

文章编号: 1000-4734(2015)04-0457-06

云南宾川宝丰寺碱性斑岩成岩时代的 精确厘定与地质意义

徐恒^{1,2}, 崔银亮^{1,3*}, 周家喜⁴, 张苗红², 荣惠锋², 姜永果³

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

2. 云南省有色地质局 地质勘查院, 云南 昆明 650216; 3. 云南省有色地质局, 云南 昆明 650051;

4. 中国科学院 地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 宾川宝丰寺碱性斑岩体位于扬子陆块西缘金沙江—红河断裂与宾川—程海断裂夹持部位, 属于金沙江—红河富碱斑岩带组成部分, 由细晶含黑云母花岗斑岩和粗晶花岗斑岩组成。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果显示, 2件样品的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄分别为 34.99±0.37 Ma (MSWD=2.1, n=20) 和 33.53±0.27 Ma (MSWD=1.4, n=19), 均属古近纪始新世岩浆活动的产物。宝丰寺花岗斑岩的成岩年龄与印—亚晚碰撞转换时限 (41~26 Ma) 和滇西三江富碱斑岩带碱性岩浆活动高峰期 (45~30 Ma) 一致, 表明宝丰寺斑岩成岩作用是印—亚大陆碰撞的响应, 形成于晚碰撞期伸展构造背景下。此外, 本次获得的宝丰碱性斑岩成岩年龄与滇西斑岩型矿床成矿高峰期年龄 (34±2 Ma) 吻合, 暗示宝丰寺碱性斑岩具有一定的成矿潜力。

关键词: 碱性斑岩; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄; 地质意义; 云南宾川宝丰寺

中图分类号: P597 **文献标识码:** A **Doi:** 10.16461/j.cnki.1000-4734.2015.04.008

作者简介: 徐恒, 男, 1981年生, 博士研究生, 矿产普查与勘探专业. E-mail: 306551439@qq.com

LA-ICP-MS Zircon U-Pb Ages and Geological Implications of Baofengsi Alkaline Porphyries, Binchuan City, Yunnan Province, China

XU Heng^{1,2}, CUI Yin-liang^{1,3}, ZHOU Jia-xi⁴, ZHANG Miao-hong², RONG Hui-feng², JIANG Yong-guo³

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Nonferrous Metal Geological Survey of Yunnan Nonferrous Metals Geological Bureau, Kunming 650216, China;

3. Yunnan Nonferrous Metals Geological Bureau, Kunming 650051, China; 4. State Key Laboratory of Mineral Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

Abstract: Located in the field between Jinshajiang-Red River and Binchuan-Chenghai faults, Baofengsi alkaline porphyries in Binchuan City, Yunnan province, China is an important part of Jinshajiang-Red River alkali-rich porphyry belt. The porphyry consists of fine crystal biotitic granite porphyry and coarse-grain granite porphyry. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of two porphyry samples shows that ²⁰⁶Pb/²³⁸U weighted average age are 34.99±0.37 Ma (MSWD=2.1, n=20) and 33.53±0.27 Ma (MSWD=1.4, n=19), respectively. These ages suggest that Baofengsi alkaline porphyries had formed during the Paleogene Eocene and are consistent with the peak ages (45~30 Ma) of the alkali-rich porphyry magmatism in Jinshajiang-Red River alkali-rich porphyry belt and India-Asian late collision transformation time (41~26 Ma), suggesting that those porphyries formed under India-Asian late collision extended setting. The LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of Baofengsi alkaline porphyry are also similar to the metallogenic peak ages of porphyry-type deposit (34±2 Ma) in western Yunnan Province, indicating that those porphyries have an ore-forming potentiality.

