王立强,谢富伟,王勇.西藏巴嘎拉东铅锌矿床黑云母花岗岩锆石 U – Pb 年龄、微量元素组成及地质意义[J].岩矿测试, 2016,35(6):650 – 657.

WANG Li-qiang, XIE Fu-wei, WANG Yong, et al. U-Pb Geochronology and Trace Element Compositions of Zircon in Biotite Granite from the Bagaladong Pb-Zn Deposit, Tibet and Their Geological Significance [J]. Rock and Mineral Analysis, 2016, 35(6):650-657. [DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.2016.06.013]

# 西藏巴嘎拉东铅锌矿床黑云母花岗岩锆石 U - Pb 年龄、微量 元素组成及地质意义

王立强1,谢富伟1,王 勇2

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室,北京100037;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083)

**摘要**: 巴嘎拉东铅锌矿床位于冈底斯弧背断隆带东段,研究程度较低,尚未开展成岩成矿年代学研究。本文 选取该矿床黑云母花岗岩进行了LA-ICP-MS 锆石U-Pb年代学和微量元素组成测试,并利用锆石Ti温 度计方法获得锆石结晶温度。结果表明,黑云母花岗岩锆石均为典型岩浆成因锆石,14个测点得到的锆  $G^{206}$ Pb/<sup>238</sup>U加权平均年龄为129.1±2.3 Ma(MSWD=1.5),岩体侵位于早白垩世中期,与前人获得的该期 岩浆侵位年龄一致。锆石 ∑LREEs=13.21~530.28 µg/g,平均值 61.90 µg/g,∑HREEs=849.16~3981.54 µg/g,平均值 1826.91 µg/g,具有轻稀土亏损、重稀土富集的左倾配分模式;δCe=1.20~701.77,δEu=0.01 ~0.12,表现出明显的铈正异常和铕负异常特征。锆石 Ti 含量分布在 0.60~7.40 之间,结晶温度范围为 593.9~795.3℃,平均温度 724.3℃,一定程度反映了成岩温度。可以推断,巴嘎拉东黑云母花岗岩可能形 成于班公湖—怒江洋闭合后的碰撞造山挤压阶段,黑云母花岗岩形成时代的厘定代表了成矿时代的上限,为 区域上同时代铅锌矿找矿勘查提供了重要依据。

关键词:黑云母花岗岩; 锆石 U – Pb 年代学; 锆石微量元素; 锆石 Ti 温度计; 巴嘎拉东铅锌矿床 中图分类号: P588.121; P597.3 文献标识码: A

冈底斯弧背断隆带东段广泛发育燕山期岩浆作 用。Ding 等<sup>[1]</sup>利用独居石 Th – Pb 定年和绢云母 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar定年限定了该带淡色花岗岩年龄分布在 130~140 Ma 之间;翟庆国等<sup>[2-3]</sup>利用全岩 K – Ar 法和锆石 U – Pb 法测定了南木林县折无地区二云 母花岗岩和冈底斯中段淡色花岗岩年龄分别 93.4 Ma 和 133.9±0.9 Ma;杨德明等<sup>[4]</sup>、和钟铧等<sup>[5]</sup>利 用 SHRIMP 锆石 U – Pb 法分别测定了措麦地区含 石榴子石二云母花岗岩、桑巴区后碰撞花岗岩类年 龄为 123.4 Ma、117~121 Ma;高一鸣等<sup>[6]</sup>、费光春 等<sup>[7]</sup>、崔晓亮等<sup>[8]</sup>利用锆石 U – Pb 法分别测定亚贵 拉石英斑岩、洞中拉花岗斑岩和石英斑岩年龄为 126.7~130.6 Ma、124.4±1.9 Ma、126.9±1.1 Ma。 杜欣等<sup>[9]</sup>、连永牢等<sup>[10-12]</sup>、唐菊兴等<sup>[13]</sup>认为念青唐 古拉地区存在与燕山晚期中酸性侵入岩浆活动有关 的钨-钼-铜-铅-锌-银矿床成矿系列,但尚未 开展成矿时代研究。因此,与燕山期岩浆活动有关 的成矿时限仍然是需要解决的重大问题。

巴嘎拉东铅锌矿床位于冈底斯弧背断隆带上的 蒙亚啊—龙玛拉矿集区内,矿床成因类型应属于岩 浆热液有关的石英脉型铅锌矿床,整体地质勘查和 科学研究程度均较低,成矿时代尚未拟定。矿区广 泛侵位的黑云母花岗岩与矿化密切相关,本文通过 详细的钻孔和平硐编录,确认巴嘎拉东矿区 Pb – Zn

