

西藏邦铺铅锌矿区石英二长斑岩锆石 U-Pb 年龄、 Hf 同位素和稀土元素特征及其地质意义

陈伟¹⁾, 王立强²⁾, 胡正华^{1, 3)}, 罗茂澄⁴⁾, 冷秋锋¹⁾, 唐晓倩¹⁾, 王艺云¹⁾,
杨毅¹⁾, 张志¹⁾

1)成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059;

2)中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

3)江西省地质调查院, 江西南昌 330000;

4)中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要: 邦铺钼(铜)多金属矿床是冈底斯带新近发现的大型斑岩型矿床, 矿区内发育大量不同类型、不同期次的侵入岩体。矿区南东方向接触带的铅锌矿床, 尽管最早受到关注并进行开采, 但研究程度却仍然相对较低。文章采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年和锆石 Hf 同位素、微量元素, 首次对铅锌矿区出露的含矿石英二长斑岩进行研究, 23 颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(15.43 \pm 0.12)\text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 2.7, n=23$), 系中新世岩浆产物。在完成锆石测年后, 同时对部分所测锆石进行了系统的 Hf 同位素原位分析, 测得 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.282790 \sim 0.282913$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(\text{t})$ 变化范围为 $0.6 \sim 5.0$, Hf 同位素测试结果与亏损地幔地球化学储库的 Hf 同位素特征较为相似, 表明石英二长斑岩的源区具亏损特征, 但在岩浆演化过程中遭受了下地壳物质的混染。稀土元素结果显示轻稀土亏损, 重稀土富集, 明显的正 Ce 异常, Eu 负异常, 属典型的岩浆成因锆石。与前人对钼(铜)矿区的研究结果一致, 故推断铅锌矿与钼(铜)矿为同一斑岩系统的产物。结合与区域上相邻的甲玛、驱龙矿床, 该矿床显示出与甲玛、驱龙等超大型斑岩型矿床具有统一的地球动力学背景及深部岩浆活动。

关键词: 邦铺; LA-ICP-MS; 锆石 U-Pb 定年; 石英二长斑岩; 西藏

中图分类号: P597; 588.13 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2012.04.17

Zircon U-Pb Ages, Hf Isotope and REE of Quartz Monzonite Porphyry in the Bangpu Pb-Zn Mining Area of Tibet and Their Geological Significance

CHEN-Wei¹⁾, WANG Li-qiang²⁾, HU Zheng-hua^{1, 3)}, LUO Mao-cheng⁴⁾, LENG Qiu-feng¹⁾,
TANG Xiao-qian¹⁾, WANG Yi-yun¹⁾, YANG Yi¹⁾, ZHANG Zhi¹⁾

1) College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, 610059;

2) Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

3) Jiangxi Institute of Geological Survey, Nanchang, Jiangxi 330000;

4) School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083

Abstract: The Bangpu Mo (Cu) polymetallic deposit is a large-size porphyry deposit newly discovered in the Gangdise belt, where there exist many intrusive rocks of different types and stages. The investigation of the Pb-Zn deposit located in the contact zone in the southeast part of the ore district has been very insufficient, in despite of the attention and exploitation paid to it. In this paper, U-Pb dating of LA-ICP-MS zircon and Hf isotopes and trace

本文由国家973项目(编号: 2011CB403103)和青藏专项(编号: 1212011085529)联合资助。

收稿日期: 2012-05-31; 改回日期: 2012-07-06。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 陈伟, 男, 1986年生。硕士研究生。矿物学、岩石学、矿床学专业。通讯地址: 610059, 四川省成都市成华区二仙桥东三路1号。E-mail: 317855390@qq.com。

elements of zircon were used to investigate ore-bearing quartz-monzonite porphyry outcropped in the lead-zinc mining area, and the weighted average age of the 23 zircons $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ is (15.43 ± 0.12) Ma (MSWD = 2.7, n = 23), suggesting a Miocene magmatic product. After the completion of the zircon dating, part of the dated zircons were analyzed systematically for the in-situ analysis of Hf isotopes. The $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ ratio varies in the range of 0.28279–0.282913, and $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ varies in the range of 0.6 – 5.0. The testing results of Hf isotope and the Hf isotope of geochemical reservoirs and depleted mantle are similar, indicating that the source area or the quartz monzonite porphyry in this area mainly came from the depleted mantle, but in the process of magmatic evolution it was contaminated by the lower crust. The analyses of REE show the depletion of light REE and enrichment of heavy REE as well as the obvious existence of positive Ce anomaly and negative Eu anomaly, suggesting zircons of typical magmatic genesis. The results are consistent with the previous study of the Mo (Cu) mining area, and hence it is inferred that lead-zinc ore and molybdenum (copper) ore are products from the same porphyry system. It is shown that this deposit is somewhat identical with Jiamal and Qulong large-size porphyry deposits in the region, with unified geodynamic background and deep magmatic activity.

Key words: Bangpu; LA-ICP-MS; zircon U-Pb dating; quartz monzonite porphyry; Tibet

冈底斯成矿带是东特提斯构造域中晚古生代以来具有独特演化历程的一个多岛弧碰撞造山带(潘桂棠等, 1997)。冈底斯-念青唐古拉板片南北界于雅鲁藏布江缝合带与班公湖-怒江结合带之间, 东西两侧分别与西南“三江”构造带和帕米尔-喀喇昆仑构造带相连。其独特的大地构造位置, 以及晚古生代以来南北两大板块之间俯冲、碰撞及陆内造山作用引起的强烈火山-岩浆活动和复杂的地质构造演化历程(侯增谦等, 2006; 莫宣学等, 2009), 使该区发生了不同地球构造圈层间物质、能量交换等深部过程, 并伴随着强烈的流体作用和成矿作用。邦铺矿区位于冈底斯成矿带东段, 大地构造位置隶属于位于冈底斯-念青唐古拉板片(图 1)。前人对于邦铺矿床的研究主要集中于钼(铜)主矿区的成岩、成矿时代以及流体演化等方面(孟祥金等, 2003; 周雄, 2009; 周雄等, 2010; 唐菊兴等, 2012; 王立强等, 2011; 罗茂澄等, 2011; 罗茂澄等, 2010; 冷秋锋等, 2012; 李奋其等, 2010), 而主矿区南东方向的铅锌矿区研究程度却仍然很低, 文章选取南东方向铅锌矿区的石英二长斑岩作为研究对象, 在阴极发光图像分析的基础上, 利用高精度 LA-ICP-MS 微区原位分析, 进行了锆石 U-Pb 定年、Hf 同位素以及稀土元素分析测试, 这对于判定铅锌矿床的形成时代、岩浆岩源区性质、梳理矿区岩浆演化序列等方面具有十分重要的意义。

