



豫西蒿坪沟岩体岩石地球化学、锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素组成

刘文毅^{1,2,3}, 刘继顺^{1,2}, 何美香³, 丁云河³, 李永峰⁴

(1. 中南大学 有色金属成矿预测与地质环境监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;

3. 河南省有色金属地质矿产局第七地质大队, 郑州 450016;

4. 河南省有色金属矿产探测工程技术研究中心, 郑州 450016)

摘 要: 蒿坪沟岩体位于华北陆块南缘沙沟-蒿坪沟银铅矿区内, 主要岩性为黑云母花岗斑岩和花岗斑岩。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示, 黑云母花岗斑岩加权平均年龄为(128±1) Ma, 花岗斑岩加权平均年龄为(110±1)~(112±1) Ma, 表明岩体为燕山期多期次岩浆作用的产物。岩石地球化学研究表明, 两期岩体为钾玄岩-高钾钙碱性系列, A/CNK 值为 1.03~1.09, 属弱过铝质花岗岩类; 轻重稀土元素分馏显著, 具中等-弱的负 Eu 异常, 均为 I 型花岗岩。锆石 Hf 同位素研究表明, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 变化范围为-22.9~-2.1, 均为负值, t_{DM2} 为 2617~1304 Ma。锆石 Hf 同位素组成以及蒿坪沟岩体中出现的继承锆石, 表明其源区物质主要来源于前寒武纪变质基底岩石, 在侵位过程中可能受到了上地壳的混染。结合区域地质背景, 蒿坪沟岩体形成于扬子陆块与华北陆块碰撞造山后的陆内伸展环境。

关键词: 蒿坪沟岩体; 豫西; 岩石地球化学; 锆石 U-Pb 年龄; Hf 同位素

文章编号: 1004-0609(2019)-07-1551-16

中图分类号: P597

文献标志码: A

豫西地区沙沟-蒿坪沟-铁炉坪银铅矿带是秦岭造山带内重要的银资源地之一, 分布有沙沟、铁炉坪、蒿坪沟、月亮沟、龙门店、范庄等银铅矿床, 这些银铅矿床大都位于熊耳山矿集区西部。熊耳山矿集区发育有大量中生代花岗质岩体, 其中呈岩基产出的包括花山岩体、五丈山岩体以及金山庙(蒿坪)岩体等, 呈小斑岩体产出的包括祁雨沟、雷门沟和蒿坪沟岩体等。该区以往岩体的研究工作主要集中在花山、五丈山和金山庙等岩基上^[1-5], 而祁雨沟、雷门沟和蒿坪沟等小斑岩体研究程度较低^[6-9]。蒿坪沟斑岩体位于沙沟和蒿坪沟矿区内, 作为沙沟-蒿坪沟-铁炉坪银铅矿带中唯一较大的花岗斑岩体, 对其开展研究工作就尤为重要。

前人对于蒿坪沟岩体的研究工作主要集中在同位素定年。王志光等^[10]采取 K-Ar 法测得蒿坪沟花岗斑岩年龄为 110 Ma, 叶会寿^[5]采取 SHRIMP 锆石 U-Pb 法测得蒿坪沟岩体东南部黑云母花岗斑岩(HPG-B10)年龄为(133.5±1.4) Ma。梁涛等^[9]采取 LA-ICP-MS 锆

石 U-Pb 法测得蒿坪沟岩体黑云母花岗斑岩(HPG304)年龄为(130.5±1.1) Ma。但是他们只采集了一个样品进行同位素定年测试, 没有将蒿坪沟岩体中的黑云母花岗斑岩和花岗斑岩分别采样, 定年样品选取代表性不强。本文通过对蒿坪沟岩体岩石地球化学、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄以及锆石 Hf 同位素研究, 参照前人研究成果, 精确厘定了蒿坪沟岩体的形成时代, 并探讨了蒿坪沟岩体岩石成因类型、岩浆源区和成岩构造背景。

1 区域地质背景

蒿坪沟岩体位于熊耳山矿集区银铅-金-钼矿带西端, 区域出露地层有太华群、熊耳群及官道口群。太华群地层变质程度深, 属中深变质的角闪岩相, 局部达麻粒岩相, 岩石组成主要为各种片麻岩、混合岩、

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项项目(2011111007-2); 河南省有色金属地质矿产局科研项目(YSDK2016-02)

收稿日期: 2018-05-03; 修订日期: 2018-10-08

通信作者: 刘继顺, 教授, 博士; 电话: 13607489990; E-mail: jsliu@csu.edu.cn

斜长角闪岩、变粒岩、浅粒岩以及大理岩等。熊耳群不整合覆盖于太华群之上,为一套中基性-中酸性火山岩,主要岩性为紫红色-灰黑色玄武安山岩、安山(玢)岩、英安岩、流纹(斑)岩、火山角砾岩和火山碎屑岩。官道口群为一套碎屑岩-碳酸盐岩组合,主要岩性有砂岩、页岩、白云岩、砂泥砾岩和泥板岩等。

受板块边界深断裂和秦岭褶皱带长期活动的影响,区域上断裂构造比较发育,主要为北北西和北东向两组,两组断裂的交汇部位控制了燕山期中酸性小岩体的分布。区内岩浆岩广泛发育,岩浆作用贯穿本区整个地质演化历史,具有长期性、多次性,其中以燕山期花岗质岩浆活动最为强烈。燕山期花岗质岩体分为两类,一类为大岩基,另一类为小岩体。代表性大岩基有花山、五丈山、金山庙等,岩性以斑状-中粗粒黑云母角闪花岗岩、斑状正长花岗岩和黑云母二长花岗岩为主。小斑岩体有雷门沟、祁雨沟、蒿坪沟等。区内分布着 100 多个大、中、小型矿床及矿(化)点,主要包括:上宫金矿、祁雨沟金矿、沙沟银铅矿、铁炉坪银铅矿、蒿坪沟银铅矿、雷门沟钼矿、大石门沟钼矿等(见图 1)。

2 岩体地质特征

蒿坪沟岩体出露于故县乡蒿坪沟口,呈不规则椭圆状。出露长约 2000~3000 m,宽 300~400 m,出露面积约 0.8 km²(见图 2),为一小岩株。长轴方向为北西-南东向,向北东拱起,南段产状 135°∠60°,北段产状近于直立。岩体北部为拆离断层,南部与太华群混合岩化黑云斜长片麻岩及混合岩化斜长角闪岩呈侵入接触关系。根据野外岩性穿插关系及岩相学特征可分为两个侵入期次,第一期侵入的黑云母花岗斑岩以及第二期的花岗斑岩。

其中,黑云母花岗斑岩主要分布在蒿坪沟岩体南部,灰白色-浅肉红色,斑状结构,块状构造。斑晶含量为 13%~22%,以钾长石、石英和斜长石为主,其中钾长石粒径以 5 mm×10 mm~10 mm×15 mm 为主,晶型以半自形为主,少量为自形晶,石英和斜长石粒径明显较小,以 5 mm×5 mm 为主,石英斑晶多呈他形粒状,斜长石斑晶多呈半自形-他形晶。基质含量

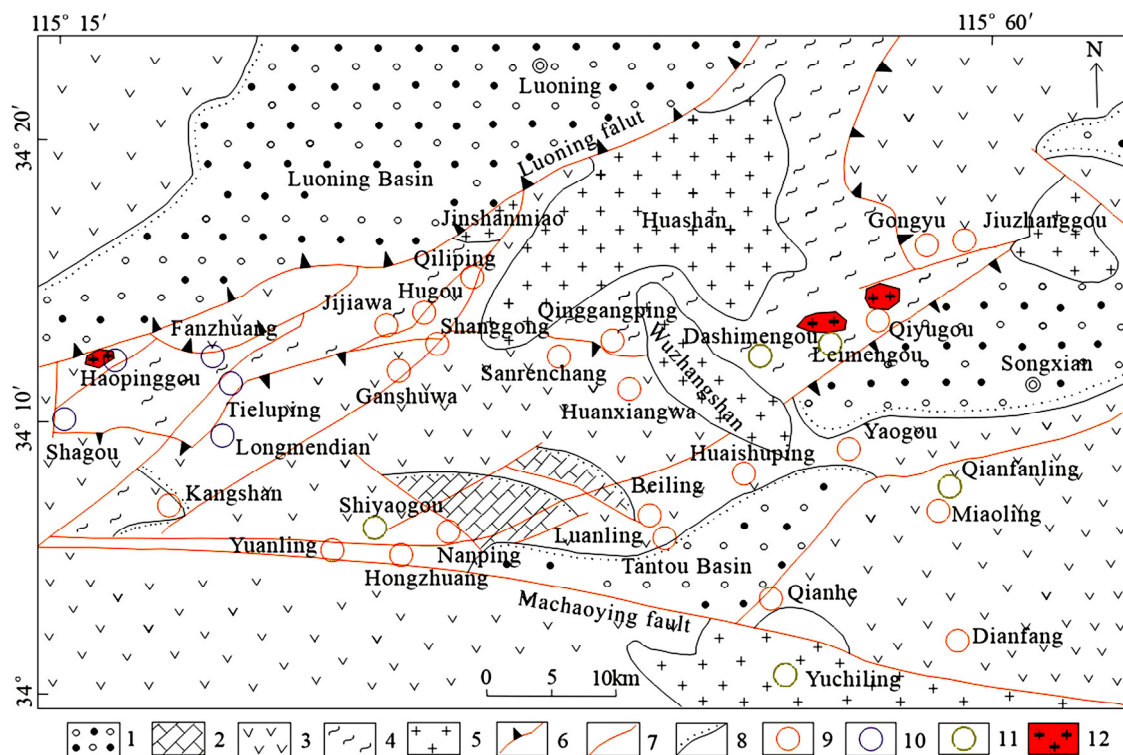


图 1 熊耳山矿集区地质简图(底图据文献[11]修改)

Fig. 1 Simplified geologic map of Xiong'er Mountain ore district(modified from Ref.[11]): 1—Quaternary sediments; 2—Middle Proterozoic Guandaokou Group quartz sandstone, dolomitic marble; 3—Middle Proterozoic Xiong'er Group volcanic rock; 4—Neo-Archaean Taihua Group gneiss; 5—Mesozoic granite; 6—Detachment fault; 7—Fault; 8—Unconformity; 9—Gold deposit; 10—Ag-Pb-Zn deposit; 11—Molybdenum deposit; 12—Granite porphyry