收稿日期: 2016-07-18; 修回日期: 2016-10-22; 接受日期: 2016-11-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41403040); 中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(K1416);中国地质调查 局地质调查项目(12120113036200,12120114050901)

作者简介: 王立强,副研究员,研究方向:矿床学及矿床地球化学。E-mail: wlq060301@163.com。

矿化发生于岩体侵位之后,对黑云母花岗岩开展了 LA – ICP – MS 锆石 U – Pb 年代学研究,其侵位时代 代表了矿区成矿时代上限。此外,利用锆石微量元 素组成对岩体形成温度及其形成时的构造环境予以 探讨。该项工作对于提升矿床整体研究程度以及总 结蒙亚啊—龙玛拉矿集区成岩成矿时间规律具有较 为重要的价值。

#### 1 矿区地质概况

矿区地层出露简单,主要为一套凝灰岩和第四 系。由于矿床地质勘查和科研工作程度极低,该套 凝灰岩的时代和地层归属尚不明确。矿区侵入岩主 要为黑云母花岗岩,出露于北部和中部(图1)。钻 孔和平硐编录结果显示,黑云母花岗岩发育较强的 硅化、白云母化和黄铁矿化,与成矿关系密切。矿区 构造形式以断层为主,分别为北东向 F1 断层、北北 西向 F2 断层和北西向 F3 断层,三组断层与成矿关 系均不大。铅锌矿体主要赋存于黑云母花岗岩与凝 灰岩接触的强硅化部位,矿体产出位置距离二者直 接接触部位常具有一定的距离。目前,矿区范围内 已经圈定7条铅锌矿(化)体,以Pb-1号矿体规模 最大,该矿体亦为矿床主采矿体。Pb-1号矿体形 态呈脉状,地表北西-南东向展布(图1),沿走向控 制长度约175 m,平均厚度约8 m;矿体倾向南西,倾 角整体较缓,多为23°~30°之间。矿体中矿石矿物 简单,主要为方铅矿、闪锌矿、黄铁矿,少量黄铜矿; 脉石矿物以石英为主,少量绿帘石、绿泥石、阳起石、 白云母和方解石等。矿石构造以浸染状构造为主, 其次为脉状、团斑状和条带状;矿石结构主要为结晶 作用形成的半自形晶 - 他形晶结构,其他结构包括 交代结构、固溶体分离结构等。矿床围岩蚀变主要 为硅化、绿帘石化、绿泥石化、白云母化和角岩化,以 强硅化与铅锌成矿关系最为密切。

### 2 样品采集与 U - Pb 定年测试

#### 2.1 样品采集和处理

用于锆石 U - Pb 年代学和微量元素地球化学 测试的黑云母花岗岩样品取自 Pb - 1 号矿体的 ZK001 钻孔。黑云母花岗岩为中粒花岗结构、块状 构造,新鲜面呈浅肉红色(图 2a),硅化较强的部位 呈灰白色(图 2b)。如图 2c、d 所示,岩石主要由石 英(35% ~ 40%)、钾长石(30% ~ 35%)、斜长石 (20% ~ 25%)、黑云母(约 10%)以及少量的锆石 等副矿物组成。显微镜下观察可见石英交代钾长石 形成的显微文象结构(图 2e);部分岩石中可见半自 形黄铁矿(图 2c~e)以及流体蚀变所形成的片状或



#### 图 1 西藏巴嘎拉东铅锌矿床地质简图(据普查报告修改)

Fig. 1 Geological sketch map of the Bagaladong Pb-Zn deposit, Tibet (Modified after prospecting report)

放射状白云母集合体(图2f)。

黑云母花岗岩破碎至自然粒度,经摇床、淘洗、 电磁及重力分选,分离出锆石单矿物,再由双目镜下 挑纯,将分选出的锆石清洗后制成环氧树脂样品靶, 将锆石磨制抛光后用于阴极发光(CL)、LA – ICP – MS 锆石 U – Pb 年代学和微量元素测试。

