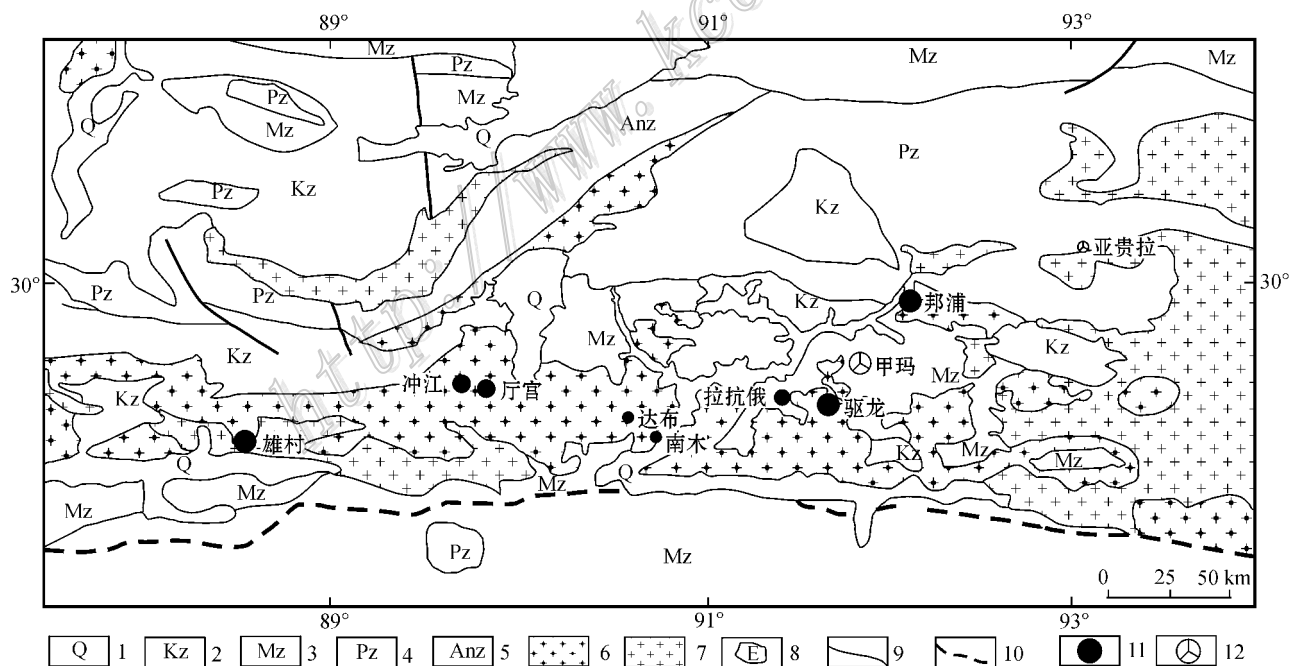


图 1 西藏冈底斯成矿带东段主要铜多金属矿床分布图(据李光明等 2005 和高一鸣 2010 修改)

1—第四系;2—新生代;3—中生代;4—古生代;5—前震旦系;6—喜马拉雅期花岗岩;7—燕山期花岗岩;8—超基性岩;9—断层;
10—缝合带;11—斑岩型铜矿床;12—矽卡岩型铜多金属矿床

Fig. 1 Distribution of main copper-polymetallic deposits in the east section of Gangdise metallogenic belt

(modified after Li et al., 2005 and Gao, 2010)

1—Quaternary; 2—Cenozoic; 3—Mesozoic; 4—Paleozoic; 5—Pre-Sinian; 6—Himalayan granite; 7—Yanshannian granite; 8—Ultrabasic rocks;
9—Fault; 10—Suture zone; 11—Porphyry copper deposit; 12—Skarn copper-polymetallic deposit

矿床的相关资料进行对比,对岩浆的来源、氧逸度进行了初步探讨。

1 矿床地质特征

邦铺钼(铜)矿床位于西藏特提斯构造域冈底斯-念青唐古拉板片中南部,矿区内构造以近东西向—北西西向断裂为主(周雄,2009)。下面简要介绍其地质特征。

矿区出露地层简单,包括古近系典中组以及下二叠统洛巴堆组凝灰质砂板岩、灰岩,地层之间多以断层接触(周雄,2009)。矿区发育多期次侵入岩,包括二长花岗斑岩、黑云二长花岗岩、花岗闪长斑岩、石英二长斑岩、闪长(玢)岩、辉绿岩以及辉长-辉绿岩。矿床蚀变分带由二长花岗斑岩岩体中心向上依次为:硅化带、黄铁绢云岩化带和青磐岩化带,后期的黏土化带叠加于早期的硅化带之上。矿化类型主要为黄铜矿化、辉钼矿化、黄铁矿化和铅锌矿化,黄铜矿主要分布在闪长(玢)岩中,辉钼矿主要分布在二长花岗斑岩中,铅锌矿主要赋存于洛巴堆组中。矿石矿物组成较为简单,主要有辉钼矿、黄铜矿、黄铁矿,发育少量闪锌矿、方铅矿、磁铁矿和孔雀石等;矿石结构以他形为主,次为半自形-自形;矿石构造主要有细脉状、浸染状、网脉状,次为团块状、角砾状等。脉体相互穿切关系反映出邦铺矿床热液活动有5个阶段:①黄铜矿-黄铁矿阶段;②石英-辉钼矿阶段;③石英-硫化物阶段;④铅锌硫化物阶段;⑤石英-硫酸盐阶段。其中,铜主要在①阶段沉淀,钼主要在②、③阶段沉淀。

2 岩石样品特征

二长花岗斑岩是与钼矿成矿关系最为密切的岩体。样品 PD7001YT-5 二长花岗斑岩采自平硐 PD7001(图2)斑状结构,块状构造。斑晶含量40%~50%,主要为钾长石(15%~25%)、石英(10%~15%)和斜长石(5%~10%),斑晶粒径2~6 mm,还可见少量黑云母、角闪石(<5%)。钾长石自形程度最好,斜长石次之,石英具典型的熔蚀结构(图3A),呈港湾状、浑圆状;长石斑晶发育环带结构、嵌晶结构。基质成分主要为长英质矿物,还有方解石、黏土矿物及绢云母、绿泥石等蚀变矿物。

黑云二长花岗岩岩体未见矿化,属于成矿前侵

位的岩体。样品 SWYT-1 黑云二长花岗岩采自矿区西南部岩体露头(图2,坐标:X=3307985,Y=10396221,H=4744 m)。样品质量约9 kg,岩石新鲜面呈肉红色,花岗结构,块状构造。主要矿物为石英(约45%)、钾长石(约30%)、斜长石(约25%)和黑云母(<5%)。石英呈他形粒状,波状消光明显,发育再生加大边。钾长石、斜长石呈板柱状,半自形-自形,钾长石发育条纹结构(图3B)反应边结构。

3 分析方法和测试结果

3.1 分析方法

测试分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。将岩石中的锆石挑出,样品锆石与标准锆石一起粘贴,制成环氧树脂样品靶,然后进行阴极发光照相。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、微量元素分析在 Agilent 7500a 型 ICP-MS 上完成,激光束斑直径为 30 μm 。

锆石颗粒 Lu-Hf 同位素组成原位分析在 Nu Plasma HR Wrexham, UK 多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)上完成。分析时斑束直径为 44 μm ,每个分析点的气体背景采集时间为 30 s,信号采集时间为 40 s。在样品测定期间,对标准参考物质 91500 和 GJ-1 进行分析,分析获得 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值的 变化范围为 0.282 277~0.282 350 和 0.281 947~0.282 052,平均值为 0.282 305 和 0.282 007,与推荐值在误差范围内一致。

3.2 锆石特征

二长花岗斑岩中的锆石透明度较好,无色,晶体的长 69~253 μm ,长宽比为 1.3~4.3,呈长柱状、柱状,少数呈浑圆状,自形程度较高。主晶面平直、清晰,晶棱直。裂纹不发育,无熔蚀结构,少数锆石具有残留核。阴极发光图像上具明显的振荡环带和扇形环带(图4),环带较窄,说明锆石在低温条件下结晶,微量元素的扩散速度慢(吴元保等,2004),具有典型中酸性岩浆锆石的特点。锆石内部普遍发育包裹体,呈针状、片状、柱状,分布无定向性。

