

# Geochronology, Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of the Baishifeng Pluton in Hunan

Tengda Xu<sup>1</sup>, Yang Wang<sup>2</sup>, Yaqi Yang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing

<sup>2</sup>Division of Petrology, China University of Geosciences, Beijing

Email: 1015085744@qq.com

Received: Apr. 7<sup>th</sup>, 2019; accepted: Apr. 22<sup>nd</sup>, 2019; published: Apr. 29<sup>th</sup>, 2019

## Abstract

The Baishifeng pluton, located in Hengshan, Hunan Province, is a component of the Hengshan complex. On the outcrops, the pluton invades into the Neoproterozoic Banxi Group and the Devonian-Permian strata. Petrographically, the pluton displays the characteristics of the two-mica granite. Two samples are analyzed by LA-ICP MS and yield the weighted mean  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age of  $157 \pm 2$  Ma and  $151 \pm 2$  Ma, respectively, suggesting Late Jurassic magmatic emplacement. The Baishifeng pluton is characterized by a strongly peraluminous ( $A/\text{CNK} > 1.1$ ), magnesia, high-potassium calc-alkaline series. The content of trace elements is low ( $\sum\text{REE} = 50.4 \times 10^{-6} - 197.6 \times 10^{-6}$ ), but shows high LREE with obvious negative Eu anomalies ( $\delta\text{Eu}$  is 0.32 - 0.62). In the primitive mantle normalized spidergram, the samples exhibit relative depletion in Ba, Nb, Sr and Ti. The two samples have notably negative  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values ( $-13.14 - -11.06$  and  $-18.76 - +0.51$ , respectively), indicating generation in crust. The granite samples show S-type granite affinity. Our results, combined with other geological evidence, indicate that the Baishifeng pluton may be formed by the melting of the Precambrian basement in the post-collision setting. We infer that the Baishifeng granitic pluton is more likely to be related to the overall extensional setting during Late Mesozoic in South China.

## Keywords

Baishifeng Pluton, S-Type Granite, Yanshanian, Post-Collision

# 湖南白石峰岩体的年代学、地球化学特征及其构造背景

徐腾达<sup>1</sup>, 汪洋<sup>2</sup>, 杨亚琦<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国地质科学院地质研究所, 北京

<sup>2</sup>中国地质大学(北京)地球科学与资源学院岩石教研室, 北京

Email: 1015085744@qq.com

收稿日期: 2019年4月7日; 录用日期: 2019年4月22日; 发布日期: 2019年4月29日

## 摘要

白石峰岩体位于湖南衡山,是衡山复式岩体的组成部分,侵入到新元古代板溪群及泥盆—二叠纪地层中,岩性为二云母花岗岩。LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为 $157 \pm 2$  Ma与 $151 \pm 2$  Ma。白石峰岩体为强过铝质(A/CNK > 1.1)、镁质、高钾钙碱性系列花岗岩。微量元素含量较低( $\Sigma\text{REE} = 50.4 \times 10^{-6} \sim 197.6 \times 10^{-6}$ ),轻稀土富集, Ba、Nb、Sr和Ti相对亏损,表现出明显的负Eu异常( $\delta\text{Eu}$ 为0.32~0.62)。岩体的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分别在-13.14~-11.06与-18.76~+0.51之间,显示源区为壳源。综合分析表明,白石峰花岗岩形成时代为晚侏罗世,花岗岩类型属于S型花岗岩,可能为前寒武纪基底部分熔融形成。白石峰花岗岩形成于后碰撞环境,与华南地区晚中生代整体呈伸展的构造环境有关。

## 关键词

白石峰岩体, S型花岗岩, 燕山期, 后碰撞

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

## 1. 引言

显生宙期间,中国南部的构造属几经转化,其中位于湖南中西部的雪峰山地区是解读华南大地构造演化及变形的关键纽带。前人在此地曾开展大量的研究工作,并取得了重要认识。但是对于加里东以来雪峰山地区的演化及构造属性仍然存在很多分歧,任纪舜[1]认为华南加里东褶皱系并不是一个碰撞造山带,江南复背斜带即雪峰山地区是华南加里东褶皱带与扬子准地台之间的构造过渡带。江南复背斜及其以东的中国南部地区经历了加里东、印支、燕山多旋回的构造作用,有大量的花岗岩分布,其时代包括加里东、印支、燕山三个旋回。印支运动以来,华南带转为滨太平洋构造域,属亚洲东部大陆边缘活化带的一部分[2] [3],发生于侏罗-白垩纪的燕山造山作用对加里东、印支期的构造进行了强烈的改造,并伴随着大规模的花岗岩岩浆作用。