1 矿区地质

铅锌矿区出露的地层为下二叠统洛巴堆组(P_1l)大理岩、砂板岩以及古新统典中组(E_1d)安山岩及安山质火山角砾岩。区内岩浆岩主要可见石英二长斑

岩及白垩世-早古新世中粗粒花岗岩(王立强等, 2012)。构造以断层构造和韧性变形带构造为主, 断层呈近 EW、NS 和 NW-SE 展布。铅锌矿体产出下二叠统洛巴堆组矽卡岩中及矽卡岩与大理岩接触带内, 呈细脉状, 富矿体主要赋存于洛巴堆组(P_1l)中, 处于 F_1 断层破碎带中, 灰岩、大理岩透镜体边缘地带(图 2)。矿床蚀变发育矽卡岩化、硅化、大理岩化、绿泥石化、绿帘石化及碳酸盐岩化等, 其

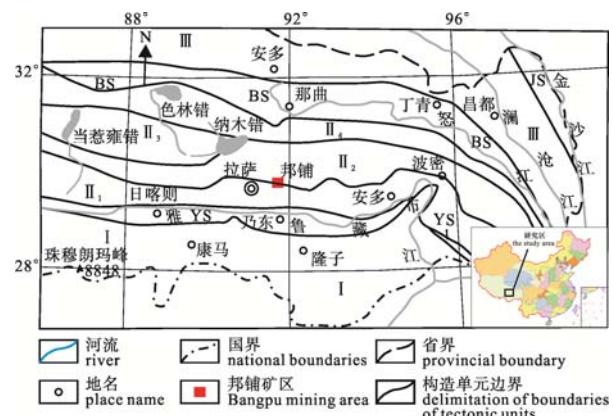


图 1 邦铺矿区大地构造位置图
(底图据唐菊兴等, 2010 修改)

Fig. 1 Geotectonic map showing the position of the Bangpu ore district (modified after TANG Ju-xing et al., 2010)

I-印度板块北部; II-冈底斯-念青唐古拉地体; II₁-冈底斯燕山-喜马拉雅陆缘岩浆弧; II₂-念青唐古拉断隆; II₃-措勤-纳木错燕山期弧后盆地; II₄-班戈-嘉黎早燕山期陆源岩浆弧; III-羌塘-三江复合地体; YS-雅鲁藏布江板块结合带; BS-班公湖-怒江板块结合带; JS-金沙江缝合带

I-north part of Indian plate; II-Gangdise-Nyainqntanlha terrane; II₁-Yanshanian-Himalayan Gangdise continental margin magmatic arc; II₂-Nyainqntanlha fault-uplift; II₃-Yanshanian Coqen-Nam Co back-arc basin; II₄-Early Yanshanian Baingoin-Lhari continental margin magmatic arc; III-Qiangtang-Sanjiang composite terrane; YS-Yarlung Zangbo River plate suture belt; BS-Bangong Co-Nujiang River plate suture belt; JS-Jinsha River suture belt

中矽卡岩化、硅化与成矿作用密切。金属矿物相对简单, 有方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿等。脉石矿物主要为石榴子石、透辉石、绿帘石、绿泥石、石英及方解石等。

2 样品采集与测试

用于本文分析测试的样品为石英二长斑岩, 采自横穿铅锌矿体的平硐 PD13。样品较新鲜, 表面呈灰白色, 块状构造, 斑状结构, 斑晶成分主要为斜长石、钾长石, 少量石英及黑云母等。

石英二长斑岩样品经破碎并分选出锆石后, 在双目镜下挑选晶形和色泽良好、无裂隙和包裹体的锆石颗粒, 粘在双面胶上并用环氧树脂固定, 待环氧树脂充分固化后, 将锆石靶表面抛光, 然后进行锆石颗粒内部结构分析(反射光和透射光照明相、阴极发光显微图像研究), 最后进行锆石 LA-ICP-MS 和微量元素测定。本文所涉及的分析测试均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。锆石的微量元素分析和 U-Pb 年龄测定在西北大学大陆动力学国家重点实验室引进的 Hewlett packard 公司最新一代带有 Shield Torch 的 Agilient 7500 a ICP-MS 和德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102 Excimer 激光器(工作物质 ArF, 波长 193 nm)以及 MicroLas 公司的 GeoLas 200 M 光学系统联机上进行。锆石原位 Lu-Hf 同位素测定采用 Nu Plasma HR(Wrexham, UK)多接收电感耦合等离子体质谱仪完成(MC-ICP-MS)。锆石原位 Lu-Hf 同位素分析与锆石

U-Pb 定年及微量元素分析的 ICP-MS 使用同一台激光剥蚀系统, 对样品进行一次性剥蚀完成, 分别由 ICP-MS 与 MC-ICP-MS 两台仪器同时采集各自的信号, 详见 Yuan 等(2008)。样品的同位素比值及元素含量计算采用 GLITTER(ver410, Macquarie University)程序, 年龄计算及谐和图的绘制用 Isoplot3.0 完成。详细分析步骤和数据处理方法详见 Yuan 等(2004)。

3 分析结果

3.1 锆石特征与 U-Pb 年龄

样品中多数锆石晶形完好, 呈长柱状、板条状, 个别不规则状。晶体长宽比介于 1:1 ~ 3:1 之间。锆石粒径大多在 100 μm 左右, 个别较大颗粒, 粒径可达 150 μm 以上。多数锆石发育较为完整的柱面和锥面, 大部分锆石无色或浅灰白色, 个别锆石颜色较深, 可能为 U、Th 等元素含量较高所致(吴元保等, 2004)。阴极发光(CL)图像(图 3)显示, 几乎所有的锆石都发育密集岩浆震荡环带, 具岩浆成因锆石的典型特征(吴元保等, 2004)。