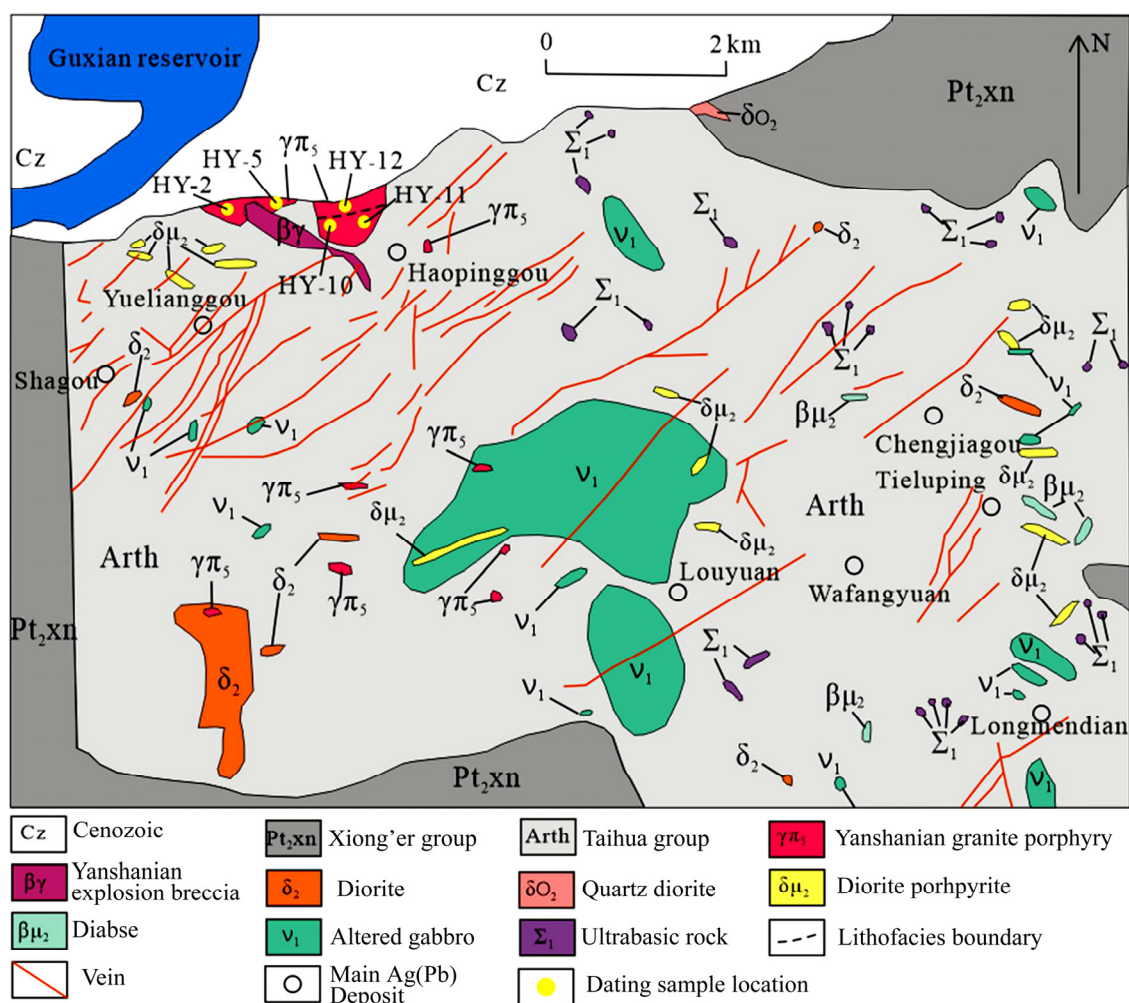


图 2 蒿坪沟岩体地质简图(底图据文献[9]修改)

Fig. 2 Simplified geologic map of Haopinggou pluton (modified from Ref.[9])

70%~80%，主要矿物为钾长石(30%~40%)、斜长石(10%~15%)和石英(25%~40%)，暗色矿物以黑云母(5%~10%)为主，局部发育黄铁矿，副矿物以磁铁矿、磷灰石等为主。

花岗斑岩主要分布在蒿坪沟岩体北部，呈灰白色、肉红色，斑状结构，块状构造。斑晶占岩石的25%~40%，其成分为钾长石、斜长石、石英。其中钾长石呈半自形板状，部分被熔化成港湾状，表面高岭土化，粒径粗大，一般为4 mm×8 mm。斜长石呈半自形板状，常被熔化成港湾状，聚片双晶发育，表面常蚀变成绢云母，粒径一般为3 mm×6 mm。石英一般为他形粒状，常被熔蚀成浑圆状，粒径一般为2 mm×3 mm。石英中常包裹钾长石及斜长石。基质含量60%~70%，中细粒-微粒结构，主要由钾长石、石英及斜长石组成。副矿物以黄铁矿、磁铁矿、磷灰石等为主，含量约1%。

3 样品采集及分析方法

本文共采集样品5件，采样位置如图2所示。其中3件来自蒿坪沟岩体北部的花岗斑岩，编号HY-2、HY-5、HY-12，2件来自蒿坪沟岩体南部的黑云母花岗斑岩，编号HY-10、HY-11。

样品的主量、稀土元素的测试分析在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成，测试仪器分别为Philips PW2404 X荧光光谱仪和Finnigan-MAT有限公司制造的ELEMENT-1等离子质谱仪，精度分别优于1%和5%。

锆石分选工作由中国地质科学院廊坊物化探研究所完成。首先将新鲜样品粉碎至半径150~180 μm，并通过重力和磁选方法进行分离，最后在双目镜下挑选出锆石颗粒。将分选出的锆石颗粒置于环氧树脂做成

样品靶,对样品靶抛光,再对锆石进行透射光、反射光和阴极发光(CL)照相。锆石阴极发光(CL)的图像采集在中国地质科学院北京离子探针中心完成。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分析在中国地质科学院矿产资源研究所进行,采用的仪器为 Finnigan Neptune 型多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)以及与之配套的 New wave UP 213 激光剥蚀系统,采用氦气作为剥蚀物质载气,激光剥蚀光斑直径可在 10~150 μm 之间调节,试验选择标样为 91500。详细的实验流程及详细分析流程见文献[12]。锆石 U-Pb 谐和图和年龄处理均采用 ISOPLOT 完成。

锆石 Lu-Hf 同位素原位测试在中国科学院地质与地球物理研究所配备的 Neptune MC-ICP-MS 和 193 nm 激光取样系统上完成,分析点与 U-Pb 定年分析点为同一位置。分析时的激光束直径为 63 μm ,激光剥蚀时间为 26 s,分析过程中用 91500 为外标,详细的分析流程及数据处理见文献[13]。

计算 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和模式年龄采用的参数^[14-17]如下:
 $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0}=0.282772^{[14]}, (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}=0.0332, (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}=0.28325^{[15]}, (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}=0.0384, (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_c=0.015^{[16]}, \lambda=1.867\times 10^{-11}\text{ a}^{-1[17]}$ 。

4 分析结果

4.1 岩石地球化学特征

4.1.1 主量元素地球化学特征

样品的主量元素分析结果见表 1。
由表 1 可以得出,蒿坪沟岩体中黑云母花岗斑岩的 SiO_2 含量变化于 70.2%~72.7%之间,平均值为 71.5%,属于酸性岩类; Al_2O_3 含量为 13.2%~14.9%,平均值为 14.1%;岩石全碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)含量为 7.16%~7.73%,平均值为 7.45%; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 2.33~3.68,平均值为 3.01; MgO 含量为 0.51%~0.66%,

CaO 含量为 2.33%~2.59%,里特曼指数 σ 为 1.71~2.19,碱度率 $\text{AR}=2.58\sim 2.71$,铝饱和指数(A/CNK)= $1.03\sim 1.04$;花岗斑岩的 SiO_2 含量变化于 70.7%~72.6%之间,平均 71.7%,属于酸性岩类, Al_2O_3 含量为 13.8%~14.2%,平均 14.0%;岩石全碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)含量为 6.67%~7.13%,平均 6.85%; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 2.18~2.65,平均值为 2.44; MgO 含量为 0.36%~0.59%, CaO 含量为 2.43%~2.49%,里特曼指数 σ 为 1.50~1.82,碱度率 $\text{A.R.}=2.38\sim 2.49$,铝饱和指数(A/CNK)= $1.05\sim 1.09$ 。

在 $\text{SiO}_2\text{-A.R.}$ 图解(见图 3)中,黑云母花岗斑岩分析样品落入碱性-钙碱性岩区域,而花岗斑岩分析样品落入钙碱性岩区域;在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解(见图 4(a))中,黑云母花岗斑岩分析样品落入钾玄岩系列,而花岗斑岩分析样品则落入高钾钙碱性系列;在 $\text{A}/\text{NK-A}/\text{CNK}$ 图解(见图 4(b))中所有样品均落入过铝质区域。

4.1.2 稀土元素分布特征

蒿坪沟岩体稀土元素分析结果见表 2。分析结果显示,黑云母花岗斑岩的稀土元素总量 $\sum\text{REE}$ 在 $(189.70\sim 236.64)\times 10^{-6}$ 之间,平均 213.17×10^{-6} , $\text{LREE}=(177.43\sim 222.98)\times 10^{-6}$, $\text{HREE}=(12.27\sim 13.66)\times 10^{-6}$, $\text{LREE}/\text{HREE}=14.46\sim 16.32$, $\delta\text{Eu}=0.58\sim 0.64$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=18.77\sim 24.31$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=5.88\sim 6.14$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}=2.00\sim 2.47$;花岗斑岩的稀土元素总量 $\sum\text{REE}$ 在 $(222.29\sim 247.72)\times 10^{-6}$ 之间,平均 234.38×10^{-6} , $\text{LREE}=(208.99\sim 230.93)\times 10^{-6}$, $\text{HREE}=(13.30\sim 16.79)\times 10^{-6}$, $\text{LREE}/\text{HREE}=13.75\sim 16.99$, $\delta\text{Eu}=0.65\sim 0.73$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=21.48\sim 27.91$, $(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=4.93\sim 6.36$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}=2.52\sim 2.72$ 。通过对比稀土元素分析结果可以得出,蒿坪沟岩体中黑云母花岗斑岩和花岗斑岩稀土元素特征较为一致,轻重稀土元素分馏较明显,轻稀土分异显著,重稀土分异程度低,具中等-弱的负 Eu 异常。在稀土元素球粒陨石标准化配分模式(见图 5)上,蒿坪沟岩体呈右倾斜的曲线,表明轻稀土元素富集,重稀土元素亏损。

表 1 蒿坪沟岩体主量元素分析结果

Table 1 Major elements composition of Haopinggou pluton

Rock style	Sample No.	Mass fraction/%												
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Sum
Biotite granite porphyry	HY-10	70.2	0.29	14.9	1.19	1.42	0.15	0.66	2.59	2.32	5.41	0.21	0.57	99.91
	HY-11	72.7	0.32	13.2	0.98	0.84	0.09	0.51	2.33	1.53	5.63	0.12	0.98	99.23
Granite porphyry	HY-2	72.6	0.43	13.9	1.75	0.67	0.11	0.59	2.43	1.91	4.76	0.13	0.63	99.91
	HY-5	70.7	0.27	14.2	1.89	1.32	0.14	0.36	2.49	2.24	4.89	0.15	0.84	99.49
	HY-12	71.8	0.34	13.8	1.04	1.4	0.16	0.43	2.46	1.85	4.91	0.14	0.94	99.27

LOI: Loss of ignition.