#### 2.2 U-Pb年代定年方法

锆石 LA – ICP – MS U – Pb 年代学和微量元素 分析测试于中国地质大学(北京)地质过程与矿产 资源国家重点实验室矿床地球化学微区分析室完 成。ICP – MS 仪器为美国产 Thermo Fisher X – Series II 型四极杆电感耦合等离子体质谱仪,激 光剥蚀系统为美国产 Geolas 193 准分子固体进样系 统。测试过程中,对锆石进行激光剥蚀的斑束直径 为 32 μm,频率为 8 Hz,激光剥蚀以 He 作为载气, Ar 为补偿气。采用美国国家标准参考物质 NIST610 对仪器进行最佳化,并将其作为微量元素含量测定 的外标。定年外标采用标准锆石 91500,监控样品 采用标准锆石 GJ – 1。每5个样品测试点测定两次 锆石 91500 标样,每个样品点的信号采集时间为 100 s,其中前 20 s 为背景信号采集时间,样品信号 采集时间为 50 s<sup>[14]</sup>。测试完成后,应用软件 ICPMSDataCal 对分析数据进行处理,具体方法可参阅文献[15]。

#### 3 U-Pb 定年结果与分析

#### 3.1 锆石 U-Pb 年龄

本次研究对黑云母花岗岩分选出来的锆石进行 了 14 个点位的 LA – ICP – MS 锆石 U – Pb 年代学 和微量元素地球化学测试工作,测试结果分别列于 表1 和表2 中。阴极发光图像(图 3)显示,锆石颗 粒整体较为规则,晶形较好,多为短柱状,个别为长 柱状。锆石粒度介于 80 ~ 150 µm 之间,锆石颗粒 长宽比值多介于 2.5:1~2:1之间,个别颗粒长宽 比值可达到 5:1。阴极发光图像显示所有锆石均 具有较为清晰的振荡环带结构,具有岩浆成因锆石 的特征<sup>[16]</sup>。测试过程中尽量避开锆石中的包体、残 留的核部以及锆石的裂隙处,从而达到最优的效果。

由表 1 可见, 锆石 U 含量为 226.1~1430 μg/g,平均值551.0μg/g, Th 含量为384.4~3603.9 μg/g,平均值1284.2μg/g; Th/U值为0.2~0.9,平 均值0.5, 与岩浆成因锆石的Th/U值大于0.1的结 果一致, 亦表明所测试的锆石为岩浆锆石。利用 Isoplot 4.12对锆石测年数据进行谐和曲线的投影及



a-新鲜黑云母花岗岩手标本特征;b-强硅化黑云母花岗岩手标本特征;c、d-黑云母花岗岩主要矿物组成;e-石英交代钾长石形成的显微 文象结构;f-黑云母花岗岩中热液蚀变白云母特征。Qtz-石英;Kf-钾长石;Pl-斜长石;Bt-黑云母;Ms-白云母;Py-黄铁矿。 图 2 西藏巴嘎拉东铅锌矿床黑云母花岗岩特征(正交偏光)

Fig. 2 Characteristics of the biotite granite from the Bagaladong Pb-Zn deposit, Tibet (cross-polarized light)

-652 -

#### 表1巴嘎拉东铅锌矿床黑云母花岗岩锆石U-Pb年代学测试结果

Table 1 Isotopic data of U-Pb age determinations on zircon of biotite granite form the Bagaladong Pb-Zn deposit

样品号	元素含量(µg/g)		TTL /I⊺		年龄(Ma)										
(LQLZK6 - 828)	Th	U	1n/ U	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	$1\sigma$	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	$1\sigma$	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	$1\sigma$	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	$1\sigma$	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	$1\sigma$
01	287.80	384.40	0.70	0.02017	0.00038	0.13056	0.00932	0.04653	0.00344	129	2	125	8	33	161
02	226.10	424.20	0.50	0.01972	0.00035	0.14227	0.01447	0.05257	0.00572	126	2	135	13	309	248
03	686.50	1961.80	0.30	0.01965	0.00027	0.14187	0.00571	0.05198	0.00216	125	2	135	5	283	94
04	346.50	721.10	0.50	0.01920	0.0003	0.11689	0.00632	0.04373	0.00237	123	2	112	6	-	-
05	325.90	806.00	0.40	0.02093	0.00032	0.14655	0.00741	0.05041	0.00261	134	2	139	7	213	116
06	605.30	640.90	0.90	0.02096	0.00030	0.13141	0.00713	0.04531	0.00261	134	2	125	6	-	-
07	274.80	564.40	0.50	0.02036	0.00028	0.13611	0.00649	0.04823	0.00242	130	2	130	6	109	124
08	689.20	731.20	0.90	0.01987	0.00031	0.12872	0.00710	0.04670	0.00258	127	2.	123	6	35	126
09	1430.00	3073.80	0.50	0.02003	0.00023	0.14262	0.00489	0.05093	0.00172	128	2	135	4	239	78
10	384.10	779.20	0.50	0.02062	0.00032	0.15072	0.00798	0.05275	0.00288	132	2	143	7	317	126
11	427.60	1452.70	0.30	0.01968	0.00029	0.14429	0.00638	0.05263	0.00231	126	2	137	6	322	100
12	722.80	1301.20	0.60	0.01996	0.00024	0.13887	0.00646	0.04997	0.00231	127	2	132	6	195	107
13	835.20	3603.90	0.20	0.01945	0.00021	0. 14361	0.00523	0.05315	0.00200	124	1	136	5	345	81
14	471.50	1534.00	0.30	0.01961	0.00023	0.13675	0.00535	0.05033	0.00201	125	2	130	5	209	88