本次对样品中分选出的锆石完成了 23 个点的测试, 石英二长斑岩岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果见表 1。样品中 $\omega(\text{U})$ 变化于 $(207.56 \sim 570.06) \times 10^{-6}$ 之间, 平均值为 329.5626×10^{-6} ; $\omega(\text{Th})$ 变化于 $(285.55 \sim 775.09) \times 10^{-6}$ 之间, 平均值为 433.6304×10^{-6} ; Th/U 值变化于 1.09 ~ 1.76 之间, 远大于 0.4, 位于典型的岩浆锆石比值范围内(Belousova et al., 2002; Hoskin et al., 2003), 属岩浆成因锆石。

本文采用 Isoplot 3.0 程序对锆石测年数据进行谐和曲线的投影和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权年龄的计算。统计的 23 个点中, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 14.6 ~ 16.5 Ma 之间, 在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图(图 4)上, 数据分析点基本上分布于谐和曲线上或在其附近一个较小的区域内, 并形成一个很好的集中区, 得到锆石 U-Pb 加权平均年龄为 $(15.43 \pm 0.12)\text{Ma}$ (MSWD=2.7, $n=23$)。

3.2 Lu-Hf 同位素组成

在对石英二长斑岩 U-Pb 测年的过程中, 获得了部分锆石 Hf 同位素数据, 分析结果见表 2。由表中数据可知, 所测石英二长斑岩锆石 Lu-Hf 同位素具有高 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和低 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 组成特征。10 个锆石测点的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值均小于 0.001, 表明锆石在形成后具有极低的放射性成因 Hf 积累, 因此所测定的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值可以代表锆石结晶时体系的 Hf 同位素组成(Amelin et al., 1999)。 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 变化范围为 $-0.9747 \sim -0.9832$, 平均值为 -0.980026 。锆石的

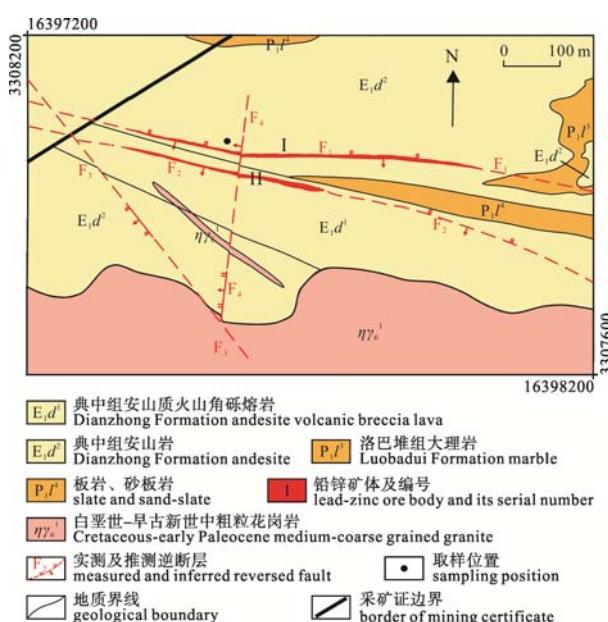


图 2 邦铺铅锌矿区地质简图

Fig.2 Simplified geological map of the Bangpu lead-zinc mining area

表1 邦铺矿床含矿石英二长斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试数据
 Table 1 The U-Pb dating result of the LA-ICP-MS zircon in the quartz-monzonite porphyry in Bangpu deposit

分析点号	$\omega(B)/10^{-6}$			Th/U	同位素比值								年龄/Ma				
	Th	U			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	
20101118C01	479.70	380.49	1.26	0.05495	0.00576	0.01815	0.00182	0.00240	0.00005	410.10	218.71	18.30	1.82	15.40	0.29		
20101118C02	560.20	399.88	1.40	0.04955	0.00747	0.01640	0.00241	0.00240	0.00006	173.80	317.84	16.50	2.40	15.50	0.40		
20101118C03	285.55	249.79	1.14	0.04842	0.00762	0.01599	0.00247	0.00239	0.00005	119.80	333.84	16.10	2.47	15.40	0.31		
20101118C04	557.69	360.27	1.55	0.09763	0.00628	0.03223	0.00184	0.00239	0.00004	1579.30	115.82	32.20	1.81	15.40	0.28		
20101118C05	411.88	328.69	1.25	0.04806	0.00723	0.01595	0.00234	0.00241	0.00006	102.00	321.64	16.10	2.34	15.50	0.38		
20101118C06	288.93	252.13	1.15	0.09298	0.00753	0.03076	0.00230	0.00240	0.00005	1487.50	146.00	30.80	2.27	15.40	0.32		
20101118C07	471.32	322.51	1.46	0.05706	0.00618	0.01891	0.00196	0.00240	0.00005	493.40	222.93	19.00	1.96	15.50	0.31		
20101118C08	304.06	279.74	1.09	0.08515	0.00765	0.02825	0.00238	0.00241	0.00005	1318.90	164.86	28.30	2.35	15.50	0.33		
20101118C09	332.94	278.98	1.19	0.05126	0.00635	0.01701	0.00204	0.00241	0.00005	252.50	262.23	17.10	2.04	15.50	0.32		
20101118C10	460.61	342.10	1.35	0.05127	0.00536	0.01696	0.00170	0.00240	0.00005	253.10	223.56	17.10	1.70	15.40	0.30		
20101118C11	546.93	353.17	1.55	0.04594	0.00604	0.01627	0.00208	0.00257	0.00006	0.10	284.36	16.40	2.08	16.50	0.36		
20101118C12	352.85	308.40	1.14	0.05702	0.00631	0.01889	0.00201	0.00240	0.00005	491.50	227.71	19.00	2.00	15.50	0.31		
20101118C13	299.23	207.56	1.44	0.06301	0.01447	0.02083	0.00470	0.00240	0.00009	708.50	425.19	20.90	4.67	15.40	0.57		
20101118C14	393.23	305.91	1.29	0.05601	0.00590	0.01852	0.00187	0.00240	0.00005	452.20	218.61	18.60	1.86	15.40	0.31		
20101118C15	400.81	309.33	1.30	0.04692	0.00562	0.01548	0.00180	0.00239	0.00005	45.10	264.18	15.60	1.80	15.40	0.30		
20101118C16	397.37	322.47	1.23	0.06747	0.00587	0.02230	0.00182	0.00240	0.00005	852.40	170.98	22.40	1.81	15.40	0.29		
20101118C17	775.09	440.09	1.76	0.05117	0.00591	0.01666	0.00185	0.00236	0.00005	248.60	245.64	16.80	1.85	15.20	0.34		
20101118C18	371.00	311.99	1.19	0.04721	0.01048	0.01552	0.00339	0.00238	0.00007	59.20	458.54	15.60	3.39	15.40	0.48		
20101118C19	419.10	302.92	1.38	0.05532	0.00661	0.01822	0.00210	0.00239	0.00005	425.10	246.42	18.30	2.10	15.40	0.31		
20101118C20	380.54	310.73	1.22	0.05126	0.00696	0.01688	0.00223	0.00239	0.00005	252.60	284.98	17.00	2.23	15.40	0.34		
20101118C21	403.87	315.10	1.28	0.07011	0.01039	0.02192	0.00316	0.00227	0.00006	931.70	277.69	22.00	3.14	14.60	0.36		
20101118C22	410.55	327.63	1.25	0.04861	0.00605	0.01605	0.00194	0.00239	0.00005	129.20	269.43	16.20	1.93	15.40	0.32		
20101118C23	670.05	570.06	1.18	0.03985	0.01384	0.01315	0.00455	0.00239	0.00006	0.10	357.79	13.30	4.56	15.40	0.37		