收稿日期: 2015-05-11

基金项目: 中国地质调查局项目 (1212011120607); 云南省有色地质局与中国科学院地球化学研究所科研合作项目 (20131300001)

* 通讯作者, E-mail: cyl186@163.com

Keywords: alkaline porphyry; LA-ICP-MS; zircon U-Pb age; geological implication; Baofengsi; Binchuan City; Yunnan Province

自 2002 年云南省有色地质局对宾川宝丰寺斑岩体出露地区开展地质找矿工作以来, 已陆续发现金、铜、铅锌矿化体(点) 3 处。宝丰寺斑岩体是何时形成的, 是否与已发现的多金属矿化有关等问题是摆在人们面前的一个现实问题。1997 年云南省地矿局获得了 51 Ma 的 K-Ar 年龄^[1], 2001 年云南省有色地质局获得了 67 Ma 的 Ar-Ar 年龄^[2], 这些年龄数据悬殊很大, 制约了对其成岩成矿作用的认知。本文利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年技术, 对宝丰寺斑岩体(不同位置) 进行了精确的锆石 U-Pb 定年, 以期更好地理解对宝丰寺富碱斑岩成岩成矿作用, 指导下一步找矿勘查。

1 地质概况和岩体特征

宝丰寺斑岩体位于滇西三江成矿带中部, 金沙江—红河断裂与宾川—程海断裂所夹持的倒三角形地带(图 1a)^[3], 属全球特提斯—喜马拉雅斑岩成矿带的一部分, 成矿地质条件较优越。大地构造位置属扬子陆块西缘丽江—盐源陆缘褶—断带。受喜马拉雅期印—亚板块碰撞的远程效应影响, 区内构造、岩浆活动强烈, 奠定了成岩成矿的物质基础^[4]。研究区内构造形迹复杂, 发育北西向、北东向和近东西向三组断层。

宝丰寺斑岩呈岩株和岩墙状沿北西向断裂侵入志留系、泥盆系和二叠系所组成的断块褶皱核部, 后被北东向和近东西向断层错断(图 1a、b)。宝丰

寺斑岩由细晶含黑云母花岗斑岩和粗粒花岗斑岩组成(图 2a、b), 岩体外接触带发育有角岩化、夕卡岩化、褐铁矿化、黄铁矿化和铅锌矿化。岩石地球化学特征上属于过铝质碱性岩系列^[3-5], 与金沙江—红河富碱斑带碱性斑岩相似^[6]。

2 岩相学特征

细晶含黑云母花岗斑岩和粗晶花岗斑岩, 均具有斑状结构(图 2c)、自形晶结构、港湾结构、交代残余结构和碎裂结构。岩石由斑晶和基质两部分组成, 斑晶占全岩的 20%~30%, 基质占 70%~80%。斑晶主要是长石、石英和黑云母, 其中长石占斑晶的 60%~70%, 石英占 20%~30%, 黑云母占 5%~10%。长石呈不规则粒状和板状自形晶体, 多有粘土化现象(图 2d), 有的晶体裂隙发育, 形成碎裂结构(图 2c), 沿裂隙充填有粘土矿物和微晶黑云母, 酸性斜长石见卡氏双晶和聚片双晶。钾长石和酸性斜长石的含量基本相等, 粒度一般为 0.5~5 mm。石英多呈它形粒状, 偶见六边形晶体, 常见被溶蚀的港湾结构(图 2d), 粒度为 0.3~0.8 mm, 具波状消光。黑云母强烈蚀变为水黑云母呈黄棕色, 解理不明显或无解理, 吸收性和多色性消失, 干涉色呈暗黄棕色。黑云母蚀变析出一些铁质, 呈分散的细粒小质点, 粒度为 0.02~0.2 mm, 副矿物见磷灰石, 含量不足全岩的 1%。

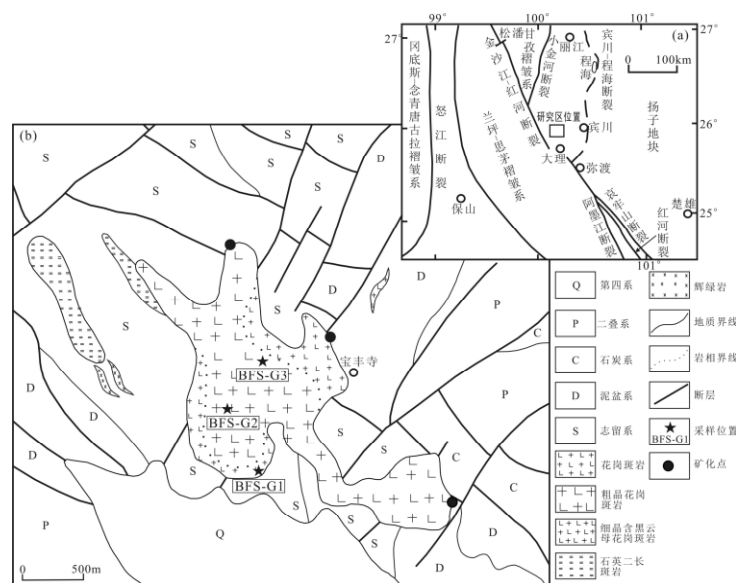


图 1 云南宾川宝丰寺斑岩体地质简图[(a)据郭晓东等^[7]修改; (b)据郭桂林等^[3]修改]

