

湖南宝山矿区煌斑岩的地球化学特征及地质意义

孔 华^{1,2}, 全铁军^{1,3}, 奚小双¹, 钟江临^{1,4}, 陈泽峰¹, 王 高¹, 郭碧莹¹, 赵志强¹

- (1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069;
3. 湖南有色地质勘查局, 长沙 410007;
4. 湖南省有色地质勘查局一总队, 郴州 423000)

摘 要: 最近在湖南宝山矿区发现了煌斑岩脉, 岩石样品具有典型煌斑结构, 斑晶矿物主要为辉石、长石、黑云母及石英。 SiO_2 含量为 50.23%~51.29%, $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 为 4.65%~5.63%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 1.89~7.77。根据 TAS 图解和 SiO_2 -Nb/Y 图解投点, 宝山煌斑岩为碱性系列钙碱性煌斑岩。煌斑岩过渡族元素配分型式为“W”形, 相对富集 Ti、Mn 和 Zn, 明显亏损 Cr、Co 和 Ni; 微量元素表现为 Th 和 LREE 强烈富集并伴有 K、Sr 和 Ba 相对亏损的特征。煌斑岩中的锆石为岩浆锆石, U-Pb 定年结果为 (156 ± 2) Ma, 煌斑岩浆来源于受到俯冲组分改造的富集地幔。湖南宝山矿区煌斑岩的产出显示了燕山期深部岩浆活动的踪迹, 反映燕山期区域陆内伸展的大地构造背景。

关键词: 煌斑岩; 地球化学; 锆石 U-Pb 定年; 宝山

中图分类号: P597

文献标志码: A

Geochemical characteristics of lamprophyre and its geological significance in Baoshan deposit, Hunan province, China

KONG Hua^{1,2}, QUAN Tiu-jun^{1,3}, XI Xiao-shuang¹, ZHONG Jiang-lin^{1,4}, CHEN Ze-feng¹,
WANG Gao¹, GUO Bi-ying¹, ZHAO Zhi-qiang¹

- (1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;
2. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China;
3. Hunan Nonferrous Metal Geo-exploration Bureau, Changsha 410007, China;
4. First General Geological Team, Hunan Nonferrous Metal Geo-exploration Bureau, Chenzhou 423000, China)

Abstract: The lamprophyre vein from Baoshan minning area, southern Hunan Province, is a new discovery, the rock sample has typical lamprophyric texture, the phenocryst minerals are pyroxene, feldspar, biotite and quartz. The contents of SiO_2 range from 50.23% to 51.29%, the values of $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ range from 4.65% to 5.63%, the values of $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ range from 1.89 to 7.77. According to figure of TAS and SiO_2 -Nb/Y, the samples belong to calc-alkaline lamprophyres of alkaline series. Distribution pattern for transitional-metal elements shows enrichment in Ti, Mn and Zn, obvious depletion in Cr, Co and Ni. The characteristics of trace elements show that strong enrichment in Th and LREE, relative depletion in K, Sr, Ba. The zircons collected from lamprophyre are magmatic zircons due to oscillatory zones, U-Pb dating results display the crystal average age of measured zircons is (156 ± 2) Ma, the lamprophyre is derived from metasomatic enrichment lithospheric mantle. The discovery of lamprophyre from Baoshan suggests the trace of Yanhsanian deep basic magma activity, corresponding to regional intra-plate extensional tectonic background in Yanshanian stage.

Key words: lamprophyre; geochemistry; U-Pb dating; Baoshan

基金项目: 中国地质调查局地质矿产调查评价专项(1212011121116, 1212011085372); 湖南省重点学科建设项目资助

收稿日期: 2013-05-16; **修订日期:** 2013-06-30

通信作者: 全铁军, 高级工程师; 电话: 0731-88830616, E-mail: quantj@vip.163.com

煌斑岩(Lamprophyre)指含云母斑晶的暗色岩。煌斑岩的分类一直存在争议, ROCK^[1-2]将煌斑岩分成钙碱性煌斑岩、碱性煌斑岩、超镁铁煌斑岩、钾镁煌斑岩和金伯利岩。路凤香等^[3]和李献华等^[4]则在此基础上, 将煌斑岩细分出8个亚类, 但不包括金伯利岩。一般根据斑晶矿物可将煌斑岩划分为云母煌斑岩、闪石煌斑岩和辉石煌斑岩。大多数煌斑岩在化学成分上属钙碱系列, 以富钾、镁为特征, 类似于钾玄岩类; 少数煌斑岩, 如闪煌岩和沸煌岩, 属碱性系列, 钠和挥发分富集, 类似于碱性玄武岩、碧玄岩和霞石岩。

20世纪90年代以来, 许多研究认为煌斑岩与成矿作用有关, 其中特别是 ROCK^[5-6]强调煌斑岩在中温热液金矿成矿作用中的重要性, 认为金来自这些共生的煌斑岩。国内众多学者也论述了煌斑岩与金、锑等热液矿床的时空成因联系, 煌斑岩来源于地幔, 是深断裂构造作用的产物, 而在深断裂构造活动区也正好是形成热液矿床的有利地段。因此, 两者在空间上往往密切共生, 显示出某种亲缘关系^[7-9]。湖南省内许多地区发现有煌斑岩^[10-14], 其中锡矿山矿区煌斑岩的研究最为深入, 锡矿山煌斑岩的 K-Ar 法同位素年龄(测试矿物为黑云母和钾长石)集中在 118~128 Ma, 平均为 124 Ma。

宝山铜铅锌矿床是湘南坪宝矿带北段重要的矿床

之一, 矿区岩脉十分发育, 以微粒花岗闪长斑岩为主, 前人对酸性脉岩如花岗闪长斑岩以及呈岩筒产出的花岗闪长质隐爆角砾岩进行过研究, 均认为宝山矿床的成岩成矿时代为燕山早期, 年龄集中在 158~182 Ma^[15-19]之间。而关于基性脉岩的研究未有报道, 本文作者基于井下岩脉的观察取样, 对煌斑岩地球化学特征及地质意义进行探讨。

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余田桥组、锡矿山组, 石炭系下统孟公坳组、石磴子组、测水组、梓门桥组, 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、岩性。矿区构造主要由一系列的倒转背、向斜及背、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 F3 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)。