注: 相关计算公式和标准值参照吴福元等(2007)。

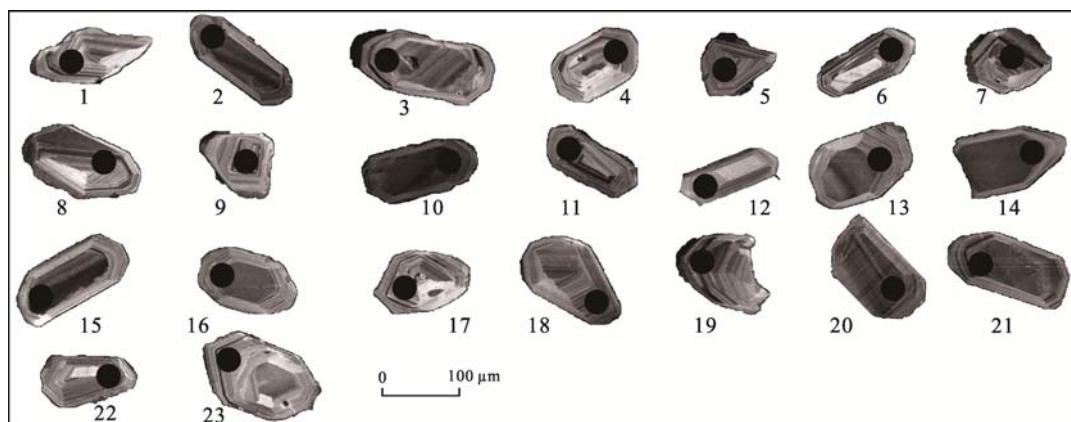
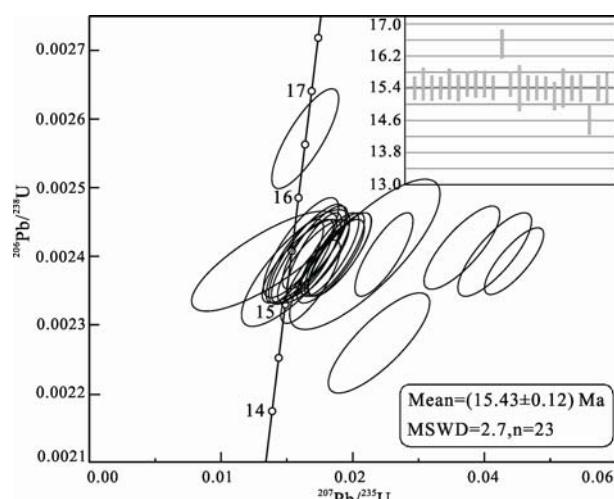


图 3 邦铺矿床石英二长斑岩锆石样品阴极(CL)发光图像及测试点位

Fig. 3 Cathodoluminescence images and testing points (CL) of zircons from quartz monzonite porphyry in the Bangpu deposit

图 4 邦铺石英二长斑岩锆石 U-Pb 年龄谐和图
Fig. 4 Concordia diagram of U-Pb dating of zircon in quartz monzonite porphyry of the Bangpu deposit

$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为正, 变化范围为 0.6 ~ 5.0, 介于球粒陨石与亏损地幔生长线之间, 可能反应了地幔物质的加入。Hf 同位素单阶段模式年龄 T_{DM1} 值变化范围为 477.8813 ~ 651.4464 Ma, 二阶段模式年龄 T_{DM2} 值变化范围为 754.8163 ~ 1033.306 Ma。

3.3 稀土元素特征

稀土元素分析结果见表 3。稀土总量 $\sum \text{REE}$ 变化于 359.543×10^{-6} ~ 814.276×10^{-6} 之间, 平均为 515.867×10^{-6} ; LREE/HREE 变化于 0.110683 ~ 0.600314 之间, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值介于 0 ~ 0.1576, 均小于 1。如图 7 所示, 稀土元素配分曲线总体较陡, 明显左倾, 锆石样品表现为轻稀土亏损, 重稀土富集的特征, δEu 介于 0.35 ~ 0.47, δCe 介于 1.54 ~ 144.76, 锆石具有明显的 Ce 正异常, Eu 负异常。

表 2 邦铺钼(铜)矿床铅锌矿区石英二长斑岩 Lu-Hf 同位素原位分析结果
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating result of quartz-monzonite porphyry in the Bangpu deposit

测点	t/Ma	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$f_{\text{Lu/Hf}}$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM1}/Ma	T_{DM2}/Ma
01	15.4	0.282864	0.000013	0.000617	0.000005	-0.981404	3.2	544.4243	865.1920
02	15.5	0.282825	0.000012	0.000556	0.000005	-0.983253	1.9	598.1640	953.5116
03	15.5	0.282831	0.000014	0.000589	0.000003	-0.98227	2.1	590.2776	939.7645
04	15.5	0.282790	0.000016	0.000821	0.000007	-0.975283	0.6	651.6639	1033.306
05	15.4	0.282803	0.000013	0.000839	0.000011	-0.974736	1.1	633.6575	1004.053
06	15.4	0.282907	0.000015	0.000613	0.000005	-0.98153	4.8	483.9982	768.8139
07	15.2	0.282835	0.000012	0.000625	0.000001	-0.981189	2.2	585.2273	930.8507
08	15.4	0.282874	0.000014	0.000605	0.000001	-0.981763	3.6	530.2221	842.9472
09	14.6	0.282913	0.000028	0.000750	0.000003	-0.977414	5.0	477.2920	754.8163
10	15.4	0.282819	0.000028	0.000571	0.000005	-0.982796	1.6	606.8002	967.5661