黑云二长花岗岩中的锆石透明度好,无色,根据显微结构特征可分为2组。第一组锆石数量较多,长 58~294.6 μm ,长宽比为 1.5~5。晶体呈长柱状、柱状,自形程度较好。一部分锆石裂纹发育,少数具熔蚀结构、残留核。阴极发光图像上具清晰的振荡环带(图5),锆石内部包裹体发育较少,一般

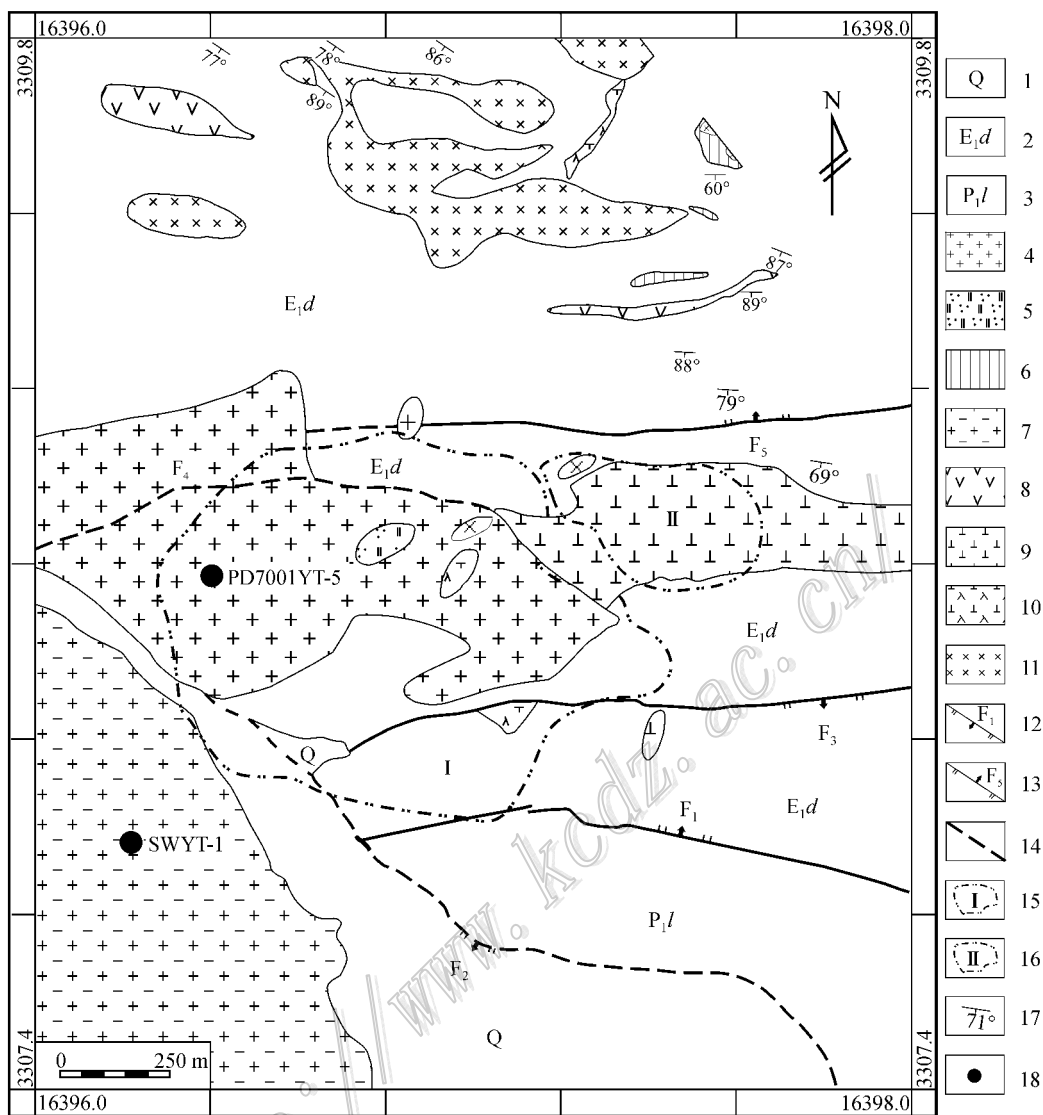


图 2 邦铺钼(铜)矿区地质简图(据^①修改)

1—第四系砂砾层;2—古近系典中组凝灰质砂板岩;3—下二叠统洛巴堆组凝灰质砂板岩、灰岩;4—含钼(铜)二长花岗斑岩;5—石英二长斑岩;6—含铜花岗闪长斑岩;7—黑云二长花岗岩;8—安山岩;9—闪长(玢)岩;10—石英闪长玢岩;11—辉绿岩-辉长辉绿岩;12—实测及推测正断层及编号;13—实测及推测逆断层及编号;14—不明性质断层;15—钼矿化边界及编号;16—铜矿体边界及编号;17—地层产状;18—采样位置

Fig. 2 Simplified geological map of the Bangpu molybdenum (copper) ore district (modified after^①)

1—Quaternary sandy gravel;2—Tuffaceous sandy slate of Paleogene Dianzhong Formation;3—Tuffaceous sandy slate and limestone of Lower Permian Luobadui Formation;4—Mo and Cu bearing monzogranite porphyry;5—Beschtuite;6—Cu-bearing granodiorite-porphyry;7—Biotite monzonitic granite;8—Andesite;9—Diorite porphyrite;10—Quartz diorite porphyrite;11—Diabase and gabbro-diorite;12—Measured and inferred normal fault and its serial number;13—Measured and inferred reverse fault and its serial number;14—Unknown fault;15—Mo mineralization boundary and its serial number;16—Cu ore body boundary and its serial number;17—Attitude of strata;18—Sampling location

呈针状、短柱状,沿锆石长轴方向定向分布。第二组锆石数量较少,粒径为 57.6~117.4 μm,长宽比小于 1.5。晶形破碎,晶体呈浑圆状、不规则状,裂纹不

发育且不含残留核,部分锆石具熔蚀结构。阴极发光图像上呈黑色,均质,无振荡环带。锆石内未发现包裹体。

① 西藏自治区地勘局地质大队. 2009. 西藏自治区墨竹工卡县邦铺矿区钼(铜)多金属矿详查报告(1:1000). 内部报告.

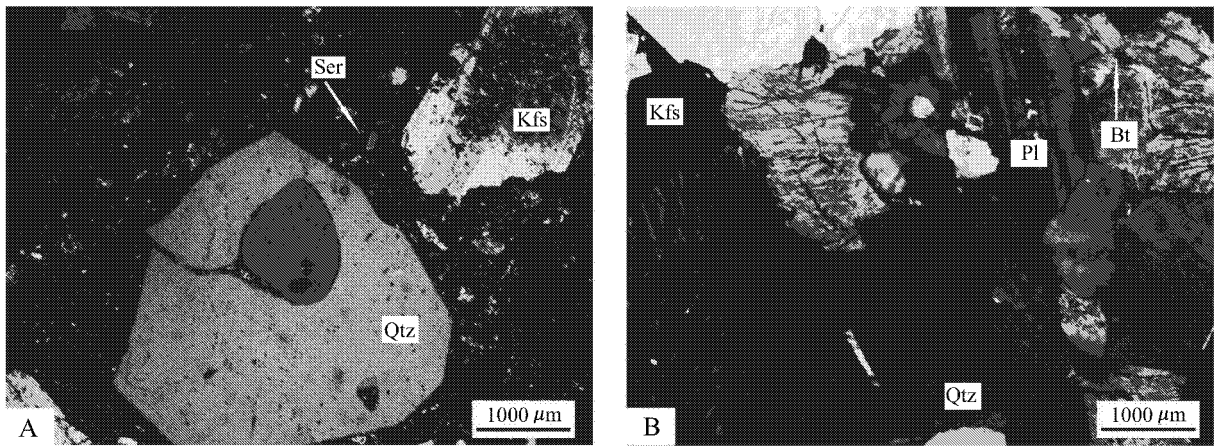


图3 石英熔蚀结构(A)及钾长石条纹结构(B)