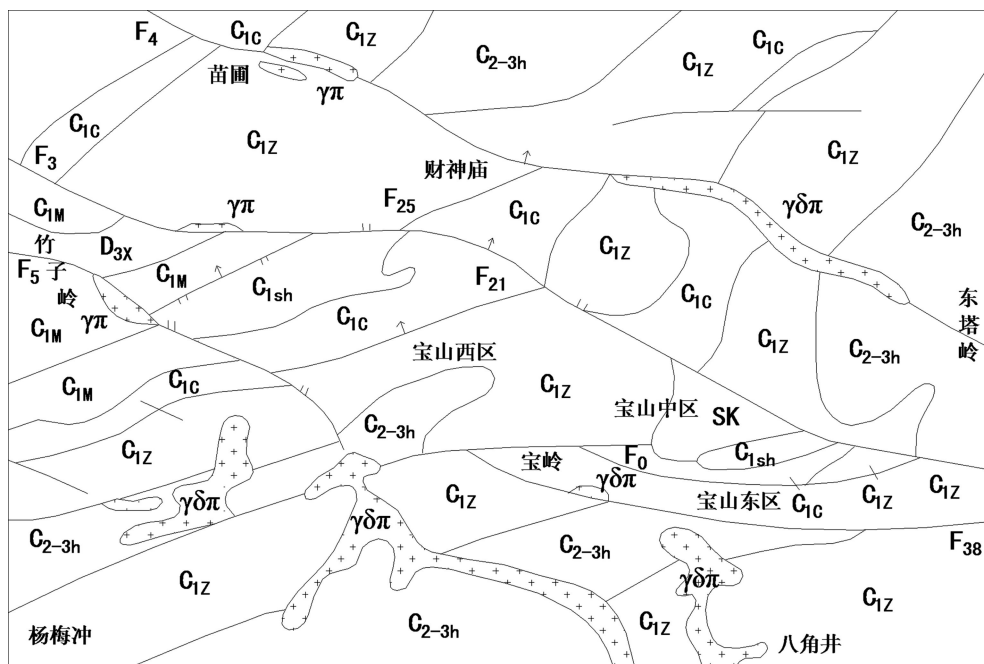


图 1 宝山矿区地质图(据文献[20]): C₂-P_{1ht}-壶天群; C_{1z}-梓门桥组; C_{1c}-测水组; C_{1sh}-石磴子组; C_{1m}-孟公坳组; D_{3x}-锡矿山组; SK-夕卡岩; γδπ-花岗闪长斑岩; γπ-花岗斑岩

Fig. 1 Geological map of Baoshan deposit (after Ref. [20]): C₂-P_{1ht}-Hutian Gr; C_{1z}-Zimenqiao Fm; C_{1c}-Ceshui Fm; C_{1sh}-Shidengzi Fm; C_{1m}-Menggongqao Fm; D_{3x}-Xikuangshan Fm; SK-Skarn; γδπ-Granodiorite porphyry; γπ-Granite porphyry

2 煌斑岩产状及岩石矿物学特征

宝山矿区的煌斑岩目前在矿区深部-70~110 m 坑道 151 线出露, 侵入地层为下石炭统梓门桥组白云岩。岩脉走向约 320°, 产状近于直立, 宽约 130~150 cm。斑晶钾长石粒径约 1~3 cm, 沿脉边缘呈定向排列, 石英斑晶呈聚合粒状, 粒度约 1 mm。黑云母斑晶粗大者达 2~3 cm。节理裂隙发育, 沿裂隙充填有方解石细脉。

煌斑岩呈灰黑色, 典型斑状结构, 斑晶占 20%, 基质占 80%, 斑晶主要为辉石、斜长石、黑云母和石英, 石英斑晶边缘遭受溶蚀磨圆。长石有泥化反应边, 是捕虏晶。基质主要为细粒黑云母和斜长石、辉石、钾长石; 基质中黑云母水化普遍, 解理不清晰; 副矿物主要有磁铁矿、钛铁矿、磷灰石、锆石等。煌斑岩遭受不同程度的蚀变, 常见的蚀变类型有绿泥石化、碳酸盐化、绢云母化、高岭土化等。根据其斑晶和基质矿物成分将其定名为辉石煌斑岩。

3 样品制备与测试分析

选择新鲜岩石样品, 通过人工重砂法从样品中分

选出锆石, 样品靶的制备参考了 SHRIMP 定年锆石样品的制备方法^[21], 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 准分子激光器完成。具体分析测试及数据处理方法见文献^[22-26]。

本次工作对 7 件煌斑岩样品进行了主量、微量和稀土元素的分析测试。主量元素、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(Thermo elementalX7), 微量元素采用等离子发射光谱仪(ICAP6300)和示波极谱仪(JP-2)。常量及微量元素图解绘制程序据文献^[27]。

4 测试结果分析

4.1 煌斑岩岩石化学特征

本次研究分析了 7 个样品(见表 1), 其中一个样品 16-2, 因碳酸盐脉发育, 烧失量过高, 不参与岩石命名投影图和微量元素配分型式作图, 但稀土元素分析结果可用。

表 1 宝山煌斑岩的主量元素含量

Table 1 Major element analyses of the Baoshan lamprophyre

主量元素	样品 14-2	样品 14-3	样品 16-2b	样品 16-3	样品 14-1	样品 16-2	样品 16-4
w(SiO ₂)/%	50.33	51.23	50.42	50.72	51.29	35.27	50.44
w(TiO ₂)/%	1.13	1.10	1.23	1.23	1.16	1.16	1.17
w(Al ₂ O ₃)/%	14.96	14.65	16.20	15.91	15.25	14.34	15.61
w(Fe ₂ O ₃)/%	3.01	2.94	3.44	2.81	3.30	9.24	2.84
w(FeO)/%	4.40	4.35	4.20	3.97	4.15	0.32	4.00
w(MnO)/%	0.17	0.17	0.15	0.22	0.17	0.64	0.21
w(MgO)/%	4.97	5.07	4.38	4.46	4.51	0.32	4.03
w(CaO)/%	8.40	8.92	5.96	6.44	7.15	18.65	6.84
w(Na ₂ O)/%	1.83	1.95	1.05	0.53	0.89	0.06	0.63
w(K ₂ O)/%	3.76	3.68	4.07	4.12	3.77	0.12	4.13
w(P ₂ O ₅)/%	0.52	0.51	0.58	0.58	0.50	0.55	0.51
w(CO ₂)/%	3.13	2.58	4.05	4.05	3.45	14.32	4.54
w(H ₂ O ⁺)/%	3.13	2.56	3.96	4.73	4.16	4.91	4.54
烧失量/%	5.80	4.66	7.91	8.39	7.23	19.14	9.47
总量/%	99.74	99.71	99.69	99.77	99.75	99.90	99.49
w(Na ₂ O+K ₂ O)/%	5.59	5.63	5.12	4.65	4.66	0.18	4.76
K ₂ O/Na ₂ O	2.05	1.89	3.88	7.77	4.24	2.00	6.56
σ ₄₃	3.68	3.45	2.95	2.31	2.23	-0.01	2.48