注: Hf 同位素分析过程中采用的标准值为球粒陨石 ($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$) CHUR = 0.0332, ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$) CHUR, 0 = 0.0282772 (Blichert-Toft et al., 1997); 亏损地幔 ($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$) $_{\text{DM}} = 0.0384$, ($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$) $_{\text{DM}} = 0.28325$ (Griffin et al., 2000); Lu 衰变常数 ($\text{Lu} = 1.86 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$) (吴福元等, 2007)。

表3 邦铺矿区石英二长斑岩锆石稀土元素数据($\omega(B)/10^{-6}$)Table 3 Trace element data of zircon in the quartz monzonite porphyry in Bangpu deposit($\omega(B)/10^{-6}$)

编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	δ Eu	δ Ce	(La/Yb) _N	LREE/HREE	Σ REE($\times 10^{-6}$)
PD1315 石英二长斑岩																			
20101118C01	0.896	54.33	0.344	2.97	3.8	1.064	15.6	4.9	52.88	18.34	79.08	18.29	191.51	28.66	0.36	23.99	0.0034	0.154924	472.664
20101118C02	<0.0227	53.87	0.117	2.21	4.1	1.046	15.9	4.87	53.22	18.48	77.78	18.0	186.58	27.86	0.35	142.94	0.0000	0.152333	464.033
20101118C03	12.29	68.24	3.21	15.63	5.81	1.208	15.71	4.68	50.31	17.67	77.37	18.05	191.61	29.84	0.36	2.60	0.0460	0.262531	511.628
20101118C04	48.51	157.08	12.12	55.03	13.38	2.379	23	6.24	63.8	21.74	91.15	21.03	220.85	32.77	0.41	1.54	0.1576	0.600314	769.079
20101118C05	0.203	47.9	0.11	2.02	3.58	0.985	14.37	4.44	50.94	17.61	75.35	17.67	185.12	28.11	0.36	77.71	0.0008	0.139219	448.408
20101118C06	21.52	86.96	5.75	24.95	6.74	1.234	15.36	4.28	47.11	16.26	70.15	16.46	175.89	26.79	0.36	1.88	0.0878	0.395257	519.454
20101118C07	3.59	63.12	1.113	8.46	7.66	2.43	26.03	7.44	77.2	26.07	109.43	24.74	256.69	39.21	0.47	7.68	0.0100	0.152384	653.183
20101118C08	1.484	48.24	0.578	4.2	3.84	0.981	14.42	4.62	52.25	18.53	82.29	19.64	210.09	32.09	0.36	12.77	0.0051	0.136711	493.253
20101118C09	0.537	44.69	0.208	2.43	3.21	0.969	13.07	3.98	43.42	15.21	65.34	15.12	157.88	24.14	0.40	32.78	0.0024	0.153903	390.204
20101118C10	0.065	52.67	0.136	2.54	4.47	1.292	18.18	5.71	62.13	21.69	94.29	21.74	224.88	34.88	0.38	100.90	0.0002	0.126521	544.673
20101118C11	<0.022	52.92	0.132	2.42	4.05	1.297	16.16	4.82	51.43	18.34	76.32	17.42	178.22	27.98	0.43	124.47	0.0000	0.155671	451.509
20101118C12	1.621	50.19	0.512	3.49	3.97	1.017	15.31	4.72	52.41	18.63	82.18	19.37	204.32	31.76	0.35	13.41	0.0057	0.141824	489.50
20101118C13	<0.023	37.97	0.094	1.86	3.34	1.089	13.58	3.94	42.23	14.44	61.46	13.94	143.24	22.36	0.43	125.41	0.0000	0.140718	359.543
20101118C14	4.41	56.48	1.265	6.81	4.71	1.176	15.97	4.68	51.1	17.48	75.44	17.7	181.07	27.78	0.37	5.78	0.0175	0.191327	466.071
20101118C15	<0.0237	48.77	0.154	2.95	5.84	1.468	20.87	6.47	69.84	24.2	103.55	23.82	247.87	38.08	0.36	98.32	0.0000	0.110683	593.882
20101118C16	3.01	54.23	0.836	5.13	4.39	1.053	15.6	4.83	52.85	18.51	79.74	18.41	192.51	29.9	0.35	8.24	0.0112	0.166482	480.999
20101118C17	2.305	73.88	0.698	5.33	5.93	1.71	20.88	6.21	64.69	21.05	85.88	19.2	187.95	28.91	0.42	14.14	0.0088	0.206668	524.623
20101118C18	0.038	49.07	0.111	2.16	3.77	1.041	15.24	4.84	53.56	18.7	80.87	18.91	193.35	30.63	0.36	120.68	0.0001	0.13504	472.29
20101118C19	0.027	54.47	0.16	2.5	4.79	1.406	18.32	5.63	61.79	21.54	92.9	21.36	221.01	34.14	0.40	99.00	0.0001	0.132902	540.043
20101118C20	0.0232	46.21	0.0969	2.03	4.1	1.076	15.83	4.98	54.43	19.24	83.93	19.52	203.46	32.36	0.36	135.09	0.0001	0.123426	487.2861
20101118C21	<0.074	45.23	0.097	1.24	2.78	0.751	14.25	4.03	46.06	16.5	72.4	16.57	172.86	27.36	0.30	144.76	0.0000	0.135389	420.128
20101118C22	2.056	52.41	0.589	3.98	4.49	1.056	16.17	4.92	54.82	19	83.78	19.31	203.64	31.99	0.34	11.51	0.0072	0.148931	498.211
20101118C23	0.113	90.87	0.19	2.85	6.71	1.753	25.93	8.14	90.37	31.76	137.12	31.84	334.06	52.57	0.36	119.90	0.0002	0.143983	814.276