Qtz—石英;Kfs—钾长石;Ser—绢云母;Pl—斜长石;Bt—黑云母

Fig. 3 Corrosion texture in quartz(A) and perthitic texture in K-feldspar(B)

Qtz—Quartz;Kfs—K-feldspar;Ser—Sericitc;Pl—Plagioclase;Bt—Biotite

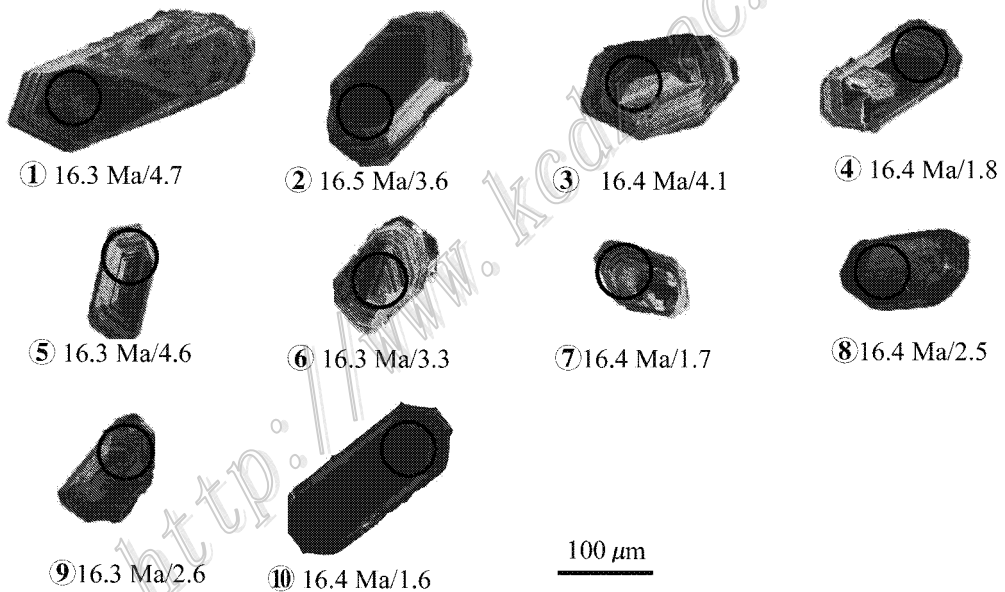


图4 邦铺矿床二长花岗斑岩锆石阴极发光图像
测试点位分析点下的数字表示 U-Pb 年龄/ $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值

Fig. 4 Cathodoluminescence images of zircons from monzogranite porphyry in the Bangpu ore deposit
Numbers below test points stand for U-Pb ages/ $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$

3.3 锆石 U-Pb 年龄、微量元素分析结果

在样品 PD7001YT-5(二长花岗斑岩)中分选出的锆石共测试了 26 个点,得到 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 (16.23 ± 0.19) Ma, 岩体形成于中新世; 样品 SWYT-1(黑云二长花岗岩)中分选出的锆石共测试了 25 个点,得到 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 (62.1 ± 1.9) Ma, 岩体形成于古新世。在 LA-ICP-MS U-Pb 定年的同时, 获得了锆石微量元素的数据,

部分结果列于表 1。

二长花岗斑岩锆石稀土元素总量为 $346.3 \sim 866.0 \mu\text{g/g}$, 平均为 $515.6 \mu\text{g/g}$, U/Yb 比值为 $0.99 \sim 2.48$, 平均为 1.53。Th、U 的质量分数较高, 分别为 $285.8 \sim 999.5 \mu\text{g/g}$ 和 $209.8 \sim 528.8 \mu\text{g/g}$, 平均为 $361.5 \mu\text{g/g}$ 和 $267.3 \mu\text{g/g}$, Th/U 比值为 $1.1 \sim 1.9$, 平均为 1.3。

黑云二长花岗岩锆石稀土元素总量为 $559.6 \sim$

表 1 邦铺矿床二长花岗斑岩、黑云二长花岗岩锆石微量元素数据($w_B/10^{-6}$)
 Table 1 Zircon trace element data from monzogranite porphyry and biotite monzonitic granite in the Bangpu ore deposit ($w_B/10^{-6}$)

编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	U	Th
PD7001YT-5 二长花岗斑岩																
01	0.787	51.87	0.27	2.87	3.92	1.13	16.31	5.01	53.06	18.74	80	18.49	168.69	29.3	333.49	497.54
02	3.41	52.52	0.904	5.35	4.45	1.098	15.17	4.72	52.28	18.58	79.62	18.25	203.47	29.94	283.2	395.69
03	1.237	43.23	0.417	3.22	4.16	1.261	16.29	4.97	54.38	19.44	84.68	19.46	186.99	32.6	227.14	342.56
04	0.029	39.73	0.084	1.49	3.31	0.996	13.89	4.3	46.45	16.6	71.25	16.5	186.1	27.27	229.34	307.89
05	0.025	46.18	0.104	1.9	3.7	0.924	15.11	4.99	54.37	20.31	90	21.1	249.34	35.18	307.49	378.95
06	22.81	91.49	7.48	35.73	10.72	1.79	21.41	5.71	60.85	21.24	90.48	20.34	211.59	33.96	209.8	288.4
07	0.591	47.48	0.344	4.67	7.65	1.92	25.64	7.6	78.7	26.79	110.98	24.7	217.22	39.5	281.61	459.34
08	0.0202	38.33	0.0824	1.46	3.37	0.87	13.42	4.34	47.66	17.34	75.53	18.2	133.81	30.02	276.83	311.35
09	0.156	44.51	0.144	1.88	3.34	0.907	13.84	4.36	49.04	17.32	75.46	17.48	182.18	28.95	276.37	337.34
10	3.81	43.14	0.932	5.36	3.1	0.762	11.31	3.2	36.34	12.67	57.06	13.05	195.21	21.75	247.9	296.09
全岩	23.706	44.674	5.057	17.184	2.381	0.435	2.012	0.175	0.618	0.09	0.264	0.027	0.17	0.021	1.056	14.05
SWYT-1 黑云二长花岗岩																
01	0.082	28.14	0.122	2.15	4.56	1.652	24.47	9.19	116.52	45.76	218.48	54.35	603.55	96.08	229.88	230.65
02	0.027	21.48	0.0336	0.795	4.49	0.594	43.18	25.75	419.08	185.87	964.9	262.15	2965.04	475.87	2254.97	489.91
03	0.022	36.93	0.0394	0.696	2.85	0.827	23.61	11.72	177.05	77.44	392.72	102.52	1138.86	183.93	739.51	308.51
04	0.063	41.35	0.657	8.6	15.57	6.6	75.19	26.32	316.73	119.15	528.4	127.18	1355.6	214.53	316.02	430.33
05	0.0216	27.66	0.309	1.07	2.81	1.447	19.88	7.98	109.1	46.69	234.78	60.84	694.49	122.98	223.06	207.94
06	0.064	18.67	0.06	0.715	3.05	0.671	25.79	14.18	226.69	100.2	514.43	140.09	1614.94	249.79	832.68	230.81
07	0.067	24.85	0.088	1.94	4.44	2.16	27.41	10.97	144.41	58.63	279.11	69.23	759.84	128.12	185.78	184.92
08	0.056	29.46	0.385	6.52	11.24	4.47	49.48	18.43	230.07	89.52	422.24	104.2	1142.63	183.65	384.34	377.46
09	0.089	22.51	0.0688	1.2	2.66	1.058	16.66	6.72	90.98	38.29	187.73	48.52	549.62	94.14	251.38	196.99
10	0.0205	11.3	0.078	1.21	2.15	0.993	11.32	4.04	51.89	21.38	102.5	24.99	278.65	49.07	40.06	64.05
全岩	9.819	30.424	2.247	8.195	1.471	0.256	1.518	0.162	0.704	0.12	0.313	0.046	0.329	0.054	2.232	7.428