从表 1 可以看出,除了样品 16-2 碳酸盐细脉发育之外,本区煌斑岩 $w(\text{SiO}_2)$ 为 50.23%~51.29%, $w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 为 4.65%~5.63%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 1.89~7.77,表明本区煌斑岩为一种富碱、高钾、中等 Ti 含量的基性脉岩。里特曼组合指数 σ 为 2.23~3.68,属于亚碱性岩系;在 $w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ — $w(\text{SiO}_2)$ 图上(见图 2(a)),所有样品落在 ROCK(1987)^[1]圈定的钙碱性煌斑岩范围内;在 $w(\text{SiO}_2)$ —Nb/Y 判别图上(见图 2(b)),样品均落入碱性玄武岩范围,结合路凤香^[3]提出的分类方案,本区煌斑岩为碱性玄武岩系列钾质钙碱性煌斑

岩,与邻区锡矿山矿区煌斑岩类型相同^[10-11]。
依据常量元素数据计算了标准矿物组成,主要矿物有石英(6.35%~22.94%)、长石、辉石等,其中石英含量较多,与镜下观察到的石英斑晶现象相吻合,本区煌斑岩为 SiO_2 过饱和煌斑岩。标准矿物中钾长石含量最高(22.38%~25.72%),辉石以紫苏辉石为主(15.8%~18.07%)。

4.2 过渡元素特征

本区煌斑岩的过渡元素含量(见表 2)与 ROCK^[30]

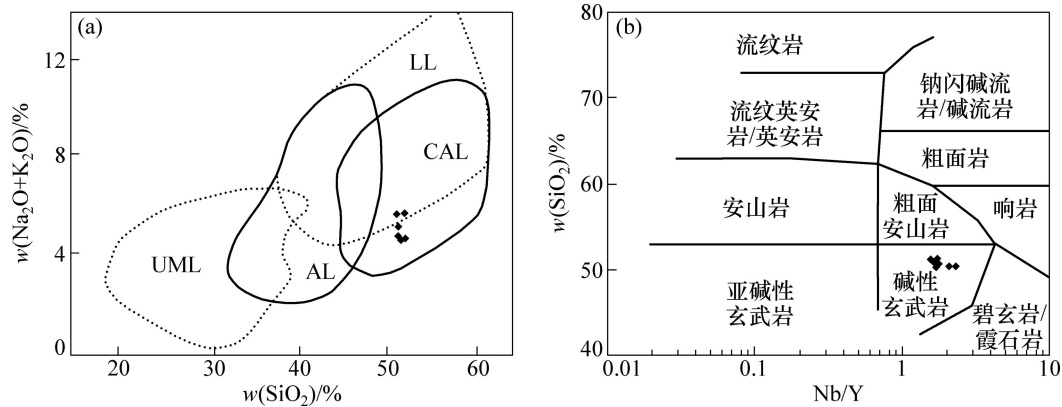


图 2 煌斑岩的 $w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ — $w(\text{SiO}_2)$ 图(a)^[1]和 $w(\text{SiO}_2)$ —Nb/Y 图(b)^[28]: UML—超镁铁煌斑岩; LL—钾镁煌斑岩; CAL—钙碱性煌斑岩

Fig. 2 Diagram of $w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ — $w(\text{SiO}_2)$ (a)^[1] and Diagram of Nb/Y— $w(\text{SiO}_2)$ ^[28]: UML—Ultra-mafic lamprophyre; LL—Lamproite; AL—Alkaline lamprophyre; CAL—Calc-alkaline lamprophyre

表 2 宝山煌斑岩的微量元素含量

Table 2 Trace elements analyses of Baoshan lamprophyre

元素	样品 629-14-2	样品 629-14-3	样品 16-2b	样品 16-5	样品 629-14-1	样品 16-2	样品 16-3	云煌岩 ⁽¹⁾
$w(\text{Sc})/10^{-6}$	26.20	24.30	26.10	27.00	16.72	26.90	20.99	16.00
$w(\text{V})/10^{-6}$	179.00	171.00	194.00	191.00	185.80	182.80	173.70	165.00
$w(\text{Cr})/10^{-6}$	55.60	52.30	59.30	52.60	58.45	44.33	55.42	360.00
$w(\text{Co})/10^{-6}$	22.10	21.50	18.80	19.30	20.32	25.75	20.81	37.00
$w(\text{Ni})/10^{-6}$	12.20	12.10	11.50	9.62	19.15	12.49	11.79	200.00
$w(\text{Cu})/10^{-6}$	21.60	18.90	23.40	19.10	22.27	20.13	20.98	50.00
$w(\text{Zn})/10^{-6}$	164.00	146.00	204.00	140.00	189.60	1012.70	221.45	120.00
$w(\text{Rb})/10^{-6}$	190.00	194.00	197.00	256.00	236.39	7.08	202.60	193.00
$w(\text{Ba})/10^{-6}$	930.00	921.00	959.00	934.00	893.70	18.10	960.60	1800.00
$w(\text{Th})/10^{-6}$	18.50	16.40	19.00	17.60	17.86	16.85	16.73	26.00
$w(\text{U})/10^{-6}$	5.61	5.23	5.93	5.45	5.62	10.76	5.96	6.00
$w(\text{Ta})/10^{-6}$	3.98	3.25	3.51	3.42	3.02	2.99	2.77	19.00
$w(\text{Nb})/10^{-6}$	44.60	39.20	44.80	43.70	41.67	48.78	50.24	1.30
$w(\text{Sr})/10^{-6}$	454.00	561.00	306.00	275.00	307.00	46.80	225.00	950.00
$w(\text{Zr})/10^{-6}$	180.00	170.00	207.00	202.00	193.40	187.20	186.30	300.00
$w(\text{Hf})/10^{-6}$	4.90	4.49	5.41	5.23	5.00	4.60	4.50	11.00

(1) 据 ROCK(1990)^[30];