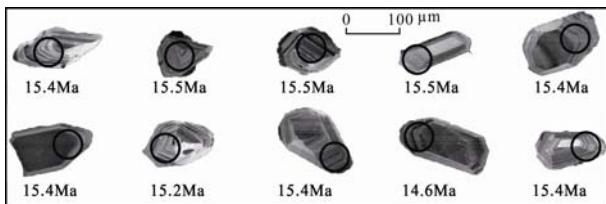


图 5 Hf 同位素分析的锆石阴极发光图像
(测试点位分析点下的数字表示 U-Pb 年龄)

Fig. 5 Cathodoluminescence images and testing points of zircons from quartz monzonite porphyry in the Bangpu deposit
(numerals under the testing points indicating U-Pb age)

4 讨论

4.1 成岩、成矿年代学意义

岩体的精确测年是研究和分析地球动力学背景的基础。关于邦铺矿区成岩成矿时代, 前人已做过大量研究工作。周雄(2010)所测试的含矿二长花岗斑岩侵位年龄为 13.9 ± 0.3 Ma(锆石 U-Pb SHRIMP)和 13.88 ± 0.38 Ma(全岩 Rb-Sr 法), 稍晚于王立强等(2011)所测试的含矿二长花岗斑岩年龄(16.23 ± 0.19 Ma, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb), 暗示邦铺钼(铜)矿区的成岩年龄具多期性。同时, 孟祥金等(2003)所测试的辉钼矿成矿年龄为 15.32 ± 0.79 Ma(Re-Os 法), 早于王立强等(2011)所测试的辉钼矿成矿年龄 14.09 ± 0.49 Ma(Re-Os 法)。辉钼矿成矿与早晚两期含矿二长花岗斑岩岩浆活动具一定对应关系, 暗示邦铺钼(铜)矿区成岩-成矿作用呈多期多阶段性, 且与地质事实相符。

文章测试的石英二长斑岩年龄 15.43 ± 0.12 Ma 介于钼(铜)矿区含矿二长花岗斑岩的成岩年龄 $13.88 \sim 16.23$ Ma, 与早期辉钼矿的成矿年龄相一致。成矿作用一般发生于岩浆-热液活动中后期, 文章测试的石英二长斑岩可能为晚期含矿二长花岗斑岩的演化母岩浆, 表明中新世中期邦铺钼(铜)矿区与铅锌矿区同为多期岩浆成矿作用的产物。本文的石英二长斑岩锆石 U-Pb 年龄使矿区岩体侵位时序更为明确, 进一步丰富和完善了邦铺矿区岩浆演化序列。

4.2 岩浆源区性质

锆石因其化学性质稳定, 抗风化能力强, Lu/Hf 比值低, 不受部分熔融作用的影响, 这使得锆石 Hf 同位素组成可以记录岩浆源区不同性质的原岩特征, 成为讨论岩浆甚至是探讨地壳演化以及壳幔相互作用过程的重要工具。本文所测石英二长斑岩锆石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值相对较高(图 7), $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值主要集中在

$0.6 \sim 5.0$, 平均值为 2.61, 二阶段模式年龄介于 $754.82 \sim 1033.31$ Ma, 通常高的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值是较多幔源组分参与成岩的标志, 显示在成岩过程中有地幔组分的参与, 且锆石具有较高的 Hf 含量, Lu 含量却极低, 反映了壳幔分异、地壳形成的时代(吴福元等, 2007)。在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ -t 图解上(图 8)所有数据均落在球粒陨石演化线之上及其附近, 介于壳幔两种端元组分之间, 表明石英二长斑岩的成岩源区具亏损岩浆源区的特征。石英二长斑岩与钼(铜)矿区二长花岗斑岩锆石 Hf 同位素组成特征(罗茂澄等, 2011)一致, 反映源区物质构成相同, 均在岩浆侵位过程中受到了古老地壳物质的混染。该点在区域及相邻矿区也得到了证实: 莫宣学等(2005)提出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。唐菊兴等(2010)通过对甲玛矿床的综合研究指出, 甲玛含矿岩浆在结晶分异过程中受到了外来物质的混染; 曲晓明等(2010)认为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

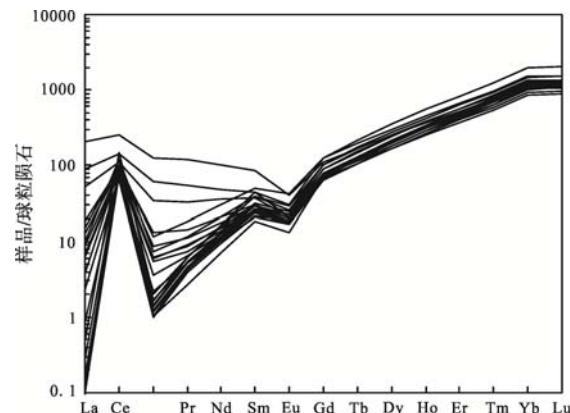


图 6 石英二长斑岩锆石稀土元素标准化配分曲线
(球粒陨石标准值引自 Sun et al., 1989)

Fig. 6 Standardized partition curve of zircon REE in quartz monzonite porphyry (after Sun et al., 1989)

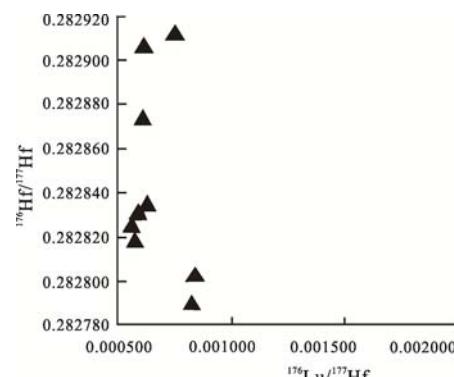


图 7 石英二长斑岩锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ - $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 关系图解

Fig. 7 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ - $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ diagram for zircon in the quartz monzonite porphyry