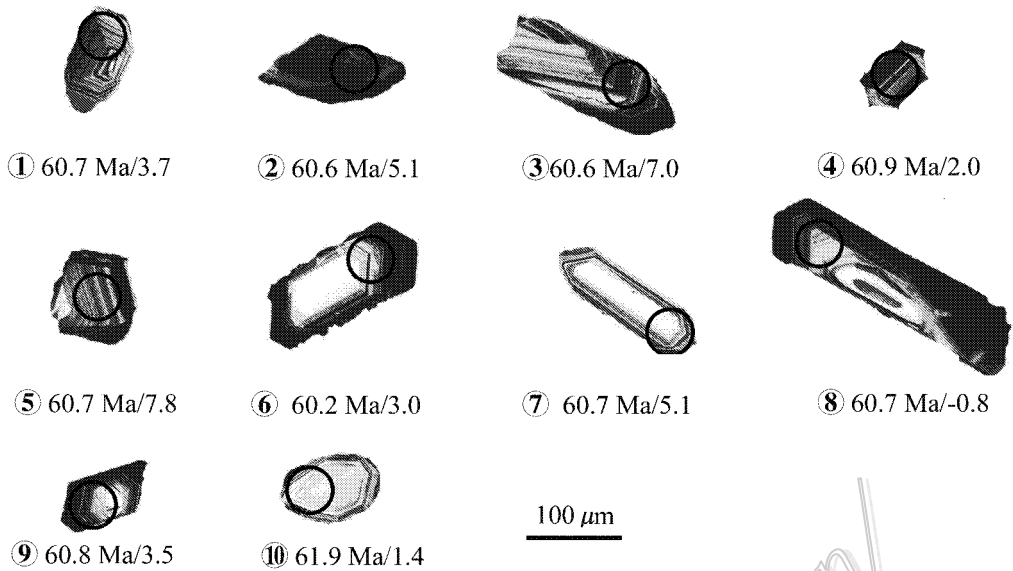


图5 邦铺矿床黑云二长花岗岩锆石阴极发光图像
测试点位分析点下的数字表示 U-Pb 年龄/ $\epsilon_{\text{H}}(t)$ 值

Fig. 5 Cathodoluminescence images of zircons from biotite monzonitic granite in the Bangpu ore deposit
Numbers below test points stand for U-Pb ages/ $\epsilon_{\text{H}}(t)$

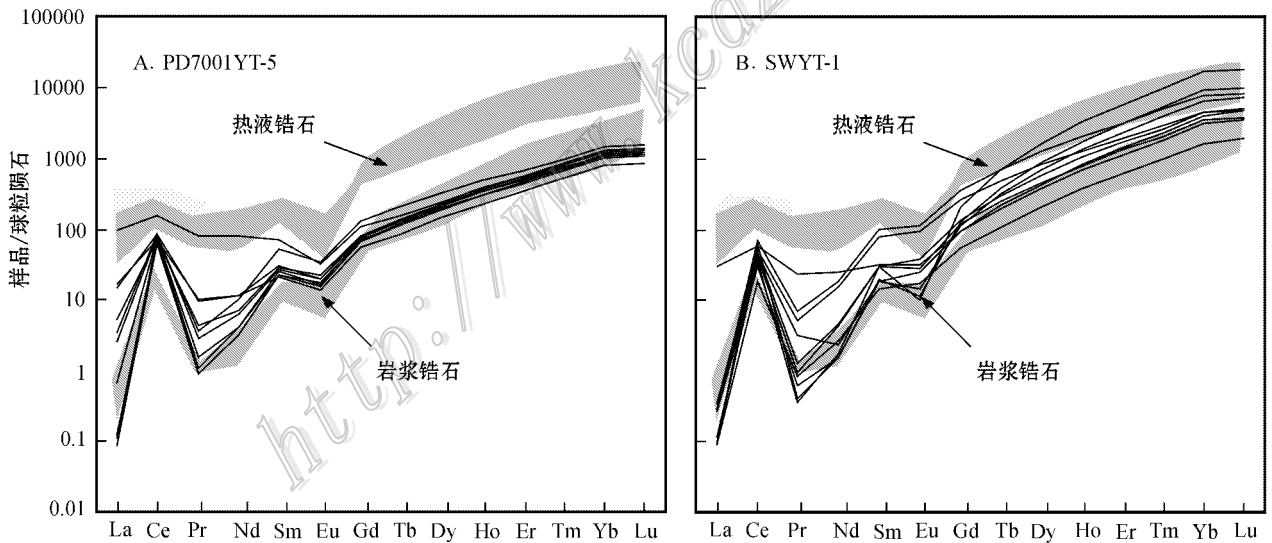


图6 锆石稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(球粒陨石标准值引自 Sun et al., 1989, 底图据赵振华, 2010 修改)
Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns of zircons (chondrite values after Sun et al., 1989, base diagrams modified after Zhao, 2010)

5 369.3 $\mu\text{g/g}$, 平均为 1 757.8 $\mu\text{g/g}$, U/Yb 比值为 0.14~0.76, 平均为 0.42。Th、U 质量分数分别为 64.1~783.88 $\mu\text{g/g}$ 和 40.1~2 255.0 $\mu\text{g/g}$, 平均为 494.8 和 545.8 $\mu\text{g/g}$, Th/U 比值为 0.2~3.7, 平均为 1.1。

两个样品的锆石稀土元素总量均达百分含量级, 锆石的 Th/U 比值接近于 1, 具典型的花岗岩类

锆石的特点 (Belousova et al., 2002; 吴元保等, 2004)。锆石稀土元素球粒陨石标准化曲线比较相似, 总体较陡 (图 6A、6B), 从 La 至 Lu 之间迅速增加, 具 Ce 正异常和 Eu 负异常, 亏损 LREE 而富集 HREE, 除 1 个测点外, 其他 9 个测点的锆石稀土元素配分型式均落入岩浆锆石区域。在 La-(Sm/La)_N 图解中, 二长花岗斑岩 2 号、4 号两个测点落入了热

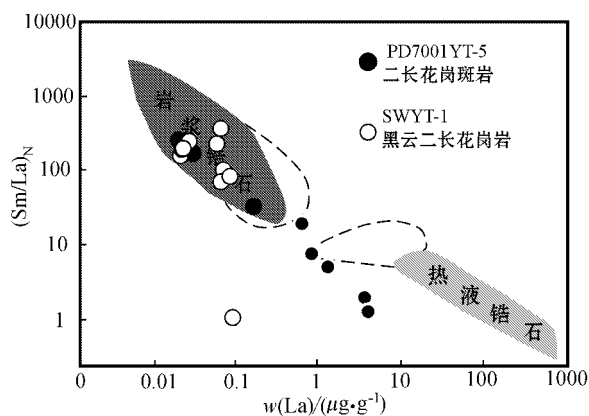


图7 锆石的 $La/(Sm+La)_N$ 图解(底图据赵振华, 2010 修改)

Fig. 7 Diagram of $(Sm/La)_N$ versus La of zircons (base diagrams modified after Zhao, 2010)

液锆石的过渡区域(图7),可能反映了俯冲板片携带的流体对其岩浆源区的影响。

3.4 锆石 Hf 同位素特征

锆石颗粒 Hf 同位素组成原位分析结果见表 2。二长花岗斑岩锆石 10 个测点的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值小

于 0.001,说明锆石形成后放射性成因 Hf 的积累很小。 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值为 0.282 818~0.282 904,平均值为 0.282 858。 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为 +1.6~+4.7,平均值为 +3.0,单阶段 Hf 模式年龄 T_{DM1} 为 488~609 Ma,地壳 Hf 模式年龄 T_{DM2} 为 776~969 Ma。

黑云二长花岗岩锆石 2 号、5 号测点 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值明显过高,可能与锆石较高的 Yb 含量有关,不具有代表性,因此未参与平均值的计算和讨论。 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值为 0.282 748~0.282 969,平均值为 0.282 86。 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为 -0.9~+7.0,平均值为 +3.1,单阶段 Hf 模式年龄 T_{DM1} 为 424~765 Ma,地壳 Hf 模式年龄 T_{DM2} 为 607~1 156 Ma。

