

西藏邦铺斑岩矿床黑云二长花岗岩的 形成时代及地球化学特征

赵晓燕¹, 杨竹森¹, 张雄², 卢世银³

1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037; 2. 北京矿产地质研究院, 北京 100012;
3. 青海省地质调查院, 青海 810012

摘要:邦铺是继驱龙、甲马之后在冈底斯斑岩铜矿带发现的又一大型斑岩型矿床。为探索邦铺矿区岩浆的起源、建立岩浆演化序列提供依据, 本文对位于矿区西南侧的黑云二长花岗岩进行了主、微量元素, 锆石 U-Pb 年代学, Sr-Nd-Pb-Hf 同位素分析。结果显示, 邦铺黑云二长花岗岩的 SiO_2 平均含量为 73.52%, 属钙碱性系列、弱过铝质花岗岩; 其轻重稀土分异较明显, 负 Eu 异常强烈, 富集 K、Rb、Th 等大离子亲石元素, 相对亏损 P、Nb、Ta、Ti 等高场强元素; 锆石 U-Pb 年龄为 $(62.2 \pm 0.32) \text{ Ma}$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值分布于 0.282892~0.283014, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均值为 7.3。研究表明, 邦铺黑云二长花岗岩起源于俯冲的特提斯洋壳板片脱水引起的地幔楔的部分熔融, 地幔组分约占 80%, 岩浆在上升过程中, 有较多地壳物质的加入, 并经过了强烈的结晶分异作用。

关键词:亏损地幔; 结晶分异; 黑云二长花岗岩; 邦铺; 冈底斯斑岩铜矿带

中图分类号: P597; P618 文章编号: 1007-2802(2017)05-0786-11 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2017.05.007

Geochronology and Geochemistry Characteristics of the Biotite Monzonite in the Bangpu Porphyry Deposit, Tibet

ZHAO Xiao-yan¹, YANG Zhu-sen¹, ZHANG Xiong², LU Shi-yin³

1. Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China; 2. Beijing Institute of Geology
for Mineral Resources, Beijing 100012, China; 3. Qinghai Geological Survey Institute, Qinghai 810012, China

Abstract: The Bangpu deposit is a large-scale porphyry deposit after Qulong and Jiama in the Gangdese porphyry copper metallogenic belt. Zircon U-Pb dating, whole rock elemental and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic compositions of the biotite monzonite have been performed in this study in order to identify the origin of parental magma and constrain magma evolution history. The rocks have average SiO_2 of 73.52% and are belonging to calc-alkalic and weak peraluminous granite. The rock is enriched in large-ion lithophile elements such as K, Rb, Th and depleted in high field strength elements including P, Nb, Ti. The zircon U-Pb age is $(62.24 \pm 0.32) \text{ Ma}$, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ is between 0.282892 and 0.283014 and the average $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ value is 7.3. The biotite monzonite is originated from the partial melting of the mantle wedge triggered by the subducted Tethyan oceanic slab. The parental magma then experienced extensive fractional crystallization with addition of ~20% crustal materials.

Key words: depleted mantle; crystal differentiation; biotite monzonitic granite; Bangpu; Gangdese porphyry copper metallogenic belt

被誉为“地球第三极”的青藏高原, 不仅是研究碰撞造山带形成与演化的天然实验室 (Yin and Harrison, 2000), 而且是中国矿产资源的重要产地。冈

底斯巨型成矿带南北分别以雅鲁藏布江缝合带和班公湖—怒江缝合带为界, 东西绵延 1500 km, 是一条具有双倍地壳厚度 (70~80 km) 的新生代巨型构

收稿日期: 2017-05-02 收到, 2017-05-30 改回

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2016YFC0600307); 中国地质科学院基本科研业务费项目 (K1709)

第一作者简介: 赵晓燕 (1989-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向: 岩石学及矿床学. E-mail: zxy19890926@163.com.

造-岩浆带,该带进一步可以划分为3个亚带(图1a):北部的勒青拉-洞中松多铅锌银多金属成矿带,中部的驱龙-甲玛-邦铺斑岩铜钼成矿带,南部的克鲁-冲木达斑岩-夕卡岩铜钼金成矿带(李光明等,2006)。冈底斯斑岩成矿带位于南拉萨地体,长达350 km、宽约50 km(侯增谦等,2001),其成矿背景明显不同于岛弧带与大陆边缘带,但矿化特征与岛弧、大陆边缘的斑岩型铜矿相似(杨勇等,2010; Hou *et al.*, 2011)。众多学者对冈底斯斑岩成矿带中的典型矿床进行了详细解剖(孟祥金等,2005, 2006; 杨志明等,2005, 2008a, 2008b, 2011; 侯增谦等,2007; Yang *et al.*, 2009; Hou *et al.*, 2009, 2011; 杨志明和侯增谦,2009; 唐菊兴等,2010; 郑文宝等,2010; 王焕等,2011; 周雄,2012; 周维德等,2014)。已有研究表明,冈底斯斑岩型矿床主要形成于印度亚洲大陆处于后碰撞伸展的环境,成岩成矿年龄集中于12~18 Ma,成矿斑岩属于碱性斑岩(曲晓明等,2001; Hou *et al.*, 2012, 2013),为加厚的下地壳局部熔融的产物,具有埃达克质岩的性质(侯增谦等,2003, 2012; Qu *et al.*, 2004, 2007)。邦铺是在继驱龙、甲玛之后在冈底斯斑岩铜矿带发现的又一大型斑岩型矿床,成矿元素以Mo-Cu为主,伴生矽卡岩型Pb-Zn成矿。前人对邦铺矿床已经展开了一定的研究工作,主要集中在含矿岩体的成岩时代、矿床的成矿时代以及流体演化、成矿物质来源等方面(周雄,2009, 2012; 周雄等,2010; 王立强等,2011; 罗茂澄等,2011, 2012),但对岩浆演化过程涉及甚少。本文的研究对象分布在矿区的西南侧,出露面积较大,研究其地球化学特征、锆石年代学及Hf同位素,是建立整个矿区岩浆演化序列必不可少的内容,对探索邦铺矿床岩浆与成矿关系以及深部动力学驱动机制都有十分重要的作用。

1 成矿地质背景

邦铺矿床位于拉萨市墨竹工卡县,经纬度坐标为:29°53'28"N、91°55'37"E,大地构造位置上位于特提斯构造域冈底斯念青唐古拉地体中南部(周雄,2012)。前人研究表明,冈底斯在经历了晚侏罗世—早白垩世雅鲁藏布江新特提斯洋持续向北俯冲这一阶段后,到白垩纪-古近纪(65 Ma)印度大陆才开始与拉萨地块碰撞对接(莫宣学等,2006; Mo *et al.*, 2007, 2008),随之进入印度-欧亚大陆碰撞造山阶段。自印亚大陆碰撞以来,冈底斯发生了两次岩浆活动高峰:第一次为同碰撞岩浆活动(65~40 Ma),以大面积分布的林子宗火山岩和相应的侵

入岩活动为代表;第二次为后碰撞岩浆活动(25~10 Ma),以钾质-超钾质火山岩和埃达克质侵入岩为特征。冈底斯斑岩成矿带内以斑岩型矿化为主的矿床在成矿作用上具有一致性,它们均产在后碰撞伸展的环境中(Hou *et al.*, 2004),与新特提斯洋俯冲无关。与成矿有关的二长花岗斑岩、花岗闪长斑岩除具备LREE、LILE富集,HREE、HFSE亏损与典型弧岩浆岩类似的地球化学特征外,还具有高Sr、低Y, Eu异常不明显的特征,埃达克岩亲和性明显(Qu *et al.*, 2004; 杨志明等,2006)。