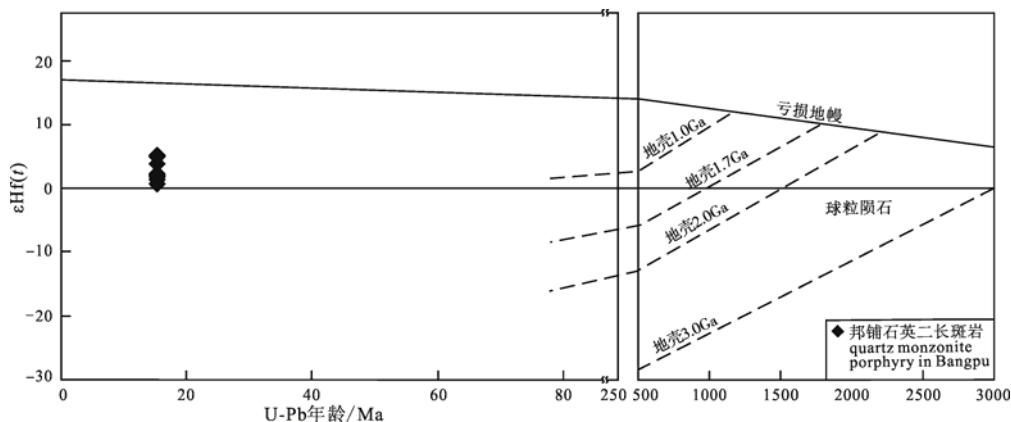


图 8 石英二长斑岩锆石年龄 $\epsilon\text{Hf}(t)$ - t 关系图解
Fig. 8 $\epsilon\text{Hf}(t)$ - t diagram of zircon age in the quartz monzonite porphyry

后又发生底侵。

石英二长斑岩的锆石稀土配分曲线(图 6), 表现为轻稀土亏损, 重稀土富集, 强烈正 Ce 异常, 负 Eu 异常, 具岩浆锆石的稀土特征(Belousova, 2002; Hoskin et al., 2003)。通常认为正 Ce 异常, 是由于 Ce^{3+} 被氧化为 Ce^{4+} 后, 其离子半径类似于 Zr 和 Hf, 比轻稀土更容易进入到锆石晶格中, 而负 Eu 异常则与长石的结晶作用有关(Hoskin et al., 2003)。同一岩石类型的内部锆石稀土含量的不同, 一方面说明了岩浆组分的不均一, 另一方面说明也与岩浆早期结晶的副矿物(包括早期结晶的锆石)对残余熔体稀土含量的影响有关。

5 结论

通过对西藏邦铺铅锌矿区出露的石英二长斑岩的锆石 La-ICP-MS U-Pb 年龄、Hf 同位素以及稀土元素特征的研究, 得出以下结论:

(1)石英二长斑岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 15.43 ± 0.12 Ma(MSWD=2.7, $n=23$), 介于钼(铜)矿区含矿二长花岗斑岩的成岩年龄 $13.88 \sim 16.23$ Ma 之间, 与早期成矿年龄一致, 表明邦铺钼(铜)矿区与铅锌矿区的岩浆成矿作用一致, 呈多期多阶段性。

(2)Hf 同位素测试结果显示, 邦铺铅锌矿区石英二长斑岩含矿岩体的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Lu}$ 比值为 $0.282790 \sim 0.282913$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $0.6 \sim 5.0$, 与亏损地幔地球化学储库的 Hf 同位素特征较为相似, 表明本区石英二长斑岩的源区可能具亏损特征。

(3)稀土元素测试结果表明锆石样品表现为轻稀土亏损, 重稀土富集的特征, 且具有明显的 Ce 正异常, Eu 负异常, 属于典型的岩浆锆石。

致谢: 野外工作期间, 得到了西藏地热地质大队张学全高级工程师, 西藏天仁矿业公司邦铺矿区陈在元矿长及相关人员的大力支持。样品的分析测试过程中得到西北大学柳小明老师、第五春荣老师等的无私指导和帮助。审稿专家和编辑部提出的宝贵的修改意见, 在此一并表示衷心感谢!

参考文献:

