文章编号：1004-0609(2012)03-0611-11

宝山花岗闪长斑岩的岩石成因：地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素制约

全铁军[1,2]，孔　华[1,2]，费利东[1,2]，王　高[1,2]，李　欢[1,2]，吴城明[1,2]

(1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室，长沙 410083；
2. 中南大学 地球科学与信息物理学院，长沙 410083)

摘　要：宝山矿床位于坪宝矿带的北端，产出与花岗闪长斑岩有关的铜钼铅锌银多金属矿床。对采自坑道内的新鲜岩脉进行岩石成分分析及锆石 U-Pb 和 Hf 同位素测试。锆石 U-Pb 定年结果显示：基质为细粒结构的斑岩成岩年龄为(180.5±2.0) Ma，基质为隐晶质的斑岩成岩年龄为(165.3±3.3) Ma，表明该区在燕山早期有多次(阶段)岩浆侵入活动，依据锆石 Hf 同位素组成计算的平均地壳模式年龄为 1 709~1 951 Ma，在 $\varepsilon_{Hf}(t)$—t 图解中，锆石点投在 2.5 Ga 平均地壳演化线附近，表明岩石源区为古老地壳。结合岩石地球化学特征，认为该区的花岗闪长岩是在燕山早期挤压背景下由中下元古界基底地层发生增厚熔融形成的。本区成矿时代对应于成岩时代，时限为 160~180 Ma，其间岩浆的多阶段侵入带来充足的成矿物质，最终在地壳浅部层次形成多金属矿床。

关键词：花岗闪长斑岩；铜铅锌多金属矿床；地球化学；锆石 U-Pb 定年；Hf 同位素示踪；宝山
中图分类号：P597　　**文献标志码**：A

Petrogenesis of granodiorite porphyry in Baoshan deposit: Constraints from geochemistry, zircon U-Pb chronology and Hf isotopes

QUAN Tie-jun[1,2], KONG Hua[1,2], FEI Li-dong[1,2], WANG Gao[1,2], LI Huan[1,2], WU Cheng-ming[1,2]

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education,
Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Baoshan Cu-Mo-Pb-Zn-Ag deposit is located in the north of famous Huangshaping—Baoshan metallogenetic belt, whose formation is related closely with shallow-seated granodiorite-porphyry. Fresh samples were collected from mining tunnel, the whole rock chemical composition tests were carried out, meanwhile zircon grains were collected from granodiorite samples, and their U-Pb and Hf isotope composites were analyzed by La-ICPMS. The results of U-Pb dating display that one sample with fine-grain texture in the matrix has an age of (180.5±2.0) Ma, the other sample with cryptocrystalline texture in matrix has an age of (165.3±3.3) Ma, which implies that there is multi-stage magmatic intrusive activity in this area. According to Hf isotope compositions, the average crust model age is calculated to be 1 709−1 951 Ma, in the figure of $\varepsilon_{Hf}(t)$—t, the points of zircon grains lie in the area neighbored to the evolution curve of 2.5 Ga average crust, suggesting that the origin of zircons comes from ancient crust. Combined with characteristics of petrogeochemistry, the granodiorites are interpreted to form in the background of crustal thickness increasing due to the regional tectonic compression. Many former studies show that the regional basement of this area is middle-lower proterozoic group, they melted to form magma which intruded to shallow position of crust to be granodiorite-porphyry along available fractures. According to former studies, the metallogenic time corresponds to the ages of two-stage magmatic rocks, the metallogenic time extends from 180 to 160 Ma, multi-stage magma activity provides abundant ore-forming material to form Baoshan multimetal ore deposit.

Key words: granodiorite-porphyry; Cu-Pb-Zn multi-metal deposit; geochemistry; zircon U-Pb dating; Hf isotope tracing; Baoshan

基金项目：中国地质调查局地质矿产调查评价专项资助项目(1212011121116；1212011085372)
收稿日期：2011-12-01；**修订日期**：2012-01-04
通信作者：孔　华，教授；电话：0731-88830616；E-mail: konghua2006@126.com

宝山铜铅锌矿床是湘南坪宝矿带北段重要的矿床之一，其大地构造位置处于湘南地洼区赣桂地洼系湘东地洼列[1]。长期以来，许多研究者从不同角度进行矿床的成因、控矿构造、岩石地球化学特征、成岩成矿时代及找矿预测研究[2−9]。宝山花岗闪长岩体的年代学资料丰富，据统计，对于花岗闪长斑岩获得的年龄有：全岩铷锶等时线年龄 182.5 Ma 和黑云母钾氩法年龄 165 Ma[9]，认为花岗闪长斑岩形成于中侏罗世燕山中期第二阶段；单颗粒锆石溶蚀法(173.3±0.9) Ma[5−6]；金属矿物黄铁矿的 Rb-Sr 等时线年龄为(174±7) Ma[6]；锆石 SHRIMPU-Pb 法(158±2) Ma，辉钼矿 Re-Os 等时线年龄为(160±2) Ma[8]。但是，宝山花岗岩脉十分发育，可能存在多期岩浆侵入事件，而且关于宝山矿床的 Hf 同位素，至今尚无文献报道。为此，本文作者基于井下岩脉的观察取样，对不同类型的岩脉进行了分析。

1 矿区地质概述

宝山矿区位于坪宝复式向斜的北端，耒阳—临武南北向构造带的中段，南岭东西向复杂构造带中段北缘，是坪宝矿带中重要的矿床，宝山矿区出露地层有泥盆系上统佘田桥组和锡矿山组，石炭系下统孟公坳组、石磴子组、测水组、梓门桥组和中上统壶天群。其中，石磴子组灰岩、测水组砂页岩为本区主要的赋矿层位和岩性。矿区构造主要由一系列的倒转背、向斜及背斜和向斜之间的压扭性逆冲走向断层组成。矿区主构造线方向为北东—南西。后期横断层 F_3 将矿区划分为南北两区。矿区与矿床有关的褶皱主要有宝岭倒转倾伏背斜、宝岭北倒转向斜、牛心倒转复式背斜、财神庙倒转背斜、杉木岭—桂阳—中倒转向斜(见图 1)。

宝山矿区的岩浆岩均为燕山早期超浅成中酸性小岩体，岩石类型主要有：花岗闪长斑岩、微晶花岗闪长斑岩、石英斑岩、英安质凝灰角砾岩和辉绿玢岩。矿区地表出露岩体 26 个，其中以微粒花岗闪长斑岩为主，地表岩体均强烈风化，岩体侵入最新地层属石炭系。在中部铜矿露采坑可见花岗闪长斑岩体的围岩矽卡岩化、大理岩化较强，出露地表的岩体规模一般较小，呈岩脉产出，伴有强烈的 W、Mo、Cu、Pb 和 Zn 等多金属矿化。