3.5 锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值

锆石中 Ce 常表现出强烈的正异常,对形成锆石的岩浆或热液体系氧化-还原状态反应敏感(辛洪波等 2008;赵振华,2010)。Ce 常呈 3 价和 4 价,在氧化条件下,锆石中的 Zr^{4+} 容易被 Ce^{4+} 离子取代,因此可以通过 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值来判断岩浆氧逸度的相对高低。Ballard 等(2002)以斑岩铜矿含矿斑岩体和不含矿斑岩体为研究对象,通过对比锆石 $Ce^{4+}/$

表 2 邦铺矿床二长花岗斑岩、黑云二长花岗岩锆石 Lu-Hf 同位素原位分析结果

Table 2 LA-MC-ICPMS in situ zircon Lu-Hf isotopic analytical results of monzonitic porphyry and biotite monzonitic granite in the Bangpu ore deposit

测点	t/Ma	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	$^{176}Lu/^{177}Hf$	2σ	$\epsilon_{Hf}(t)$	T_{DM1}/Ma	T_{DM2}/Ma	$f_{La/Hf}$
PD7001YT-5 二长花岗斑岩									
01	16.3	0.282904	0.000018	0.000557	0.000003	4.652	488.139	775.814	-0.983
02	16.5	0.282874	0.000012	0.000605	0.000002	3.605	530.316	842.271	-0.982
03	16.4	0.282888	0.000016	0.000912	0.000014	4.109	514.468	810.120	-0.973
04	16.4	0.282823	0.000015	0.000702	0.000005	1.821	602.604	957.313	-0.979
05	16.3	0.282902	0.000016	0.000713	0.000004	4.604	492.039	779.106	-0.979
06	16.3	0.282865	0.000014	0.000764	0.000004	3.288	545.167	862.965	-0.977
07	16.4	0.282820	0.000018	0.000877	0.000005	1.686	610.774	965.737	-0.974
08	16.4	0.282842	0.000012	0.000533	0.000004	2.465	574.416	914.802	-0.984
09	16.3	0.282846	0.000014	0.000760	0.000006	2.612	572.049	906.281	-0.977
10	16.4	0.282818	0.000028	0.000608	0.000002	1.624	608.899	969.312	-0.982
SWYT-1 黑云二长花岗斑岩									
01	60.7	0.282876	0.000018	0.001450	0.000011	3.671	539.704	814.291	-0.956
02	60.6	0.282915	0.000023	0.005324	0.000021	5.073	539.056	734.153	-0.840
03	60.6	0.282969	0.000014	0.003042	0.000020	6.955	424.484	607.432	-0.908
04	60.9	0.282829	0.000035	0.003405	0.000015	2.010	640.772	689.549	-0.897
05	60.7	0.282993	0.000026	0.009980	0.000078	7.803	482.823	662.647	-0.699
06	60.2	0.282857	0.000020	0.000919	0.000007	3.017	558.229	740.866	-0.972
07	60.7	0.282916	0.000017	0.001858	0.000022	5.100	487.015	1155.869	-0.944
08	60.7	0.282748	0.000029	0.003471	0.000027	-0.863	764.936	794.022	-0.895
09	60.8	0.282871	0.000023	0.001934	0.000018	3.503	553.741	958.033	-0.942
10	61.9	0.282812	0.000017	0.001895	0.000021	1.418	638.682	958.378	-0.943

注 SWYT-1 中的 2 号、5 号测点未参与平均值计算 $\epsilon_{Hf}(t)$ 、 T_{DM1} 、 T_{DM2} 、 $f_{La/Hf}$ 值根据吴福元等(2007b)给出的公式计算得出。

表3 斑岩型矿床含矿与不含矿斑岩中锆石的 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值Table 3 Zircon Ce^{4+}/Ce^{3+} ratios of ore-bearing and barren porphyries in porphyry ore deposits

斑岩含矿性	矿床类型	矿床	t/Ma	Ce^{4+}/Ce^{3+}	数据来源
含矿	Cu(Mo)	玉龙	41.2	204 ± 37	Liang et al., 2006
	Cu	拉抗俄	14.57	492.25	辛洪波等 2008
	Cu	冲江	13.17	263.83	
	Cu(Mo)	南木	15.34	291.94	
		Md(Cu)	邦铺	16.23	557.53
不含矿	Md(Cu)	邦铺	62.9	239.5	本文
	Cu(Mo)	玉龙	38.5	122	Liang et al., 2006

Ce^{3+} 比值发现:含矿斑岩体的氧逸度明显高于不含矿斑岩体的氧逸度。Liang 等(2006)对马厂箐铜矿的研究和辛洪波等(2008)对冈底斯斑岩铜矿带拉抗俄、冲江、南木3个矿床的研究也得到了一致的结论(表3)。对于 Ce^{4+} 、 Ce^{3+} 的分配系数 $D_{Ce^{4+}/Ce^{3+}}^{锆石/熔体}$ 、 $D_{Ce^{3+}}^{锆石/熔体}$, 辛洪波等(2008)已经给出了详细的计算公式:

$$[Ce^{4+}/Ce^{3+}]_{锆石} = \frac{Ce_{熔体} - \frac{Ce_{锆石}}{D_{Ce^{3+}}^{锆石/熔体}}}{\frac{Ce_{锆石}}{D_{Ce^{4+}}^{锆石/熔体}} - Ce_{熔体}}$$

据此计算,邦铺矿床二长花岗斑岩和黑云二长花岗岩锆石 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值分别为 557.53 和 239.5 (表3)。

4 讨论

4.1 岩浆源区示踪

锆石具有较高的 Hf 含量, Lu 含量却极低, 其 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 具有非常低的比值(通常小于 0.002)。因此, 锆石在形成后基本没有明显的放射性成因 Hf 的积累, 所测定的锆石的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值基本代表了锆石形成时体系的 Hf 同位素组成(吴福元等, 2007b), 从而能够示踪岩浆源区(陈懋弘等, 2009)。通过计算获得的锆石地壳模式年龄 T_{DM2} 可以反映壳幔分异、地壳形成的时代(吴福元等, 2007b)。另外, Hf 同位素比全岩的 Nd 同位素, 能更加有效地反映岩浆的来源(李皓扬等, 2007)。

邦铺矿床含矿的二长花岗斑岩(PD7001YT-5)及成矿前的黑云二长花岗岩(SWYT-1)中的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 平均值相近, 分别为 +3.0 和 +3.1, 在图 8 中, 二者的数据点均落在球粒陨石线附近, 介于幔、壳两种端元组分之间, 具有幔源 Hf 同位素组成的特征。因此, 邦铺矿区的二长花岗斑岩、黑云二长花岗

岩的岩浆源区主要来源于年轻地幔的组分, 但在岩浆侵位过程中遭受了古老地壳物质的混染。含矿的中新世二长花岗斑岩的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为 +1.6 ~ +4.7, 变化范围较小, 相对于驱龙花岗闪长岩的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值(+7.3 ~ +10.2)更加远离亏损地幔, 可以推断地壳的混染程度较大; 成矿前的古新世黑云二长花岗岩的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值为 -0.9 ~ +7.0, 与林周盆地古新世林子宗群典中组火山岩的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值变化特征(+0.5 ~ +9.0)相一致。二长花岗斑岩的锆石平均 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值为 0.282 858, 与球粒陨石的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值($^{176}Hf/^{177}Hf = 0.282 772 \pm 29$ (2 σ), Blichert et al., 1997)大致相当, 变化范围很小(表2)。黑云二长花岗岩的锆石平均 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值为 0.282 860, 变化范围较大(表2)。二长花岗斑岩、黑云二长花岗岩的锆石 T_{DM2} 值范围、平均 T_{DM2} 值相似(表4)。另外, 斑岩 Md(Cu)型矿床的含矿岩体的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值、平均 T_{DM2} 值均高于与斑岩 Cu(Mo)型矿床(表4)。