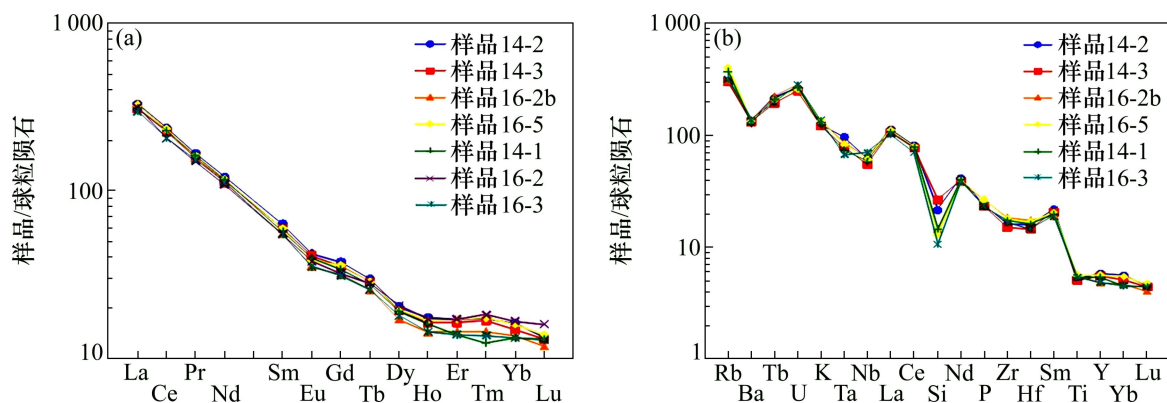


图 4 宝山矿区的稀土元素配分图解(a)和微量元素蛛网图(b), 标准化值转引自文献[31], 绘制程序引自文献[27]

Fig. 4 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b) of Baoshan lamprophyre

在原始地幔标准化地球化学蛛网图(见图 4(b))中, 所有样品均表现为 Th 强烈富集并伴有 Ce 弱富集和 K、Sr、Ba 相对亏损的特征, 具有钙碱性岛弧玄武岩分布模式^[32-33]。另外, 所有样品中 LILE 和 LREE 相对 HFSE 富集的特征可以从 Ba/Nb 和 La/Nb 相关图(见图 5)中明显地看出。煌斑岩的 Ba/Nb 和 La/Nb 比值与大陆地壳平均组成相同, 而高于 N-MORB、OIB 的相应比值, 暗示了大陆地壳物质(花岗质岩石, 麻粒岩、沉积物等)在煌斑岩岩浆生成中起了重要作用^[33]。由于化学蚀变作用, 样品 16-2 的 K、Rb、Sr、Ba 含量明显降低。

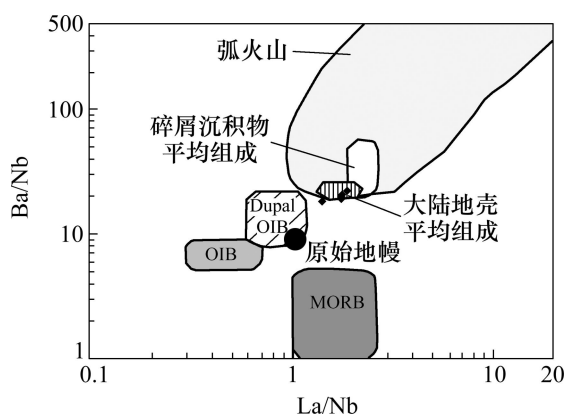


图 5 宝山煌斑岩的 Ba/Nb—La/Nb 相关图解(底图据文献[33])

Fig. 5 Plot of Ba/Nb vs La/Nb showing the lamprophyres from Baoshan (After Ref. [33])

4.4 煌斑岩锆石 U-Pb 同位素特征

本次 U-Pb 测年锆石均为具有韵律环带的锆石,

显示为岩浆结晶形成。锆石外形有长柱状和短柱状(见图 6), 锆石 CL 图像显示多数锆石有溶蚀亮化边, 边缘不平直, 用于测试的锆石 Th/U 值较高(0.22~1.27, 见表 4), 表明为岩浆成因。多数锆石具核幔结构。测点选择在晶体两端, 所测 12 颗锆石的分析点均位于 U-Pb 谐和线上或其附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $156.0 \text{ Ma} \pm 2.0 \text{ Ma}$ (1σ , $\text{MSWD}=2.9$, 见图 7(a)), 代表了锆石的结晶年龄。

4.5 锆石 Hf 同位素特征

锆石 Hf 同位素测定点选在锆石 U-Pb 测试的同位点, 即选取年龄谐和性好的点。样品中锆石(10 个点)的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值变化范围较大, 分别为 0.015 109~0.046 884 和 0.000 549~0.001 665 (见表 5); 初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别为 0.282 360~0.282 476 (见表 5) 和 -6.99~11.17 (见表 5), 模式年龄为 1 092~1 243 Ma, 平均为 1 167 Ma; 平均地壳模式年龄为 1 763 Ma, 与矿区北部花岗闪长斑岩一致(t 为 $165.3 \text{ Ma} \pm 3.3 \text{ Ma}$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -5.87~-9.42)^[19], 在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ — t 图解(见图 7(b))投点位于球粒陨石和下地壳演化线之间, 结合锆石的形态特征, 推测锆石是岩浆上升过程的捕获锆石, 煌斑岩的实际成岩年龄要小于 156 Ma, 可能与锡矿山煌斑岩年龄接近。

在表 5 中, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 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_{DMC} 表示平均地壳模式年龄; 现今球粒陨石和亏损地幔的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 分别为 0.282 772 和 0.033 2 及 0.283 25 和 0.038 4; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{C}}=0.015$; t 为锆石的结晶年龄; s 为标准差。

表 4 宝山煌斑岩中锆石 U-Pb 同位素组成及年龄

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

样号	组成/ 10^{-6}				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$				$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	Pb*	Th	U	Th/U	比值	1σ	年龄/Ma	1σ	比值	1σ
20121109L06	16.01	276	544	0.51	0.048 97	0.002 29	146.3	105.96	0.024 77	0.000 47
20121109L07	35.98	486	1242	0.39	0.049 27	0.001 73	160.8	80.04	0.024 91	0.000 44
20121109L09	21.91	204	809	0.25	0.047 84	0.001 84	90.6	89.73	0.024 49	0.000 44
20121109L20	39.60	342	1465	0.23	0.049 16	0.001 69	155.7	78.34	0.023 86	0.000 41
20121109L21	32.03	273	1132	0.24	0.051 65	0.001 87	269.8	80.74	0.025 04	0.000 44
20121109L22	39.08	341	1409	0.24	0.049 66	0.001 72	179.3	78.89	0.024 37	0.000 42
20121109L23	8.66	306	264	1.16	0.048 65	0.002 61	131.0	121.75	0.023 25	0.000 44
20121109L24	22.99	128	335	0.38	0.050 94	0.003 19	238.0	138.14	0.023 83	0.000 50
20121109L27	53.73	693	1905	0.36	0.050 14	0.001 69	201.6	76.38	0.023 91	0.000 41
20121109L29	29.10	1043	823	1.27	0.049 47	0.001 91	170.4	87.65	0.024 8	0.000 43
20121109L30	13.08	434	363	1.20	0.050 78	0.002 33	230.9	102.59	0.025 08	0.000 46
20121109L31	33.90	270	1211	0.22	0.050 62	0.001 79	223.4	79.82	0.025 31	0.000 43