Fig. 1. Geological sketch map of Baofengsi porphyry, Binchuan city, Yunnan Province, China.

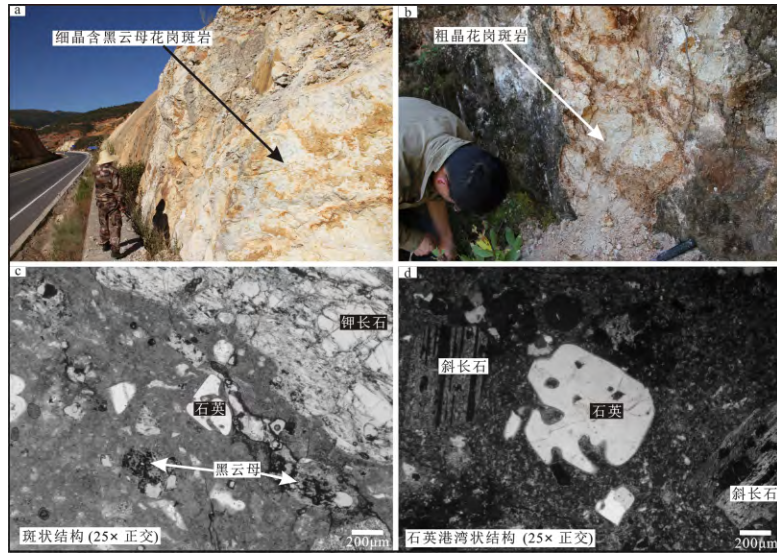


图 2 宝丰寺斑岩野外露头 and 显微镜下照片

Fig. 2. Field photographs and microscope photographs of Baofengsi porphyries.

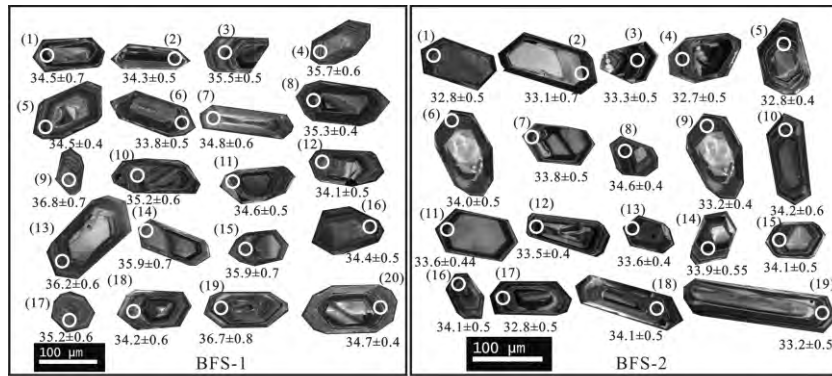


图 3 锆石阴极发光图像和测年点及年龄

Fig. 3. CL images and dating spots of zircons.

3 样品采集和分析方法

3.1 样品采集

BFS-1 样品采自宝丰寺路边, 为细晶含黑云母花岗岩, 样品风化强烈, 风化后呈白色砂土状 (图 2a); BFS-2 样品采自宝丰寺矿区中部, 为粗晶花岗岩, 岩石风化后呈灰白色, 砂粒状 (图 2b), 具体采样位置见图 1b。

3.2 分析方法

样品经破碎后, 按重力和磁选方法分选出锆石, 并在双目镜下选纯, 将锆石置于环氧树脂上, 对其进行抛光, 直至样品露出光洁的平面, 进行透一反射光、阴极发光和 LA-ICP-MS 分析。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年在在中国地质大学(武汉)完成, 所用仪器为安捷伦公司制造, 型号为 Agilent 7700x, 激光剥蚀系统为 Lamda Physik 公司制造, 型号为