围绕冈底斯成矿带花岗岩的源区, 前人开展了大量的工作。纪伟强等(2009)总结了冈底斯新生代花岗岩 Hf 同位素组成的特点: 具有高的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值、正的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值和年轻的模式年龄(1 000 ~ 300 Ma), 提出从新生代早期开始岩浆源区便有古老地壳物质的贡献。莫宣学等(2006)通过系统的同位素地球化学研究后认为, 冈底斯岩基与林子宗火山岩具有相同的起源。唐菊兴等(2010)提出, 甲玛含矿岩浆在结晶分异过程中受到了外来物质的混染, 同一矿集区内的驱龙含矿斑岩岩浆的源区主要为沉积物熔体对岩石圈地幔交代而成, 岩石圈地幔部分熔融后又发生底侵(曲晓明等, 2010)。冈底斯花岗岩具有年轻的模式年龄, 可能是地幔物质透过岩浆底侵-岩浆混合作用大量进入地壳的结果(莫宣学等, 2005)。

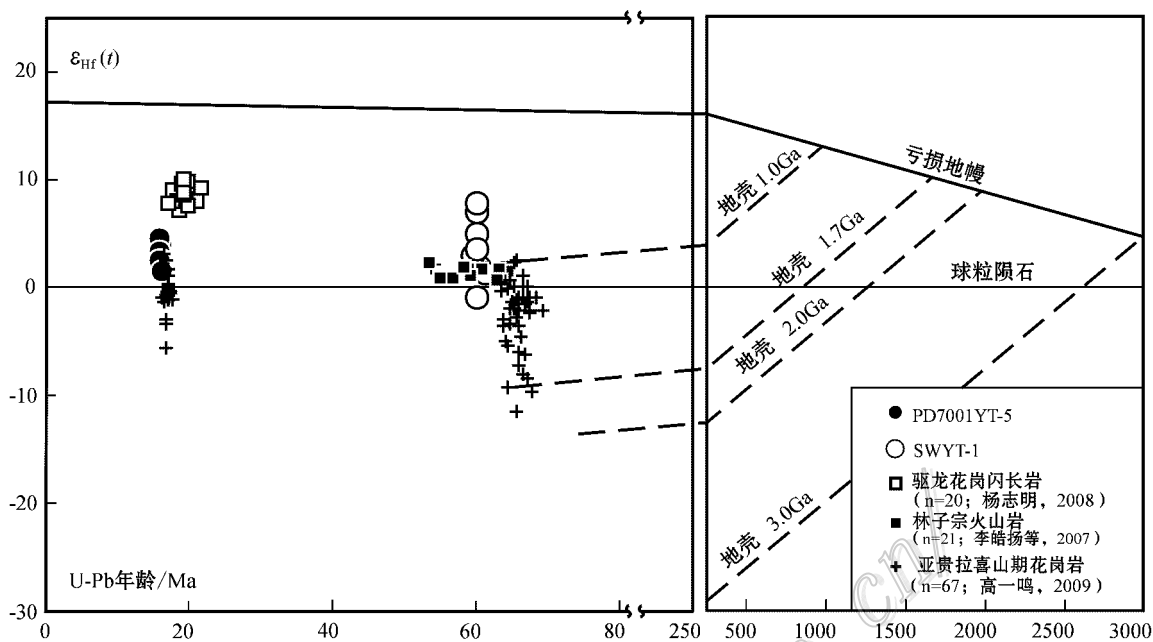


图 8 样品 PD7001YT-5(二长花岗斑岩)和 SWYT-1(黑云二长花岗岩)的锆石 Hf 同位素组成和 U-Pb 年龄作图 (底图据杨志明, 2008 和高一鸣, 2010 修改)

Fig. 8 Plot of $\epsilon_{Hf}(t)$ versus U-Pb ages of zircons from sample PD7001YT-5 (monzogranite porphyry) and SWYT-1 (monzonitic granite) (base diagrams modified after Yang, 2008 and Gao, 2010)

表 4 冈底斯成矿带部分斑岩型矿床岩体中的锆石 T_{DM2} 值

Table 4 Zircon T_{DM2} from rocks of some porphyry ore deposits in Gangdise metallogenic belt

地质年代	矿床类型	矿床或岩石	t/Ma	T_{DM2}/Ma	数据来源
中新世	Cu(Mo)	驱龙	19.5	467~703(543)	杨志明, 2008
	Md(Cu)	邦铺	16.23	776~969(878)	本文
	Pb, Zr(Mo)	亚贵拉	17.4	900~1461(1136)	高一鸣, 2010
古新世		林子宗火山岩	62.5	425~1104(695)	李皓扬等, 2007
	Md(Cu)	邦铺	62.9	607~1155(816)	本文
	Pb, Zr(Mo)	亚贵拉	66	980~1758(1298)	高一鸣, 2010

由此可以推断,在 16 Ma 左右,已经断裂且下沉的洋壳残体,在下沉过程中,不断地被软流圈熔融形成二长花岗斑岩。黑云二长花岗岩与其同时代的林子宗群火山岩具有相同的起源,均为俯冲板片及卷入的陆源沉积物部分熔融的产物(莫宣学等, 2006)。从图 8 和表 4 还可发现,从拉萨至工布江达,岩体中的锆石 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值呈递减趋势,平均 T_{DM2} 值呈递增趋势,表明古老地壳物质对岩浆源区的贡献越来越大;同时,从雅鲁藏布江缝合带向北至念青唐古拉,岩浆源区带混染了越来越多的古老地壳物质成分。

4.2 岩浆相对氧逸度

邦铺矿区含矿二长花岗斑岩(PD7001YT-5)的

Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值高于成矿前的黑云二长花岗岩(SWYT-1)的 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值,说明含矿岩体的氧逸度高于不含矿岩体的氧逸度。岩浆中高的氧逸度,有利于钼、铜的富集(梁华英等, 2004; 简伟等, 2010)。

驱龙矿床的含矿斑岩中产出岩浆成因的硬石膏,说明成矿母岩浆具有很高的氧化状态(肖波等, 2009),与邦铺矿床的含矿斑岩具有相似性。曲晓明等(2004)系统分析了甲玛、拉抗俄、南木、厅宫、冲江及洞嘎 6 个矿床含矿斑岩的 Sr、Pb 同位素,认为沿冈底斯成矿带自西向东,参与岩浆源区混合的俯冲沉积物不断增多。从中可以推断,位于这一递增区

间内的邦铺矿床含矿二长花岗斑岩、驱龙矿床含矿花岗闪长岩的岩浆源区应该也遭受了俯冲沉积物的混染。

辛洪波等(2008)在研究冈底斯铜矿带拉抗俄、南木、冲江3个矿床含矿斑岩的氧逸度时,发现了 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值自西向东呈递增的趋势(表3),因此提出了冈底斯成矿带自东向西岩浆氧逸度递减的变化规律。邦铺矿床含矿斑岩的 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值高于上述3个矿床,进一步证实了这一规律。另外,斑岩 $Md(Cu)$ 型矿床的含矿岩体的氧逸度高于斑岩 $Cu(Mo)$ 型矿床含矿岩体的氧逸度。

4.3 构造动力学背景

冈底斯成矿带经历了晚侏罗世—早白垩世持续向北俯冲这一阶段后,到白垩纪与古近纪之交(65 Ma),印度大陆才开始与拉萨地块碰撞对接(莫宣学等,2009)。随之进入印度-欧亚大陆碰撞造山阶段。在中新世,新特提斯洋片继续北向俯冲,在中新世,冈底斯发生东西向伸展。自印度-亚洲大陆碰撞以来,冈底斯带发生了两次岩浆活动高潮:第一次为同碰撞期岩浆活动(65~40 Ma左右),以巨大规模的曲水花岗岩和林子宗火山岩活动为代表;第二次为后碰撞期岩浆活动(25~10 Ma左右),以钾质-超钾质火山岩、埃达克质斑岩、强过铝花岗岩的准同时活动为特征。而在两次高潮之间(40~25 Ma左右)是一个岩浆活动的间歇期(莫宣学等,2006)。

关于渐新世—中新世岩浆作用的成因,尤其是中新世具埃达克岩性质的含矿斑岩的成因,尚无一致的认识。在岩浆源区方面,部分学者主张岩浆源区经受过俯冲组分交代作用(纪伟强等,2009;曲晓明等,2010);对于软流圈上涌的诱发机制,主要存在两种观点:一种观点认为印度大陆板块的断离作用导致软流圈上涌(李皓扬等,2007;侯增谦等,2004);另一种观点认为岩石圈地幔减薄实现了软流圈的上涌(纪伟强等,2009)。