2 岩体地质特征及样品采集

宝山矿区代表性岩体为隐伏于宝岭倒转背斜中的 306 号花岗闪长斑岩，在 193 线和 165 线之间产生。岩体上盘接触带具矽卡岩化，岩体中 Cu、Mo、W、

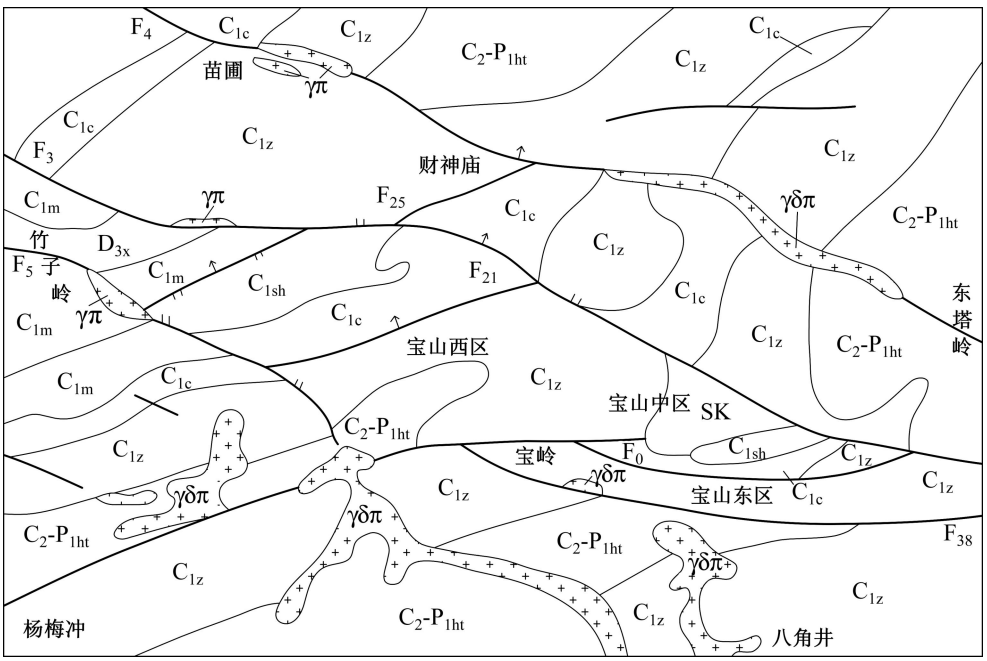

图 1 宝山矿区地质图[3]：C_2-P_{1ht}—壶天群；C_{1z}—梓门桥组；C_{1c}—测水组；C_{1sh}—石磴子组；C_{1m}—孟公坳组；D_{3x}—锡矿山组；SK—夕卡岩；γδπ—花岗闪长斑岩；γπ—花岗斑岩

Fig. 1 Geological map of Baoshan deposit[3]: C_2-P_{1ht}—Hutian Gr; C_{1z}—Zimenqiao Fm; C_{1c}—Ceshui Fm; C_{1sh}—Shidengzi Fm; C_{1m}—Menggong'ao Fm; D_{3x}—Xikuangshan Fm; SK—Skarn; γδπ—Granodiorite porphyry; γπ—Granite porphyry

Bi、Pb、Zn、Ti、Cr 和 Ni 等元素含量较高。该岩体与成矿关系极为密切。

样品均为采自坑道内的新鲜样品，花岗斑岩(917-3、4、5)：采自北部−70 m 中段，193 线南穿和 165 线西沿脉，斑状结构，斑晶为石英、钾长石和黑云母，石英斑晶晶形好，2 mm，10%，钾长石 2 mm，3%；基质隐晶质结构，占 80%，有重结晶现象。

花岗闪长斑岩(919-8)，采自西部−70 m 中段，158 线南穿脉，岩石灰白色，斑状结构，斑晶为石英、斜长石、角闪石、黑云母，石英斑晶见溶蚀边，1.2 mm，20%，斜长石斑晶 1.5 mm，5%~8%，角闪石 1.5 mm，3%~5%，黑云母：0.9 mm，3%；基质：显微细粒结构，0.02 mm，占视域 85%。

3　样品制备与测试分析

对宝山岩体的 7 件样品进行主量(见表 1)、微量(见表 2)和稀土元素(见表 3)的分析测试。主量、微量和稀土元素分析样品在武汉地质实验研究所完成。主量元素使用 X 荧光光谱仪(1800)加湿法分析，稀土元素分析采用质谱仪(ThermoelementalX7)，微量元素采用等离子发射光谱仪(ICAP6300)和示波极谱仪(JP−2)。

选择新鲜岩石样品，通过人工重砂法从样品中分选出锆石，样品靶的制备参考 SHRIMP 定年锆石样品的制备方法[10]，锆石 CL 图像在西北大学扫描电镜室完成。

锆石 U-Pb 年龄分析采用西北大学地质学系大陆动力学国家重点实验室 Agilent 7500a 型 ICP-MS 仪器与 193nm 的 ArF 准分子激光器。分析时，采用 He 作为剥蚀物质的载气，用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行仪器最佳化，锆石年龄测定采用国际标准锆石 91500，GJ-1 作为外标标准物质，外标校正方法为每隔 5 个样品分析点测一次标准，保证标准和样品的仪器条件完全一致。年龄测定时的激光束斑直径控制在 30 μm，激光剥蚀深度控制在 20~40 μm，普通铅校正采用 ANDERSON[11] 的方法，在已确定年龄的锆石颗粒上进行 Hf 同位素测试，分析时激光束斑直径控制在 44 μm，激光剥蚀时间为 120 s。采用标准锆石 91500，MON-1 和 GJ-1 作外部标样，具体分析步骤见文献

表 1　宝山岩体的主量元素含量

Table 1　Major element contents of Baoshan pluton

岩性	花岗斑岩	花岗斑岩	花岗闪长斑岩	花岗闪长斑岩	花岗闪长斑岩	花岗闪长斑岩	花岗闪长斑岩
样品编号	914-7	917-3	917-6	917-9	918-10	919-7	919-9
$w(SiO_2)$/%	68.68	66.30	65.98	67.42	65.54	70.25	70.99
$w(TiO_2)$/%	0.37	0.51	0.46	0.47	0.46	0.29	0.28
$w(Al_2O_3)$/%	14.12	14.81	14.74	14.75	15.44	13.73	13.83
$w(Fe_2O_3)$/%	1.15	1.10	0.88	1.02	1.25	0.98	0.81
w(FeO)/%	1.85	2.60	1.80	2.10	1.82	1.43	1.53
w(MnO)/%	0.09	0.10	0.17	0.08	0.09	0.08	0.07
w(MgO)/%	1.87	1.97	1.24	1.67	1.99	1.23	1.39
w(CaO)/%	1.88	2.47	3.79	2.65	4.07	2.24	1.62
$w(Na_2O)$/%	0.60	0.72	0.51	0.54	0.20	1.62	1.46
$w(K_2O)$/%	5.20	4.41	3.32	3.67	0.80	4.90	5.05
$w(P_2O_5)$/%	0.16	0.19	0.17	0.19	0.19	0.10	0.09
$w(CO_2)$/%	1.15	1.37	2.84	1.58	2.62	1.09	0.71
$w(H_2O^+)$/%	2.69	3.23	3.94	3.68	5.35	1.89	2.01
Total	99.81	99.78	99.84	99.82	99.82	99.83	99.84
A/CNK	1.40	1.41	1.30	1.52	1.79	1.14	1.28
K_2O/Na_2O	8.67	6.13	6.51	6.80	4.00	3.02	3.46