GeoLasPro。数据校正采用锆石 91500 参数^[7], 年龄计算采用 ICP-MS DataCal^[8-9]完成, 谐和图绘制和加权平均年龄计算均采用 Isoplot/Ex_ver3^[10]完成。

4 分析结果

4.1 锆石 CL 图像特征

阴极发光图像上显示锆石粒径为 80~200 μm, 多为长柱状少量短柱状, 裂隙不发育, 晶型比较完整, 具有清楚的振荡环带, 显示典型的岩浆成因锆石特征 (图 3)。

4.2 锆石 U-Pb 年龄

锆石 U-Pb 同位素测试结果见表 1。BFS-1 表面年龄介于 33.80±0.5~36.80±0.7 Ma, 谐和年龄为 34.99±0.12 Ma (MSWD=3.3), ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄 34.99±0.37 Ma (MSWD=2.1, n=20); BFS-G2

表 1 样品的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析结果
Table 1. LA-ICP-MS U-Pb dating results for zircons from samples

测点号	$w_B/10^{-6}$		$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	同位素比值						同位素年龄/Ma			
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
				比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄	1σ	年龄	1σ
BFS-1-1	613	764	0.80	0.0501	0.0051	0.0376	0.0038	0.0055	0.0001	37.5	3.7	35.4	0.7
BFS-1-2	647	1036	0.62	0.0481	0.0039	0.0354	0.0028	0.0053	0.0001	35.3	2.8	34.3	0.5
BFS-1-3	527	873	0.60	0.0511	0.0042	0.0382	0.0031	0.0055	0.0001	38.1	3.0	35.5	0.5
BFS-1-4	327	744	0.44	0.0536	0.0062	0.0395	0.0044	0.0055	0.0001	39.4	4.3	35.7	0.6
BFS-1-5	890	1407	0.63	0.0468	0.0027	0.0346	0.0020	0.0054	0.0001	34.6	2.0	34.5	0.4
BFS-1-6	678	1183	0.57	0.0494	0.0033	0.0356	0.0023	0.0053	0.0001	35.5	2.3	33.8	0.5
BFS-1-7	405	737	0.55	0.0511	0.0053	0.0380	0.0037	0.0054	0.0001	37.8	3.7	34.8	0.6
BFS-1-8	922	1326	0.70	0.0470	0.0026	0.0353	0.0018	0.0055	0.0001	35.2	1.8	35.3	0.4
BFS-1-9	362	727	0.50	0.0524	0.0053	0.0403	0.0039	0.0057	0.0001	40.1	3.8	36.8	0.7
BFS-1-10	420	877	0.48	0.0492	0.0042	0.0368	0.0032	0.0055	0.0001	36.7	3.1	35.2	0.6
BFS-1-11	660	933	0.71	0.0433	0.0037	0.0313	0.0026	0.0054	0.0001	31.3	2.5	34.6	0.5
BFS-1-12	587	940	0.62	0.0526	0.0040	0.0370	0.0027	0.0053	0.0001	36.9	2.6	34.1	0.5
BFS-1-13	627	1084	0.58	0.0520	0.0042	0.0396	0.0031	0.0056	0.0001	39.4	3.0	36.2	0.6
BFS-1-14	510	897	0.57	0.0518	0.0047	0.0394	0.0035	0.0056	0.0001	39.2	3.4	35.9	0.7
BFS-1-15	450	924	0.49	0.0493	0.0050	0.0372	0.0037	0.0056	0.0001	37.1	3.6	35.9	0.7