注:"-"表示误差数据予以剔除。

#### 表 2 巴嘎拉东铅锌矿床黑云母花岗岩锆石微量元素组成及锆石 Ti 温度计算结果

Table 2 Trace elements compositions and results of crystallization temperture of zircons from the biotite granite in Bagaladong Pb-Zn deposit

测定点号		含量(×10 <sup>-6</sup> )															温度
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Ti	(°C)
01	< 0.05	16.29	< 0.05	1.45	3.47	0.19	22.70	8.60	110.87	43.40	190.88	40.65	367.17	64.80	1234.25	3.67	728.6
02	0.29	7.20	0.17	1.50	5.10	0.10	29.30	11.40	143.37	54.90	244.49	52.50	489.30	84.65	1583.56	3.45	723.1
03	0.07	20.40	0.10	2.19	6.96	0.19	52.39	24.10	330.88	133.74	618.50	135.65	1225.10	214.50	3889.87	0.60	593.9
04	< 0.05	9.48	0.07	1.40	4.48	0.10	32.90	13.44	182.40	72.69	323.20	71.09	634.70	111.20	2077.46	-	-
05	< 0.05	7.69	0.07	1.38	4.20	0.06	29.76	13.50	179.69	72.79	331.60	71.50	639.10	115.80	2101.87	5.10	759.2
06	1.40	35.00	0.96	6.05	7.45	0.40	31.69	10.85	127.00	48.79	213.10	44.88	403.80	74.18	1419.66	5.90	773.3
07	7.00	25.50	2.88	15.40	7.37	0.60	33.20	10.97	132.18	51.85	226.35	46.98	429.90	78.30	1447.80	7.20	792.8
08	< 0.05	28.50	0.10	2.95	5.49	0.20	36.90	13.50	168.40	63.80	281.10	58.40	512.96	91.47	1830.68	3.15	715.3
09	61.68	210.76	29.99	161.20	64.56	2.08	119.40	30.20	303.10	107.95	460.80	95.87	865.70	155.58	3099.90	107.89	1160.1
10	< 0.05	7.85	0.10	2.45	5.90	0.07	37.59	15.57	200.47	79.10	355.55	76.20	687.59	124.96	2289.77	7.40	795.3
11	< 0.05	7.10	0.05	1.47	6.35	0.09	49.30	21.67	296.10	120.78	560.29	121.30	1098.76	197.25	3508.10	0.90	619.1
12	< 0.05	13.50	0.19	3.89	10.16	0.19	71.96	28.28	346.06	137.10	586.60	120.86	1049.20	189.35	3841.36	6.10	776.4
13	0.46	7.29	0.35	3.05	10.10	0.10	76.46	35.85	498.28	198.59	915.97	195.47	1748.37	312.50	5720.00	6.07	775.6
14	< 0.05	6.57	0.09	1.00	5.48	< 0.05	40.30	18.70	256.05	104.10	480.00	103.79	928.78	172.18	3029.50	1.20	639.1

注:球粒陨石标准化数据值据 Sun 等<sup>[17]</sup>,"-"表示低于检出限数据。

<sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup> U 加权平均年龄计算。在<sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup> U <sup>207</sup> Pb/<sup>235</sup> U 谐和图上(图 4a),所有数据点均分布于 谐和曲线上或其附近区域内,得到锆石<sup>206</sup> Pb/<sup>238</sup> U 加 权平均年龄为 129.1 ± 2.3 Ma(MSWD = 1.5),表明 巴矿区黑云母花岗岩岩体侵位于早白垩世中期。