样号	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$					
	年龄/Ma	1σ	比值	1σ	年龄/Ma	1σ				
20121109L06	157.7	2.94	0.167 27	0.006 54	157.0	5.69	0.008 39	0.000 20	168.9	4.07
20121109L07	158.6	2.75	0.169 26	0.004 21	158.8	3.66	0.008 57	0.000 16	172.4	3.22
20121109L09	155.9	2.75	0.161 60	0.004 72	152.1	4.13	0.008 41	0.000 19	169.3	3.90
20121109L20	152.0	2.58	0.161 79	0.003 75	152.3	3.28	0.007 92	0.000 15	159.5	3.07
20121109L21	159.5	2.74	0.178 41	0.004 58	166.7	3.95	0.008 81	0.000 18	177.4	3.64
20121109L22	155.2	2.64	0.166 94	0.003 95	156.8	3.43	0.008 25	0.000 16	166.0	3.23
20121109L23	148.2	2.79	0.156 01	0.007 29	147.2	6.41	0.007 19	0.000 15	144.9	3.02
20121109L24	151.8	3.12	0.167 41	0.009 40	157.2	8.18	0.007 84	0.000 29	157.8	5.78
20121109L27	152.3	2.56	0.165 33	0.003 63	155.4	3.16	0.007 62	0.000 13	153.5	2.64
20121109L29	157.9	2.72	0.169 16	0.004 83	158.7	4.20	0.007 34	0.000 12	147.7	2.49
20121109L30	159.7	2.88	0.175 59	0.006 58	164.3	5.69	0.007 81	0.000 15	157.3	2.97
20121109L31	161.1	2.72	0.176 62	0.004 27	165.1	3.68	0.008 87	0.000 18	178.5	3.54

Pb*为全铅, σ 为均方差。

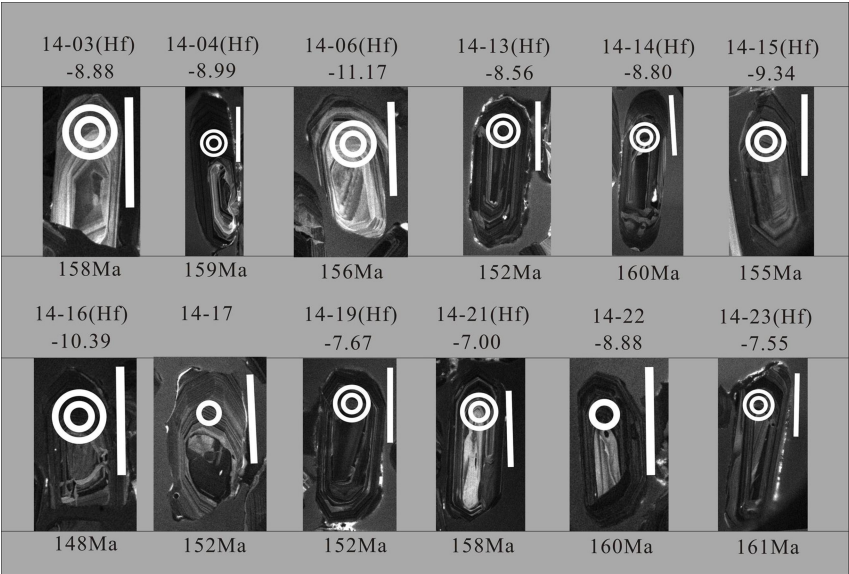


图 6 锆石阴极发光(CL)图像(其中 44 μm 圆表示铪同位素测试点, 锆石上方数字代表 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值; 30 μm 圆表示 U-Pb 年龄分析点, 图像下面数字为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄; 分析点号位于锆石上方; 线比例尺长度为 100 μm 。)

Fig. 6 CL images of zircons from Baoshan lamprophyre (Rounded circles indicate the locations of Hf and U-Pb analyses, with $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages. Spot numbers are labeled on the top of zircons. The line scales are 100 μm .)

表 5 宝山煌斑岩中锆石 Hf 同位素组成

Table 5 Zircon Hf isotopic data and ages of Baoshan lamprophyre

样品编号	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf		¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf		¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	
	比值	2s	比值	2s	比值	2s
629-14-03	0.282 427	0.000 014	0.039 681	0.000 118	0.001 300	0.000 004
629-14-04	0.282 424	0.000 013	0.046 884	0.000 151	0.001 665	0.000 004
629-14-06	0.282 361	0.000 009	0.015 109	0.000 043	0.000 549	0.000 001
629-14-13	0.282 439	0.000 010	0.033 503	0.000 047	0.001 323	0.000 002
629-14-14	0.282 428	0.000 011	0.035 014	0.000 189	0.001 280	0.000 006
629-14-15	0.282 415	0.000 011	0.030 695	0.000 053	0.001 159	0.000 001
629-14-16	0.282 389	0.000 011	0.028 152	0.000 113	0.000 987	0.000 004
629-14-19	0.282 464	0.000 008	0.035 100	0.000 069	0.001 327	0.000 002
629-14-21	0.282 479	0.000 011	0.027 465	0.000 261	0.000 973	0.000 009
629-14-23	0.282 461	0.000 009	0.018 404	0.000 071	0.000 795	0.000 003

样品编号	<i>t</i> /Ma	ε _{Hf} (0)	<i>f</i> _{Lu/Hf}	(¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf) _i	ε _{Hf} (<i>t</i>)	<i>T</i> _{DM1} /Ma	<i>T</i> _{DMC} /Ma
629-14-03	158	−12.21	−0.96	0.282 423	−8.89	1 176	1 767
629-14-04	159	−12.29	−0.95	0.282 419	−8.99	1 191	1 774
629-14-06	156	−14.53	−0.98	0.282 360	−11.17	1 243	1 909
629-14-13	152	−11.76	−0.96	0.282 436	−8.56	1 158	1 743
629-14-14	160	−12.17	−0.96	0.282 424	−8.81	1 173	1 764
629-14-15	155	−12.62	−0.97	0.282 412	−9.34	1 187	1 794
629-14-16	148	−13.55	−0.97	0.282 386	−10.39	1 219	1 854
629-14-19	152	−10.88	−0.96	0.282 461	−7.67	1 123	1 687
629-14-21	158	−10.36	−0.97	0.282 476	−6.99	1 092	1 649
629-14-23	161	−11.00	−0.98	0.282 459	−7.55	1 112	1 686