- 侯增谦, 莫宣学, 高永丰, 杨志明, 董国臣, 丁林. 2006. 印度大陆与亚洲大陆早期碰撞过程与动力学模型—来自西藏冈底斯新生代火成岩证据[J]. 地质学报, 80(9): 1233-1248.
- 冷秋锋, 王立强, 应立娟, 郑文宝, 罗茂澄, 陈伟, 林彬, 王艺云. 2012. 西藏邦铺钼(铜)矿床辉绿玢岩脉体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地球学报, 33(4): 559-568.
- 李奋其, 刘伟, 耿全如. 2010. 西藏冈底斯带那曲地区中生代火山岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和地质意义[J]. 地球学报, 31(6): 781-790.
- 罗茂澄, 毛景文, 王立强, 冷秋锋, 陈伟. 2012. 西藏邦铺斑岩钼铜矿床岩浆-热液流体演化: 流体包裹体研究[J]. 地球学报, 33(4): 471-484.
- 罗茂澄, 王立强, 冷秋锋, 陈伟. 2011. 西藏邦铺钼(铜)矿床二长花岗斑岩、黑云二长花岗岩锆石 Hf 同位素和 $\text{Ce}^{4+}/\text{Ce}^{3+}$ 比值研究[J]. 矿床地质, 30(2): 266-278.
- 孟祥金, 侯增谦, 高永丰, 黄卫, 曲晓明, 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.
- 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, 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-中国地质大学学报, 34(1): 17-24.
- 潘桂棠, 陈智梁, 李兴振. 1997. 东特提斯地质构造形成演化[M]. 北京: 地质出版社.
- 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, 多吉, 刘鸿飞, 郎兴海, 张金树, 郑文宝, 应立娟. 2012. 冈底斯成矿带东段矿床成矿系列及找矿突破的关键问题研究[J]. 地球学报, 33(4): 393-410.
- 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.
- 王立强, 罗茂澄, 袁志洁, 陈伟, 冷秋锋, 张学全. 2012. 西藏邦铺铅锌矿床 S、Pb、C、O 同位素组成及成矿物质来源研究[J]. 地球学报, 33(4): 435-443.
- 王立强, 唐菊兴, 陈毓川, 罗茂澄, 冷秋锋, 陈伟, 王焕. 2011. 西藏邦铺钼(铜)矿床含矿二长花岗斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 矿床地质, 30(2): 349-360.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. 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.
- 周雄, 温春齐, 温泉, 吴鹏宇, 曹盛远, 费光春, 霍艳, 周玉. 2010. 西藏邦铺大型岩钼-铜矿床二长花岗斑岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 29(4): 373-379.
- 周雄. 2009. 西藏邦铺钼铜多金属矿床流体包裹体研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- References:**
- AMELIN Y, LEE D C, HALLIDAY A N, PIDGEON R T. 1999. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons[J]. Nature, 399(6733): 252-255.
- BEOLOSOVA E A, GRIFFIN W L, O'REILLY S Y, FISHER N J. 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 143(5): 602-622.
- HOSKIN P W O, SCHALTEGGER U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53(1): 27-62.
- HOU Zeng-qian, MO Xuan-xue, GAO Yong-feng, YANG Zhi-ming, DONG Guo-chen, DING-Lin. 2006. Early Processes and Tectonic Model for the Indian—Asian Continental Collision: Evidence from the Cenozoic Gangdese Igneous Rocks in Tibet[J]. Acta Geologica Sinica, 80(9): 1233-1248(in Chinese with English abstract).
- LENG Qiu-feng, WANG Li-jiang, YING Li-juan, ZHENG Wen-bao, LUO Mao-cheng, CHEN Wei, LIN Bin, WANG Yi-yun. 2012. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of Allgovite in the Bangpu Molybdenum (Copper) Deposit of Tibet and Its Geological Significance[J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(4): 559-568(in Chinese with English abstract).
- LI Fen-qi, LIU-Wei, GENG Quan-ru. 2010. Zircon LA-ICP-MS U-Pb Ages of the Mesozoic Volcanic Rocks in Nagqu Area of Gangdise in Tibet and Their Geological Significance[J]. Acta Geoscientica Sinica, 31(6): 781-790(in Chinese with English abstract).
- LUO Mao-cheng, MAO Jing-wen, WANG Li-jiang, LENG Qiu-feng, CHEN Wei. 2012. Fluid Inclusion Evidence for Magmatic-Hydrothermal Evolution in the Bangpu Porphyry Molybdenum-Copper Deposit, Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(4): 471-484(in Chinese with English abstract).
- LUO Mao-cheng, WANG Li-jiang, LENG Qiu-feng, CHEN-Wei. 2011. Zircon Hf isotope and Ce⁴⁺/Ce³⁺ ratio of the monzogranite porphyry and biotite monzonitic granite in Bangpu Mo(Cu) deposit, Tibet[J]. Mineral Deposits, 30(2): 266-278(in Chinese with English abstract).
- MENG Xiang-jin, HOU Zeng-qian, GAO Yong-feng, HUANG-Wei, QU Xiao-ming, QU Wen-jun. 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).
- MO Xuan-xue, DONG Guo-chen, ZHAO Zhi-dan, ZHOU-Su, WANG Liang-liang, QUI Rui-zhao, ZHANG Feng-qin. 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 Xuan-xue, ZHAO Zhi-dan, ZHU Di-cheng, YU Xue-hui, DONG Guo-chen, ZHOU-Su. 2009. On the Lithosphere of Indo-Asia Collision Zone in Southern Tibet: Petrological and Geochemical Constraints[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 34(1): 17-24(in Chinese with English abstract).
- PAN Gui-tang, CHEN Zhi-liang, LI Xing-zhen. 1997. Geological tectonic evolution of eastern Tethyan[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- QU Xiao-ming, JIANG Jun-hua, XIN Hong-bo, CHEN-Hua. 1997. 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).
- SUN S S, MCDONOUGH W F. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes.In: Saunders AD and Norry MJ(Eds.). Magmatism in the Ocean Basin[J]. Geological Society[London] Special Publication, 42: 313-345.
- TANG Ju-xing, Dorji, LIU Hong-fei, LANG Xing-hai, ZHANG Jin-shu, ZHENG Wen-bao, YING Li-juan. 2012. Minerogenetic Series of Ore Deposits in the East Part of the Gangdise Metallogenic Belt[J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(4): 393-410(in Chinese with English abstract).
- TANG Ju-xing, WANG Deng-hong, WANG Xiong-wu, ZHONG Kang-hui, YING Li-juan, ZHENG Wen-bao, LI Feng-ji, GUO Na, QIN Zhi-peng, YAO Xiao-feng, LI Lei, WANG You, TANG Xiao-qian. 2010. Geological Features and metallogenic model of the Jiama copper-polymetallic deposit in Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 31(4): 495-506(in Chinese with English abstract).
- WANG Li-qiang, LUO Mao-cheng, YUAN Zhi-jie, CHEN-Wei, LENG Qiu-feng, ZHANG Xue-quan. 2012. Study on Sulfur, Lead, Carbon and Oxygen Isotope Composition and the Source of Ore-forming Materials of Pb-Zn Ore Deposit in the Bangpu Mining Area, Tibet[J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(4): 435-443(in Chinese with English abstract).
- WANG Li-qiang, TANG Ju-xing, CHEN Yu-chuan, LUO Mao-cheng, LENG Qiu-feng, CHEN Wei, WANG Huan. 2011. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of Ore-Bearing Monzogranite Porphyry in Bangpu Molybdenum (Copper) Deposit, Tibet and Its Significance[J]. Mineral Deposits, 30(2): 349-360(in Chinese with English abstract).
- WU Fu-yuan, LI Xian-hua, ZHENG Yong-fei, GAO-Shan. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185-220(in Chinese with English abstract).
- WU Yuan-bao, ZHENG Yong-fei. 2004. Zircon Genesis mineralogy and its restriction for U-Pb age[J]. Chinese Science Bulletin, 49(16): 1589-1604(in Chinese with English abstract).
- YUAN Hong-lin, GAO-Shan, LIU Xiao-ming, LI Hui-ming, GÜNTHER D, WU Fu-yuan. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 28: 357-370.
- YUAN Hong-Lin, GAO-Shan, DAI Meng-ning, ZONG Chun-lei, DETLEFM G, GISELA-HELENE F, LIU Xiao-ming, DIWU Chun-rong. 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser ablation quadrupole and multiple collector ICP-MS[J]. Chemical Geology, 247: 100-117.
- ZHOU Xiong, WEN Chun-qi, WEN Quan, WU Peng-yu, CAO Sheng-yuan, FEI Guang-chun, HUO Yan, ZHOU Yu. 2010. Zircon U-Pb SHRIMP Dating of the Monzonite Granite Porphyry from the Bangpu Large Porphyry Molybdenum Copper Deposits, Tibet, and its geological Significance[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 29(4): 373-379(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Xiong. 2009. Study on the Fluid Inclusions of Bangpu Molybdenum Copper Polymetallic Deposit, Tibet[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology(in Chinese with English abstract).