#### 3.2 锆石微量元素组成

由表 2 可见,黑云母花岗岩锆石稀土元素总量 变化范围较大,稀土元素总量 ΣREEs = 870.62 ~ 4002.93 μg/g,平均值 1888.81 μg/g;轻稀土元素总 量 ΣLREEs = 13.21 ~ 530.28 μg/g,平均值 61.90  $\mu g/g; 重稀土元素总量 \Sigma HREEs = 849.16 ~ 3981.54$  $<math>\mu g/g, 平均值 1826.91 \mu g/g; 轻重稀土元素比值为$ 0.01 ~ 0.25, 平均值 0.04。计算得到锆石稀土元素 $<math>\delta Ce$  值为 1.20 ~ 701.77, 平均值 117.04,  $\delta Eu$  值为 0.01 ~ 0.12, 平均值 0.04。稀土元素配分模式图解 显示(图 4b), 黑云母花岗岩锆石的稀土配分模式与 典型岩浆锆石配分模式一致, 即具有轻稀土亏损、重 稀土富集的左倾配分模式, 明显的铈正异常和铕负 异常特征<sup>[16,18]</sup>。



#### 图 3 巴嘎拉东铅锌矿床黑云母花岗岩锆石的阴极发光(CL)图像

Fig. 3 CL images of biotite granite from the Bagaladong Pb-Zn deposit, Tibet



图 4 巴嘎拉东黑云母花岗岩(a) 锆石 U - Pb 年龄谐和图与(b) 锆石稀土元素配分模式图

Fig. 4 (a) Zircon U-Pb concordia diagram and (b) Chondrite-normalized REE patterns for biotite granite from the Bagaladong Pb-Zn deposit

## 4 成岩时代与成岩温度讨论

#### 4.1 成岩时代及其对燕山期成矿作用的限定意义

矿化与蚀变特征表明,巴嘎拉东铅锌矿床成矿 作用与黑云母花岗岩关系密切,Pb-Zn 矿化应发生 于岩体侵位之后,矿床黑云母花岗岩的成岩年龄代 表了矿床成矿时代的上限。因此,矿床成矿时代应 略晚于129.1 Ma。区域上,早白垩世的酸性岩浆岩 侵位事件亦有报道,主要表现为一系列淡色白云母 或二云母花岗岩<sup>[1-3]</sup>、二云母花岗岩<sup>[4]</sup>、黑云母花岗 岩[5];巴嘎拉东矿床东部的亚贵拉铅锌矿区石英斑 岩成岩时代介于 127.8~129.3 Ma 之间<sup>[6]</sup>;费光春 等<sup>[7]</sup>和崔晓亮等<sup>[8]</sup>分别对洞中拉矿床花岗斑岩和 石英斑岩进行了锆石 U-Pb 年代学测试,结果显示 二者成岩时代分别为 124.4 Ma 和 126.9 Ma。由此 可见,冈底斯弧背断降带东段的念青唐古拉地区早 白垩世岩浆作用并非偶然事件,可能具有较广泛发 育的特征。需说明的是,除巴嘎拉东黑云母花岗岩 与成矿关系较为明显之外,其他该时期的侵入岩体 是否形成矿化尚不明确。不少研究认为冈底斯弧背 断隆带东段存在燕山期中、晚期与酸性侵入岩有关 的 Pb - Zn 矿床<sup>[7,9-13]</sup>,然而有明确时代约束的矿床 (点)基本未见报道。巴嘎拉东矿床成矿黑云母花 岗岩成岩时代的厘定,揭示了冈底斯弧背断隆带东 段的确存在燕山期成矿作用,这对于区域上寻找该 时期成矿事件提供了理论依据。

#### 4.2 锆石微量元素与成岩温度讨论

锆石部分微量元素是源岩性质和形成过程的提 供重要的地球化学信息<sup>[19]</sup>,锆石 Th /U 值区分岩 浆、变质和热液锆石的标志<sup>[18]</sup>,巴嘎拉东矿床黑云 母花岗岩锆石 Th/U 值分布在 0.6~7.4 之间(表 1),与典型岩浆成因锆石(Th/U>0.1)<sup>[20]</sup>一致。前 述锆石稀土配分曲线为轻稀土亏损、重稀土富集的 左倾配分模式、Ce 正异常和 Eu 负异常(图4b),进 一步证实为岩浆锆石,因此锆石结晶温度可以反映 成岩温度。利用锆石微量元素 Ti 含量计算岩石形 成温度近年来得到较为广泛的应用<sup>[21-22]</sup>。经过大 量实验测试和热力学计算,锆石 Ti 温度计的计算公 式最终被 Ferry 等<sup>[23]</sup>修订为 log(10<sup>-6</sup>Ti<sub>in-ziron</sub>) = (5.711 ±0.072) - (4800 ±86)/T(K) - log $\alpha_{Sio_2}$  + log $\alpha_{TiO_2}$ 。前人研究表明,体系中石英存在时 $\alpha_{SiO_2} \approx$  1;在典型岩浆温度范围内,硅酸盐熔体中 $\alpha_{TiO_2} \approx$  0.6<sup>[24]</sup>。巴嘎拉东黑云母花岗岩中存在大量石英(图3),可取 $\alpha_{SiO_2}$ 值为1。依据公式计算得到锆石结晶温度列于表2,其中点09温度为1160.1℃,超过锆石U-Pb体系的封闭温度(900~1100℃)<sup>[25]</sup>,予以剔除。其余锆石结晶温度在593.9~795.3℃之间,且多在700℃以上,平均温度值为724.3℃。