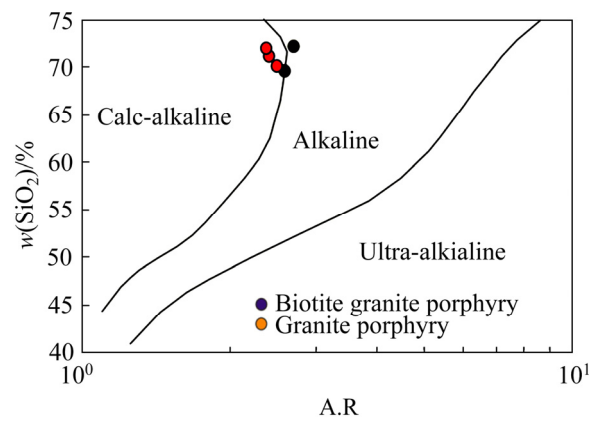


图 3 蒿坪沟岩体 SiO₂-A.R 图解
Fig. 3 SiO₂ vs A.R diagram of Haopinggou pluton

4.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

蒿坪沟黑云母花岗岩斑岩(HY-11)锆石颜色从无色透明到浅黄色, 锆石呈长柱状或短柱状, 多数较自形, 粒径在 100~200 μm, 长宽比约为 2:1~3:1(见图 6)。从表 3 可以看出, 21 颗锆石的 Th/U 为 0.19~1.75, 具有典型的岩浆锆石特征。其中 14 颗锆石的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄为 126~129 Ma。在 ²⁰⁷Pb/²³⁵U-²⁰⁶Pb/²³⁸Pb 谐和图上, 所有测试点均投影在谐和线上或谐和线附近(见图 7), 变化幅度较小, 表明被测锆石未遭受明显的后期热事件影响, 其 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为(128±1) Ma (MSWD=0.20)(见图 7), 可代表岩体的结晶年龄。1 颗锆石的 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 表面年龄为 1716 Ma, 可能为继承锆石。

表 2 蒿坪沟岩体中稀土元素的分析结果

Table 2 Rare earth elements composition of Haopinggou pluton

Sample No.	Mass fraction/10 ⁻⁶										
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er
HY-10	48.4	81.8	9.07	31.9	5.31	0.95	4.48	0.62	2.75	0.63	1.37
HY-11	61	102	11.2	41.1	6.41	1.27	5.38	0.73	3.13	0.66	1.48
HY-2	64.6	104	11.7	41.8	6.56	1.38	5.44	0.76	3.21	0.62	1.35
HY-5	56.6	96.3	10.7	39.3	6.14	1.37	5.33	0.72	3.18	0.66	1.47
HY-12	58.4	93.4	10.6	39.2	6.02	1.37	5.2	0.7	3.13	0.66	1.41
WZG-1997 ^[10]	59	104	12	46.7	7.73	1.5	6	0.89	3.93	0.83	2.03

Sample No.	Mass fraction/10 ⁻⁶						LREE/HREE	δEu	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N
	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE	HREE					
HY-10	0.27	1.85	0.3	189.7	177.43	12.27	14.46	0.58	18.77	5.88	2
HY-11	0.25	1.8	0.23	236.64	222.98	13.66	16.32	0.64	24.31	6.14	2.47
HY-2	0.26	1.66	0.24	243.58	230.04	13.54	16.99	0.69	27.91	6.36	2.71
HY-5	0.26	1.62	0.26	223.91	210.41	13.5	15.59	0.72	25.06	5.95	2.72
HY-12	0.25	1.7	0.25	222.29	208.99	13.3	15.71	0.73	24.64	6.26	2.53
WZG-1997 ^[10]	0.84	1.97	0.3	247.72	230.93	16.79	13.75	0.65	21.48	4.93	2.52

蒿坪沟花岗斑岩(HY-5)锆石颜色从无色透明到浅黄色, 锆石呈长柱状或短柱状, 多数呈半自形-自形, 粒径在 100~150 μm, 长宽比约为 2:1~3:1(见图 6)。从表 4 可以看出, 24 颗锆石的 Th/U 为 0.31~0.91, 具有

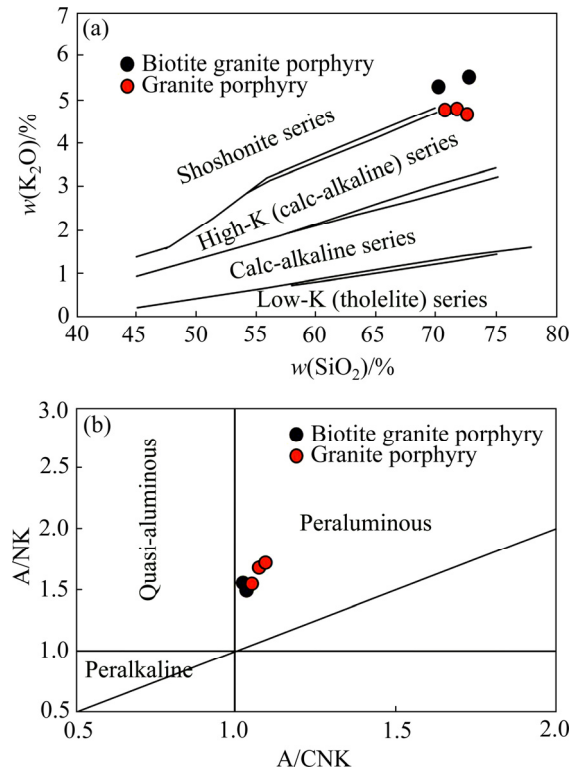


图 4 蒿坪沟岩体 K₂O vs SiO₂ 和 A/NK vs A/CNK 图解
Fig. 4 K₂O vs SiO₂(a) and A/NK vs A/CNK(b) diagrams of Haopinggou pluton

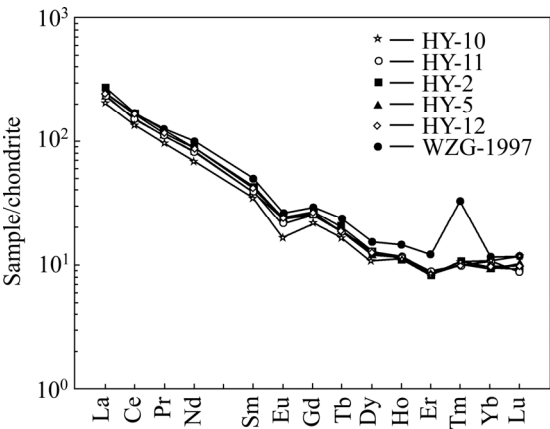


图 5 蒿坪沟岩体球粒陨石标准化稀土元素分布模式

Fig. 5 Chondrite-normalised REE patterns of Haopinggou pluton

典型的岩浆锆石特征。其中 18 颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 107~113 Ma，加权平均年龄(110±1) Ma (MSWD=3.6)(见图 8(a))。6 颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄集中在 133~925 Ma，可能为继承锆石。蒿坪沟花岗斑岩(HY-12)锆石颜色从无色透明到浅黄色，锆石呈长柱状或短柱状，多数较自形，粒径在 100~150 μm，长宽比约为 2:1~4:1(见图 6)。从表 5 可以看出，20 颗锆石的 Th/U 为 0.21~1.61，具有典型的岩浆锆石特

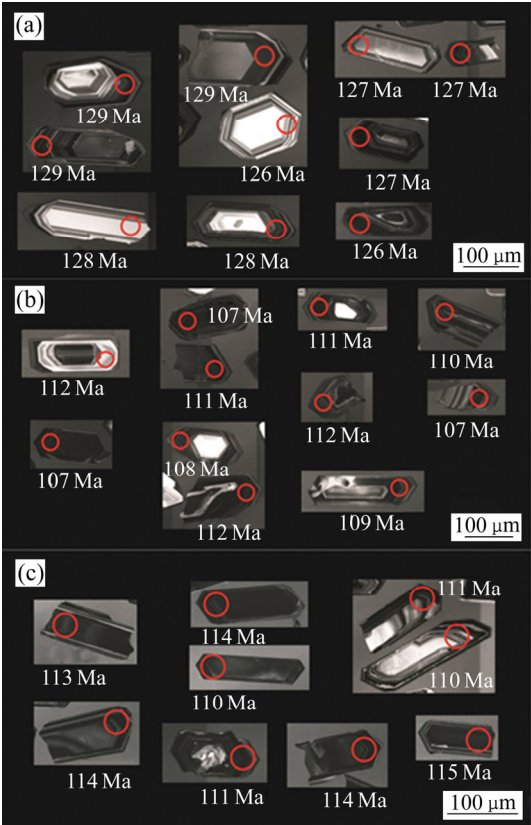


图 6 蒿坪沟岩体代表性锆石阴极发光图

Fig. 6 CL images of representative zircons from Haopinggou pluton: (a) HY-11; (b) HY-5; (c) HY-12

表 3 蒿坪沟岩体样品 HY-11 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果

Table 3 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of sample HY-11 from Haopinggou pluton