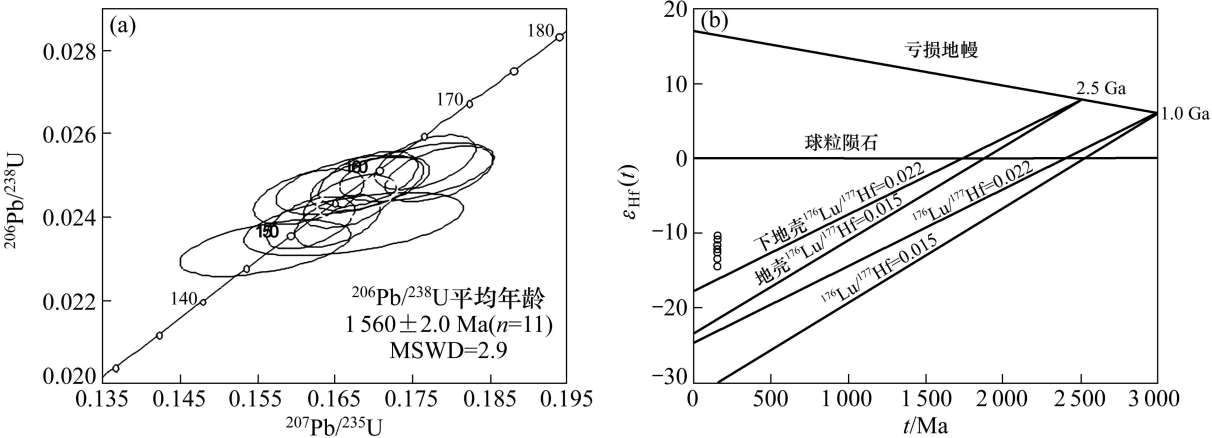


图 7 宝山煌斑岩的锆石 U-Pb 年龄(a)和宝山煌斑岩锆石 Hf 同位素 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ — t 图(b)
Fig. 7 U-Pb ages of zircons from Baoshan lamprophyre (a) and $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ — t diagram of zircon of Baoshan lamprophyre (b)

5 煌斑岩形成构造环境和岩石成因

Nb、Ti、Y 为高场强元素，它们受到后期作用影

响不大，故常用来判断岩浆岩的构造环境。在 Zr/Y—Y 图(见图 8(a))和 2Nb-Zr/4-Y 图(见图 8(b))中样品点投在大陆板内环境，本区 Nb/Y 和 Ti/Y 比值分别为 0.44~0.64 和 255~336，均略低于锡矿山煌斑岩^[11]，在 Ti/100-Zr-3Y 图(图略)中也投入板内环境。这与岩

石微量元素具有的岛弧玄武岩特性不一致, 暗示在岩浆形成前发生过地壳物质的俯冲。宝山矿区处于湘桂坳陷带, 区域上位于扬子板块和华夏板块相接的过渡地区, 地表为晚古生代地层覆盖区, 印支运动使得晚古生代盖层发生褶皱, 在随后的燕山期早期因古太平洋板块持续快速低角度俯冲作用^[34], 可能诱发了湘南深部岩石圈上地幔的热扰动^[11]。华南中生代受到板块构造体制和板内体制的联合制约, 这是华南地表发育挤压逆冲推覆构造, 而深部地壳却发生重熔形成花岗岩的根本原因。由于区域性伸展及断裂的深切作用, 使得早期被俯冲物质交代的岩石圈地幔减压熔融形成基性岩浆, 宝山矿区的煌斑岩可能是这期基性岩浆活动的产物。

关于煌斑岩的成因, 目前主要存在三种不同的模

式: 一是富集地幔部分熔融模式^[5, 37], 二是基性岩浆陆壳混染模式^[38]。三是幔源+陆壳混染模式^[11]。

宝山煌斑岩微量、稀土元素以相对均一或变化不大为特征, 表明岩浆上升过程中地壳混染作用不大。本区煌斑岩的 Nb/Ta 为 11.2~18.4。平均比值为 13.86, 略低于原始地幔的值 (17.5 ± 2.0); Zr/Hf 值为 36.73~41.40, 平均比值为 38.89, 接近原始地幔的值 (36.27 ± 2.0); 同时, 这两个值都远大于陆壳的相应值 (11 和 33)^[39]。这些表明本区煌斑岩受到大比例的地壳混染的可能性不大^[40~41]。煌斑岩的主要元素地球化学特征可反映其源区的性质, 本区煌斑岩为钙碱性系列。从图 4 可以看出, 样品具有较明显的 Nb、Ta 亏损和较低的 Nb/La 值 (0.54~0.71)。Nb、Ta 亏损是板块俯冲环境中喷发岩浆的典型特征, 这些表明其是不可能直接由软流圈部分熔融产生的^[42], 其源区可能因受到俯冲作用的影响, 混合了部分地壳物质。

6 结论

1) 宝山煌斑岩主要矿物成分为辉石、长石和云母, 标准矿物含石英, 为 SiO_2 过饱和煌斑岩, 岩石化学成分显示组合指数 (σ) 为 2.23~3.68, 结合 SiO_2 —Nb/Y 图解、TAS 图解和 SiO_2 —($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) 图解, 可认为本区煌斑岩属于碱性系列钾质钙碱性煌斑岩。

2) 本区煌斑岩稀土元素具有总量高, 无明显负锆异常、配分模式呈轻稀土富集的强烈右倾型特征。在微量元素蛛网图中, 以富集高场强元素 Nb、Ta 亏损和 Ti 不亏损, 以及 Th 强富集和 Ce 弱富集为特征, 具有岛弧钙碱性玄武岩微量元素分配模式, 反映地幔源区有俯冲组分特点; 煌斑岩浆可能为富含 REE 和高场强元素的俯冲带流体交代过的富集地幔部分熔融所产生的岩浆。