越来越多的资料表明,中新世含矿斑岩岩浆来自于俯冲板片的重熔,或具有大量俯冲板片参与成岩成矿的地球化学信息。在伸展环境下,已经断裂且下沉的洋壳残体,在下沉过程中,不断地对岩石圈地幔进行交代,尤其是俯冲板片携带的流体及富含钾铝质地壳组分以及洋壳板片易熔融的碱质组分优先进入熔浆,岩石圈地幔部分熔融后又发生底侵,形成数量众多的含矿斑岩。冈底斯含矿斑岩带及共存的中新世超钾质火山岩带仅限于藏南地区,且规模

较小,因为板片断离会引起短期内的大规模岩浆活动(纪伟强等,2009),所以板片断离模式难以成立。本文获得的邦铺矿床二长花岗斑岩、黑云二长花岗岩中锆石 Hf 同位素组成,以及冈底斯成矿带东段岩浆岩的锆石 Hf 同位素组成和相对氧逸度存在的规律性,支持俯冲板片参与源区岩浆作用及岩石圈地幔减薄作用导致软流圈上涌的观点。

邦铺钼(铜)矿床与同一矿集区的甲玛、驱龙等斑岩型、矽卡岩型矿床的形成具相似的地质、地球化学动力学背景。那么,邦铺钼(铜)矿床含矿岩浆的成因及演化是否与甲玛、驱龙等斑岩型、矽卡岩型矿床相似呢?这是需要我们进行更加深入研究的问题。

5 结论

(1) 锆石 Hf 同位素组成原位分析表明,邦铺钼(铜)矿区二长花岗斑岩、黑云二长花岗岩 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值分别为为0.282 818~0.282 904和0.282 748~0.282 969, $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值平均值分别为+3.0和+3.1,地壳 Hf 模式年龄平均值分别为878 Ma和816 Ma,表明岩浆源区主要来源于年轻地幔的组分,但在岩浆演化中遭受了古老地壳物质的混染。

(2) 邦铺钼(铜)矿区二长花岗斑岩、黑云二长花岗岩 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值分别为557.53和239.5,说明含矿岩体的氧逸度大于不含矿岩体的氧逸度,通过与驱龙、拉抗俄、南木矿床的对比,证实了冈底斯成矿带自东向西,岩浆氧逸度递减的变化规律。

(3) 从拉萨到工布江达,从雅鲁藏布江至念青唐古拉,冈底斯成矿带岩浆源区混染了越来越多的古老地壳物质,岩浆氧逸度增大。

志谢 野外地质调查过程中得到西藏地热地质大队张学全高级工程师(邦铺详查项目总技术负责)的大力支持,西北大学大陆动力学国家重点实验室柳小明老师、第五春荣老师等人为样品的分析测试提供了大量帮助;在本文写作过程中,高一鸣、秦志鹏等人给予了无私的指导,提出了重要的修改建议,两位匿名审稿人指出了本文的许多不足,在此一并致谢。

References

Ballard R J, Palin J M and Campell H I. 2002. Relative oxidation states

- of magmas inferred from $Ce(IV)/Ce(III)$ in zircon: Application to porphyry copper deposits of northern Chile [J]. *Contrib. Mineral Petrol.*, 144: 347-364.
- Belousova A E, Griffin L W, O'Reilly Y S and Fisher I N. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type [J]. *Contrib. Mineral Petrol.*, 143: 602-622.
- Blichert T J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system [J]. *Earth Planet.*, 148: 243-258.
- Chen M H, Zhang W, Yang Z X, Lu G, Hou K J and Liu J H. 2009. Zircon SHRIMP U-Pb age and Hf isotopic composition of Baiceng ultrabasic dykes in Zhenfeng County, southwestern Guizhou Province [J]. *Mineral Deposits*, 28(3): 240-250 (in Chinese with English abstract).
- Gao Y M. 2010. Regional metallogenic rule and geological characteristics of Yagula-Sharang mineralization concentration area (dissertation for Doctor degree) [D]. Supervisor: Chen Y C and Tang J X. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences. 78-119 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Gao Y F, Meng X J, Qu X M and Huang W. 2004. Genesis of adakitic porphyry and tectonic controls on the Gangdese Miocene porphyry copper belt in the Tibetan orogen [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 239-248 (in Chinese with English abstract).
- Jiang W, Liu W and Shi L H. 2010. Advance in study of porphyry molybdenum deposits [J]. *Mineral Deposits*, 29(2): 308-316 (in Chinese with English abstract).
- Ji W Q, Wu F Y, Zhong S L and Liu C Z. 2009. Petrogenesis and ages of granites in the Gangdese batholith, South Tibet [J]. *Science in China (Series D)*, 39(7): 849-871 (in Chinese with English abstract).
- Li G M, Liu B, Qu W J, Lin F C, She H Q and Feng C Y. 2005. The porphyry-skarn ore-forming system in Gangdese metallogenic belt, southern Tibet: Evidence from molybdenite Re-Os age of porphyry-type copper deposits and skarn-type copper polymetallic deposit [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 29(4): 482-490 (in Chinese with English abstract).
- Li H Y, Zhong S L, Wang Y B, Zhu D C, Yang J H, Song B, Liu D Y and Wu F Y. 2007. Age, petrogenesis and geological significance of Linzong volcanic successions in the Linzhou basin, southern Tibet: Evidence from zircon U-Pb dates and Hf isotopes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 493-500 (in Chinese with English abstract).
- Liang H Y, Xie Y W and Zhang Y Q. 2004. Formation and evolution of K-rich alkaline rock from Machangjing: Constrains on copper ore deposit [J]. *Progress in Natural Science*, 14(1): 116-120 (in Chinese with English abstract).
- Liang H Y, Campell H I, Allen C, Sun W D, Liu C Q, Yu H X, Xie Y W and Zhang Y Q. 2006. Zircon Ce^{4+}/Ce^{3+} ratios and ages for Yulong ore-bearing porphyries in eastern Tibet [J]. *Mineralium Deposita*, 41: 152-159.
- Meng X J, Hou Z Q, Gao Y F, Huang W, Qu X M and Qu W J. 2003. Development of porphyry copper-molybdenum-lead-zinc ore-forming system in east Gangdese Belt, Tibet: Evidence from Re-Os age of molybdenite in Bangpu copper polymetallic deposit [J]. *Mineral Deposits*, 22(3): 246-252 (in Chinese with English abstract).
- Meng X J. 2004. The Metallogeny of The Miocene Gangdese porphyry copper belt in Tibetan collisional orogen (dissertation for doctor degree) [D]. Supervisor: Hou Z Q. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences. 81-86 (in Chinese with English abstract).
- Mo X X, Dong G C, Zhao Z D, Zhou S, Wang L L, Qiu R Z and Zhang F Q. 2005. Spatial and temporal distribution and characteristics of granitoids in the Gangdese, Tibet and implication for crustal growth and evolution [J]. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 281-290 (in Chinese with English abstract).
- Mo X X, Zhao Z D, DePaolo D J, Zhou S and Dong G C. 2006. Three types of collisional and post-collisional magmatism in the Lhasa block, Tibet and implications for India intra-continental subduction and mineralization: Evidence from Sr-Nd isotopes [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 795-803 (in Chinese with English abstract).
- Mo X X, Zhao Z D, Zhu D C, Yu X H, Dong G C and Zhou S. 2009. On the lithosphere of Indo-Asia collision zone in southern Tibet: Petrological and geochemical constraints [J]. *Earth Science*, 34(1): 17-24 (in Chinese with English abstract).
- Qu X M, Hou Z Q, Guo L J and Xu W Y. 2004. Source compositions and crustal contaminations of adakitic ore-bearing porphyries in the Gangdese copper belt: Nd, Sr, Pb and isotope constraints [J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(6): 815-821 (in Chinese with English abstract).
- Qu X M, Jiang J H, Xin H B and Chen H. 2009. A study of two groups of adakite almost simultaneously formed in Gangdese collisional orogen, Tibet: Why does one group contain copper mineralization and the other not [J]? *Mineral Deposits*, 29(3): 381-394 (in Chinese with English abstract).
- Tang J X, Chen Y C, Duo J, Liu H F, Du X, Zhang J S, Zheng W B and Gao Y M. 2009. Main types, region mineralogical regularity and prospecting evaluation on deposits in the east section of Gangdese metallogenic belt, Tibet [J]. *Acta Mineralogica Sinica (Supp)*: 476-478 (in Chinese).
- Tang J X, Wang D H, Wang X W, Zhong K H, Ying L J, Zheng W B, Li F J, Guo N, Qin Z P, Yao X F, Li L, Wang Y and Tang X Q. 2010. Geological Features and metallogenic model of the Jiama copper-polymetallic deposit in Tibet [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 31(4): 495-506 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Li X H, Yang J H and Zheng Y F. 2007a. Discussions on the petrogenesis of granites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217-1238 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Li X H, Zheng Y F and Gao S. 2007b. Lu-Hf isotope systematics and their applications in petrology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185-220 (in Chinese with English abstract).
- Wu Y B and Zheng Y F. 2004. Zircon genesis mineralogy and its restriction for U-Pb age [J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589-1604 (in Chinese with English abstract).
- Xiao B, Qin K Z, Li G M, Li J X, Xia D X, Chen L and Zhao J X. 2009. S-rich, highly-oxidized ore-bearing magma in the Qulong giant porphyry-type Cu-Mo deposit in southern Tibet-evidence from magmatogenic anhydrite [J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(12): 1860-1868 (in Chinese with English abstract).