邦铺矿区出露地层较为简单,除第四系外,主要有下二叠统洛巴堆组(P_1l)和古近纪典中组(E_d)。洛巴堆组主要分布在矿区中南部,根据岩石组合可以划分为两个岩性段:洛巴堆组一段(P_1l^1)为灰黄色、黄色变质火山角砾岩,洛巴堆组二段(P_1l^2)为黑色、灰黑色变质泥质岩屑杂砂岩,含大理岩、灰岩透镜体。典中组主要分布在矿区北部、中北部及东部,以安山质凝灰岩为主,含凝灰质板岩、晶屑凝灰岩、凝灰质角砾岩及薄层帘石板岩(周雄,2009)。典中组与洛巴堆组以断层接触。矿区侵入岩较发育,约占矿区总面积的50%以上。各种岩体有的呈大规模侵入体产出,有的呈小岩枝、岩脉产出。岩浆岩主要包括二长花岗斑岩、花岗斑岩、花岗闪长斑岩、黑云二长花岗岩、闪长玢岩及辉绿玢岩等(图1b),其中二长花岗斑岩为含矿斑岩(Zhao *et al.*, 2015)。

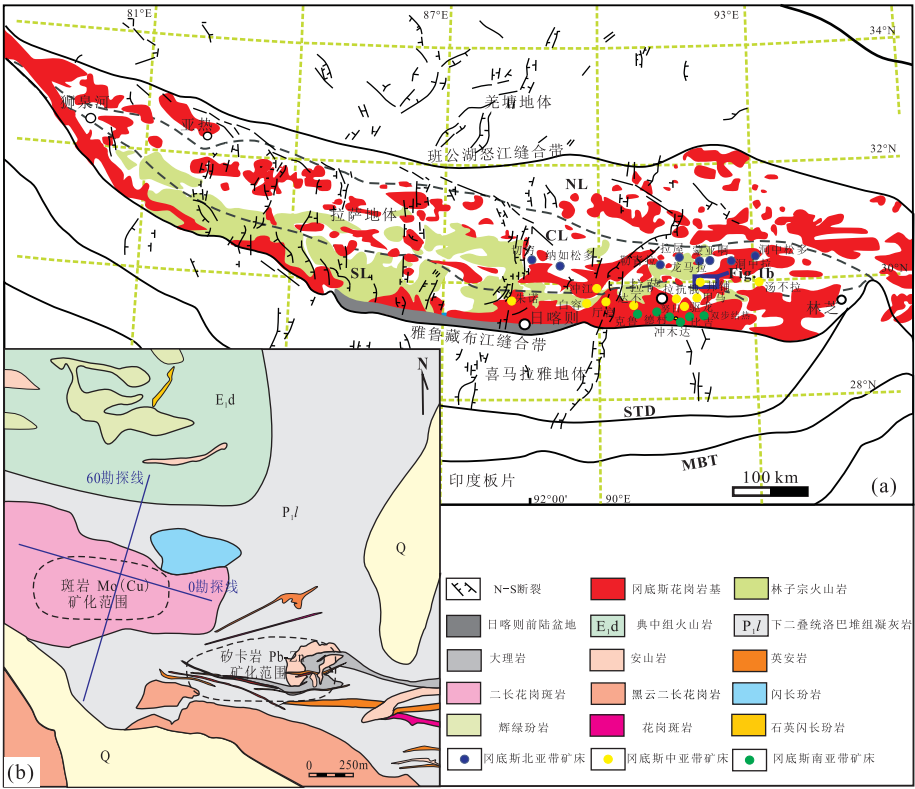
邦铺矿床金属矿物以辉钼矿、黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、黄铁矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿为主,少见孔雀石和蓝铜矿。非金属矿物包括石英、钾长石、斜长石、黑云母、绿泥石、绿帘石、石榴子石、辉石、阳起石、方解石等。矿石结构有自形-半自形粒状结构、他形填隙结构、浸蚀结构及交代结构等,构造则以块状构造、浸染状构造为主。

2 样品采集及分析方法

2.1 采样位置及样品特征

黑云二长花岗岩位于邦铺矿区西南部,出露面积约0.4 km²(罗茂澄等,2012),呈岩株状产出,第四系覆盖严重。所测样品经纬度坐标为29°53'30.7"N, 91°55'42"E(图1b)。本次共采集黑云二长花岗岩6块,其中5块蚀变较弱的进行全岩化学分析,1块用于挑选锆石。

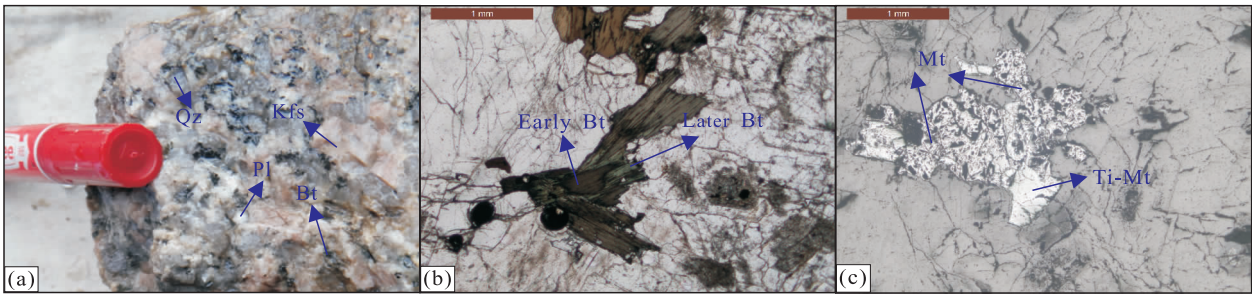
黑云二长花岗岩呈灰红色(图2a),半自形粒状结构,块状构造。主要组成矿物有石英(40%)、钾



(a) 修改自 Zheng 等 (2012); (b) 修改自周雄 (2012)

图 1 青藏高原造山带成矿区带图(a)和邦铺矿区地质简图(b)

Fig.1 Geological maps of metallogenic belts within the Tibetan orogenic belt(a) and the Bangpu deposit(b)



Qtz-石英; Kfs-钾长石; Pl-斜长石; Bt-黑云母; Mt-磁铁矿; Ti-Mt-钛磁铁矿

图 2 邦铺黑云二长花岗岩岩石学特征

Fig.2 Photos of the biotite monzonite in the Bangpu deposit

长石(20%)、斜长石(20%)及黑云母(15%)。黑云母分为两期,可见明显的包含关系(图 2b),早期黑云母具有浅褐-深褐色的多色性,晚期黑云母具有浅绿-黄绿的多色性。副矿物可见磁铁矿及钛磁铁矿(图 2c),说明岩浆具有较高的氧逸度。岩石总体来说比较新鲜,蚀变较弱。黑云二长花岗岩为成矿前已经存在的岩体,与斑岩 Mo-Cu 成矿关系不大。

2.2 分析测试方法

2.2.1 全岩主、微量元素分析 通过手标本及镜下鉴定,挑选蚀变较弱的样品粉碎至 200 目,由国家地质实验测试中心进行主微量元素分析。主量元素

分析仪器为荷兰帕纳科公司 Axios 波长色散 X 射线荧光光谱仪(XRF),微量元素分析仪器为等离子质谱仪(X-series)。

2.2.2 锆石 U-Pb 定年 锆石样品的分离和挑选由廊坊地岩矿物分选有限公司完成,制靶及阴极发光图像(CL)由北京锆石领航科技有限公司完成。将待测锆石打磨、抛光,经反射光和透射光照相后,用阴极发光扫描电镜分析确定单颗粒锆石的成因类型,选择待测点。测定时选择颗粒较大、自形程度好、清晰的锆石,尽量避开裂纹和包裹体。

LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析在中国地质

科学院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室完成, 分析仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。激光剥蚀斑束直径 25 μm , 频率 10 Hz, 能量密度 2.5 J/cm², He 载气。数据处理采用 ICPMSDataCal 程序 (Liu *et al.*, 2010)。测量过程中绝大多数分析点 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > 1000$, 未进行普通铅校正, ^{204}Pb 由离子计数器检测, ^{204}Pb 含量异常高的分析点可能受包体等普通 Pb 的影响, 对 ^{204}Pb 含量异常高的分析点在计算时剔除, 锆石年龄谐和图用 Isoplot 3.0 程序获得 (侯可军等, 2007, 2009)。Plesovice 标样分析结果为 $(336.5 \pm 1.1) \text{ Ma}$ ($n = 3, 2\sigma$), 对应的年龄推荐值为 $(337.13 \pm 0.37) \text{ Ma}$ (2σ) (Sláma *et al.*, 2008), 两者在误差范围内完全一致。