表 2 宝山岩体的微量元素含量

Table 2 Trace element contents of Baoshan pluton

岩性	花岗斑岩	花岗斑岩	花岗闪长斑岩	花岗闪长斑岩	花岗闪长斑岩	花岗闪长斑岩	花岗闪长斑岩
样品编号	914-7	917-3	917-6	917-9	918-10	919-7	919-9
w(Rb)/10^{-6}	389.00	186.00	131.00	149.00	17.70	213.00	215.00
w(Ba)/10^{-6}	930.00	713.00	571.00	615.00	389.00	515.00	496.00
w(Th)/10^{-6}	27.50	15.40	16.00	16.90	15.80	15.60	15.10
w(U)/10^{-6}	9.28	3.26	4.95	3.00	3.89	4.92	5.04
w(K)/10^{-6}	43 149.00	36 594.00	27 549.00	30 453.00	6 638.00	4 0660.00	41 904.00
w(Nb)/10^{-6}	39.50	18.50	20.40	18.10	19.90	17.30	18.30
w(Sr)/10^{-6}	139.00	91.00	113.00	96.00	155.00	157.00	140.00
w(P)/10^{-6}	699.00	830.00	742.00	830.00	830.00	437.00	393.00
w(Zr)/10^{-6}	193.00	142.00	127.00	139.00	171.00	103.00	107.00
w(Hf)/10^{-6}	6.10	4.80	4.20	4.70	5.90	4.00	4.20
w(Ti)/10^{-6}	3 171.00	4 371.00	3 943.00	4 029.00	3 943.00	2 486.00	2 400.00
w(Sr)/w(Y)	8.42	4.77	4.57	4.91	7.08	9.18	9.59
w(Rb)/w(Sr)	2.79	2.04	1.16	1.56	0.11	1.36	1.53

表 3 宝山岩体的稀土元素含量

Table 3 Rare earth element contents of Baoshan pluton

岩性	花岗斑岩	花岗斑岩	花岗闪长斑岩	花岗闪长斑岩	花岗闪长斑岩	花岗闪长斑岩	花岗闪长斑岩
样品编号	914-7	917-3	917-6	917-9	918-10	919-7	919-9
w(La)/10^{-6}	61.90	28.00	28.00	30.00	21.90	19.30	21.60
w(Ce)/10^{-6}	115.00	55.30	55.90	58.70	44.70	38.30	42.10
w(Pr)/10^{-6}	12.70	6.87	6.85	7.41	5.75	4.80	5.05
w(Nd)/10^{-6}	44.60	26.50	26.00	27.90	22.70	18.40	19.10
w(Sm)/10^{-6}	7.13	5.20	5.62	5.41	5.06	3.93	3.71
w(Eu)/10^{-6}	1.22	1.17	1.30	1.19	1.23	1.04	0.91
w(Gd)/10^{-6}	5.99	4.32	4.92	4.57	4.05	3.18	2.92
w(Tb)/10^{-6}	0.81	0.72	0.83	0.74	0.75	0.56	0.51
w(Dy)/10^{-6}	3.34	3.64	4.47	3.78	4.16	3.09	2.69
w(Ho)/10^{-6}	0.59	0.70	0.86	0.75	0.82	0.62	0.53
w(Er)/10^{-6}	1.87	2.05	2.64	2.29	2.44	1.92	1.78
w(Tm)/10^{-6}	0.25	0.35	0.40	0.36	0.48	0.27	0.39
w(Yb)/10^{-6}	1.81	2.35	2.86	2.77	3.18	1.83	2.86
w(Lu)/10^{-6}	0.26	0.34	0.40	0.39	0.45	0.25	0.41
w(Y)/10^{-6}	16.50	19.10	24.70	19.50	27.80	16.20	21.90
∑REE/10^{-6}	257.02	137.40	141.04	146.16	222.01	181.64	117.19
LREE/10^{-6}	242.11	122.93	123.67	130.52	200.42	167.26	101.32
HREE/10^{-6}	14.91	14.48	17.37	15.64	21.59	14.38	15.87
LREE/HREE	16.23	8.49	7.12	8.35	9.28	11.63	6.38
La_N/Yb_N	22.10	7.69	6.34	7.01	9.90	14.39	4.97
δ(Eu)	0.58	0.76	0.76	0.74	0.76	0.77	0.84
δ(Ce)	0.91	0.89	0.90	0.88	0.88	0.88	0.89

[12−13]。样品的同位素比值采用 ICPDATACAL[14]程序计算，年龄数据处理采用 Isoplot3.0[15]。分析数据列于表 4~5 中，分析及计算误差均为 1σ。

4　测试结果

4.1　岩石地球化学特征

分析结果见表 1~3。在 TAS 图解中(见图 2(a))，岩石均投入花岗闪长岩区域，从 $w(K_2O)$—$w(SiO_2)$图解(见图 2(b))看出，岩石属于高钾钙碱性到钾玄岩系列，K_2O/Na_2O=3.02~8.67，SiO_2 含量为 65.98%~70.99%，A/CNK 值为 1.14~1.79，均大于 1，表现出过铝钙碱性岩石系列特征。花岗闪长岩表现为 Al_2O_3、MgO、CaO、Fe_2O_3、TiO_2、P_2O_5 与 SiO_2 明显的负相关。

由表 3 和图 3(a)可知，稀土元素总量在 117×10^{-6}~257×10^{-6}，LREE/HREE=7.12~16.23，La_N/Yb_N=7.01~22.10，δ(Eu)=0.58~0.84，δ(Ce)=0.88~0.91，稀土元素配分曲线右倾，轻稀土富集，轻重稀土分异多数不强烈，铕弱负异常。

由表 1~2 和图 3(b)可知，微量元素显示总体上大离子亲石元素 Rb、Th、U、K 和 La 富集(918-10 例外)，贫 Ba、Nb、Sr、P 和 Ti，w(Sr)/w(Y)=4.57~9.59。Nb 和 Ta 亏损，与具岛弧特征的钾质岩石相似，P 和 Ti 亏损，可能受到磷灰石和钛铁矿的分离结晶作用影响。Nb、Ta 和 Ti 负异常表明其源区或受到了俯冲组分的影响[4]。