#### 5 结论

巴嘎拉东铅锌矿区黑云母花岗岩与矿化关系密 切,本文利用 LA – ICP – MS 技术对黑云母花岗岩的 锆石微量元素进行研究,锆石微量元素稀土配分模 式表现为与典型岩浆锆石相似的轻稀土亏损、重稀 土富集的左倾配分模式;计算得到锆石 δCe 和 δEu 值分别为 1.20 ~ 701.77、0.01 ~ 0.12,同样显示了 岩浆锆石特征,利用锆石 Ti 元素温度计算出矿区黑 云母花岗岩锆石结晶温度分布在 593.9 ~ 795.3℃ 之间,平均温度为 724.3℃,岩浆锆石的结晶温度在 一定程度上反映了黑云母花岗岩的成岩温度。

此外,采用 LA - ICP - MS 锆石 U - Pb 年代学 测试获得成矿黑云母花岗岩的年龄为 129.1 ±2.3 Ma,与前人获得的念青唐古拉地区早白垩世岩浆侵 位时代一致,推测可能形成于班公湖一怒江洋闭合 后的碰撞造山挤压阶段。巴嘎拉东矿区 Pb - Zn 矿 化发生于岩体侵位之后,因此,黑云母花岗岩成岩时 代的厘定,限定了冈底斯弧背断隆带东段燕山期成 矿作用晚于 129.1 ±2.3 Ma,对于区域上寻找早白 垩成矿作用奠定了理论基础。

**致谢:** 锆石 U – Pb 年代学和微量元素测试过程中得 到中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家 重点实验室矿床地球化学微区分析室工作人员的指 导和帮助,在此一并致谢。

#### **6** 参考文献

- Ding L, Lai Q Z. New Geological Evidence of Crustal Thickening in the Gangdese Block Prior to the Indo-Asian Collision [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48 (15):1604-1610.
- [2] 翟庆国,李才,王天武,等.西藏折无地区晚白垩世二 云母花岗岩地球化学特征及构造环境[J].吉林大学 学报(地球科学版),2004,34(1):27-31.

Zhai Q G,Li C,Wang T W, et al. The Geochemistry and Tectonic Settings of Two-Micagranite in Zhewu Area, Tibet [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2004, 34(1): 27 - 31.

- [3] 翟庆国,李才,李惠民,等. 西藏冈底斯中部淡色花岗 岩锆石 U - Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 2005,24(4):349-353.
  Zhai Q G, Li C, Li H M, et al. U-Pb Zircon Age of Leucogranite in the Central Ggangdise, Tibet, and Its Geological Significance [J]. Geological Bulletin of China,2005,24(4):349-353.
- [4] 杨德明,黄映聪,戴琳娜,等. 西藏嘉黎县措麦地区含 石榴子石二云母花岗岩锆石 SHRIMP U - Pb 年龄及 其意义[J]. 地质通报,2005,24(3):235-238.
  Yang D M, Huang Y C, Dai L N. SHRIMP Zircon U-Pb Age of Garnet-bearing Two-Mica Granite at Comai Township, Lhari County, Tibet, and Its Significance[J]. Geological Bulletin of China,2005,24(3):235-238.
- [5] 和钟铧,杨德明,王天武.冈底斯带桑巴区早白垩世后 碰撞花岗岩类的确定及构造意义[J].岩石矿物学杂 志,2006,25(3):185-193.
  He Z H, Yang D M, Wang T W. The Determination of Carly Cretaceous Post-collision Granitoids in Sangba Area of Gangdese Tectonic Belt and Its Tectonic Significance [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2006,25(3):185-193.
- [6] 高一鸣,陈毓川,唐菊兴,等.西藏工布江达县亚贵拉 铅锌钼多金属矿床石英斑岩锆石 SHRIMP 定年及其 地质意义[J].地质学报,2009,83(10):1436-1444.
  Gao Y M, Chen Y C, Tang J X, et al. SHRIMP U-Pb Dating of Zircon from Quartz Porphyry in the Yaguila Pb-Zn-Mo Deposit,Gongbujiangda County,Tibet and Its Geological Implication[J]. Acta Geologica Sinica,2009, 83(10):1436-1444.
- [7] 费光春,温春齐,王成松,等.西藏墨竹工卡县洞中拉 铅锌矿床花岗斑岩锆石 SHRIMP U - Pb 定年[J]. 中国地质,2010,37(2):470-476.
  Fei G C, Wen C Q, Wang C S, et al. Zircon SHRIMP U-Pb Age of Porphyry Granite in the Dongzhongla Lead-Zinc Deposit, Maizhokunggar County, Tibet[J]. Geology in China,2010,37(2):470-476.
- [8] 崔晓亮,唐菊兴,多吉,等.西藏洞中拉铅锌矿床石英 斑岩锆石 U - Pb 年代学研究[J].成都理工大学学报 (自然科学版),2011,38(5):557-562.
  Cui X L,Tang J X, Dorji, et al. Zircon U-Pb Age of the Quartz Porphyry from Dongzhongla Pb-Zn Deposit in Tibet, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology,2011,38(5):557-562.