BFS-1-16	512	1008	0.51	0.0477	0.0034	0.0347	0.0024	0.0053	0.0001	34.6	2.4	34.4	0.5
BFS-1-17	481	820	0.59	0.0498	0.0048	0.0370	0.0034	0.0055	0.0001	36.9	3.3	35.2	0.6
BFS-1-18	805	980	0.82	0.0497	0.0034	0.0360	0.0024	0.0053	0.0001	35.9	2.3	34.2	0.6
BFS-1-19	394	899	0.44	0.0499	0.0050	0.0389	0.0039	0.0057	0.0001	38.7	3.8	36.7	0.8
BFS-1-20	647	1146	0.56	0.0463	0.0035	0.0344	0.0025	0.0054	0.0001	34.4	2.5	34.7	0.4
BFS-2-1	1379	1374	1.00	0.0431	0.0032	0.0300	0.0022	0.0051	0.0001	30.0	2.1	32.8	0.5
BFS-2-2	494	346	1.43	0.0498	0.0091	0.0335	0.0060	0.0051	0.0001	33.4	5.9	33.1	0.7
BFS-2-3	1561	857	1.82	0.0463	0.0040	0.0330	0.0027	0.0052	0.0001	33.0	2.7	33.3	0.5
BFS-2-4	637	1269	0.50	0.0485	0.0037	0.0335	0.0025	0.0051	0.0001	33.4	2.5	32.7	0.5
BFS-2-5	1270	1788	0.71	0.0469	0.0026	0.0330	0.0018	0.0051	0.0001	32.9	1.7	32.8	0.4
BFS-2-6	2746	1791	1.53	0.0506	0.0028	0.0369	0.0020	0.0053	0.0001	36.8	2.0	34.0	0.5
BFS-2-7	677	1111	0.61	0.0469	0.0037	0.0336	0.0026	0.0052	0.0001	33.5	2.5	33.8	0.5
BFS-2-8	2416	1433	1.69	0.0489	0.0032	0.0361	0.0023	0.0054	0.0001	36.0	2.3	34.6	0.4
BFS-2-9	1496	1674	0.89	0.0465	0.0031	0.0328	0.0021	0.0052	0.0001	32.7	2.0	33.2	0.4
BFS-2-10	443	1075	0.41	0.0480	0.0032	0.0358	0.0024	0.0053	0.0001	35.7	2.4	34.2	0.6
BFS-2-11	2468	1842	1.34	0.0457	0.0026	0.0330	0.0019	0.0052	0.0001	33.0	1.8	33.6	0.4
BFS-2-12	1671	1885	0.89	0.0449	0.0024	0.0324	0.0017	0.0052	0.0001	32.4	1.7	33.5	0.4
BFS-2-13	2285	1839	1.24	0.0461	0.0024	0.0336	0.0018	0.0052	0.0001	33.5	1.8	33.6	0.4
BFS-2-14	429	1030	0.42	0.0455	0.0038	0.0332	0.0028	0.0053	0.0001	33.1	2.8	33.9	0.5
BFS-2-15	438	1000	0.44	0.0495	0.0033	0.0359	0.0024	0.0053	0.0001	35.8	2.4	34.1	0.5
BFS-2-16	1090	1051	1.04	0.0478	0.0041	0.0348	0.0029	0.0053	0.0001	34.7	2.9	34.1	0.5
BFS-2-17	450	1043	0.43	0.0474	0.0037	0.0326	0.0025	0.0051	0.0001	32.6	2.5	32.8	0.5
BFS-2-18	1141	753	1.52	0.0501	0.0043	0.0363	0.0030	0.0053	0.0001	36.2	3.0	34.1	0.5
BFS-2-19	562	1142	0.49	0.0476	0.0033	0.0335	0.0023	0.0052	0.0001	33.5	2.2	33.2	0.5