对于印支期的岩体前人进行了较多的研究[4] [5] [6] [7],关于燕山期的大规模花岗岩岩浆作用研究总体较弱,本次研究选取的湖南中部白石峰岩体为衡山岩体的组成部分,马铁球等[8]测得衡山岩体中南岳岩体主体部分锆石 U-Pb 年龄为 215.5 Ma。李建华[4]测得白石峰花岗岩岩体的年龄为 151 Ma~150 Ma。除此之外,此地区的年龄数据较少,并且缺乏相应的地球化学研究,有待于进一步的工作。本文对白石峰岩体进行了详细野外观测,并对该岩体进行了锆石 LA-ICP-MS 测年、全岩地球化学与锆石 Hf 同位素测试[9],并在此基础上简要分析花岗岩的年代学、地球化学特征与构造背景。

## 2. 区域地质概况

衡山复式岩体位于湖南中东部地区,南岳衡山风景区。区内岩浆活动频繁,从早志留世开始至早白垩世均有岩浆活动记录,其中南岳岩体与白石峰岩体均呈穹隆状产出(图 1)。

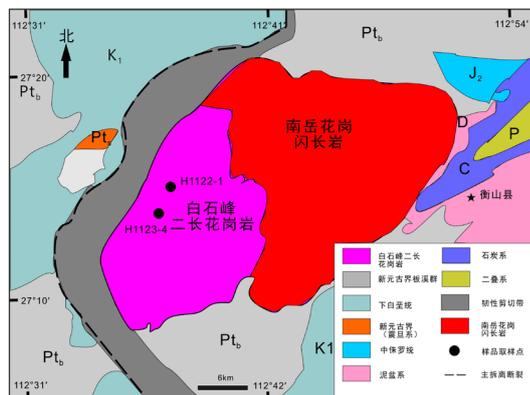


Figure 1. Geological sketch of Baishifeng pluton (modified after [10])

图 1. 白石峰岩体地质简图(改自文献[10])

白石峰岩体作为衡山复式岩体的组成部分，位于华南地区江南复背斜即雪峰山地区北东部位。关于雪峰山地区构造演化目前存在争议，晚中生代燕山造山旋回，该地区的构造演化主要受到古太平洋影响，早期的挤压作用(中晚侏罗世)造成地壳的广泛缩短加厚，地表形成大规模褶皱与逆冲推覆构造；晚期伸展作用(白垩纪)导致大规模断陷盆地和伸展穹隆构造的形成[10]。

衡山复式岩体侵入到新元古代板溪群及泥盆-二叠纪地层中，西侧与晚白垩世红层沉积为断层接触关系。其中东部的南岳岩体主要为花岗闪长岩，白石峰岩体主要为二云母花岗岩为主，发育较大的钠长石脉体，白石峰岩体与西侧白垩纪地层接触关系为断层接触[11]，为一近南北向的拆离断层，起止时间为 136 Ma~97 Ma [12]。

### 3. 野外和岩相学特征

衡山岩体呈较大的岩基出露，主要由南岳、白石峰岩体及其北侧琵琶山、庙湾、金宝冲和福田铺等小岩体组成，出露面积约 420 km<sup>2</sup> [13]。岩体侵入到板溪群及泥盆-二叠纪地层中，西侧与晚白垩世红层沉积为断层接触关系(图 2(a)、图 2(b))。



a, b——白石峰岩体与白垩纪地层断层接触；c——二云母花岗岩；d——岩体上发育擦痕线理；e, f——二云母花岗岩镜下照片(正交偏光)；Q——石英；Bi——黑云母；Mc——白云母；Kf——钾长石；Pl——斜长石

Figure 2. Field and microscopic photographs of Baishifeng pluton

图 2. 白石峰岩体野外和镜下照片

白石峰岩体主要为二云母花岗岩, 岩石表面为灰白色, 中-粗粒结构(图 2(c)), 靠近断层面附近花岗岩及钠长岩糜棱岩化显著, 矿物定向排列, 线理发育(图 2(d))。显微镜下, 可见花岗结构, 主要矿物为石英(25%), 钾长石(35%~40%), 斜长石(20%~25%), 黑云母(5%~8%)和白云母(5%), 含少量副矿物如黄铁矿, 锆石等。其中, 石英为它形粒状, 颗粒大小不一, 常见于长石和云母三角缝中。云母和长石较自形, 云母粒度在 2 mm~5 mm 不等, 长石粒度在 1 mm~5 mm 不等。