4.2　锆石 U-Pb 同位素特征

表 4 所列为宝山岩体锆石 U-Pb 同位素组成及年龄。本次研究用于 U-Pb 测年锆石均为具有韵律环带

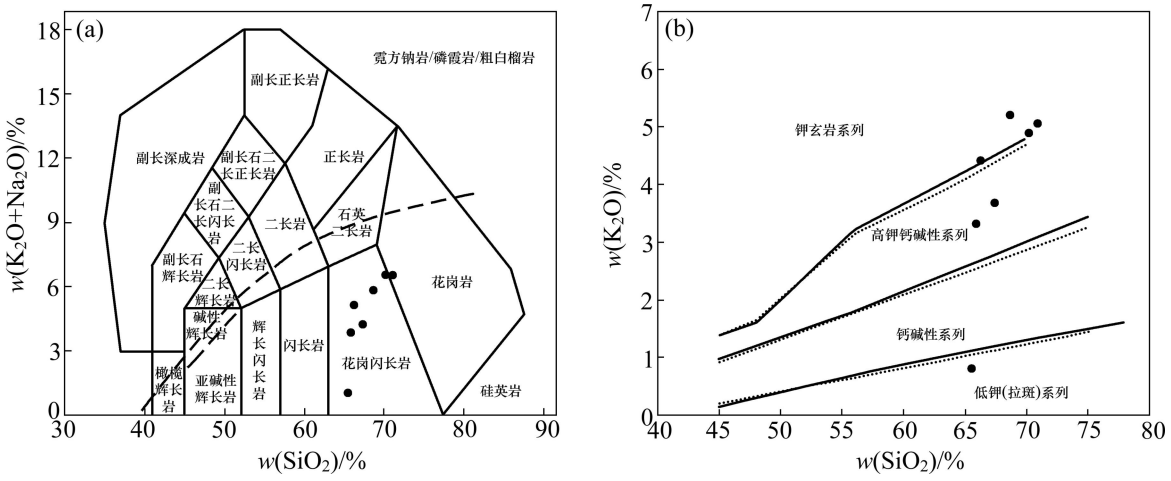

图 2　岩石分类的 TAS 图(a)和 $w(K_2O)$—$w(SiO_2)$图(b)[16−18]

Fig. 2　TAS diagram (a) and $w(K_2O)$—$w(SiO_2)$ diagram (b) about classification of Baoshan pluton[16−18]

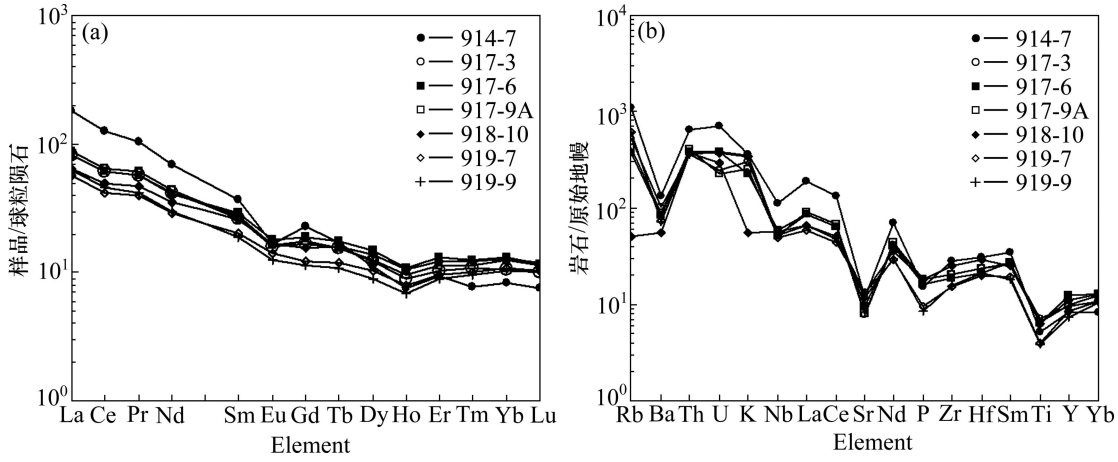

图 3　宝山岩体的稀土元素配分图解(a)和微量元素蛛网图(b)[19−20]

Fig. 3　Chondrite-normalized REE distribution pattern (a) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b) of Baoshan pluton[19−20]

表 4 宝山岩体锆石 U-Pb 同位素组成及年龄

Table 4 Zircon La-ICPMS U-Pb isotopic data and ages of Baoshan pluton

样品编号	$w/10^{-6}$			Th/U	$^{207}Pb/^{206}Pb$			
	Pb	Th	U		比值	1σ	年龄/Ma	1σ
917-01	8.91	128	262	0.49	0.200 77	0.010 30	326	84
917-02	15.0	359	415	0.87	0.182 87	0.012 61	213	161
917-04	5.32	69	148	0.47	0.211 07	0.021 70	474	243
917-06	7.95	93	265	0.35	0.189 39	0.009 96	339	85
917-07	13.84	143	470	0.3	0.175 55	0.010 16	184	138
917-15	13.2	337	378	0.89	0.181 51	0.009 12	193	82
917-16	17.8	580	531	1.09	0.211 90	0.009 54	576	53
917-17	11.07	151	343	0.44	0.178 93	0.011 19	146	146
917-18	10.11	128	296	0.43	0.193 86	0.013 53	192	165
917-21	11.64	159	371	0.43	0.190 22	0.009 50	286	79
917-22	15.9	234	517	0.45	0.177 88	0.007 49	192	75
917-23	12.96	182	437	0.42	0.180 06	0.009 15	278	93
917-24	10.77	147	348	0.42	0.184 08	0.009 78	211	95
917-25	9.55	106	301	0.35	0.193 22	0.011 46	228	103
917-26	11.04	138	398	0.35	0.180 07	0.011 96	338	158
917-28	128	423	910	0.46	0.188 63	0.010 11	379	94
917-29	13.28	194	440	0.44	0.175 00	0.009 44	264	93

样品编号	$^{207}Pb/^{235}U$				$^{206}Pb/^{238}U$				$^{208}Pb/^{232}Th$			
	比值	1σ	年龄/Ma	1σ	比值	1σ	年龄/Ma	1σ	比值	1σ	年龄/Ma	1σ
917-01	0.027 63	0.000 50	186	9	0.200 77	0.010 30	176	3	0.027 63	0.000 50	193	6
917-02	0.026 32	0.000 39	171	11	0.182 87	0.012 61	167	2	0.026 32	0.000 39	167	2
917-04	0.027 07	0.000 78	194	18	0.211 07	0.021 70	172	5	0.027 07	0.000 78	169	4
917-06	0.025 81	0.000 48	176	9	0.189 39	0.009 96	164	3	0.025 81	0.000 48	168	7
917-07	0.025 58	0.000 44	164	9	0.175 55	0.010 16	163	3	0.025 58	0.000 44	163	2
917-15	0.026 45	0.000 49	169	8	0.181 51	0.009 12	168	3	0.026 45	0.000 49	172	5
917-16	0.026 24	0.000 71	195	8	0.211 90	0.009 54	167	4	0.026 24	0.000 71	144	8
917-17	0.026 50	0.000 41	167	10	0.178 93	0.011 19	169	3	0.026 50	0.000 41	169	2
917-18	0.028 16	0.000 52	180	12	0.193 86	0.013 53	179	3	0.028 16	0.000 52	179	3
917-21	0.026 46	0.000 50	177	8	0.190 22	0.009 50	168	3	0.026 46	0.000 50	175	8
917-22	0.025 82	0.000 32	166	6	0.177 88	0.007 49	164	2	0.025 82	0.000 32	167	4
917-23	0.025 22	0.000 32	168	8	0.180 06	0.009 15	161	2	0.025 22	0.000 32	161	5
917-24	0.026 60	0.000 40	172	8	0.184 08	0.009 78	169	3	0.026 60	0.000 40	163	5
917-25	0.027 78	0.000 51	179	10	0.193 22	0.011 46	177	3	0.027 78	0.000 51	177	6
917-26	0.024 55	0.000 38	168	10	0.180 07	0.011 96	156	2	0.024 55	0.000 38	155	2
917-28	0.025 22	0.000 38	175	9	0.188 63	0.010 11	161	2	0.025 22	0.000 38	165	5
917-29	0.024 69	0.000 42	164	8	0.175 00	0.009 44	157	3	0.024 69	0.000 42	148	6