2016 年

[9] 杜欣,刘俊涛,王亚平.西藏拉屋铅锌多金属矿床地质特征及成因分析[J].矿产与地质,2004,18(5): 410-414.

> D Xin , Liu J T, Wang Y P. Geological Character and Ore Genesis of the Lawu Copper-Lead-Zinc Polymetallic Ore Deposit[J]. Mineral Resources & Geology,2004,18 (5):410-414.

 [10] 连永牢,曹新志,燕长海,等.西藏工布江达县亚贵拉 铅锌矿床地质特征及成因分析[J].地质与勘探, 2009,45(5):570-576.

> Lian Y L, Cao X Z, Yan C H, et al. Geological Characteristics and Genesis of Yaguila Lead-Zinc Deposit in the Gongbujiangda County of Tibet Province [J]. Geology & Exploration, 2009, 45(5):570 – 576.

[11] 连永牢,曹新志,燕长海,等.西藏当雄县拉屋铜铅锌
 多金属矿床喷流沉积成因[J].吉林大学学报(地球
 科学版),2010,40(5):1041-1046.

Lian Y L, Cao X Z, Yan C H, et al. Exhalative Sedimentary Genesis of Lawu Copper-Lead-Zinc Deposit in Dangxiong County of Tibet [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2010,40(5):1041 – 1046.

[12] 连永牢,曹新志,燕长海,等. 西藏念青唐古拉地区铅 锌银矿床成矿系列及找矿前景[J]. 贵州大学学报 (自然科学版),2011,28(2):31-36.
 Lian Y L, Cao X Z, Yan C H, et al. Metallogenic Series

and Prospecting Potential of Lead-Zinc-Silver Ore District in Nyainqentangha, Tibet [J]. Journal of Guizhou University (Natural Science Edition), 2011, 28 (2):31 – 36.

[13] 唐菊兴,王立强,郑文宝,等. 冈底斯成矿带东段矿床 成矿规律及找矿预测[J]. 地质学报,2014,88(12): 2545-2555.

> Tang J X, Wang L Q, Zheng W B, et al. Ore Deposits Metallogenic Regularity and Prospecting in the Eastern Section of the Gangdese Metallogenic Belt [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(12):2545 – 2555.

 [14] 顾枫华,章永梅,刘瑞萍,等.内蒙古沙德盖花岗岩岩 浆混合作用:岩相学、矿物化学和年代学证据[J]. 岩石学报,2015,31(5):1374-1390.

> Gu F H,Zhang Y M,Liu R P,et al. Magma Mixing and Mingling of the Shadegai Granite in Inner Mongolia: Evidence from Petrography, Mineral Chemistry and Geochronology [J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31 (5):1374 – 1390.

[15] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisement and Refinement of Zircon U-Pb Isotope and Trace Element Analyses by LA-ICP-MS[J]. Chinese Science Bulletin, 2010,55(15):1535-1546. [16] 吴元保,郑永飞. 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, 2004, 49 (16):
1589 - 1604.
Wu Y B, Zheng Y F. Genesis of Zircon and Its

Constraints on Interpretation of U-Pb Age [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16):1589 – 1604.

- [17] Sun S S, McDonough W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Process//Saundern A D, Norry M J (eds.). Magmatism in the Ocean Basins[J]. Geological Society London Special Publication, 1989, 42 (1): 313 - 345.
- [18] Belousova E A, Griffin W L, O' Reilly S Y, et al. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002, 143:602 - 622.
- [19] 钟玉芳,马昌前,佘振兵. 锆石地球化学特征及地质应用研究综述[J]. 地质科技情报,2006,25(1): 27-34.
   Zhong Y F, Ma C Q, She Z B. Geochemical

Characteristics of Zircon and Its Applications in Geosciences [ J ]. Geological Science & Technology Information,2006,25(1):27-34.