表面年龄介于 $32.70\pm 0.5\sim 34.60\pm 0.6$ Ma 间, 谐和年龄为 33.52 ± 0.11 Ma (MSWD=0.073), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄 33.53 ± 0.27 Ma (MSWD=1.4, $n=19$)。可见, 样品 BFS-1 和 BFS-3 年龄一致, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄 $33.5\sim 35.0$ Ma, 可以代表宝丰寺斑岩体的成岩年龄 (图 4)。

5 讨论

宝丰寺斑岩成岩年龄为 $33.5\sim 35.0$ Ma, 形成于古近纪始新世, 与滇西新生代富碱斑岩岩浆活动高峰期 ($30\sim 45$ Ma) [11] 和青藏高原晚碰撞转换阶段岩浆活动的时限 ($26\sim 40$ Ma) [12-13] 相近, 表明宝

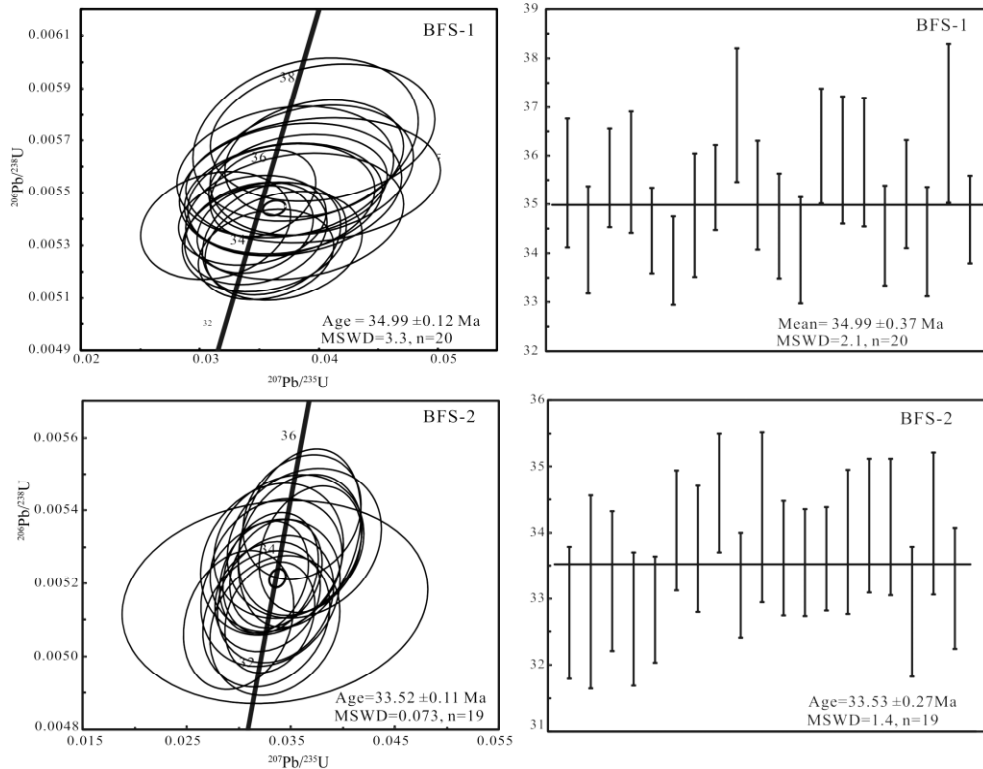


图4 锆石 U-Pb 年龄谱和图 and 加权平均统计图

Fig. 4. U-Pb concordia and weighted average age diagrams for zircon.

丰寺碱性斑岩的成岩作用也是对印—亚大陆碰撞作用的响应^[14], 其形成于陆陆晚碰撞期构造应力转换阶段, 与大规模的走滑系统有关, 由加厚下地壳和上地幔的部分熔融岩浆沿次级断裂上升侵位形成。

根据岩相特征, 宝丰寺斑岩体由早阶段细晶含黑云花岗斑岩和晚阶段粗晶花岗斑岩组成。本次所测定的细晶含黑云花岗斑岩 (BFS-1) 年龄为 35.0 Ma, 略大于粗晶花岗斑岩 (BFS-2) 33.5 Ma, 与实际吻合。大量与富碱斑岩有关的辉钼矿 Re-Os 年龄资料显示, 滇西三江地区富碱斑岩型矿床的成矿高峰期年龄为 34 ± 2 Ma^[17-18], 与宝丰寺紧邻的马厂箐斑岩型矿床的成矿斑岩和辉钼矿年龄均约为 35.0 Ma^[13,15-16], 与本次获得的细晶含黑云母花岗斑岩年龄 (BFS-1 35.0 Ma) 一致。此外, 宝丰寺矿区发现的铜、金、铅锌矿化体产出的位置与马厂箐矿床高度相似。这些都暗示宝丰寺斑岩与马厂箐斑岩可能属同源岩浆同期活动的产物, 具备斑岩型矿床的成矿潜力, 应加强找矿勘查工作^[19-21]。宝丰寺矿区已发现的铜、金、铅锌矿化体与斑岩, 特别是细晶含黑云花岗, 具有密切的内在成因联系, 是重要的斑