σ 为均方差。

的锆石，显示为岩浆结晶形成。917 样品(由 917-3、4、5 合成)中锆石的 Th/U 值较高(0.30~1.09)，表明为典型的岩浆成因。少数具核幔结构。锆石外形有长柱状和短柱状(917-26，917-29)(见图 4)。多数测点选择在晶体两端，少部分测点在柱体中部(917-02、917-07)，所测 17 颗锆石的分析点均位于 U-Pb 谐和线上或其附近，$^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为(165.3±3.3) Ma (1σ，MSWD=6) (见图 5)，代表花岗斑岩的结晶年龄。

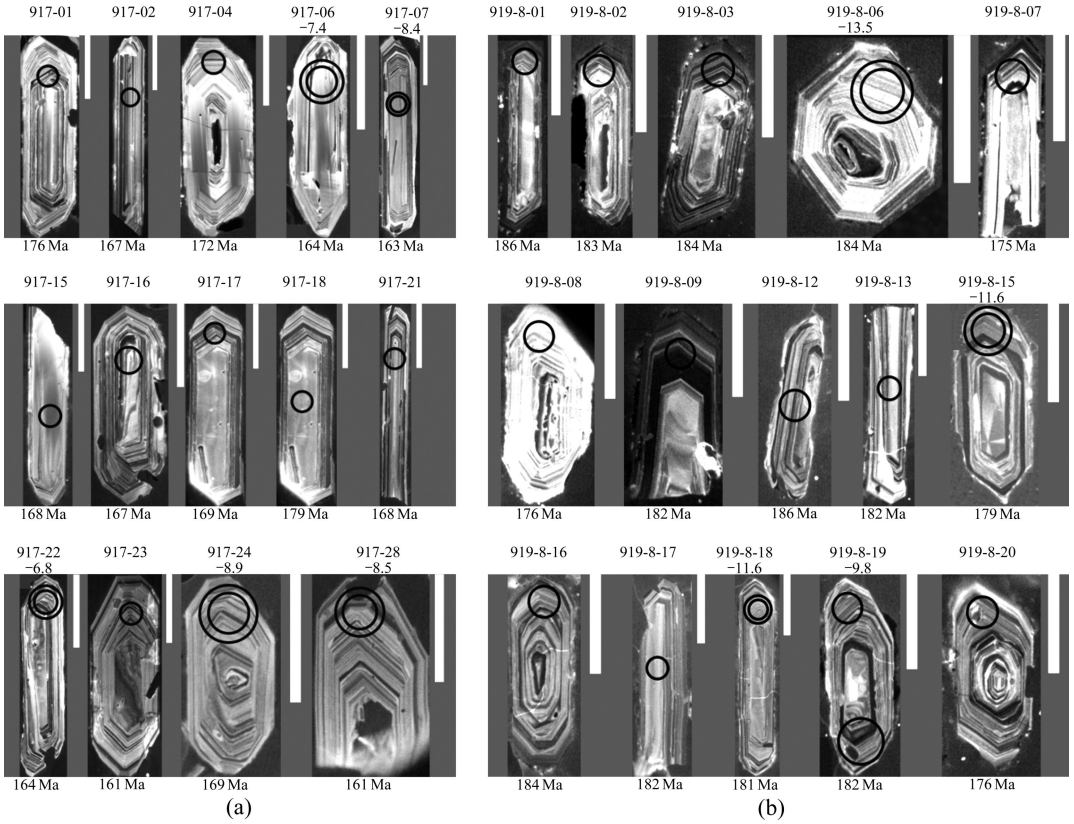

图 4　宝山岩体的锆石阴极发光(CL)图像(44 μm 圆表示铪同位素测试点，锆石上方数字代表 $\varepsilon_{Hf}(t)$值；30 μm 圆表示 U-Pb 年龄分析点，图像下面数字为 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄；分析点号位于锆石上方；线比例尺长度为 100 μm)：(a) 岩体样品 917 的 CL 图像；(b) 岩体样品 919-8 的 CL 图像

Fig. 4 CL images of zircons from Baoshan pluton (Rounded circles indicate locations of Hf and U-Pb analyses, with $\varepsilon_{Hf}(t)$ values and $^{206}Pb/^{238}U$ ages, spot numbers are labeled at top of zircons, line scales are 100 μm): (a) CL images of zircons from sample 917; (b) CL images of zircons from sample 919-8

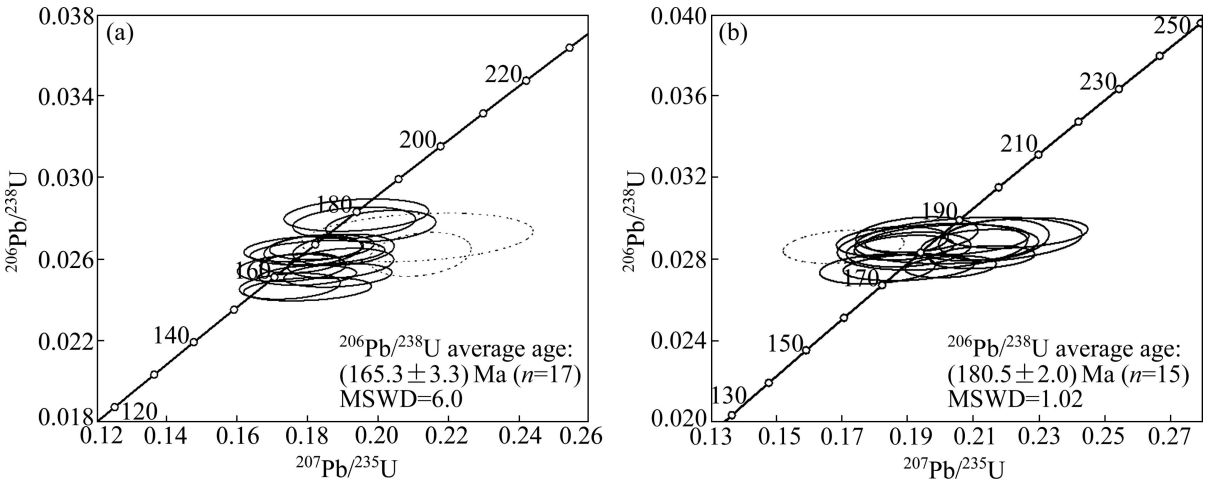

图 5　宝山岩体的锆石 U-Pb 年龄

Fig. 5　U-Pb ages of zircons from Baoshan pluton: (a) Sample 917; (b) Sample 919-8