2.2.3 锆石原位 Hf 同位素分析 在中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室进行, 仪器为 Finnigan Neptune 型 MC-ICP-MS 及与之配套的 Newwave UP 213 激光剥蚀系统。激光束斑直径为 55 μm , 分析点为已经打过 U-Pb 年龄并且粒径较大的锆石。Hf 亏损地幔模式年龄的计算采用现今亏损地幔 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.28325$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0384$ (Vervoort and Blichert-Toft, 1999)。

2.2.4 Sr-Nd-Pb 同位素分析 在南京大学现代分析中心同位素分析室完成, 仪器为英国产 VG354 多接收质谱计, 以 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 为标准化值, 测得 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710224 \pm 8$ ($n = 10$); 对美国 La Jolla Nd 标样 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 的测定值为 0.511860 ± 8 ($n = 8$), 采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 校正。U-Th-Pb 化学分离是通过分析级的阳离子交换树脂和阴离子交换树脂进行, Pb 同位素质谱分析采用硅胶-磷酸发射技术和单铋带单接受技术, 测定 NBS981 Pb 同位素标准为: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 16.939 \pm 0.006$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.489 \pm 0.009$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 36.698 \pm 0.029$ ($n = 20$), 测定值都用 NBS 981 标样校正 (王银喜等, 2007)。

3 分析测试结果

3.1 主量元素组成

由邦铺黑云二长花岗岩的主量、微量元素分析结果 (表 1) 可见, 5 个样品中, SiO_2 含量为 72.13% ~ 75.19%, 均值为 73.52%。碱质较高, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 的均值为 7.79%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 0.96$ 。在 SiO_2 - K_2O 图解 (图 3a) 中, 1 个点落在高钾钙碱性范围, 其余 4 个点均落在钙碱性系列中。 Al_2O_3 含量为 13.45% ~ 14.61%, $\text{A}/\text{CNK} = 1.07 \sim 1.08$, 显示为准铝质-弱过铝质花岗岩 (图 3b)。MgO 含量为 0.29% ~

0.7%, CaO 为 1.1% ~ 1.47%, TFeO 为 1.04% ~ 1.78%。

3.2 微量元素组成

如表 1 所示, 邦铺黑云二长花岗岩稀土总量 ΣREE 为 $71.73 \times 10^{-6} \sim 116.79 \times 10^{-6}$, 均值为 98.72×10^{-6} , 变化不大。轻重稀土分异明显, LREE/HREE 为 5.69 ~ 8.03, La_N/Yb_N 为 4.90 ~ 7.95, 总体显示出一种右倾型、中稀土相对于重稀土更加亏损的稀土配分模式 (图 4a)。 δEu 为 0.49 ~ 0.61, 显示较强的负 Eu 异常, 说明岩浆演化过程中发生了较强烈的斜长石的分离结晶作用。各个样品的 REE 配分模式相似, 说明不同部位样品源区的一致性。

在 MORB 标准化的微量元素比值蛛网图 (图 4b) 上, 邦铺黑云二长花岗岩 5 个样品分布较为一致, 富集 Rb、Th、K 等大离子亲石元素, 相对亏损 P、Nb、Ti 等高场强元素。Rb/Sr 值为 0.91 ~ 0.99, 均值为 0.94, Nb/Ta 值为 9.01 ~ 28.45, 均值为 14.82。

3.3 锆石 U-Pb 定年

用于测试的锆石多数呈长柱状, 长宽比 1:1 ~ 3:1, 粒径 90 ~ 130 μm 。锆石自形程度较好, 多呈现白色或浅灰色。如阴极发光 (CL) 图像 (图 5a) 所示, 绝大多数锆石均发育密集震荡环带, 具有岩浆成因锆石的典型特征 (吴元保和郑永飞, 2004)。本次共测试 19 个点, 其中 12 个为锆石有效点的测试, 其余点为主要为锆石中的老核。这 12 点的锆石 U-Pb 同位素分析结果见表 2。锆石中 U 含量为 $63.38 \times 10^{-6} \sim 1620.76 \times 10^{-6}$, 均值为 341.98×10^{-6} ; Th 为 $99.08 \times 10^{-6} \sim 773.10 \times 10^{-6}$, 均值为 380.99×10^{-6} ; Th/U 值为 0.67 ~ 4.02, 远大于 0.1, 属于岩浆成因锆石 (Belousova *et al.*, 2002; 吴元保和郑永飞, 2004)。利用 Isoplot3 程序进行谐和曲线投影和等时线年龄计算 (Ludwig, 2003), 在 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} - ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和图上 (图 5b), 锆石有效点集中在一致线及其附近的一个很小区域内, 等时线年龄为 $(62.2 \pm 0.32) \text{ Ma}$ (MSWD = 0.08, $n = 12$)。

3.4 锆石 Hf 同位素特征

对邦铺黑云二长花岗岩中晶形较大并进行了 U-Pb 定年的 12 颗锆石进行 Lu-Hf 同位素分析, 结果如表 3 所示。12 个测点中点 3 和 11 的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值大于 0.004, 可能受到后期放射成因 Hf 积累, 故不参与均值计算。其余点所测定的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值可以近似代表锆石结晶时体系的 Hf 同位素组成 (Amelin *et al.*, 1999)。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 892 ~ 0.283 014, 均值为 0.282 942, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 5.5 ~ 9.8

表 1 邦铺黑云二长花岗岩主量元素及微量元素分析结果

Table 1 Major and trace element abundance of the biotite monzonite in the Bangpu deposit

项目	BP12-41 -1-1	BP12-41 -1-2	BP12-41 -1-3	BP12-41 -1-4	BP12-41 -1-5	项目	BP12-41 -1-1	BP12-41 -1-2	BP12-41 -1-3	BP12-41 -1-4	BP12-41 -1-5
SiO ₂	75.19	73.31	72.13	74.19	72.77	Nb	10.8	12.2	45.8	8.83	14.9
Al ₂ O ₃	13.45	14.15	14.61	13.98	14.56	Ta	0.86	0.84	1.61	0.98	1.56
CaO	1.26	1.35	1.6	1.1	1.47	Zr	77.9	73.1	87.4	55.2	78.7
Fe ₂ O ₃	0.55	0.78	0.75	0.58	0.72	Hf	3.19	2.77	3.71	2.13	3.46
FeO	0.75	0.83	1.1	0.52	0.81	Sn	1.2	1.41	2.9	0.88	1.4
K ₂ O	3.59	3.9	3.11	4.88	3.6	Ti	1183	1401	1805	862	1411
MgO	0.39	0.52	0.7	0.29	0.54	V	16.6	19.5	28.1	12	16.7
MnO	0.06	0.07	0.12	0.04	0.06	La	20.1	25.5	22.4	15.2	21.3
Na ₂ O	3.83	3.96	4.38	3.53	4.17	Ce	41.3	51.1	43.8	30.6	43.9
P ₂ O ₅	0.05	0.06	0.08	0.05	0.06	Pr	4.38	5.38	4.88	3.21	4.72
TiO ₂	0.19	0.23	0.28	0.15	0.23	Nd	14.2	17.8	16.2	10.6	16.1
CO ₂	0.34	0.34	0.17	0.3	0.34	Sm	2.99	3.49	3.32	2.26	3.12
H ₂ O ⁺	0.26	0.3	0.38	0.31	0.38	Eu	0.5	0.58	0.56	0.45	0.56
LOI	0.33	0.43	0.55	0.4	0.52	Gd	3.19	3.47	3.54	2.2	3.09
总量	100.24	100.23	99.96	100.32	100.23	Tb	0.6	0.57	0.62	0.39	0.5
Li	33.5	38.4	50.6	20.3	32.9	Dy	3.72	3.25	3.58	2.3	2.77
Be	1.09	1.13	1.35	0.71	1.03	Ho	0.79	0.65	0.75	0.5	0.58
Cr	3.59	3.24	0.9	2.8	3.19	Er	2.54	2.01	2.38	1.6	1.82
Mn	461	578	852	286	499	Tm	0.41	0.31	0.38	0.26	0.29
Co	1.83	2.15	2.66	1.22	2.4	Yb	2.94	2.3	2.79	1.86	2.16
Ni	2.32	2.37	1.83	2.01	2.58	Lu	0.49	0.38	0.46	0.3	0.35
Cu	2.07	1.85	6.99	1.64	1.91	Sc	4.44	5.24	6.66	2.76	5.2
Zn	14	17.5	37.6	11	18.3	Y	26.5	21.1	23.4	16.2	17.2
Ga	12.9	14.3	14	11.4	14.9	A/CNK	1.08	1.07	1.08	1.07	1.08
Rb	126	135	124	125	128	ΣREE(不含 Y)	98.15	116.79	105.66	71.73	101.26
Sr	135	148	131	126	141	LREE	83.47	103.85	91.16	62.32	89.70
Cs	3.72	4.33	5.81	2.91	4.41	HREE(不含 Y)	14.68	12.94	14.50	9.41	11.56
Ba	372	428	329	518	387	LREE/HREE	5.69	8.03	6.29	6.62	7.76
Pb	16.8	17.6	14.9	19.1	17.2	La _N /Yb _N	4.90	7.95	5.76	5.86	7.07
Th	16.7	18.3	17.1	11.7	17	δEu	0.49	0.50	0.50	0.61	0.55
U	1.67	1.34	2.59	0.82	1.11	δCe	1.03	1.02	0.98	1.02	1.03