Sample No.	$^{232}\text{Th}/10^{-6}$	$^{238}\text{U}/10^{-6}$	Th/U	Isotope ratio						Age/Ma					
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
					σ		σ		σ	Age	σ	Age	σ	Age	σ
1	1708	1990	0.86	0.04581	0.00192	0.12824	0.00580	0.02026	0.00039	12	60	123	5	129	2
2	1238	1923	0.64	0.04929	0.00189	0.13667	0.00621	0.02023	0.00063	161	53	130	6	129	4
3	147	628	0.23	0.10511	0.00242	4.98177	0.11861	0.34107	0.00353	1716	29	1816	20	1892	17
4	700	1482	0.47	0.05047	0.00195	0.14203	0.00607	0.02023	0.00031	217	70	135	5	129	2
5	271	299	0.91	0.04605	0.00297	0.12543	0.00775	0.01976	0.00036		142	120	7	126	2
6	410	234	1.75	0.05374	0.00370	0.14506	0.00942	0.02009	0.00064	360	90	138	8	128	4
7	269	1249	0.22	0.04946	0.00164	0.13746	0.00552	0.02013	0.00052	170	49	131	5	128	3
8	731	3054	0.24	0.05016	0.00269	0.13724	0.00675	0.01984	0.00042	202	124	131	6	127	3
10	2347	3498	0.67	0.05269	0.00124	0.10862	0.00242	0.01499	0.00022	316	26	105	2	96	1
12	940	1766	0.53	0.04612	0.00220	0.12530	0.00564	0.01970	0.00031	4	103	120	5	126	2
13	858	2968	0.29	0.05190	0.00122	0.12135	0.00284	0.01688	0.00016	281	36	116	3	108	1
15	2428	2663	0.91	0.04944	0.00132	0.11992	0.00324	0.01749	0.00016	169	46	115	3	112	1
16	2349	6274	0.37	0.04933	0.00123	0.11638	0.00308	0.01699	0.00017	163	43	112	3	109	1
17	1532	4444	0.34	0.04942	0.00154	0.11571	0.00345	0.01698	0.00015	168	74	111	3	109	1
20	3295	6359	0.52	0.04920	0.00110	0.11896	0.00259	0.01747	0.00019	158	31	114	2	112	1
21	910	4803	0.19	0.05511	0.00146	0.15398	0.00543	0.02001	0.00040	417	44	145	5	128	3
23	865	744	1.16	0.05074	0.00183	0.13930	0.00500	0.01997	0.00032	229	53	132	4	127	2
24	870	2649	0.33	0.04825	0.00141	0.13141	0.00450	0.01984	0.00046	111	41	125	4	127	3
26	832	2751	0.30	0.04605	0.00285	0.12612	0.00668	0.01986	0.00064		136	121	6	127	4
27	868	1723	0.50	0.04887	0.00129	0.13552	0.00425	0.02007	0.00041	141	38	129	4	128	3
30	2004	2257	0.89	0.05199	0.00158	0.14078	0.00540	0.01987	0.00057	285	42	134	5	127	4

表 4 蒿坪沟岩体样品 HY-5 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果

Table 4 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of sample HY-5 from Haopinggou pluton

Sample No.	²³² Th/ 10 ⁻⁶	²³⁸ U/ 10 ⁻⁶	Th/U	Isotope ratio						Age/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	
				σ	σ	σ	σ	σ	σ	Age	σ	Age	σ	Age	σ
2	933	2990	0.31	0.04888	0.00134	0.11709	0.00330	0.01729	0.00026	142	38	112	3	111	2
3	228	255	0.89	0.04878	0.00285	0.13913	0.00789	0.02086	0.00030	137	102	132	7	133	2
4	1686	3635	0.46	0.04959	0.00122	0.11513	0.00279	0.01676	0.00014	176	40	111	3	107	0.9
5	1416	4742	0.30	0.04778	0.00103	0.11560	0.00270	0.01744	0.00022	88	32	111	2	111	1
7	168	363	0.46	0.05164	0.00448	0.12533	0.01112	0.01750	0.00043	269	155	120	10	112	3
8	2669	4310	0.62	0.04822	0.00098	0.11181	0.00232	0.01667	0.00013	110	34	108	2	107	0.8
9	596	2395	0.25	0.08619	0.00208	1.83358	0.04117	0.15430	0.00135	1342	48	1058	15	925	8
10	208	441	0.47	0.04809	0.00237	0.14143	0.00689	0.02127	0.00030	104	83	134	6	136	2
11	661	1664	0.40	0.04651	0.00295	0.10867	0.00629	0.01694	0.00044	24	140	105	6	108	3
12	647	3005	0.22	0.04952	0.00130	0.11971	0.00335	0.01750	0.00019	172	45	115	3	112	1
13	177	194	0.91	0.05123	0.00340	0.14621	0.01005	0.02094	0.00039	251	123	139	9	134	2
15	321	449	0.72	0.05080	0.00271	0.14576	0.00792	0.02097	0.00030	232	99	138	7	134	2
17	1610	4930	0.33	0.04882	0.00149	0.11619	0.00399	0.01730	0.00024	139	54	112	4	111	2
19	788	3447	0.23	0.04986	0.00135	0.12072	0.00335	0.01752	0.00015	188	49	116	3	112	0.9
20	1839	3478	0.53	0.04849	0.00113	0.11440	0.00275	0.01705	0.00013	123	42	110	3	109	0.8
21	544	1726	0.32	0.04994	0.00159	0.11950	0.00492	0.01722	0.00037	192	57	115	4	110	2
22	2246	3888	0.58	0.04947	0.00110	0.11458	0.00260	0.01673	0.00015	170	36	110	2	107	0.9
23	819	2015	0.41	0.04883	0.00170	0.11702	0.00475	0.01725	0.00032	139	60	112	4	110	2
24	2803	4517	0.62	0.05015	0.00110	0.11928	0.00267	0.01715	0.00014	202	36	114	2	110	0.9
26	218	328	0.66	0.05032	0.00214	0.17840	0.00761	0.02580	0.00035	210	74	167	7	164	2
27	721	1768	0.41	0.04758	0.00131	0.11650	0.00344	0.01765	0.00021	78	47	112	3	113	1
28	340	1947	0.17	0.04818	0.00146	0.11450	0.00348	0.01715	0.00014	108	56	110	3	110	0.9
29	1763	3870	0.46	0.04791	0.00101	0.11488	0.00240	0.01729	0.00014	95	34	110	2	111	0.9
30	1042	2268	0.46	0.05303	0.00166	0.12653	0.00431	0.01727	0.00029	330	47	121	4	110	2

表 5 蒿坪沟岩体样品 HY-12 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果

Table 5 LA-ICP-MS zircon U-Pb data of sample HY-12 from Haopinggou pluton

Sample No.	²³² Th/ 10 ⁻⁶	²³⁸ U/ 10 ⁻⁶	Th/U	Isotope ratio						Age/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	
				σ	σ	σ	σ	σ	σ	Age	σ	Age	σ	Age	σ
1	2426	3779	0.64	0.04874	0.00116	0.11681	0.00259	0.01739	0.00019	135	32	112	2	111	1
5	600	558	1.08	0.05016	0.00196	0.13776	0.00517	0.01991	0.00024	202	64	131	5	127	2
6	1403	4156	0.34	0.05029	0.00118	0.12424	0.00288	0.01786	0.00020	209	33	119	3	114	1
9	1146	3124	0.37	0.05774	0.00149	0.13613	0.00345	0.01706	0.00018	520	37	130	3	109	1
11	648	3076	0.21	0.05120	0.00151	0.12590	0.00380	0.01773	0.00024	250	45	120	3	113	1
12	3323	4599	0.72	0.05116	0.00277	0.12177	0.00644	0.01726	0.00021	248	126	117	6	110	1
13	1820	4085	0.45	0.06025	0.00135	0.12560	0.00289	0.01500	0.00019	613	28	120	3	96	1
14	959	2734	0.35	0.04987	0.00145	0.12514	0.00580	0.01784	0.00046	189	61	120	5	114	3
16	964	3666	0.26	0.04898	0.00160	0.11786	0.00444	0.01724	0.00034	147	52	113	4	110	2
17	719	1925	0.37	0.04975	0.00166	0.12148	0.00463	0.01777	0.00049	184	43	116	4	114	3
18	186	199	0.93	0.05544	0.00642	0.13306	0.01488	0.01777	0.00070	430	180	127	13	114	4
19	2675	1661	1.61	0.05021	0.00162	0.12627	0.00650	0.01799	0.00058	205	63	121	6	115	4
20	816	3658	0.22	0.05105	0.00126	0.12644	0.00325	0.01783	0.00018	243	41	121	3	114	1
23	131	200	0.66	0.05289	0.00348	0.17272	0.01099	0.02395	0.00041	324	113	162	10	153	3
24	1459	2159	0.68	0.04833	0.00125	0.11849	0.00333	0.01768	0.00024	116	41	114	3	113	2
26	1080	1873	0.58	0.04838	0.00191	0.12007	0.00589	0.01778	0.00049	118	65	115	5	114	3
27	304	394	0.77	0.10690	0.00221	4.88515	0.09794	0.32937	0.00357	1747	21	1800	17	1835	17
28	1642	6636	0.25	0.05225	0.00263	0.11819	0.00588	0.01641	0.00013	296	118	113	5	105	0.8
29	636	1583	0.40	0.04775	0.00264	0.11646	0.00880	0.01732	0.00054	87	110	112	8	111	3
30	599	1704	0.35	0.05004	0.00234	0.11904	0.00541	0.01725	0.00019	197	109	114	5	110	1

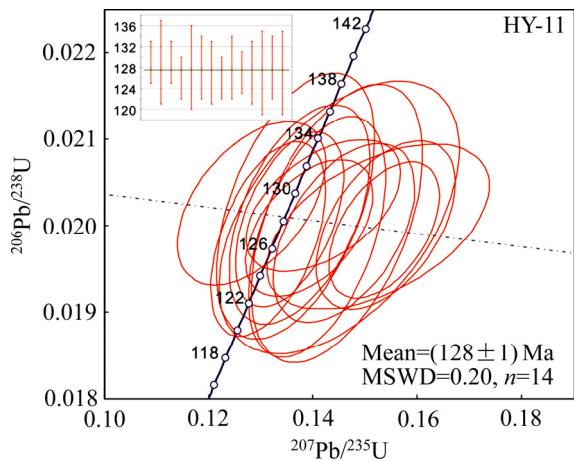


图 7 蒿坪沟黑云母花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 7 Zircon U-Pb concordian of Haopinggou biotite granite porphyry

征。15 颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 109~115 Ma, 加权平均年龄(112 ± 1 Ma) (MSWD=2.1)(见图 8(b))。2 颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄分别为 153 Ma、1747 Ma, 可能为继承锆石。两件样品(HY-5、HY-12)的定年结果相一致, 可代表岩体的成岩年龄。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明, 蒿坪沟岩体形成于(110 ± 1)~(128 ± 1) Ma, 结合前人^[5, 9-10]测定的蒿坪沟岩体年龄得出, 该岩体分两期侵入, 第一期在 130 Ma 左右, 第二期在 110 Ma 左右。

4.3 锆石 Hf 同位素

锆石 Hf 同位素结果见表 6~8。所有测试点的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.000541~0.002816 之间, 大部分

都小于 0.002, 表明锆石在形成以后具有较低的放射成因 Hf 积累, 因而可以用锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值代表锆石