919 样品锆石的 Th/U 值较高(0.30~0.67，详细数据略)，表明为典型的岩浆成因。锆石外形有长柱状和短柱状(919-8-06、919-8-20)，均具有明显的成分韵律环带。打点位置多数选择在柱状晶体的两端，少数在

中心部位(919-8-13、919-8-17)(见图 4)，在 CL 图像上为均匀灰白色，其 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄与柱体端部一致，显示为岩浆结晶锆石。所测 15 颗锆石的分析点均位于 U-Pb 谐和线上或其附近，$^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为(180.5± 2.0) Ma (1σ，MSWD=1.02)(见图 5)，代表花岗闪长斑岩的结晶年龄。

4.3 锆石 Hf 同位素

锆石 Hf 同位素测定点选在锆石 U-Pb 测试的同位点。选取年龄谐和性好的点。917 样品中锆石(8 个点)的 $^{176}Yb/^{177}Hf$ 和 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 值变化范围较大，分别为 0.013 774~0.033 307 和 0.000 624~0.001 402 (表 5)；初始 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值和 $\varepsilon_{Hf}(t)$值分别为 0.282 408~ 0.282 501 和−5.87~−9.42(见图 6)，模式年龄为 1 065~1 178 Ma，平均值为 1 136 Ma；平均地壳模式年龄为 1 709 Ma。

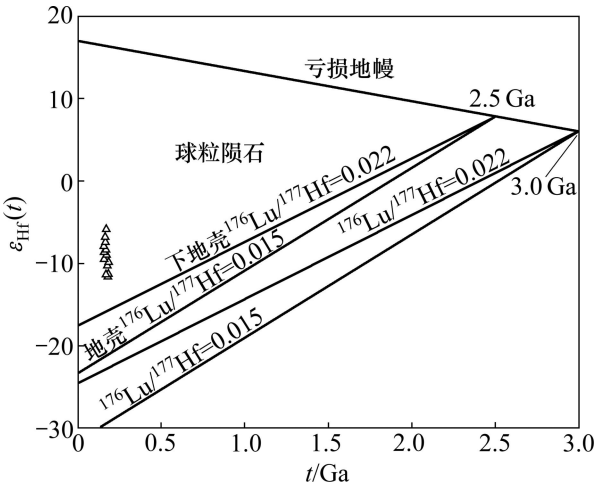

图 6 宝山岩体锆石铪同位素 $\varepsilon_{Hf}(t)$—t 图解

Fig. 6 $\varepsilon_{Hf}(t)$—t diagram of zircon of Baoshan pluton

919 样品中锆石(5 个点)的 $^{176}Yb/^{177}Hf$ 和 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 值变化范围较大，分别为 0.022 333~0.038 398 和 0.001 022~0.001 611(见表 5)；初始 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值和 $\varepsilon_{Hf}(t)$值分别为 0.282 336~0.282 379 和−9.86~−11.48(见图 6)，模式年龄为 1 229~1 302 Ma，平均为 1 270 Ma；平均地壳模式年龄为 1 951 Ma(见表 5)。

锆石极强的稳定性使其 Hf 同位素组成比较稳定，较少受到后期地质事件的影响，不像铅同位素易受到铅丢失的影响，而极低的 Lu 含量有利于获得锆石形成时的准确同位素组成，所以，目前锆石 Hf 同位素示踪成为探讨地壳演化和示踪岩石源区的有效手段。模式年龄显示源区地壳年龄为 1 065~1 178 Ma 和 1 229~1 302 Ma，而平均地壳模式年龄更老，表明有古老地壳物质的加入，主要是古元古界地壳物质。

在 $\varepsilon_{Hf}(t)$—t 图解中，锆石点投在 2.5 Ga 下地壳演化线附近($^{176}Lu/^{177}Hf$=0.022，$f_{Lu/Hf}$=−0.34)，表明岩石源区为古老下地壳[21−22]。

5 构造环境和岩石成因分析

在 w(Rb)—w(Y+Nb)和 w(Nb)—w(Y)构造环境判别图解[23](见图 7)中样品投点显示宝山岩体为碰撞环境下的产物；在花岗闪长岩的 Sr/Y—Y 和$(La/Yb)_N$—Yb_N 判别图解中岩石投入经典岛弧区域，反映了挤压环境。但是有研究认为扬子板块与华夏板块的全面焊接拼合则是在中三叠世，所以印支运动后，华南地区已经由海洋环境转变为大陆环境[24]。165~180 Ma 间，华夏板块与扬子板块已经完成拼贴，不具备岛弧形成

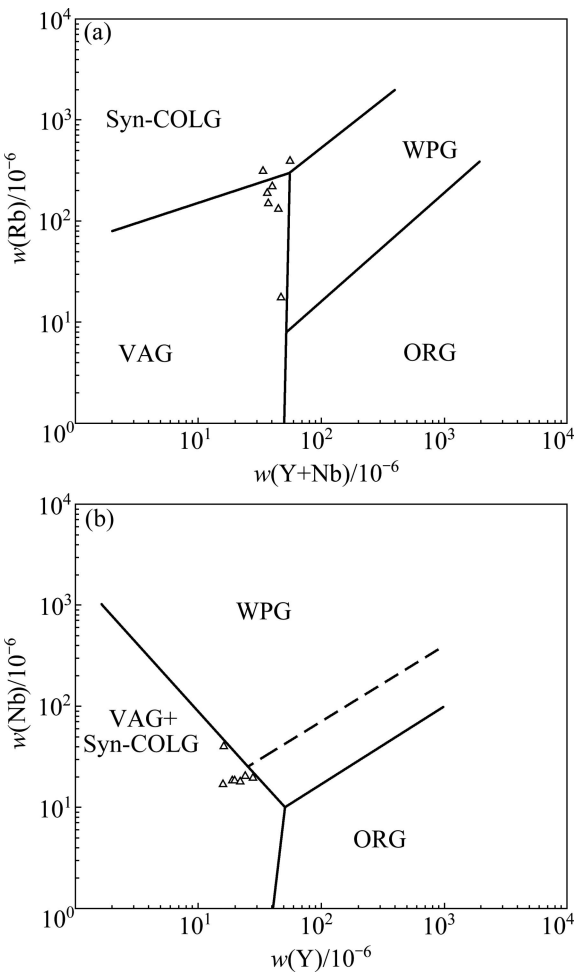

图 7 w(Rb)—w(Y+Nb)(a)和 w(Nb)—w(Y)(b)构造环境判别图[23]：VAG—火山弧花岗岩；Syn-COLG—同碰撞花岗岩；WPG—板内花岗岩；ORG—大洋脊花岗岩

Fig. 7 w(Rb) — w(Y+Nb) (a) and w(Nb) — w(Y) (b) discrimination diagrams for tectonic settings[23]