注：主量元素为%，微量、稀土元素为×10⁻⁶。

(图 6), 均值为 7.3, 单阶段 Hf 模式年龄 t_{DM} 为 456 Ma, $f_{Lu/Hf}$ 均值为 -0.93。

3.5 Sr-Nd-Pb 同位素特征

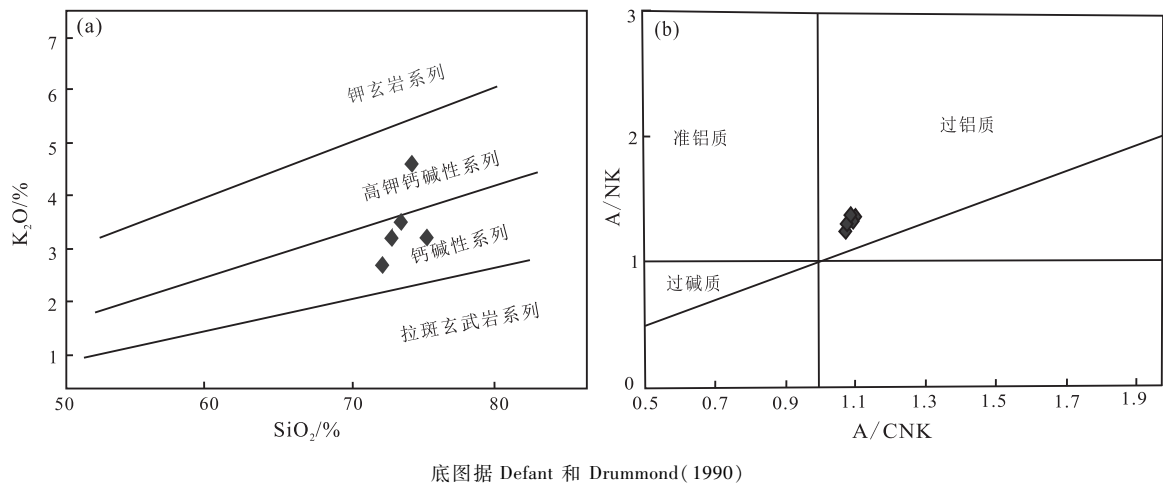
黑云二长花岗岩的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 值为 0.7100 ~ 0.7104, 变化范围较小; ε_{Nd}(*t*) 值为 -4.79 ~ -3.11, 全部为负值, Nd 同位素亏损地幔模式年龄集中于 109 ~ 141 Ma。在 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i-ε_{Nd}(*t*) 图解上(图 7a), 位于雅鲁藏布洋壳和安多片麻岩端元演化线附近。黑云二长花岗岩的 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb、²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 分别为 18.451 ~ 18.536、15.853 ~

15.897、38.951 ~ 38.996, 分布于近地球演化线之上, EM II 上方(图 7b)。

4 讨论

4.1 形成时代

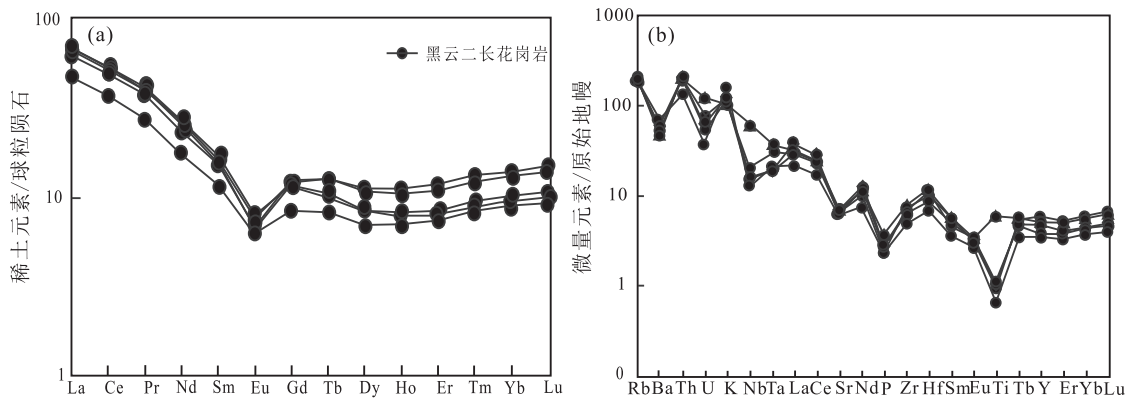
邦铺矿区二长花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄为 (16.23±0.19) Ma(罗茂澄等, 2011), 与成矿年龄即辉钼矿 Re-Os 年龄 15.32 Ma(孟祥金等, 2003) 近于一致。此外, 在地表还出露辉绿玢岩, 其成岩年龄为 (14.46±0.38) Ma(赵晓燕等, 2013)。黑云二长花岗岩是邦铺矿区迄今发现的最老的岩浆岩, 其年



底图据 Defant 和 Drummond(1990)

图 3 邦铺黑云二长花岗岩 SiO₂-K₂O 图解 (a) 和 A/CNK-A/NK 图解 (b)

Fig.3 Binary diagrams of SiO₂ vs K₂O (a) and A/CNKvs A/NK (b) of the biotite monzonite in the Bangpu deposit



球粒陨石和原始地幔数据来自于 Sun 和 McDonough (1989)

图 4 邦铺黑云二长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化图解 (a) 和微量元素原始地幔标准化图解 (b)

Fig.4 Chondrite-normalized rare earth element patterns (a) and primitive-mantle-normalized trace element patterns (b) for the biotite monzonite in the Bangpu deposit

表 2 邦铺矿床黑云二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试数据

Table 2 LA-ICP-MS Zircon U-Pb dating results of the biotite monzonite in the Bangpu deposit