3) 煌斑岩中锆石特征显示为岩浆锆石, 其 U-Pb 谐和年龄为 $(156 \pm 2) \text{ Ma}$, 与矿区花岗斑岩的年龄接近, Hf 同位素特征显示 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-6.99 \sim -11.17$, 锆石可能为岩浆上升过程中捕获的成矿期岩体中的锆石, 煌斑岩实际成岩年龄应小于 156 Ma。

4) 煌斑岩的构造环境判别图解显示具有板内构造环境特点, 微量元素配分型式又具有岛弧钙碱性玄武岩的微量元素分配型式, 表明宝山煌斑岩的地幔源区为受早期俯冲地壳物质交代的富集地幔。煌斑岩的形成是在华南陆内燕山早期大规模伸展的区域背景下沿深大断裂侵位形成的。

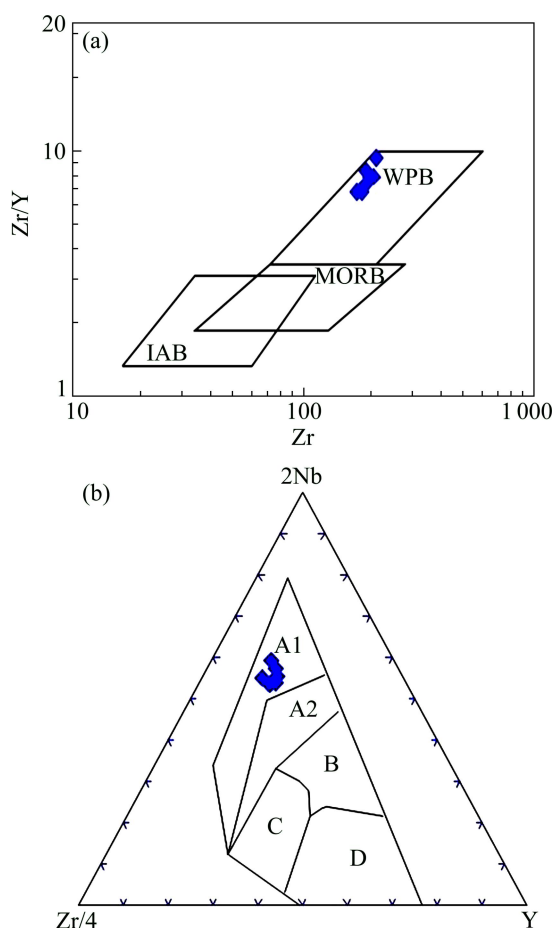


图 8 宝山煌斑岩构造判别图(Zr/Y—Zr 图(a)据 PEARCE 等^[35], A、B 和 C 分别代表 WPB、IAB 和 MORB。Nb-Zr-Y 图(b)据 MESEHEDE^[36]; A1+A2—板内碱性玄武岩; A2+C—板内拉斑玄武岩; B—P 型 MORB; D—N 型 MORB; C+D—火山弧玄武岩。)

Fig. 8 Tectonic discriminates diagrams for lamprophyres from Baoshan: (a) Zn-Y-Zr diagram from PEARCE et al.^[35], (b) Nb-Zr-Y diagram from MESEHEDE^[36]

致谢：野外工作得到湖南有色地勘局一总队钟江临总工程师、宝山铅锌矿地质部周孟祥部长、罗征厚工程师的支持与协助，锆石测试得到西北大学大陆动力学国家重点实验室的袁洪林教授、柳小明副研究员、戴梦宁博士的帮助。感谢审稿人提出的宝贵意见，谨此一并表示诚挚谢意！