表 5 宝山岩体的铪同位素组成

Table 5 Zircon Hf isotope compositions of Baoshan pluton

样品编号	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2*s*	$^{176}Yb/^{177}Hf$	2*s*	$^{176}Lu/^{177}Hf$	2*s*
917-28	0.282 435	0.000 017	0.023 246	0.000 210	0.001 044	0.000 010
917-29	0.282 410	0.000 017	0.013 774	0.000 027	0.000 624	0.000 001
917-03	0.282 505	0.000 010	0.031 693	0.000 136	0.001 337	0.000 006
917-05	0.282 453	0.000 012	0.031 551	0.000 124	0.001 345	0.000 005
917-06	0.282 465	0.000 014	0.033 307	0.000 164	0.001 402	0.000 007
917-07	0.282 438	0.000 015	0.024 812	0.000 147	0.001 085	0.000 007
917-22	0.282 483	0.000 015	0.027 930	0.000 111	0.001 180	0.000 005
917-24	0.282 420	0.000 018	0.023 206	0.000 115	0.001 050	0.000 006
919-8-14	0.282 35	0.000 017	0.024 627	0.000 184	0.001 025	0.000 007
919-8-15	0.282 341	0.000 014	0.034 277	0.000 167	0.001 481	0.000 006
919-8-18	0.282 342	0.000 014	0.027 167	0.000 160	0.001 176	0.000 006
919-8-19	0.282 378	0.000 012	0.038 398	0.000 346	0.001 611	0.000 014
919-8-06	0.282 383	0.000 017	0.022 333	0.000 133	0.001 022	0.000 006

样品编号	*t*/Ma	$\varepsilon_{Hf}(0)$	$f_{Lu/Hf}$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	$\varepsilon_{Hf}(t)$	T_{DM1}/Ma	T_{DM}^{C}/Ma
917-28	161	−11.91	−0.97	0.282 432	−8.49	1 156	1 745
917-29	157	−12.80	−0.98	0.282 408	−9.42	1 178	1 800
917-03	169	−9.42	−0.96	0.282 501	−5.87	1 065	1 589
917-05	160	−11.30	−0.96	0.282 448	−7.93	1 141	1 709
917-06	164	−10.84	−0.96	0.282 461	−7.40	1 124	1 678
917-07	163	−11.81	−0.97	0.282 435	−8.35	1 153	1 739
917-22	164	−10.21	−0.96	0.282 480	−6.74	1 092	1 640
917-24	169	−12.44	−0.97	0.282 417	−8.85	1 177	1 775
919-8-14	172	−14.92	−0.97	0.282 347	−11.26	1 274	2 061
919-8-15	179	−15.23	−0.96	0.282 336	−11.48	1 302	1 930
919-8-18	181	−15.20	−0.96	0.282 338	−11.37	1 291	1 949
919-8-19	182	−13.95	−0.95	0.282 372	−10.15	1 255	1 947
919-8-06	184	−13.77	−0.97	0.282 379	−9.86	1 229	1 870

$\varepsilon_{Hf}(t)$表示样品偏离球粒陨石的程度；T_{DM1} 表示样品单阶段演化模式年龄；T_{DM}^{C} 表示平均地壳模式年龄；现今球粒陨石和亏损地幔的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 和 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 分别为 0.282 772 和 0.033 2 及 0.283 25 和 0.03 84；$(^{176}Lu/^{177}Hf)_C$=0.015；*t* 为锆石的结晶年龄；*s* 为标准差。

环境。所以，岩石地球化学所显示的火山弧特征的唯一的解释是早期俯冲碰撞的产物在燕山期重新活化了，虽然在扬子与华夏板块之间的南华洋已经闭合，但两者之间闭合过程中挤压效应在燕山期持续发酵。该区确定的年龄显示 224 Ma 前后地壳处于拉张阶段，产生岩浆底侵形成层状辉长岩，底侵岩浆同时加热和软化了下地壳岩石层[25]。220~180 Ma 处于相对平静期，目前没有发现该时间段有大规模的岩浆活动记录。180 Ma 以来地壳显示重新活跃的迹象，湘南的花岗闪长岩侵入活动多发生在(172±5) Ma[6]，150 Ma 前后湘南出现局部火山喷发活动，显示地壳活动又到了剧烈期。

宝山花岗闪长斑岩和水口山、铜山岭花岗闪长岩具有一致的岩石地球化学特征[6−7]，且均为铜铅锌矿床，与黄沙坪、柿竹园花岗岩及成矿系列有显著差异。前人获得宝山岩体的成岩年龄为 173 Ma 和 160 Ma，并分别确定成岩时代为中侏罗世燕山早期二、三阶段。本文作者完成的锆石年龄测试结果同时包含了上述文献中出现的年龄值，本研究揭示宝山岩浆岩侵入活动有多次，既有 180 Ma 左右的花岗闪长斑岩，又有 165 Ma 的花岗斑岩。前面分析本区在中生代为陆相板内环境，锆石 Hf 同位素示踪结果显示来源于古

老地壳，可以认为 220 Ma 前后地壳的拉张造成幔源岩浆的底侵，对下地壳起了预热作用，180 Ma 前后，本区构造体制发生了转换，表现为挤压体制，增厚的下地壳发生局部熔融形成花岗闪长斑岩。

6 结论

1) 宝山矿区地区出露的花岗闪长岩脉为多次侵入的产物，既有 180 Ma 左右的基质呈细粒结构的花岗闪长斑岩，又有 165 Ma 左右侵入的基质呈隐晶质的花岗斑岩，显示晚期岩浆侵入深度更浅。

2) 花岗闪长斑岩的 Hf 同位素特征显示锆石来源于古老地壳，其地壳平均模式年龄为 1 709~1 951 Ma，岩石地球化学图解判别指示岩石形成于碰撞环境，岩石的综合成因应是燕山早期挤压构造体制下，该区中下地壳发生加厚熔融，岩浆沿有利的构造部位上升到浅部形成各期浅成岩脉(体)。

3) 本研究所获得的两期岩脉年龄 180 Ma 和 165 Ma 分别对应于前人所获得的两期成矿年龄，说明宝山矿区成岩成矿时间跨越 20 Ma 左右，在此期间，深部岩浆的持续多期活动带来了丰富的成矿物质，最终形成宝山铜钼铅锌银多金属矿床。

致谢：

野外工作得到郴州有色一总队钟江临高级工程师、周伟平工程师、矿山地质科彭昭喜工程师及李茂平工程师的热情帮助；锆石测试得到西北大学大陆动力学国家重点实验室袁洪林教授、柳小明高级工程师、弓虎军博士和戴梦宁博士的支持，数据处理得到阳杰华博士的帮助，谨此一并致以诚挚谢意！

REFERENCES

[1] 陈国达. 1:4 000 000 中国大地构造图[M]. 北京: 地图出版社, 1977.
CHEN Guo-da. 1:400 000 0 tectonic map of China [M]. Beijing: SinoMaps Press, 1977.

[2] 印建平. 湖南宝山铅锌银多金属矿成矿构造机制分析[J]. 大地构造与成矿学, 1998, 22(S): 57−61.
YIN Jian-ping. Metallogenetic tectonics analysis about Baoshan Pb-Zn-Ag polymetallic deposit, Hunan, China [J]. Geotectonica et Metallogenia, 1998, 22(S): 57−61.