点号	Pb/ ×10 ⁻⁶	Th/ ×10 ⁻⁶	U/ ×10 ⁻⁶	Th U	比值						t/Ma					
					²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
						1σ		1σ		1σ		1σ		1σ		1σ
BP12-41-1-1	47.7766	235.6887	86.2877	2.7314	0.0487	0.0032	0.0647	0.0041	0.0097	0.0003	131.6	148.1	63.6	3.9	62.3	1.7
BP12-41-1-2	57.4995	344.5803	89.1366	3.8658	0.0492	0.0030	0.0660	0.0041	0.0097	0.0002	166.8	144.4	64.9	3.9	62.4	1.5
BP12-41-1-3	92.3896	407.1499	534.3866	0.7619	0.0498	0.0004	0.0665	0.0006	0.0097	0.0001	183.4	21.3	65.4	0.5	62.2	0.4
BP12-41-1-7	144.8950	773.1029	308.8406	2.5032	0.0495	0.0010	0.0666	0.0017	0.0097	0.0001	172.3	46.3	65.4	1.6	62.5	0.6
BP12-41-1-8	19.1357	99.0822	63.3839	1.5632	0.0499	0.0016	0.0661	0.0020	0.0097	0.0001	190.8	71.3	65.0	1.9	62.2	0.9
BP12-41-1-10	73.2694	341.3917	113.5621	3.0062	0.0517	0.0024	0.0701	0.0038	0.0098	0.0002	333.4	102.8	68.8	3.6	63.1	1.3
BP12-41-1-13	55.9830	387.4664	96.3964	4.0195	0.0487	0.0057	0.0648	0.0074	0.0097	0.0002	131.6	255.5	63.8	7.1	62.1	1.2
BP12-41-1-14	85.4383	456.1566	685.3718	0.6656	0.0491	0.0006	0.0657	0.0012	0.0097	0.0001	150.1	25.9	64.6	1.1	62.3	0.7
BP12-41-1-15	124.2668	697.3664	1620.7580	0.4303	0.0492	0.0002	0.0658	0.0005	0.0097	0.0000	166.8	11.1	64.7	0.4	62.2	0.3
BP12-41-1-16	31.3835	208.1353	65.1579	3.1943	0.0484	0.0040	0.0649	0.0049	0.0098	0.0002	116.8	185.2	63.8	4.6	62.8	1.2
BP12-41-1-17	71.9347	450.4912	185.3889	2.4300	0.0493	0.0013	0.0658	0.0017	0.0097	0.0001	166.8	59.3	64.7	1.7	62.2	0.6
BP12-41-1-19	29.1947	171.2711	255.1366	0.6713	0.0495	0.0006	0.0660	0.0008	0.0097	0.0001	168.6	27.8	64.9	0.8	62.2	0.3

表 3 邦铺矿床黑云二长花岗岩锆石 Lu-Hf 同位素原位分析结果

Table 3 In situ zircon Lu-Hf isotope results of the biotite monzonite at Bangpu

点号	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	±2σ	ε _{Hf} (<i>t</i>)	<i>t</i> _{DM} /Ma	<i>t</i> _{DM} ^c	<i>f</i> _{Lu/Hf}
BP12-41-1-1	0.149135	0.002408	0.283014	0.000021	9.8	351	506	-0.93
BP12-41-1-2	0.121590	0.002091	0.282912	0.000019	6.2	496	735	-0.94
BP12-41-1-3	0.195976	0.004328	0.283073	0.000024	11.9	277	375	-0.87
BP12-41-1-7	0.161782	0.002768	0.282986	0.000027	8.8	395	569	-0.92
BP12-41-1-8	0.068733	0.001289	0.282981	0.000022	8.7	386	576	-0.96
BP12-41-1-10	0.122513	0.002229	0.282899	0.000025	5.8	518	766	-0.93
BP12-41-1-13	0.095111	0.001753	0.282892	0.000026	5.5	521	780	-0.95
BP12-41-1-14	0.219714	0.003827	0.282898	0.000027	5.7	543	772	-0.88
BP12-41-1-15	0.126349	0.002257	0.282892	0.000027	5.5	528	782	-0.93
BP12-41-1-16	0.168041	0.002933	0.282965	0.000027	8.1	428	617	-0.91
BP12-41-1-17	0.237527	0.004126	0.282995	0.000034	9.1	397	553	-0.88
BP12-41-1-19	0.070809	0.001267	0.282979	0.000023	8.6	390	582	-0.96

表 4 邦铺矿床黑云二长花岗岩 Sr-Nd-Pb 同位素分析结果

Table 4 Sr-Nd-Pb isotopic compositions of the biotite monzonite at Bangpu

样品号	BP12-41-1-1	BP12-41-1-2	BP12-41-1-3	BP12-41-1-4	BP12-41-1-5
Rb(μg/g)	123.9	137.1	122.7	126.8	130.2
Sr(μg/g)	134.1	151.2	128.6	128.3	143.5
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	2.729	2.673	2.815	2.906	2.684
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.7112	0.7110	0.7114	0.7115	0.7110
Sm(μg/g)	3.218	3.273	3.507	2.413	2.984
Nd(μg/g)	15.16	15.97	17.41	11.15	15.32
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0.1295	0.1219	0.1216	0.1302	0.1181
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.5125	0.5124	0.5124	0.5124	0.5125
(⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr) _i	0.7101	0.7100	0.7103	0.7104	0.7100
(¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd) _i	0.51243	0.51238	0.51236	0.51236	0.51244
ε _{Nd} (<i>t</i>)	-3.42	-4.45	-4.66	-4.79	-3.11
<i>t</i> _{DM} /Ma	127	125	127	141	109
U/(μg/g)	1.608	1.401	2.436	0.7691	1.085
Th/(μg/g)	14.93	18.85	16.49	12.07	16.23
Pb/(μg/g)	17.26	18.14	15.23	20.15	16.94
²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	18.479	18.467	18.503	18.536	18.451
²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	15.867	15.853	15.881	15.875	15.897
²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	38.962	38.951	38.984	38.996	38.979

龄的确定说明62 Ma 左右在冈底斯南亚带存在着岩浆活动,这一年龄与冈底斯中亚带与铅锌成矿岩体的年龄近为一致,如亚贵拉石英斑岩锆石U-Pb年龄为(62.4±0.6) Ma(黄克贤等,2012),纳如松多石英正长斑岩锆石U-Pb年龄为(62.5±0.77) Ma(纪现华等,2012)等。邦铺黑云二长花岗岩与冈底斯北亚带铅锌矿床的成矿岩体是否同源,其演化过程都需要进一步探讨。

4.2 岩石成因

主量元素分析结果显示,黑云二长花岗岩为钙碱性系列过铝质酸性岩;在稀土元素配分曲线上,

黑云二长花岗岩呈现一种“雁列”的分布形式,即中稀土相对于重稀土更加亏损,这种特征普遍认为是由于角闪石的结晶分异引起的。Ti 的强烈亏损可能也是由于在角闪石分离结晶时发生了金红石的分离。在图 4a 中可以看到,邦铺黑云二长花岗岩显示出强烈的负 Eu 异常,说明在岩浆演化过程中经历了较强的斜长石的结晶分异。在 La-La/Sm 图解(图 8a)及 Rb/Sr-Sr 图解(图 8b)中,黑云二长花岗岩各点均沿着分离结晶的趋势线演化。同时,在 Ba-Sr 图(图 8c)中(Rollinson,1993),邦铺黑云二长花岗岩分布于斜长石、辉石、角闪石结晶分离作用

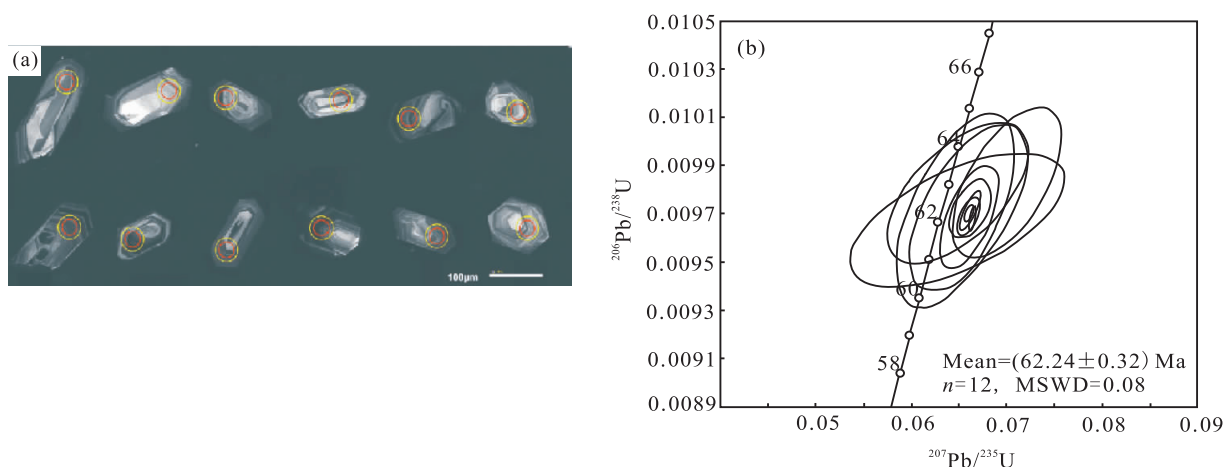
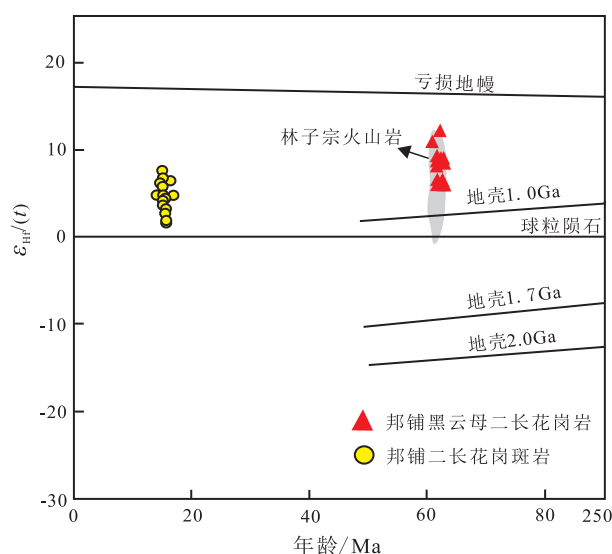