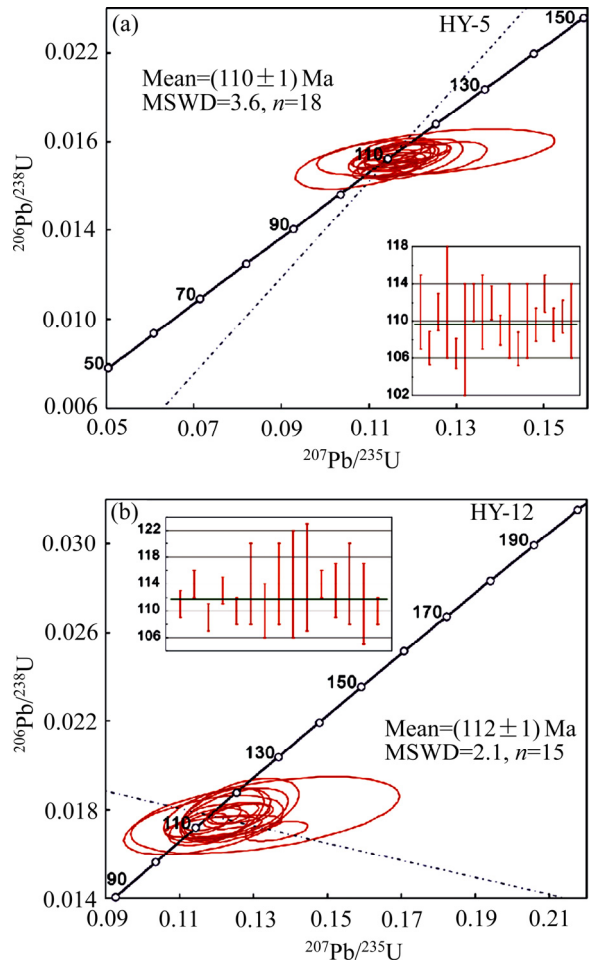


图 8 蒿坪沟花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 8 Zircon U-Pb concordian of Haopinggou granite porphyry: (a) Sample HY-5; (b) Sample HY-12

表 6 蒿坪沟岩体样品 HY-11 锆石 Hf 同位素分析结果

Table 6 Hf isotopic data of zircon of sample HY-11 from Haopinggou pluton

Sample No.	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
1	0.037616	0.001192	0.282388	-10.9	1228	1870	-0.96
2	0.045802	0.001307	0.282558	-4.8	991	1492	-0.96
4	0.036851	0.001089	0.282470	-8.0	1110	1688	-0.97
5	0.021949	0.000618	0.282450	-8.7	1123	1731	-0.98
6	0.019886	0.000605	0.282520	-6.2	1026	1574	-0.98
7	0.022921	0.000811	0.282384	-11.0	1221	1877	-0.98
8	0.037049	0.001305	0.282422	-9.7	1184	1796	-0.96
12	0.043393	0.001329	0.282342	-12.6	1298	1975	-0.96
21	0.038458	0.001292	0.282208	-17.3	1485	2270	-0.96
23	0.042621	0.001249	0.282418	-9.8	1188	1806	-0.96
26	0.071746	0.002816	0.282053	-22.9	1774	2617	-0.92
27	0.038288	0.001579	0.282201	-17.5	1506	2285	-0.95
30	0.048775	0.001680	0.282190	-17.9	1526	2311	-0.95

表 7 蒿坪沟岩体样品 HY-5 锆石 Hf 同位素分析结果

Table 7 Hf isotopic data of zircon of sample HY-5 from Haopinggou pluton

Sample No.	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
2	0.043238	0.001534	0.282363	-12.2	1275	1937	-0.95
4	0.052888	0.001674	0.282316	-13.9	1346	2043	-0.95
5	0.038522	0.001302	0.282352	-12.5	1283	1961	-0.96
7	0.018387	0.000541	0.282418	-10.1	1165	1809	-0.98
8	0.057303	0.002009	0.282211	-17.6	1509	2277	-0.94
11	0.048129	0.001550	0.282281	-15.1	1391	2119	-0.95
12	0.019785	0.000794	0.282275	-15.2	1372	2127	-0.98
17	0.042008	0.001657	0.282273	-15.4	1408	2137	-0.95
19	0.034663	0.001192	0.282310	-14.0	1337	2051	-0.96
20	0.041983	0.001203	0.282306	-14.2	1343	2062	-0.96
21	0.033766	0.001214	0.282346	-12.8	1289	1975	-0.96
22	0.029923	0.001157	0.282229	-16.9	1450	2233	-0.97
23	0.038805	0.001223	0.282332	-13.2	1308	2005	-0.96
27	0.026610	0.000927	0.282284	-14.9	1365	2108	-0.97

表 8 蒿坪沟岩体样品 HY-12 锆石 Hf 同位素分析结果

Table 8 Hf isotopic data of zircon of sample HY-12 from Haopinggou pluton

Sample No.	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
1	0.035417	0.001300	0.282364	-12.1	1265	1934	-0.96
6	0.048576	0.001744	0.282538	-5.9	1032	1548	-0.95
9	0.050992	0.001727	0.282455	-9.0	1150	1735	-0.95
11	0.036437	0.001362	0.282447	-9.1	1150	1749	-0.96
12	0.052401	0.001794	0.282423	-10.1	1198	1806	-0.95
14	0.036079	0.001289	0.282282	-14.9	1381	2113	-0.96
16	0.039341	0.001479	0.282186	-18.4	1523	2328	-0.96
18	0.030361	0.000921	0.282238	-16.5	1429	2209	-0.97
19	0.070507	0.002203	0.282497	-7.4	1105	1641	-0.93
20	0.040262	0.001389	0.282451	-9.0	1146	1740	-0.96
24	0.036070	0.001403	0.282326	-13.4	1323	2018	-0.96
26	0.051242	0.002019	0.282390	-11.2	1253	1878	-0.94
29	0.075416	0.002234	0.282576	-4.7	990	1467	-0.93
30	0.053863	0.001592	0.282647	-2.1	871	1304	-0.95

形成时的比值,探索岩体形成时的成因信息^[18-22]。3 件样品的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 平均值分别为-0.96、-0.96 和-0.95,明显小于镁铁质地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值(-0.34)^[23-24]和硅铝质地壳的 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值(-0.72)^[25]。因此二阶段模式年龄更能反映其源区物质从亏损地幔被抽取的时间。

蒿坪沟黑云母花岗斑岩(HY-11)13 颗锆石原位 Hf 同位素分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282053~0.282558, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-22.9~-4.8, Hf 同位素二阶段模式年龄(t_{DM2})变化范围为 2617~1492 Ma(平均 1946 Ma);蒿坪沟花岗斑岩(HY-5)14 颗锆石原位 Hf 同位素分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282211~0.282418, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-17.6~-10.1, Hf 同位素二阶段模式年龄(t_{DM2})变

化范围为 2277~1809 Ma(平均 2060Ma);蒿坪沟花岗斑岩(HY-12)14 颗锆石原位 Hf 同位素分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为 0.282186~0.282647, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-18.4~-2.1, Hf 同位素二阶段模式年龄(t_{DM2})变化范围为 2328~1304Ma(平均 1819 Ma)。

5 讨论

5.1 蒿坪沟岩体的形成时代

本次研究得到蒿坪沟岩体中 3 个样品(HY-11、HY-5、HY-12)的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 加权平均年

龄分别为(128±1) Ma (MSWD=0.20)、(110±1) Ma (MSWD=3.6)和(112±1) Ma (MSWD=2.1), 大致显示了两个期次的岩体侵入; 第一期为蒿坪沟黑云母花岗斑岩侵入, 形成时代为(128±1) Ma, 这与人^[5,9]获得的锆石年龄(133.5±1.4) Ma、(130.5±1.1) Ma 基本一致。第二期为蒿坪沟花岗斑岩侵入, 形成时代为(112±1) Ma~(110±1) Ma, 这与王志光等^[10]获得的岩体时代 110 Ma 基本一致。

蒿坪沟岩体周边存在众多中生代花岗质岩体, 其中金山庙岩体侵入时代为(127.6±1.6) Ma^[2], 花山岩体侵入时代为(128±1) Ma^[1], 祁雨沟 Au 矿 16 号爆破角砾岩下伏花岗斑岩的锆石年龄为(134.1±2.3) Ma^[26], 雷门沟岩体侵入时代为(136.2±1.5) Ma^[27]。因此, 蒿坪沟岩体第一期侵入时代与其周边中生代花岗质岩体侵入时代基本一致, 都在 130 Ma 左右。

综上所述, 在 130 Ma 左右, 熊耳山地区发生了一次大规模的岩浆侵入活动, 包括蒿坪沟黑云母花岗斑岩、金山庙岩体、花山岩体、祁雨沟岩体以及雷门沟岩体等侵入就位。在 110 Ma 左右, 该地区又发生了一次岩浆侵入活动, 包括蒿坪沟花岗斑岩等的侵入就位。

5.2 岩石成因类型

在豫西东秦岭地区, 燕山期花岗岩广泛发育, 有学者将这些花岗岩归为改造型系列^[28], 但也有学者认为这些花岗岩是在俯冲挤压环境下, 由新太古界基底物质发生部分熔融形成, 应归属为陆内同熔型花岗岩, 亦即 I 型花岗岩^[29]。目前, 以源区性质等划分的 I 型 (Intracrustal 或 Igneous)、S 型 (Supracrustal 或 Sedimentary)、A 型 (Alkaline、Anorogenic 和 Anhydrous) 和 M 型 (Mantle driven) 花岗岩分类是最常用的花岗岩分类方案^[30]。

前述岩石地球化学特征显示, 蒿坪沟岩体中黑云母花岗斑岩的 SiO₂ 含量变化于 70.2%~72.7%; K₂O 含量变化于 5.41%~5.63%, SiO₂-K₂O 图解(见图 4(a))指示岩体属于钾玄岩系列; K₂O/Na₂O 比值较高, 为 2.33~3.68, 显示钾质花岗岩特征; 里特曼指数 σ 为 1.71~2.19, 属于碱性-钙碱性岩; K₂O+Na₂O 含量变化于 7.16%~7.73% 之间, 铝饱和指数(A/CNK)=1.03~1.09, 均小于 1.1, 属于弱过铝质岩石; 花岗斑岩的 SiO₂ 含量变化于 70.7%~72.6%; K₂O 含量变化于 4.76%~4.91%, SiO₂-K₂O 图解(见图 4(a))指示岩体属于高钾钙碱性系列; K₂O/Na₂O 比值较高, 为

2.18~2.65, 显示钾质花岗岩特征; 里特曼指数 σ 为 1.50~1.82, 属于钙碱性岩; K₂O+Na₂O 含量变化于 6.67%~7.13%, 铝饱和指数(A/CNK)=1.05~1.09, 均小于 1.1, 属于弱过铝质岩石。因此, 蒿坪沟黑云母花岗斑岩和花岗斑岩均具高硅、弱过铝、钙碱和高钾等 I 型花岗岩岩石特征。