- Xin H B and Qu X M. 2008. Relative oxidation states of ore-bearing porphyries inferred from $Ce(IV)/Ce(III)$ ratio in zircon: application to the porphyry copper belt at Gandense, Tibet [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 28(2): 152-160 (in Chinese with English abstract).
- Yang Z M. 2008. The Qulong giant porphyry copper deposit in Tibet: Magmatism and mineralization (dissertation for Doctor degree) [D]. Supervisor: Hou Z Q. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences. 58-101 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Z H. 2010. Trace element geochemistry of accessory minerals and its applications in petrogenesis and metallogenesis [J]. *Earth Science Frontiers*, 17(1): 267-286 (in Chinese with English abstract).
- Zhou X. 2009. Study on the fluid inclusions of Bangpu molybdenum copper polymetallic deposit, Tibet (Master candidate paper) [D]. Supervisor: Wen C Q. Chengdu: Chengdu University of Technology. 81p (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 陈懋弘, 章伟, 杨宗喜, 陆刚, 侯可军, 刘建辉. 2009. 黔西南白层超基性岩强锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成研究 [J]. *矿床地质*, 28(3): 240-250.
- 高一鸣. 2010. 西藏工布江达县亚贵拉-沙让多金属矿床地质特征及区域成矿研究 [博士学位论文] [D]. 导师: 陈毓川, 唐菊兴. 北京: 中国地质科学院. 78-119.
- 侯增谦, 高永丰, 孟祥金, 曲晓明, 黄卫. 2004. 西藏冈底斯中新世斑岩铜矿带埃达克质斑岩成因与构造控制 [J]. *岩石学报*, 20(2): 239-248.
- 简伟, 柳维, 石黎红. 2010. 斑岩型钼矿床研究进展 [J]. *矿床地质*, 29(2): 308-316.
- 纪伟强, 吴福元, 钟孙霖, 刘传周. 2009. 西藏南部冈底斯岩基花岗岩时代与岩石成因 [J]. *中国科学(D辑)*, 39(7): 849-871.
- 李光明, 刘波, 屈文俊, 林方成, 余宏全, 丰成友. 2005. 西藏冈底斯成矿带的斑岩-矽卡岩成矿系统: 来自斑岩矿床和矽卡岩型铜多金属矿床的 Re-Os 同位素年龄证据 [J]. *大地构造与成矿学*, 29(4): 482-490.
- 李皓扬, 钟孙霖, 王彦斌, 朱弟成, 杨进辉, 宋彪, 刘敦一, 吴福元. 2007. 藏南林周盆地林子宗火山岩的时代、成因及其地质意义: 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据 [J]. *岩石学报*, 23(2): 493-500.
- 梁华英, 谢应雯, 张玉泉. 2004. 富钾碱性岩体形成演化对铜矿成矿制约——以马厂箐铜矿为例 [J]. *自然科学进展*, 14(1): 116-120.
- 孟祥金, 侯增谦, 高永丰, 黄卫, 曲小明, 屈文俊. 2003. 西藏冈底斯东段斑岩铜钼铅锌成矿系统的发育时限: 邦铺铜多金属矿床辉钼矿 Re-Os 年龄证明 [J]. *矿床地质*, 22(3): 246-252.
- 孟祥金. 2004. 西藏碰撞造山带冈底斯中新世斑岩铜矿成矿作用研究 [博士学位论文] [D]. 导师: 侯增谦. 北京: 中国地质科学院. 81-86.
- 莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 周肃, 王亮亮, 邱瑞照, 张凤琴. 2005. 西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息 [J]. *高校地质学报*, 11(3): 281-290.
- 莫宣学, 赵志丹, Don J DePaolo, 周肃, 董国臣. 2006. 青高原拉萨地块碰撞-后碰撞岩浆作用的三种类型及其对大陆俯冲和成矿作用的启示: Sr-Nd 同位素证据 [J]. *岩石学报*, 22(4): 795-803.
- 莫宣学, 赵志丹, 朱弟成, 喻学惠, 董国臣, 周肃. 2009. 西藏南部印度-亚洲碰撞带岩石圈: 岩石学-地球化学约束 [J]. *地球科学*, 34(1): 17-24.
- 曲晓明, 侯增谦, 国连杰, 徐文艺. 2004. 冈底斯铜矿带埃达克质含矿斑岩的源区组成与地壳混染: Nd, Sr, Pb, O 同位素约束 [J]. *地质学报*, 78(6): 815-821.
- 曲晓明, 江军华, 辛洪波, 陈华. 2010. 西藏冈底斯造山带几乎同时形成的两套埃达克岩为什么一套含矿一套不含矿 [J]? *矿床地质*, 29(3): 381-394.
- 唐菊兴, 陈毓川, 多吉, 刘鸿飞, 杜欣, 张金树, 郑文宝, 高一鸣. 2009. 西藏冈底斯成矿带东段主要矿床类型、成矿规律和找矿评价 [J]. *矿物学报(增刊)*: 476-478.
- 唐菊兴, 王登红, 汪雄武, 钟康惠, 应立娟, 郑文宝, 黎枫信, 郭娜, 秦志鹏, 姚晓峰, 李磊, 王友, 唐晓倩. 2010. 西藏甲玛铜多金属矿床地质特征及其矿床模型 [J]. *地球学报*, 31(4): 495-506.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007a. 花岗岩成因研究的若干问题 [J]. *岩石学报*, 23(6): 1217-1238.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007b. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用 [J]. *岩石学报*, 23(2): 185-220.
- 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 [J]. *科学通报*, 49(16): 1589-1604.
- 肖波, 秦克章, 李光明, 李金祥, 夏代祥, 陈雷, 赵俊兴. 2009. 西藏驱龙巨型斑岩 Cu-Mo 矿床的富 S₂ 高氧化性含矿岩浆——来自岩浆成因硬石膏的证据 [J]. *地质学报*, 83(12): 1860-1868.
- 辛洪波, 曲晓明. 2008. 西藏冈底斯斑岩铜矿带含矿岩体的相对氧化状态: 来自锆石 $Ce(IV)/Ce(III)$ 比值的约束 [J]. *矿物学报*, 28(2): 152-160.
- 杨志明. 2008. 西藏驱龙超大型斑岩铜矿床——岩浆作用与矿床成因 [博士学位论文] [D]. 导师: 侯增谦. 北京: 中国地质科学院. 58-101.
- 赵振华. 2010. 副矿物微量元素地球化学特征在成矿作用研究中的应用 [J]. *地学前缘*, 17(1): 267-286.
- 周雄. 2009. 西藏邦铺钼铜多金属矿床流体包裹体研究 (硕士学位论文) [D]. 导师: 温春齐. 成都: 成都理工大学. 81 页.