[20] 赵振华. 副矿物微量元素地球化学特征在成岩成矿作用研究中的应用[J]. 地学前缘, 2010, 17(1):
 267-286.
 Zhao Z H. Trace Element Geochemistry of Accessory

Zhao Z H. Trace Element Geochemistry of Accessory Minerals and Its Applications in Petrogenesis and Metallogenesis [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17 (1):267 – 286.

- [21] Watson E B, Wark D A, Thomas J B. Crystallization Thermometers for Zircon and Rutile[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2006, 151:413-433.
- [22] 高晓英,郑永飞.金红石 Zr 和锆石 Ti 含量地质温度 计[J].岩石学报,2011,27(2):417-432.
  Gao X Y, Zheng Y F. On the Zr-in-Rutile and Ti-in-Zircon Geothermometers [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011,27(2):417-432.
- [23] Ferry M, Watson E B. New Thermodynamic Models and Revised Calibrations for the Ti-in-Zircon and Zr-in-Rutile Thermometers [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2007, 154 (4):429-437.
- [24] Hayden L A, Watson E B. Rutile Saturation in Hydrous Siliceous Melts and Its Bearing on Ti-Thermometry of Quartz and Zircon [J]. Earth Planetary Science Letters, 2007,258(3-4):561-568.
- [25] Lee J, Williams I, Ellis D. Pb, U and Th Diffusion in Nature Zircon[J]. Nature, 1997, 390:159 162.

-656 -

## U-Pb Geochronology and Trace Element Compositions of Zircon in Biotite Granite from the Bagaladong Pb-Zn Deposit, Tibet and Their Geological Significance

WANG Li-qiang<sup>1</sup>, XIE Fu-wei<sup>1</sup>, WANG Yong<sup>2</sup>

- (1. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Land and Resources; Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;
- 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

#### Highlights:

- The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating for mineralization-related biotite granite is 129.1 ±2.3 Ma (MSWD = 1.5).
- Crystallization temperatures of zircon spartially reflect the diagenetic temperature.
- The formation age of the biotite granite in the Bagaladong deposit represents the upper limit of the metallogenic epoch.
- Limit of the metallogenic epoch provides an important evidence for prospecting the Early Creataceous Pb-Zn mineralization.

Abstract: The Bagaladong Pb-Zn deposit is located in the eastern segment of the Gangdese back-arc uplift belt and lacks enough study with no available ages for ores and rocks. Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (LA-ICP-MS) zircon U-Pb dating and in situ trace elements were carried out for mineralization-related biotite granite in the Bagaladong Pb-Zn deposit and are reported in this paper. The crystallization temperatures of zircons in the biotite granite are obtained by using the zircon Ti thermometer. Trace element composition of



zircons in the biotite granite indicates a magmatic origin. Fourteen zircons yield a weighted average  $^{206}$  Pb/ $^{238}$ U ages of 129.1 ± 2.3 Ma (MSWD = 1.5), suggesting that the biotite granite was established in the middle of the Early Cretaceous, which is consistent with the age of magmatic intrusions obtained by previous studies. Zircon has  $\Sigma$ LREEs values of 13.21 – 530.28 µg/g with an average of 61.90 µg/g and  $\Sigma$ HREEs values of 849.16 – 3981.54 µg/g with an average of 1826.91 µg/g. Zircon has left-inclined REEs patterns with relative LREEs depletion and HREEs enrichment. These zircons have  $\delta$ Ce and  $\delta$ Eu values of 1.20 – 701.77 and 0.01 – 0.12, respectively, indicating obviously positive Ce anomalies and negative Eu anomalies. Zircons have Ti contents varying from 0.60 to 7.40 and crystallization temperatures of 593.9 – 795.3 °C with an average of 724.3 °C, which partially reflect the diagenetic temperature. It can be concluded that the Bagaladong biotite granite was probably formed during the extrusion stage of collision after the closure of the Bangong Co-Nujiang ocean basin. The age of the biotite granite in the Bagaladong deposit represents the upper limit of the metallogenic epoch and provides important evidence for prospecting the Early Cretaceous Pb-Zn mineralization in the east section of the Gangdese back-arc fault uplift area. **Key words**: biotite granite; zircon U-Pb dating; zircon trace element; zircon Ti thermometer; Bagaladong Pb-Zn deposit