REFERENCES

- [1] ROCK N M S. The nature and origin of lamprophyres: An overview[J]. *Geol Soc London Spec Pub*, 1987, 30: 191–226.
- [2] ROCK N M S. Lamprophyres[M]. U K Blackie, Glasgow, 1991: 285.
- [3] 路凤香, 舒小辛, 赵崇贺. 有关煌斑岩分类的建议[J]. *地质科技情报*, 1991, 10(增刊): 55–62.
LU Feng-xiang, SHU Xiao-xin, ZHAO Chong-he. A suggestion on classification of lamprophyres[J]. *Geological Science and Technology Information*, 1991, 10(supp): 55–62.
- [4] 李献华, 孙贤斌. “煌斑岩”与金矿的实际观察与理论评述[J]. *地质论评*, 1995, 41(3): 252–260.
LI Xian-hua, SUN Shen-su. Lamprophyre and gold mineralization—an assessment of observations and theories[J]. *Geological Review*, 1995, 41(3): 252–260.
- [5] ROCK N M S, GROVES D I. Do lamprophyres carry gold as well as diamond[J]. *Nature*, 1988, 332: 253–255.
- [6] ROCK N M S. Can lamprophyres resolve the genetic controversy over mesothermal gold deposits[J]. *Geology*, 1988, 16: 538–541.
- [7] 季海章, 赵懿英, 卢冰, 陈殿照. 胶东地区煌斑岩与金矿关系初探[J]. *地质与勘探*, 1992(2): 15–18.
JI Hai-zhang, ZHAO Yi-ying, LU Bing-chen. On the relation of lamprophyre to gold ore in the Jiaodong area[J]. *Geology and Prospecting*, 1992(2): 15–18.
- [8] 黄智龙, 朱成明, 王联魁. 云南老王寨金矿区煌斑岩的化学成分与矿化关系初探[J]. *有色金属矿产与勘查*, 1996, 5(1): 22–27.
HUANG Zhi-long, ZHU Cheng-ming, WANG Liang-kui. Chemical composition of lamprophyres and its relation of it to mineralization in the Laowangzhai gold deposit, Yunnan[J]. *Geological Exploration for Non-ferrous Metals*, 1996, 5(1): 22–27.
- [9] 朱桂田, 朱世戎. 煌斑岩与金矿成矿关系探讨[J]. *矿产与地质*, 1996, 10(6): 368–376.
ZHU Gui-tian, ZHU Shi-rong. Discussion on lamprophyres and their relations mineralization of gold deposits[J]. *Mineral Resources and Geology*, 1996, 10(6): 368–376.
- [10] 吴良士, 胡雄伟. 湖南锡矿山地区云斜煌斑岩及其花岗岩包体地意义[J]. *地质地球化学*, 2000, 28(2): 51–55.
WU Liang-shi, HU Xiong-wei. Xikuangshan mica-plagioclase lamprophyre and its granite inclusions, Hunan province[J]. *Geology-geochemistry*, 2000, 28(2): 51–55.
- [11] 谢桂青, 彭建堂, 胡瑞忠, 贾大成. 湖南锡矿山锑矿矿区煌斑岩的地球化学特征[J]. *岩石学报*, 2001, 17(4): 29–36.
XIE Gui-qing, PENG Jian-tang, HU Rui-zhong, JIA Da-cheng. Geochemical characteristics of lamprophyres in the Xikuangshan antimony ore deposits, Hunan province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(4): 29–36.
- [12] 贾大成, 胡瑞忠, 卢焱, 谢桂青. 湘东北蕉溪岭富钠煌斑岩地球化学特征[J]. *岩石学报*, 2002, 18(4): 459–467.
JIA Da-cheng, HU Rui-zhong, LU Yan, XIE Gui-qing. Petrological and geochemical characteristics of sodium-rich lamprophyres from Jiaoxiling in northeast Hunan province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18(4): 459–467.
- [13] 滕智猷, 王华. 湖南省宁远县毛梨坳云煌岩的新发现[J]. *国土资源导刊*, 2007, 4(4): 15–19.
TENG Zhi-you, HUAN Hua. A new discovery of minette rock in Maoliao, Ningyuan county, Hunan[J]. *Land and Resource Herald*, 2007, 4(4): 15–19.
- [14] 林玮鹏, 丘志力, 李子云, 陈炳辉, 李榴芬, 龚盛玮. 湖南宁乡V号岩管煌斑岩的岩石地球化学特征[J]. *资源调查与环境*, 2009, 30(3): 180–187.
LIN Wei-peng, QIU Zhi-li, LI Zi-yun, CHEN Bing-hui, LI Liu-fen, GONG Sheng-wei. Lithogeochemical characteristics of No.5 pipe-like lamprophyre in Ningxiang, Hunan province[J]. *Resources Survey Environment*, 2009, 30(3): 180–187.
- [15] 王岳军, 范蔚茗, 郭锋. 湘东南中生代闪长质小岩体的锆石 U-Pb 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 D*, 2001, 31(9): 745–751.
- [16] 姚军明, 华仁民, 林锦富. 湘南宝山矿床 REE、Pb-Sr 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-Sr isotope geochemistry and Rb-Sr isochron age of pyrites in the Baoshan deposit, South Hunan Province, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80(7): 1045–1054.
- [17] 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.
- [18] 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 Xing. 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.
- [19] 全铁军, 孔 华, 费利东, 王 高, 李 欢, 吴城明. 宝山花岗闪长斑岩的岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素制约[J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22(3): 611–621.
- QUAN Tie-jun, KONG Hua, FEI Li-dong, WANG Gao, LI Huan, WU Cheng-ming. Petrogenesis of the granodiorites in Baoshan deposit: Constraints from petrochemistry, Zircon U-Pb Chronology and Hf Isotope[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(3): 611–621.
- [20] 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.
- [21] 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(增刊): 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(S1): 26–30.
- [22] ANDERSEN T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chem Geol*, 2002, 192: 59–791.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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 of mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1/2): 537–571.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] WINCHESTER J A, FLOYD P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 1977, 20(supp): 325–343.
- [29] JAGOUTZ E, PALME H. The abundances of major, minor and trace elements in the earth's as derived from primitive ultramafic nodules Proc[J]. *Lunar and Planet. Geochim Cosmochim Acta*, 10(supp): 2031–2050.
- [30] ROCK N M S. *Lamprophyres*[M]. Glasgow and London: Blackie, 1990: 77–156.
- [31] SUN S S, McDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[M]. SAUNDERS A D, NORRY M J, eds. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42: 313–345.
- [32] 赵振华. 微量元素地球化学原理[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 112–169.
- ZHAO Zhen-huan. The principle of trace elements geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1997: 112–164.
- [33] 刘 燊, 胡瑞忠, 赵军红, 冯彩霞, 钟 宏, 曹建劲, 史丹妮. 胶北晚中生代煌斑岩的岩石地球化学特征及其成因研究[J]. *岩石学报*, 2005, 21(3): 947–958.
- LIU Sun, HU Rui-zhong, ZHAO Jin-hong, FENG Cai-xia, ZHONG Hong, CAO Jianjin, SHI Danni. Geochemical characteristics and petrogenetic Investigation of the Late Mesozoic lamprophyres of Jiaobei, Shandong Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(3): 947–958.
- [34] ZHOU Xin-ming, LI Wu-xian. Origin of Late Mesozoic igneous rock in Southeastern China: Implication for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas[J]. *Tectonophysics*, 2000, 326(3/4): 269–287.
- [35] PEARCE J A, NORRY M J. Petrogenetic Implications of Ti, Zr, Y and Nb Variations in Volcanic Rocks[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1979, 69: 33–47.
- [36] MESCHÉDE M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. *Chemical Geology*, 1986, 56: 207–218.
- [37] 黄智龙, 王联魁, 朱成明. 云南老王寨金矿区煌斑岩的成因: 稀土元素研究[J]. *高校地质学报*, 1996, 2(1): 100–111.

- HUANG Zhi-long, WANG Lian-kui, ZHU Cheng-ming. A study on rare earth elements and the genesis of lamprophyres in Laowangzhai gold deposit area, Yunnan[J]. Geological Journal of Universities, 1996, 2(1): 100–111.
- [38] 翟 淳. 论煌斑岩的成因模式[J]. 地质论评, 1981, 27(6): 527–532.
- ZHAI Chun. On the model for the origin of lamprophyres[J]. Geological Review, 1981, 27(6): 527–532.
- [39] TAYLOR S R, MCLENNAN S M. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Blackwell, 1985: 312.
- [40] WEAVER B L. The origin of ocean island basalt end-member compositions: Trace element and isotope constraints[J]. Earth Planet Sci Lett, 1991, 104(2/4): 381–397.
- [41] 赵振华, 包志伟, 张伯友. 湘南中生代玄武岩类地球化学特征[J]. 中国科学 D 辑, 1998, 28(增刊): 7–14.
- ZHAO Zhen-hua, BAO Zhi-wei, ZHANG Bo-you. Geochemical characteristics of Mesozoic basalt series from south Hunan province[J]. Science in China D, 1998, 28(suppl.): 7–14.
- [42] MILLER C, SEHUSTER R, KLOTZLI U, FRANK W, PURSCHELLER F. Post-collisional potassic and ultrapotassic magmatism in SW Tibet: Geochemical and Sr-Nd-Pb-O isotopic constraints for mantle source characteristics and petrogenesis[J]. Journal of Petrology, 1999, 40(9): 1399–1424.
- (编辑 何学锋)