另外, 蒿坪沟岩体中黑云母花岗斑岩和花岗斑岩稀土元素特征较为一致, 轻重稀土分馏异常显著, 稀土元素球粒陨石标准化分配曲线呈右倾型, 具有中等-弱的负 Eu 异常, 这也与 S 型花岗岩常表现出的“海鸥型”稀土配分型式明显不同^[2]。所有岩石样品的 P₂O₅ 含量均较低(<0.21%), 而且 P₂O₅ 与 SiO₂ 存在明显的负相关关系(见图 9(a)); 在 Ce-SiO₂ 判别图解中(见图 9(b)), 所有岩石样品投影点均落入 I 型花岗岩区域。综上所述, 蒿坪沟岩体属于 I 型花岗岩。

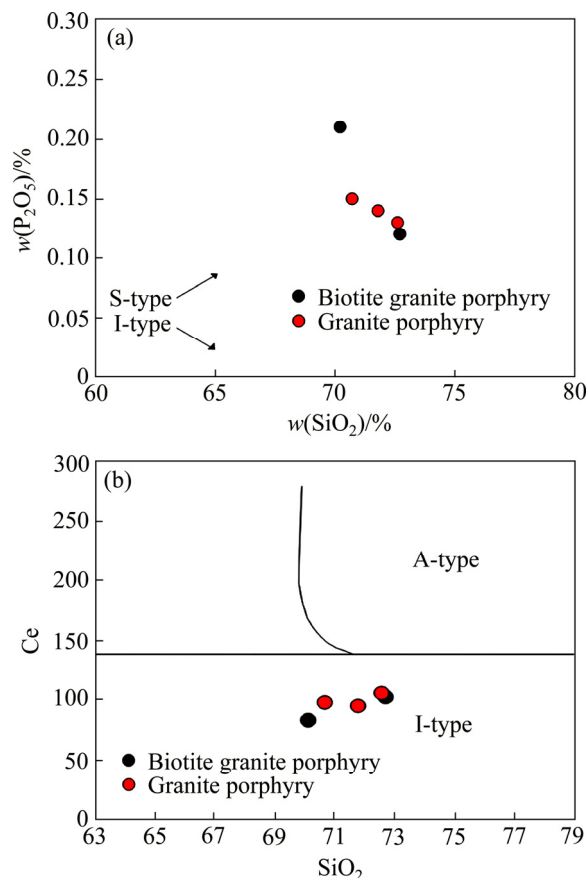


图9 蒿坪沟岩体 P₂O₅-SiO₂ 和 Ce-SiO₂ 关系图解

Fig. 9 Diagrams of Haopinggou pluton: (a) P₂O₅-SiO₂; (b) Ce-SiO₂

5.3 岩浆源区

由于锆石 Lu-Hf 同位素体系具有较高的封闭温度, 锆石 Hf 同位素比值不会随后期部分熔融或分离

结晶而变化^[31], 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值代表岩浆源区的成分特征, 正 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值通常代表源区为亏损地幔或从亏损地幔中新生的年轻地壳^[32], 负 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值通常代表源区为古老地壳^[19], 不均一的锆石 Hf 同位素特征很可能指示与具有不同放射性成因 Hf 同位素含量的几种岩浆混合有关^[33-35]; 因此锆石原位 Hf 同位素分析是示踪岩浆源区的重要手段^[15, 36-39]。

蒿坪沟岩体中黑云母花岗斑岩和花岗斑岩的岩浆锆石均具有较低的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和古老的 Hf 模式年龄(见表 6~8), 并且所有 Hf 同位素数据点均落于球粒陨石 Hf 同位素演化线之下(见图 10), 表明蒿坪沟岩体主要来源于古老的地壳物质。

Sr-Nd 同位素研究结果显示, 大陆地壳的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 平均值为 0.719^[40], 若花岗岩的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 大于 0.719, 则其无疑是壳源的; 而蒿坪沟岩体的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 在 0.7167~0.7230 之间, 平均为 0.7196, 与大陆地壳平均值相当, 而且蒿坪沟岩体样品的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值与地壳的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值^[19]一样均为负值, 因此其岩浆来源应主要是壳源的。另外, 蒿坪沟岩体与其周边的中生代花岗质岩体蒿坪岩体($\varepsilon_{\text{Hf}}(t)=-13.3\sim-10.2$)^[2]和金山庙岩体($\varepsilon_{\text{Hf}}(t)=-17.5\sim-13.3$)^[2]的 Hf 同位素组成接近, 并相互重叠, 很可能具有相似的岩浆来源。肖娥等^[2]认为蒿坪与金山庙岩体的形成很可能经历了两个阶段的成岩过程, 首先太华群基底物质遭受了幔源或新生地壳物质的改造, 至早白垩世时, 这些被改造的源区物质发生部分熔融并经不同岩浆通道上升侵位, 在此过程中, 由于岩浆通道及岩浆房容纳的岩浆体积不一, 导致原始岩浆在上升侵位过程中仍可能遭受地壳物质的混染而使岩浆的局部性状发生改变。范宏瑞等^[29]认为花山复式岩基(包括金山庙和蒿坪岩体)是燕山期华北陆块南缘发生的陆内挤压俯冲作用的产物, 由太华

群变质岩经重熔作用形成。由于蒿坪和金山庙岩体中均发现有太华群继承锆石存在, 且两岩体的稀土配分曲线与太华群地层近似, 暗示这两岩体的物质源区应与太华群有着紧密的亲缘关系。

综上所述, 结合蒿坪沟岩体中出现的 3 个元古代((1716±29) Ma、(1747±21) Ma、(925±8) Ma)和 2 个中生代((164±2) Ma、(153±3) Ma)继承锆石, 本文认为蒿坪沟岩体应来源于前寒武纪变质基底岩石(以古元古代-晚元古代岩石为主), 在侵位过程中可能受到了上地壳(中生代岩石)的混染。

5.4 成岩构造背景

在蒿坪沟岩体(包括黑云母花岗斑岩和花岗斑岩)的 QAP 图解(见图 11(a))、 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 图解(见图 11(b))以及 $\text{TFeO}/(\text{TFeO}+\text{MgO})\text{-SiO}_2$ 图解(见图 11(c))中, 分析样品均大部分落入造山后花岗岩类(POG)范围内, 说明蒿坪沟岩体属于 POG 花岗岩。蒿坪沟岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果显示其成岩时代介于 128~110 Ma 之间, 为早白垩世, 而中生代碰撞造山作用结束于侏罗纪(145~135 Ma), 此时受太平洋构造域构造动力的影响, 整个中国大陆中东部的区域构造体制发生转换, 从以近 SW 向构造为主、NNE-近 NS 向构造为次进入以 NNE-近 NS 向构造为主、近 EW 向构造为次的构造-动力体制大转换时期, 包括豫西东秦岭在内的华北克拉通南缘从陆内俯冲转入伸展构造环境^[41-42]。

此外, 蒿坪沟岩体与金山庙岩体、蒿坪岩体形成时代相近, 空间上紧邻, 地球化学特征相似, 它们应是同一构造动力学背景的产物。而蒿坪、金山庙岩体形成于扬子陆块与华北陆块碰撞造山后的陆内伸展引张环境, 是古特提斯构造域向古太平洋构造域转换机制下岩浆作用的产物^[2]。

所以, 蒿坪沟岩体为早白垩世东秦岭地区岩石圈拆沉作用的产物, 是对我国东部中生代岩石圈巨大减薄的地质响应事件之一。蒿坪沟岩体形成于华北板块和扬子板块碰撞造山后的伸展构造环境, 揭示成岩作用环境为挤压向伸展过渡的时期。造山作用晚期发生拆沉作用的阶段被认为是花岗岩形成的重要构造背景^[43-44], 常形成大规模的花岗岩基, 而蒿坪沟岩体规模较小。对此, 目前有两种推测, 一是认为造山带后期抬升有可能对岩体有剥蚀作用; 二是认为可能有燕山期隐伏大岩基(寨洼隐伏岩体), 而目前出露的小(斑)岩体仅为其岩枝。此外, 造山带由于后期大规模的走

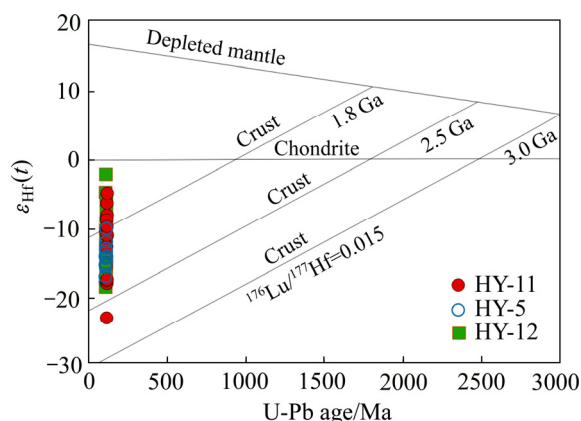


图 10 蒿坪沟岩体锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图解

Fig. 10 Zircon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t diagram of Haopinggou pluton