岩—热液成矿系统找矿线索。

6 结论

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示, 宝丰寺两件碱性斑岩的形成年龄为 33.5~35.0 Ma, 属古近纪始新世富碱斑岩岩浆活动的产物, 岩体形成于印—亚晚碰撞期构造构造应力由挤压向伸展转换的构造背景下, 其岩石成因和动力学背景与金沙江-红河富碱斑岩带一致。宝丰寺斑岩在岩相学和成岩年代学上, 与马厂箐等典型富碱成矿斑岩相似, 且与滇西富碱斑岩型成矿高峰期年龄吻合, 表明宝丰寺斑岩具有形成斑岩型矿床的潜力, 应加强地质找矿工作。已发现的铜、金和铅锌矿化与碱性斑岩具有内在的成因联系。

致谢: 野外工作得到了中国科学院地球化学研究所严再飞副研究员、云南省有色地质局 310 队陈梁总工、郭桂林工程师和中国地质大学(北京)王根厚教授的帮助; 岩矿鉴定方面得到云南省有色地质局地质勘查院高俊才高工的指导。在此, 向他们表示衷心的感谢!

参 考 文 献:

- [1] 胡祥昭, 黄震. 扬子地台西缘富碱花岗岩特征及成因探讨[J]. 大地构造与成矿学, 1997, 21(2): 173-74.
- [2] 葛良胜. 滇西北富碱岩浆活动与金多金属成矿系统[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007: 70-71.
- [3] 郭桂林, 吴道鹏, 唐忠. 云南宾川宝丰寺金铜多金属成矿条件及找矿远景浅析[J]. 云南地质, 2014, 33(1): 45-50.
- [4] 李建军, 杨飞, 何志芳, 等. 云南省永胜县分水岭铜矿找矿模型初探[J]. 矿物学报, 2013, 33(4): 606-612.
- [5] 云南省地质局. 云南省 1:5 万大营街幅区域地质报告[R]. 1993: 50-56.
- [6] 云南省有色地质勘察院. 云南省宁蒗—祥云斑岩铜矿评价报告[R]. 2006: 94-97.
- [7] Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, et al. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf trace element and REE analyses [J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 1995, 19(1): 1-23.
- [8] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard [J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1/2): 34-43.
- [9] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(15): 1535-1545.
- [10] Ludwig K R. ISOPLLOT 3.00: A Geochronological toolkit for Microsoft excel [M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003.
- [11] 莫宣学, 赵志丹, 喻学惠. 青藏高原新生代碰撞—后碰撞火成岩[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 1-396.
- [12] 张连生, 钟大赉. 从红河剪切带走滑运动看东亚大陆新生代构造[J]. 地质科学, 1996, 31(4): 327-340.
- [13] 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 等. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用[J]. 矿床地质, 2006a, 25(5): 521-543.
- [14] 李勇, 莫宣学, 喻学惠, 等. 金沙江—哀牢山断裂带几个富碱斑岩体的锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 现代地质, 2011, 25(2): 189-200.
- [15] 郭晓东, 葛良胜, 王梁, 等. 云南马厂箐岩体中深源包体特征及其锆石 LA-ICP-MSU-Pb 年龄[J]. 岩石学报, 2012, 28(5): 1413-1424.
- [16] 郭晓东, 王治华, 王梁, 等. 云南马厂箐岩体(似)斑状花岗岩锆石 LA-ICP-MSU-Pb 年龄及地质意义[J]. 中国地质, 2010, 38(3): 610-622.
- [17] 莫宣学, 赵志丹, 喻学惠. 青藏高原新生代碰撞-后碰撞火成岩[M]. 北京: 地质出版社, 2009: 1-396.
- [18] 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 等. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用[J]. 矿床地质, 2006, 25(5): 521-543.
- [19] 周家喜, 黄智龙, 周国富, 等. 黔西北天桥铅锌矿床热液方解石 C-O 同位素和 REE 地球化学[J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36(1): 93-101.
- [20] 周家喜, 黄智龙, 周国富, 等. 黔西北赫章天桥铅锌矿床成矿物质来源: S-Pb 同位素和 REE 制约[J]. 地质论评, 2010, 56(4): 513-524.
- [21] 周家喜, 黄智龙, 周国富, 等. 贵州天桥铅锌矿床分散元素赋存状态及规律[J]. 矿物学报, 2009, 29(4): 471-480.