图5 邦铺黑云二长花岗岩锆石阴极发光图像(a)和U-Pb年龄和谐图(b)

Fig.5 Cathodoluminescence images(a) and U-Pb concordia diagram(b) of zircons from the biotite monzonite in the Bangpu deposit



底图据杨志明(2008)

图6 邦铺黑云二长花岗岩的Hf同位素组成和锆石U-Pb年龄关系图

Fig.6 Plot of $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. U-Pb ages of zircons from the biotite monzonite in the Bangpu deposit

趋势线之间。综合主量、稀土、微量元素特征可知,原始岩浆经历较为彻底的斜长石和角闪石的分离结晶,形成了黑云二长花岗岩。

锆石以其较高的Hf含量及低的Lu含量一直被认为是示踪岩浆源区最为有效的手段,同时通过计算获得的锆石地壳模式年龄 t_{DM2} 也可以反映壳幔分异以及地壳的形成时代(吴福元等,2007)。邦铺黑云二长花岗岩的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 均值为0.282 942,具有较高的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(均值为7.3),高于含矿的二长花岗斑岩(4.5),接近亏损地幔的Hf同位素组成,说明亏损地幔端元对黑云二长花岗岩的形成起了相

当重要的作用。Sr-Nd同位素研究也显示出相同的结果,邦铺黑云二长花岗岩位于雅鲁藏布江MORB与安多片麻岩的演化线上,其地幔组分占到80%左右,说明邦铺黑云二长花岗岩起源于俯冲的特提斯洋壳板片脱水引起的地幔楔的部分熔融,岩浆在上升的过程中,受到较强的地壳物质混染和结晶分异作用。

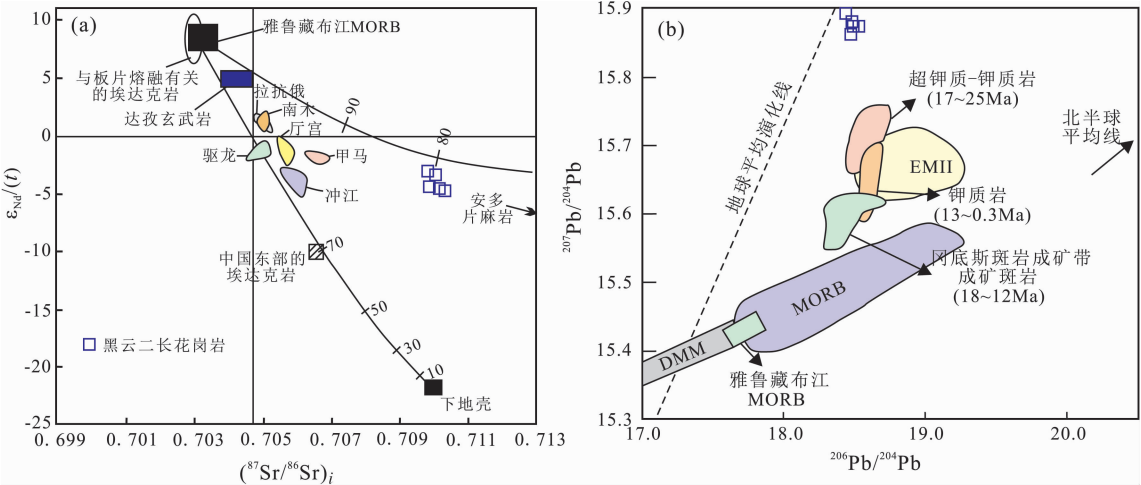
4.3 成岩构造环境

对花岗岩进行构造环境判别,目前比较常用的是Pearce等(1984)提出的微量元素判别图解及Maniar和Piccoli(1989)提出的主量元素判别图解。因为各种构造环境判别图中环境常常有重叠,不是唯一的,因此在此综合运用多个图解对邦铺黑云二长花岗岩的成岩构造环境进行判别。

在 $\text{SiO}_2\text{-TFeO/TFeO+MgO}$ 图解中(图9a),有4个点落入IAG+CAG+CCG区域;而在 CaO-TFeO+MgO 图解中(图9b),5个样品点均落入IAG+CAG+CCG区域。黑云二长花岗岩微量元素上富集Rb、Th、K等大离子亲石元素,亏损Nb、Ta、Ti等高场强元素显示出岛弧花岗岩(IAG)的特征,铝含量偏高可能是受到陆源沉积物混染的结果。在 Yb-(Y+Nb) (图10a)和Nb-Y(图10b)图解中,除点BP12-41-1-3的Nb含量偏高,落入板内花岗岩(WPG)的区域,其余几点综合两图均位于火山弧花岗岩(VAG)区域。Pearce图解结果与Maniar图解结果近于一致,也反映出邦铺黑云二长花岗岩的岛弧岩浆岩特征。

5 结论

(1) 邦铺黑云二长花岗岩锆石U-Pb年龄为



底图修改自 Hou 等 (2004)

图 7 邦铺矿床黑云二长花岗岩 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i - \epsilon_{Nd}(t)$ 图解

Fig.7 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i - \epsilon_{Nd}(t)$ diagram of the biotite monzonite from the Bangpu deposit

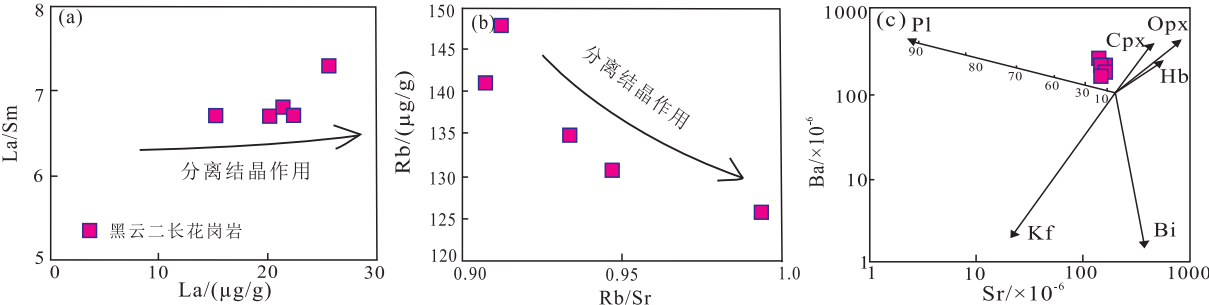
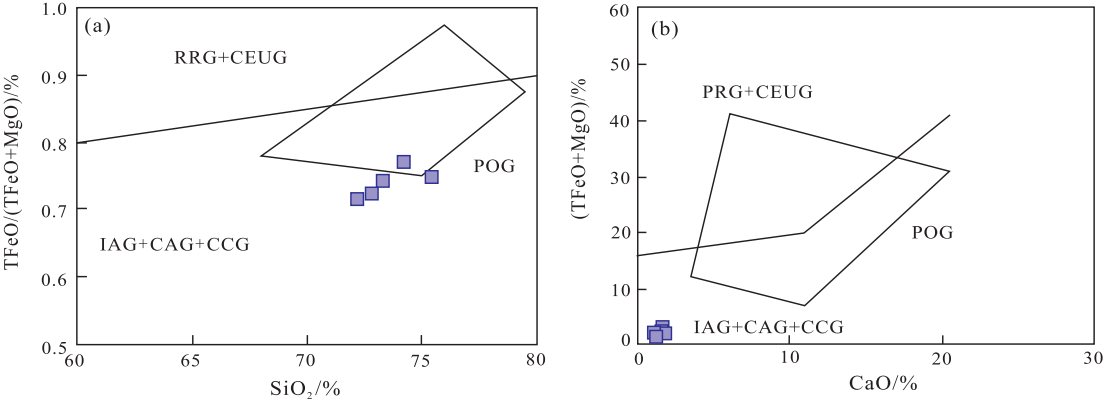