[3] 杨国高, 陈振强. 湖南宝山铜钼铅锌银多金属矿田围岩蚀变与矿化分带特征[J]. 矿产与地质, 1998, 12(2): 96−100.
YANG Guo-gao, CHEN Zhen-qiang. Alteration of wall rocks and the mineralization zoning features in Baoshan copper-molybdenum-lead-zinc-silver mineralization field [J]. Mineral Resources and Geology, 1998, 12(2): 96−100.

[4] 童潜明, 李荣清, 张建新. 郴临深大断裂带及其两侧的矿床成矿系列[J]. 华南地质与矿产, 2000(3): 34−41.
TONG Qian-ming, LI Rong-qing, ZHANG Jian-xin. Deposit metallogenetic series across the Chenzhou—Linwu deep-seated fault [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2000(3): 34−41.

[5] 王岳军, 范蔚茗, 郭 锋, 李 旭. 湘东南中生代花岗闪长质小岩体的岩石地球化学特征[J]. 岩石学报, 2001, 17(1): 169−175.
WANG Yue-jun, FAN Wei-ming, GUO Feng, LI Xu. Petrological and geochemical characteristics of Mesozoic granodioritic intrusions in southeast Hunan Province, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(1): 169−175.

[6] 王岳军, 范蔚茗, 郭 锋. 湘东南中生代闪长质小岩体的锆石 U-P 法定年及成因指示[J]. 中国科学: D 辑, 2001, 31(9): 745−751.
WANG Yue-jun, FAN Wei-ming, GUO Feng. Zircon U-Pb ages of the Mesozoic era granodiorites and its genesis indicators in southeast Hunan Province [J]. Science in China: Series D, 2001, 31(9): 745−751.

[7] 姚军明, 华仁民, 林锦富. 湘南宝山矿床 REE、Pb-S 同位素地球化学及黄铁矿 Rb-Sr 同位素定年[J]. 地质学报, 2006, 80(7): 1045−1054.
YAO Jun-ming, HUA Ren-min, LIN Jin-fu. REE, Pb-S isotope geochemistry, and Rb-Sr isochrone age of pyrites in the Baoshan deposit, south Hunan Province, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(7): 1045−1054.

[8] 伍光英, 马铁球, 柏道远, 李金冬, 车勤建, 王先辉. 湖南宝山花岗闪长质隐爆角砾岩的岩石学、地球化学特征及锆石 SHRIMP 定年[J]. 现代地质, 2005, 19(2): 198−204.
WU Guang-ying, MA Tie-qiu, BAI Dao-yuan, LI Jin-dong, CHE Qin-jian, WANG Xian-hui. Petrological and geochemical characteristics of granodioritic cryptoexplosion breccia and zircon SHRIMP dating in the Baoshan area, Hunan Province [J]. Geoscience, 2005, 19(2): 198−204.

[9] 路远发, 马丽艳, 屈文俊, 梅玉平, 陈希清. 湖南宝山铜钼多金属矿床的成岩成矿的 U-Pb 和 Re-Os 同位素定年研究[J]. 岩石学报, 2006, 22(10): 2483−2492.
LU Yuan-fa, MA Li-yan, QU Wen-jun, MEI Yu-ping, CHEN Xi-qing. U-Pb and Re-Os isotope geochronology of Baoshan Cu-Mo polymetallic ore deposit in Hunan Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(10): 2483−2492.

[10] 宋 彪, 张玉海, 万渝生, 简 平. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 2002, 5(S): 26−30.
SONG Biao, ZHANG Yu-hai, WAN Yu-sheng, JIAN Ping. Mount making and procedure of the SHTIMP dating [J]. Geological Review, 2002, 5(S): 26−30.

[11] ANDERSEN T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chem Geol, 2002, 192(1/2): 59−79.

[12] YUAN H L, GAO S, LIU X M, LI H M, GUNTHER D, WU F Y. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry [J]. Geostands Newsletter, 2004, 28: 353−370.

[13] 杨进辉, 吴福元, 柳小明, 谢烈文. 北京密云环斑花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素及其地质意义[J]. 岩石学报, 2005, 21(6): 1633−1644.
YANG Jin-hui, WU Fu-yuan, LIU Xiao-ming, XIE Lie-wen. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes and their geological significance of the Miyun rapakivi granites from Beijing, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(6): 1633−1644.

[14] LIU Y S, GAO S, HU Z C, GAO C G, ZONG K Q, WANG D B. 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 [J]. Journal of Petrology, 2010, 51(1/2): 537−571.

[15] LUDWIG K R. User's manual for Isoplot 3.0: A geochronological toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley: Geochronology Center Special Publication, 2003: 1−71.

[16] MIDDLEMOST E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. Earth-Sci Rev, 1994, 37: 215−224.

[17] PECCERILLO R, TAYLOR S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey [J]. Contribution Mineral Petrol, 1976, 58: 63−81.

[18] MIDDLEMOST E A K. Magmas and magmatic rocks [M]. London: Longman, 1985: 1−266.

[19] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992: 1−195.
LI Chang-nian. Igneous trace element petrology [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992: 1−195.

[20] 路远发. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 2004, 33(5): 459−464.
LU Yuan-fa. A geochemical toolkit for Microsoft excel [J]. Geochemical, 2004, 33(5): 459−464.

[21] 杨进辉, 吴福元, 柳小明, 谢烈文, 杨岳衡. 辽东半岛小黑山岩体成因及其地质意义: 锆石 U-Pb 年龄和铪同位素证据[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(1): 29−43.
YANG Jin-hui, WU Fu-yuan, LIU Xiao-ming, XIE Lie-wen, YANG Yue-heng. Petrogenesis and geological significance of the Jurassic Xiaoheishan pluton in the Liaodong Peninsula, east China: In-situ zircon U-Pb dating and Hf isotopic analysis [J]. Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry, 2007, 26(1): 29−43.

[22] 凤永刚, 刘树文, 吕勇军, 田　伟, 柳小明. 冀北凤山晚古生代闪长岩−花岗质岩石的成因: 岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素制约[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2009, 45(1): 59−70.
FENG Yong-gang, LIU Shu-wen, LÜ Yong-jun, TIAN Wei, LIU Xiao-ming. Petrogenesis of the late paleozoic diorites-granitoids in Fengshan area, northern Hebei Province: Constraints from petrochemistry, zircon U-Pb chronology and Hf isotope [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2009, 45(1): 59−70.

[23] PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. Journal of Petrology, 1984, 25: 956−983.

[24] 殷鸿福, 吴顺宝, 杜远生, 彭元桥. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1999, 24(1): 1−12.
YIN Hong-fu, WU Shun-bao, DU Yuan-sheng, PENG Yuan-qiao. south China defined as part of Tethyan archipelagic ocean system [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1999, 24(1): 1−12.

[25] 郭　锋, 范蔚茗, 林　舸, 林源贤. 湘南道县辉长岩包体的年代学研究及成因探讨[J]. 科学通报, 1997, 42(15): 1661−1663.
GUO Feng, FAN Wei-ming, LIN Ge, LIN Yuan-xian. Chronology study of the gabbro xenolith and discussion of its genesis, Daoxian County, Hunan Province [J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(15): 1661−1663.

(编辑　陈卫萍)