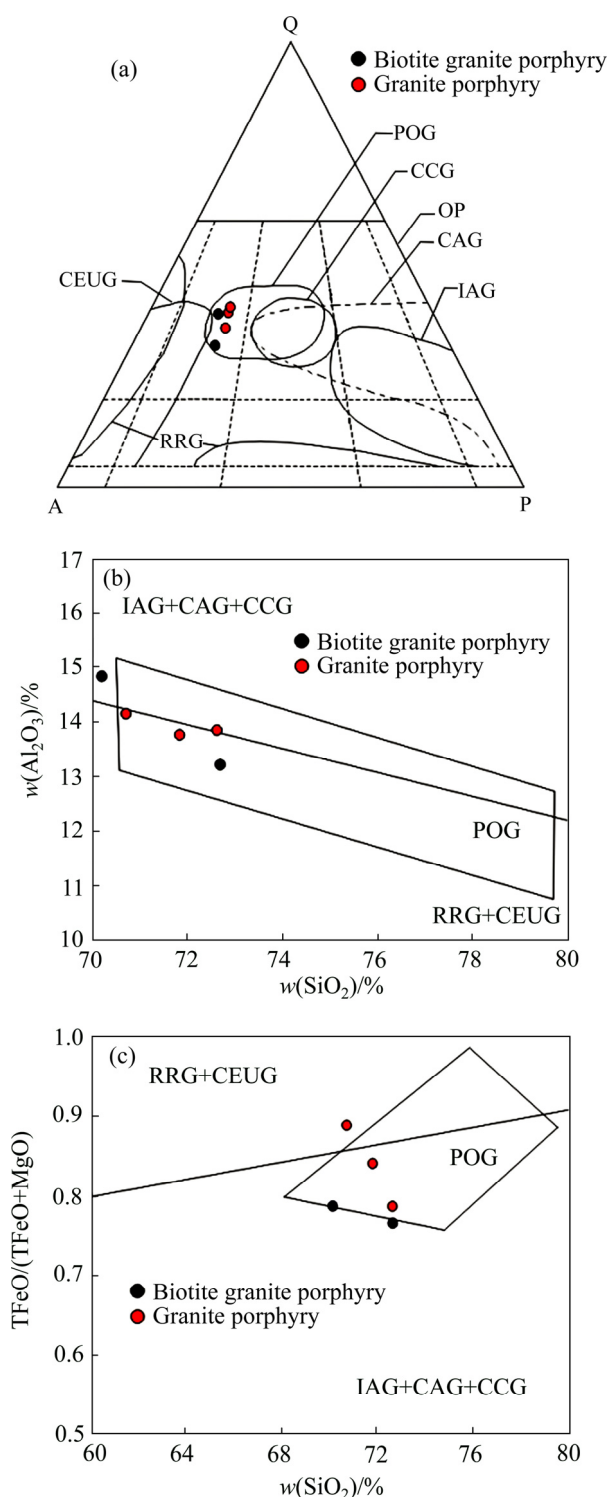


图 11 蒿坪沟岩体构造环境判别图

Fig. 11 Tectonic discrimination diagrams of Haopinggou pluton (IAG—Island arc granitoids; CAG—Continental arc granitoids; CCG—Continental collision granitoids; POG—Post-orogenic granitoids; RRG—Rift-related granitoids; CEUG—Continental epeirogenic uplift granitoids; OP—Oceanic plagiogranites): (a) QAPF; (b) Al_2O_3 - SiO_2 ; (c) $TFeO/(TFeO+MgO)$ - SiO_2

滑剪切等作用, 也可能会破坏岩体, 从而造成出露岩体的规模较小。

综上所述, 蒿坪沟岩体是在碰撞造山向造山后伸展的转换期间, 随着造山带应力由挤压转向松弛, 加厚的地壳发生熔融形成花岗岩质岩浆, 大量花岗岩浆经过多期次重熔作用, 并与底侵的地幔岩浆混合, 上升侵位形成。

6 结论

1) 蒿坪沟岩体中的黑云母花岗斑岩和花岗斑岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $(110 \pm 1) \sim (128 \pm 1)$ Ma, 认为该岩体由两期形成, 第一期为 130 Ma 左右, 第二期为 110 Ma 左右。

2) 蒿坪沟岩体主要岩性包括黑云母花岗斑岩和花岗斑岩, 具高硅、弱过铝、钙碱和高钾等 I 型花岗岩岩石特征。

3) 锆石 Hf 同位素特征显示蒿坪沟岩体的源区具有壳源性质, 主要由前寒武纪变质基底岩石发生重熔形成, 但在侵位过程中受到了上地壳(中生代岩石)物质的混染。

4) 蒿坪沟岩体形成于扬子陆块与华北陆块碰撞造山后的陆内伸展环境, 对应的地球动力学背景为早白垩世地壳从挤压收缩向区域性伸展的构造体制大转换过程, 即大规模的地壳伸展和岩石圈减薄时期。

致谢:

感谢河南省有色金属地质矿产局野外工作人员对本项目的支持, 感谢丁云河教授和李永峰教授对本文的悉心指导, 感谢审稿专家和编辑部给予宝贵的修改建议!

REFERENCES

- [1] 聂政融, 王晓霞, 柯昌辉, 杨 阳, 吕星球. 华北地块南缘花山、五丈山岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成因[J]. 地质通报, 2015, 34(8): 1502-1516.
- NIE Zheng-rong, WANG Xiao-xia, KE Chang-hui, YANG Yang, LV Xing-qiu. Age, geochemistry and petrogenesis of Huashan granitoid pluton on the southern margin of the North China Block[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(8): 1502-1516.
- [2] 肖 娥, 胡 建, 张遵忠, 戴宝章, 王艳芬, 李海勇. 东秦岭花山复式岩基中蒿坪与金山庙花岗岩体岩石地球化学、

- 锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素组成[J]. 岩石学报, 2012, 28(12): 4031–4046.
- XIAO E, HU Jian, ZHANG Zun-zhong, DAI Bao-zhang, WANG Yan-fen, LI Hai-yong. Petrogeochemistry, zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotopic compositions of the Haoping and Jinshanmiao granites from the Huashan complex batholith in Eastern Qinling Orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(12): 4031–4046.
- [3] 毕献武, 骆庭川. 洛宁花山岩体地球化学特征及成因的探讨[J]. 矿物学报, 1995, 15(4): 433–441.
- BI Xian-wu, LUO Ting-chuan. Geochemical characteristics and genesis of Huashan granite mass[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1995, 15(4): 433–441.
- [4] 庞绪成, 杨春蕾, 张红军, 许 栋. 豫西熊耳山五丈山岩体锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 矿物岩石, 2016, 36(4): 57–65.
- PANG Xu-cheng, YANG Chun-lei, ZHANG Hong-jun, XU Dong. Zircon U-Pb dating for Wuzhangshan rock mass in Xiong'ershan of Western Henan province, and its geological significance[J]. *J Mineral Petrol*, 2016, 36(4): 57–65.
- [5] 叶会寿. 华北陆块南缘中生代构造演化与铅锌银成矿作用[D]. 北京: 中国地质科学院, 2006: 1–217.
- YE Hui-shou. The Mesozoic Tectonic evolution and Pb-Zn-Ag metallogeny in the South Margin of North China Craton[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2006: 1–217.
- [6] 祁冬梅, 周汉文, 宫勇军, 熊索菲, 贾 耽, 张 金, 张旻玥. 岩石热液蚀变作用过程元素的活动性——河南祁雨沟金矿 IV 号岩体蚀变花岗岩斑岩的研究[J]. 岩石学报, 2015, 31(9): 2655–2673.
- QI Dong-mei, ZHOU Han-wen, GONG Yong-jun, XIONG Suo-fei, JIA Dan, ZHANG Jin, ZHANG Min-yue. Element mobility during the fluid-rock hydrothermal alteration: Evidence from altered porphyritic granite in IV pipe of the Qiyugou gold deposit, Henan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(9): 2655–2673.
- [7] 严正富, 杨正光, 程 海, 杨 浩, 付成义, 吴智慧. 雷门沟钼矿化花岗岩斑岩成因浅析[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1986, 22(3): 525–535.
- YAN Zheng-fu, YANG Zheng-guang, CHENG Hai, YANG Hao, FU Cheng-yi, WU Zhi-hui. Genesis of the Leimengou molybdenum mineralized granite porphyry[J]. *Journal of Nanjing University(Natural Sciences Edition)*, 1986, 22(3): 525–535.
- [8] 曹 晶, 叶会寿, 陈小丹, 李正远, 张兴康, 贺 文. 豫西雷门沟钼矿区花岗岩斑岩年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素研究[J]. 矿床地质, 2016, 35(4): 677–695.
- CAO Jing, YE Hui-shou, CHEN Xiao-dan, LI Zheng-yuan, ZHANG Xing-kang, HE Wen. Geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopic compositions of granite porphyry in Leimengou Mo deposit, Western Henan Province[J]. *Mineral Deposits*, 2016, 35(4): 677–695.
- [9] 梁 涛, 卢 仁, 罗照华, 白凤军, 刘 晓. 豫西熊耳山蒿坪沟黑云母花岗岩斑岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质论评, 2015, 61(4): 901–912.
- LIANG Tao, LU Ren, LUO Zhao-hua, BAI Feng-jun, LIU Xiao. LA-ICP-MS U-Pb age of zircons from Haopinggou Biotite granite porphyry in Xiong'er Mountain, Western Henan Province, and its geologic implications[J]. *Geological Review*, 2015, 61(4): 901–912.
- [10] 王志光, 崔 毫, 徐孟罗, 郑尚模, 王福贵, 吕 夏, 张林, 程广国. 华北地块南缘地质构造演化与成矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997: 1–310.
- WANG Zhi-guang, CUI Bo, XU Meng-luo, ZHENG Shang-mo, WANG Fu-gui, LÜ Xia, ZHANG Lin, CHENG Guang-guo. The tectonic evolution and mineralization in the south margin of North China Block[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997: 1–310.
- [11] 郭保健, 李永峰, 王志光, 叶会寿. 熊耳山 Au-Ag-Pb-Mo 矿集区成矿模式与找矿方向[J]. 地质与勘探, 2005, 41(5): 43–47.
- GUO Bao-jian, LI Yong-feng, WANG Zhi-guang, YE Hui-shou. Type, metallogenetic regularities, mineralization model and prospecting proposal in the Xiong'ershan district[J]. *Geology and Prospecting*, 2005, 41(5): 43–47.
- [12] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 2009, 28(4): 481–492.
- HOU Ke-jun, LI Yan-he, TIAN You-rong. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(4): 481–492.
- [13] WU Fu-yuan, YANG Yue-heng, XIE Lie-wen, YANG Jin-hui, XU Ping. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology[J]. *Chemical Geology*, 2006, 234: 105–126.
- [14] BLICHERT-TOFT J, ALBAREDE F. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 148(1/2): 243–258.
- [15] GRIFFIN W L, PEARSON N J, BELOUSOVA E,