图 8 邦铺黑云二长花岗岩 La-La/Sm 图 (a)、Rb/Sr-Sr 图 (b) 和 Ba-Sr 微量元素判别图 (c)

Fig.8 Binary plots of La vs. La/Sm diagram (a), Sr vs. Rb/Sr diagram (b) and Ba vs. Sr (c)

of the biotite monzonite in the Bangpu deposit



底图据 Maniar 和 Piccoli (1989)

图 9 邦铺黑云二长花岗岩构造环境判别图解

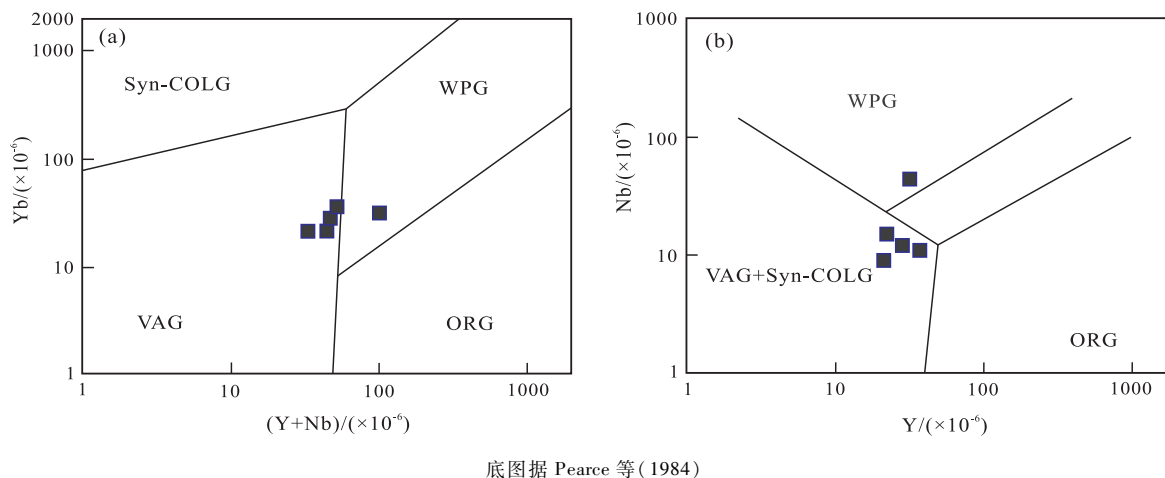
Fig.9 Discrimination diagrams of tectonic setting of the biotite monzonite in the Bangpu deposit

(62.2±0.32) Ma, $\epsilon_{Hf}(t)$ 的均值为 7.3, 接近于亏损地幔 Hf 同位素组成, 这都说明亏损地幔端元对于黑云二长花岗岩的形成起了重要作用, 铝含量偏高说明岩石在成岩过程中受到了地壳物质的混染。

(2) 邦铺黑云二长花岗岩轻重稀土分异明显,

强烈的负 Eu 异常说明岩石经历过斜长石的分离结晶作用, 中稀土相对重稀土更加亏损, Ba/Sr 图解说明岩石经历过角闪石的分离。

(3) Sr-Nd 同位素显示黑云二长花岗岩位于雅鲁藏布江 MORB 与安多片麻岩的演化线上, 并且地



底图据 Pearce 等 (1984)

图 10 邦铺黑云二长花岗岩 Yb-(Y+Nb) 图和 Nb-Y 图

Fig.10 Yb-(Y+Nb) and Nb-Y discriminant diagrams of the biotite monzonite in the Bangpu deposit

幔组分占到 80% 左右,说明邦铺黑云二长花岗岩起源于俯冲的特提斯洋壳板片脱水引起的地幔楔的部分熔融,岩浆在上升的过程中,有较多中上地壳物质的加入。

致谢: 感谢中国地质科学院矿产资源研究所侯可军、郭春丽老师在锆石 U-Pb 及 Hf 同位素测试中提供的帮助!

参考文献 (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. *Nature*, 399(6733): 252-255
- Belousova E, Griffin W L, O'Reilly S Y, Fisher N. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602-622
- Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662-665
- Hou Z Q, Gao Y F, Qu X M, Rui Z Y, Mo X X. 2004. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(1-2): 139-155
- Hou Z Q, Yang Z M, Qu X M, Meng X J, Li Z Q, Beaudoin G, Rui Z Y, Gao Y F, Zaw K. 2009. The Miocene Gangdese porphyry copper belt generated during post-collisional extension in the Tibetan Orogen. *Ore Geology Reviews*, 36(1-3): 25-51
- Hou Z Q, Zhang H R, Pan X F, Yang Z M. 2011. Porphyry Cu(-Mo-Au) deposits related to melting of thickened mafic lower crust: Examples from the eastern Tethyan metallogenic domain. *Ore Geology Reviews*, 39(1-2): 21-45
- Hou Z Q, Zheng Y C, Yang Z M, Rui Z Y, Zhao Z D, Jiang S H, Qu X M, Sun Q Z. 2013. Contribution of mantle components within juvenile lower-crust to collisional zone porphyry Cu systems in Tibet. *Mineralium Deposita*, 48(2): 173-192
- Hou Z Q, Zheng Y C, Zeng L S, Gao L E, Huang K X, Li W, Li Q Y, Fu Q, Liang W, Sun Q Z. 2012. Eocene-Oligocene granitoids in southern Tibet: Constraints on crustal anatexis and tectonic evolution of the Himalayan orogen. *Earth and Planetary Science Letters*, 349-350: 38-52
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C G, Zong K Q, Wang D B. 2010. 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 from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537-571
- Ludwig K R. User's manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003
- Maniar P D, Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635-643
- Mo X X, Hou Z Q, Niu Y L, Dong G C, Qu X M, Zhao Z D, Yang Z M. 2007. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: Evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet. *Lithos*, 96(1-2): 225-242
- Mo X X, Niu Y L, Dong G C, Zhao Z D, Hou Z Q, Zhou S, Ke S. 2008. Contribution of syncollisional felsic magmatism to continental crust growth: A case study of the Paleogene Linzizong volcanic Succession in southern Tibet. *Chemical Geology*, 250(1-4): 49-67
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrol*, 25(4): 956-983
- Qu X M, Hou Z Q, Li Y G. 2004. Melt components derived from a subducted slab in late orogenic ore-bearing porphyries in the Gangdese copper belt, southern Tibetan plateau. *Lithos*, 74(3-4): 131-148
- Qu X M, Hou Z Q, Zaw K, Li Y G. 2007. Characteristics and genesis of Gangdese porphyry copper deposits in the southern Tibetan Plateau: Preliminary geochemical and geochronological results. *Ore Geology Reviews*, 31(1-4): 205-223
- Rollinson H R. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. New York: John Wiley & Sons. Inc., 154-162
- Sláma J, Košler 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, Whitehouse M J. 2008. Plešovice zircon-A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 249(1-2): 1-35
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes.