- JACKSON S E, VAN ACHTERBERGH E, O'REILLY S Y, SHEE S R. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(1): 133–147.
- [16] VEEVERS J J, SAEED A, BELOUSOVA E A, GRIFFIN W L. U–Pb ages and source composition by Hf-isotope and trace-element analysis of detrital zircons in Permian sandstone and modern sand from southwestern Australia and a review of the paleogeographical and denudational history of the Yilgarn Craton[J]. *Earth-Science Reviews*, 2005, 68: 245–279.
- [17] SODERLUND U, PATCHETT P J, VERVOORT J D, ISACHSEN C E. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu–Hf and U–Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 219(3/4): 311–324.
- [18] KINNY P D. Lu–Hf and Sm–Nd isotope systems in zircon[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53(1): 327–341.
- [19] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. Lu–Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 185–220.
- WU Fu-yuan, LI Xian-hua, ZHENG Yong-fei, GAO Shan. Lu–Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2): 185–220.
- [20] 刘跃, 邓军, 王中亮, 张良, 张潮, 刘向东, 郑小礼, 王旭东. 胶西北新城金矿床二长花岗岩岩石地球化学、锆石 U–Pb 年龄及 Lu–Hf 同位素组成[J]. *岩石学报*, 2014, 30(9): 2559–2573.
- LIU Yue, DENG Jun, WANG Zhong-liang, ZHANG Liang, ZHANG Chao, LIU Xiang-dong, ZHENG Xiao-li, WANG Xu-dong. Zircon U–Pb age, Lu–Hf isotopes and petrogeochemistry of the monzogranites from Xincheng gold deposit, Northwestern Jiaodong Peninsula, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(9): 2559–2573.
- [21] 高阳, 叶会寿, 李永峰, 罗正传, 李法岭, 熊必康, 孟芳. 大别山千鹅冲钨矿区花岗岩的 SHRIMP 锆石 U–Pb 年龄、Hf 同位素组成及微量元素特征[J]. *岩石学报*, 2014, 30(1): 49–63.
- GAO Yang, YE Hui-shou, LI Yong-feng, LUO Zheng-zhuan, LI Fa-ling, XIONG Bi-kang, MENG Fang. SHRIMP zircon U–Pb ages, Hf isotopic compositions and trace elements characteristics of the granites from the Qian'echong Mo deposit, Dabie Orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(1): 49–63.
- [22] 刘清泉, 邵拥军, 张智慧, 张宇, 李冰, 张驰. 大别山姚冲花岗岩锆石 U–Pb 年龄、Hf 同位素及地质意义[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(2): 479–491.
- LIU Qing-quan, SHAO Yong-jun, ZHANG Zhi-hui, ZHANG Yu, LI Bing, ZHANG Chi. Zircon U–Pb ages, Hf isotope characteristics and its implication of granite from Yaochong, Dabie Orogen, China[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(2): 479–491.
- [23] AMELIN Y, LEE D-C, HALLIDAY A N, PIDGEON R T. Nature of the earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons[J]. *Nature*, 1999, 399: 252–255.
- [24] AMELIN Y, LEE D-C, HALLIDAY A N. Early-middle Archaean crustal evolution deduced from Lu–Hf and U–Pb isotopic studies of single zircon grains[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(24): 4205–4225.
- [25] VERVOORT J D, BLICHERT-TOFT J. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(3/4): 533–556.
- [26] 姚军明, 赵太平, 李晶, 孙亚莉, 原振雷, 陈伟, 韩军. 河南祁雨沟金成矿系统辉钼矿 Re–Os 年龄和锆石 U–Pb 年龄及 Hf 同位素地球化学[J]. *岩石学报*, 2009, 25(2): 374–384.
- YAO Jun-ming, ZHAO Tai-ping, LI Jing, SUN Ya-li, YUAN Zhen-lei, CHEN Wei, HAN Jun. Molybdenite Re–Os age and zircon U–Pb age and Hf isotope geochemistry of the Qiyugou gold system, Henan Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(2): 374–384.
- [27] 李永峰. 豫西熊耳山地区中生代花岗岩类时空演化与钨(金)成矿作用[D]. 北京: 中国地质大学, 2005: 1–135.
- LI Yong-feng. The temporal-spital evolution of mesozoid granitoids in the Xiong'ershan Area and their relationships to molybdenum-gold mineralization[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2005: 1–135.
- [28] 胡志宏, 胡受奚. 东秦岭燕山期大陆内部挤压俯冲的构造模式及其证据[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 1990, 26(3): 489–498.
- HU Zhi-hong, HU Shou-xi. The Yenshanian intracontinental compression-subduction in the northern part of the East-Qinlin area: Its tectonic model and evidences[J]. *Journal of Nanjing University(Natural Sciences Edition)*, 1990, 26(3): 489–498.
- [29] 范宏瑞, 谢奕汉, 王英兰. 豫西花山花岗岩基岩石学和地球化学特征及其成因[J]. *岩石矿物学杂志*, 1994, 13(1): 19–32.

- FAN Hong-rui, XIE Yi-han, WANG Ying-lan. Petrological and geochemical characteristics and genesis of the Huashan Granitic Batholith, Western Henan[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1994, 13(1): 19–32.
- [30] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1217–1238.
- WU Fu-yuan, LI Xian-hua, YANG Jin-hui, ZHENG Yong-fei. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(6): 1217–1238.
- [31] SCHERER E E, CAMERON K L, BLICHERT-TOFT J. Lu-Hf garnet geochronology: Closure temperature relative to the Sm-Nd system and the effects of trace mineral inclusions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(19): 3413–3432.
- [32] 隋振民, 葛文春, 吴福元, 徐学纯, 张吉衡. 大兴安岭北部察哈彦岩体的 Hf 同位素特征及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2009, 39(5): 849–856, 867.
- SUI Zhen-min, GE Wen-chun, WU Fu-yuan, XU Xue-chun, ZHANG Ji-heng. Hf isotopic characteristics and geological significance of the Chahayan Pluton in Northern Daxing'anling Mountains[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2009, 39(5): 849–856, 867.
- [33] GRIFFIN W L, WANG Xiang, JACKSON S E, PEARSON N J, O'REILLY S Y, XU Xi-sheng, ZHOU Xin-min. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 2002, 61(3): 237–269.
- [34] RAVIKANT V, WU Fu-yuan, JI Wei-qiang. U-Pb age and Hf isotopic constraints of detrital zircons from the Himalayan foreland Subathu sub-basin on the Tertiary palaeogeography of the Himalaya[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 304(3/4): 356–368.
- [35] 周振华, 武新丽, 欧阳荷根. 内蒙古莲花山铜银矿斜长花岗斑岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年、Hf 同位素研究及其地质意义[J]. *中国地质*, 2012, 39(6): 1472–1485.
- ZHOU Zhen-hua, WU Xin-li, OU'YANG He-gen. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and Hf isotope study of the plagioclase granite porphyry in the Lianhuashan Cu-Ag deposit of Inner Mongolia and its geological significance[J]. *Geology in China*, 2012, 39(6): 1472–1485.
- [36] BOUVIER A, VERVOORT J D, PATCHETT P J. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: Constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 273(1/2): 48–57.
- [37] 原垠斌, 袁顺达, 陈长江, 霍然. 黄沙坪矿区花岗岩类的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2014, 30(1): 64–78.
- YUAN Ya-bin, YUAN Shun-da, CHEN Chang-jiang, HUO Ran. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes of the granitoids in the Huangshaping mining area and their geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(1): 64–78.
- [38] 赵辛敏, 张作衡, 刘敏, 李育森, 郭少丰. 北祁连西段小柳沟矿区花岗质岩石锆石 U-Pb 年代学、地球化学及成因研究[J]. *岩石学报*, 2014, 30(1): 16–34.
- ZHAO Xin-min, ZHANG Zuo-heng, LIU Min, LI Yu-sen, GUO Shao-feng. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and petrogenesis of the granites from the Xiaoliugou deposit in the Western of the North Qilian[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(1): 16–34.
- [39] 周振华, 欧阳荷根, 武新丽, 刘军, 车合伟. 内蒙古道伦达坝铜钨多金属矿黑云母花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2014, 30(1): 79–94.
- ZHOU Zhen-hua, OU'YANG He-gen, WU Xin-li, LIU Jun, CHE He-wei. Geochronology and geochemistry study of the biotite granite from the Daolundaba Cu-W polymetallic deposit in the Inner Mongolia and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(1): 79–94.
- [40] FAURE G. Principles of isotope geology[M]. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 1986: 1–589.
- [41] 任纪舜. 论中国大陆岩石圈构造的基本特征[J]. *中国区域地质*, 1991(4): 289–293.
- REN Ji-shun. The basic characteristics of the tectonic evolution of the continental lithosphere in China[J]. *Regional Geology of China*, 1991(4): 289–293.
- [42] 卢欣祥. 秦岭花岗岩揭示的秦岭构造演化过程——秦岭花岗岩研究进展[J]. *地球科学进展*, 1998, 13(2): 213–214.
- LU Xin-xiang. The geology evolvement process of Qinling by its granite character—The study of progress about Qinling granite[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1998, 13(2): 213–214.
- [43] KAY R W, KAY S M. Creation and destruction of lower continental crust[J]. *Geologische Rundschau*, 1991, 80(2): 259–278.
- [44] RUDNICK R L. Making continental crust[J]. *Nature*, 1995, 378(6557): 571–578.

Petrogeochemistry, zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition of Haopinggou pluton, Western Henan

LIU Wen-yi^{1,2,3}, LIU Ji-shun^{1,2}, HE Mei-xiang³, DING Yun-he³, LI Yong-feng⁴

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitor Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Geosciences and Info physics, Central South University, Changsha 410083, China;

3. No. 7 Geological Team, Bureau of Nonferrous Metals Geology and Mineral Resources of Henan Province, Zhengzhou 450016, China;

4. Non-Ferrous Mineral Exploration Engineering Research Center of Henan Province, Zhengzhou 450016, China)

Abstract: The Haopinggou pluton occurred in the southern margin of the North China Craton, Shagou-Haopinggou Ag-Pb deposits, which includes biotite granite porphyry and granite porphyry. LA-ICP-MS zircon dating yields U-Pb age shows that the weighted average ages of biotite granite porphyry and granite porphyry are (128 ± 1) Ma, (110 ± 1) – (112 ± 1) Ma, indicating that the Haopinggou pluton which formed in Yanshanian is the product of two cycles of magmatic activities at least. The compositions of these two period pluton fall into shoshonite and High-K calc-alkaline series, with an A/CNK ratio of 1.03–1.09. They have significant fractionation between LREE and HREE, with medium-weak negative Eu anomalies, which are all belonging to I-type granite. Zircon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of the pluton are negative (-22.9 – -2.1), and two-stage Hf model ages (t_{DM2}) range from 1304 Ma to 2617 Ma. Zircon Hf isotope data, along with the presence of the inherited zircons, indicating that the Haopinggou pluton might be generated by partial melting of Precambrian metamorphic basement rocks of coupled with assimilation of the wall rocks of the upper crust. The Haopinggou pluton was emplaced after the major collisional period of the North China block and Yangtze block, in the post-collisional tectonic setting under the regional extension mechanism.

Key words: Haopinggou pluton; Western Henan province; petrogeochemistry; zircon U-Pb ages; Hf isotope

Foundation item: Project(201111007-2) supported by Nonprofit Industry Research Project of Ministry of Land and Resources, China; Project(YSDK2016-02) supported by the Research Project of Bureau of Nonferrous Metals Geology and Mineral Resources of Henan Province, China

Received date: 2018-05-03; **Accepted date:** 2018-10-08

Corresponding author: LIU Ji-shun; Tel: +86-13607489990; E-mail: jslu@csu.edu.cn

(编辑 龙怀中)