- In: Saunders A D, Norry M J (eds). Magmatism in the ocean Basins. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313-345
- Vervoort J D, Blichert-Toft J. 1999. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(3-4): 533-556
- Yang Z M, Hou Z Q, White N C, Chang Z S, Li Z Q, Song Y C. 2009. Geology of the post-collisional porphyry copper-molybdenum deposit at Qulong, Tibet. *Ore Geology Reviews*, 36(1-3): 133-159
- Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211-280
- Zhao X Y, Yang Z S, Zheng Y C, Liu Y C, Tian S H, Fu Q. 2015. Geology and genesis of the post-collisional porphyry-skarn deposit at Bangpu, Tibet. *Ore Geology Reviews*, 70: 486-509
- Zheng Y C, Hou Z Q, Li W, Liang W, Huang K X, Li Q Y, Sun Q Z, Fu Q, Zhang S. 2012. Petrogenesis and geological implications of the Oligocene Chongmuda-Mingze Adakite-like intrusions and their mafic enclaves, southern Tibet. *The Journal of Geology*, 120(6): 647-669
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术. *矿床地质*, 28(4): 481-492
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 曲晓明, 石玉若, 谢桂青. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用. *岩石学报*, 23(10): 2595-2604
- 侯增谦, 莫宣学, 高永丰, 曲晓明, 孟祥金. 2003. 埃达克岩: 斑岩铜矿的一种可能的重要含矿母岩——以西藏和智利斑岩铜矿为例. *矿床地质*, 22(1): 1-12
- 侯增谦, 潘小菲, 杨志明, 曲晓明. 2007. 初论大陆环境斑岩铜矿. *现代地质*, 21(2): 332-351
- 侯增谦, 曲晓明, 黄卫, 高永丰. 2001. 冈底斯斑岩铜矿成矿带有望成为西藏第二条“玉龙”铜矿带. *中国地质*, 28(10): 27-29
- 侯增谦, 郑远川, 杨志明, 杨竹森. 2012. 大陆碰撞成矿作用: I. 冈底斯新生代斑岩成矿系统. *矿床地质*, 31(4): 647-670
- 黄克贤, 郑远川, 张松, 李为, 孙清钟, 李秋耘, 梁维, 付强, 侯增谦. 2012. 西藏亚贵拉矿区两期岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义. *岩石矿物学杂志*, 31(3): 348-360
- 纪现华, 杨竹森, 于玉帅, 申俊峰, 田世洪, 孟祥金, 李振清, 刘英超. 2012. 西藏纳如松多铅锌矿床成矿岩体形成机制: 岩浆锆石证据. *矿床地质*, 31(4): 758-774
- 李光明, 刘波, 余宏全, 丰成友, 屈文俊. 2006. 西藏冈底斯成矿带南缘喜马拉雅早期成矿作用——来自冲木达铜金矿床的 Re-Os 同位素年龄证据. *地质通报*, 25(12): 1481-1486
- 罗茂澄, 毛景文, 王立强, 冷秋峰, 陈伟. 2012. 西藏邦铺斑岩铜矿床岩浆-热液流体演化: 流体包裹体研究. *地球学报*, 33(4): 471-484
- 罗茂澄, 王立强, 冷秋峰, 陈伟. 2011. 邦铺钼(铜)矿床二长花岗岩、黑云二长花岗岩锆石 Hf 同位素和 Ce^{4+}/Ce^{3+} 比值. *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: 帮浦铜多金属矿床辉钼矿 Re-Os 年龄证据. *矿床地质*, 22(3): 246-252
- 孟祥金, 侯增谦, 李振清. 2005. 西藏冈底斯三处斑岩铜矿床流体包裹体及成矿作用研究. *矿床地质*, 24(4): 398-408
- 孟祥金, 侯增谦, 李振清. 2006. 西藏驱龙斑岩铜矿 S、Pb 同位素组成: 对含矿斑岩与成矿物质来源的指示. *地质学报*, 80(4): 554-560
- 莫宣学, 赵志丹, DePaolo D J, 周肃, 董国臣. 2006. 青藏高原拉萨地块碰撞-后碰撞岩浆作用的 3 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. *岩石学报*, 23(4): 795-803
- 曲晓明, 侯增谦, 黄卫. 2001. 冈底斯斑岩铜矿(化)带: 西藏第二条“玉龙”铜矿带? *矿床地质*, 20(4): 355-366
- 唐菊兴, 王登红, 汪雄武, 钟康惠, 应立娟, 郑文宝, 黎枫佶, 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. *地球学报*, 31(4): 495-506
- 王焕, 唐菊兴, 应立娟, 王立强, 秦志鹏. 2011. 西藏甲玛铜多金属矿床主要矿石矿物特征. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 38(1): 103-112
- 王立强, 唐菊兴, 陈毓川, 罗茂澄, 冷秋峰, 陈伟, 王焕. 2011. 西藏邦铺钼(铜)矿床含矿二长花岗岩斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义. *矿床地质*, 30(2): 349-360
- 王银喜, 顾连兴, 张遵忠, 吴昌志, 李惠民, 杨杰东. 2007. 东天山晚石炭世大石头群流纹岩 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学研究. *岩石学报*, 23(7): 1749-1755
- 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. *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. *科学通报*, 49(16): 1589-1604
- 杨勇, 罗泰义, 黄智龙, 杨竹森, 田世洪, 钱志宽. 2010. 西藏纳如松多银铅矿 S、Pb 同位素组成: 对成矿物质来源的指示. *矿物学报*, 30(3): 311-318
- 杨志明, 侯增谦, 江迎飞, 张洪瑞, 宋玉财. 2011. 西藏驱龙矿区早侏罗世斑岩的 Sr-Nd-Pb 及锆石 Hf 同位素研究. *岩石学报*, 27(7): 2003-2010
- 杨志明, 侯增谦, 宋玉财, 李振清, 夏代祥, 潘凤雏. 2008b. 西藏驱龙超大型斑岩铜矿床: 地质、蚀变与成矿. *矿床地质*, 27(3): 279-318
- 杨志明, 侯增谦, 夏代祥, 宋玉财, 李政. 2008a. 西藏驱龙铜矿西部斑岩与成矿关系的厘定: 对矿床未来勘探方向的重要启示. *矿床地质*, 27(1): 28-36
- 杨志明, 侯增谦. 2009. 西藏驱龙超大型斑岩铜矿的成因: 流体包裹体及 H-O 同位素证据. *地质学报*, 83(12): 1838-1859
- 杨志明, 谢玉玲, 李光明, 徐九华. 2005. 西藏冈底斯斑岩铜矿带驱龙铜矿成矿流体特征及其演化. *地质与勘探*, 41(2): 21-26
- 杨志明, 谢玉玲, 李光明, 徐九华. 2006. 西藏冈底斯斑岩铜矿带成矿流体的扫描电镜(能谱)约束——以驱龙和厅宫矿床为例. *矿床地质*, 25(2): 147-154
- 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]. 北京: 中国地质科学院, 1-193
- 赵晓燕, 杨竹森, 侯增谦, 郑远川, 刘英超, 田世洪, 付强, 费凡. 2013. 西藏邦铺矿区辉绿玢岩成因及对区域构造岩浆演化的指示. *岩石学报*, 29(11): 3767-3778
- 郑文宝, 唐菊兴, 畅哲生, 黎枫佶, 姚晓峰. 2010. 西藏甲玛铜多金属矿床地质地球化学特征及成因浅析. *地质与勘探*, 46(6): 985-994
- 周维德, 张正伟, 袁盛朝, 吴承泉, 李玉娇. 2014. 西藏尼木县白容斑岩型铜钼矿床特征及成矿期次. *矿物岩石地球化学通报*, 33(2): 177-184
- 周雄, 温春齐, 温泉, 吴鹏宇, 曹盛远, 费光春, 霍艳, 周玉. 2010. 西藏邦铺大型斑岩钼-铜矿床二长花岗岩斑岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. *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[硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 1-90
- 周雄. 2012. 西藏邦铺钼铜多金属矿床成因研究[博士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 1-154

(本文责任编辑: 刘莹; 英文审校: 高剑峰)