#### 4. 分析测试方法

本次研究样品均采自白石峰岩体, 采集 2 个二云母花岗岩样品(H1122-1 和 H1123-4)进行精确锆石 U-Pb 测年和锆石原位 Hf 同位素测试, 5 个样品进行全岩地球化学测试。采样位置见图 1。

锆石的挑选、制靶与阴极发光照相在河北省廊坊市诚信地质服务有限公司进行。锆石 U-Pb 同位素定年分析在北京科荟测试技术有限公司进行, 利用 LA-ICPMS 同时分析完成。实验所用的激光剥蚀系统为 ESI NWR 193 nm, ICP-MS 仪器为 Analytikjena Plasma Quant MS Elite ICP-MS, 激光剥蚀过程采用氦气作为载体, 用氩气作为补偿气来调节灵敏度。对分析数据的离线处理采用软 ICPMS Data Cal [14]完成。定年中采用锆石标准 GJ-1 外部校正法进行同位素素分馏校正。而对于分析时间有关的 U-Th-Pb 的同位素比值漂移, 利用 GJ-1 的变化采用线性内插的方式完成校正。锆石样品的 U-Pb 年龄协和图绘制和年龄权重平均计算采用了 Isoplot 完成。

锆石 Hf 同位素测试在北京科荟测试技术有限公司的激光剥蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪上进行, 用 NWR 213 nm 固体激光器对锆石进行剥蚀, 激光剥蚀的斑束直径一般为 25  $\mu\text{m}$ 。测试点在 U-Pb 定年测定点附近, 且位于同一锆石晶体内。采用  $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.7325$  对 Hf 同位素比值进行指数归一化质量歧视校正, 采用  $^{173}\text{Yb}/^{172}\text{Yb} = 1.35274$ 。对 Yb 同位素比值进行指数归一化质量歧视校正。在计算  $^{176}\text{Lu}$  的衰变常数时采用  $1.867 \times 10^{-11}/\text{a}$  [15] [16]。球粒陨石的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  和  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值分别为 0.0332 和 0.282772 [17], 亏损地幔的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  和  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值分别为 0.0384 和 0.28325 [18], ( $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ )平均地壳为 0.015。

全岩地球化学测试在中核集团核工业北京地质研究院分析测试研究所测定。选取新鲜的样品经切割去掉表皮、蒸馏水洗净、自然干燥三步后粉碎至 200 目待检。测定主量元素组分时, FeO 含量依据重铬酸钾滴定法测定, 其余组分的分析在飞利浦 PW2404-X 型 XRF 上完成, 分析精度优于 3 wt%, 具体实验流程见 Norrish 和 Hutton [19]; 微量元素组成分析在 Finningan MAT 的 HR-ICP-MS (Element I)型 ICP-MS 上进行, 分析精度优于 6 wt%, 分析方法详见文献[20]。

### 5. 测试结果

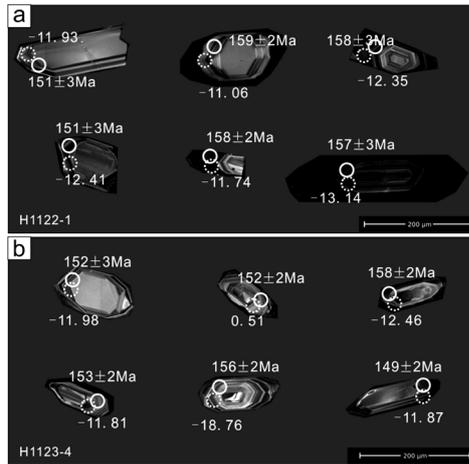
#### 5.1. 锆石 U-Pb 年龄

测年锆石均选取自形, 无裂痕和包裹体的锆石。H1122-1 样品中锆石的 Th/U 比值大部分大于 0.1, 平均值为 0.15, 另外所有锆石见明显的震荡环带(图 3), 表明这些锆石均为岩浆锆石。H1122-1 样品锆石 U-Pb 测试的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为 151 Ma~160 Ma 之间(表 1), 加权平均值为  $157 \pm 2$  Ma (MSWD = 1.12, 图 4(a))。H1123-4 样品的所有锆石也具有明显的震荡环带, Th/U 比值大部分大于 0.1, 平均值为 0.38, 可以说明这些锆石为岩浆成因。本次实验给出的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为 148 Ma~156 Ma 之间(表 1), 加权平均值为  $151 \pm 2$  Ma (MSWD = 1.9, 图 4(b))。

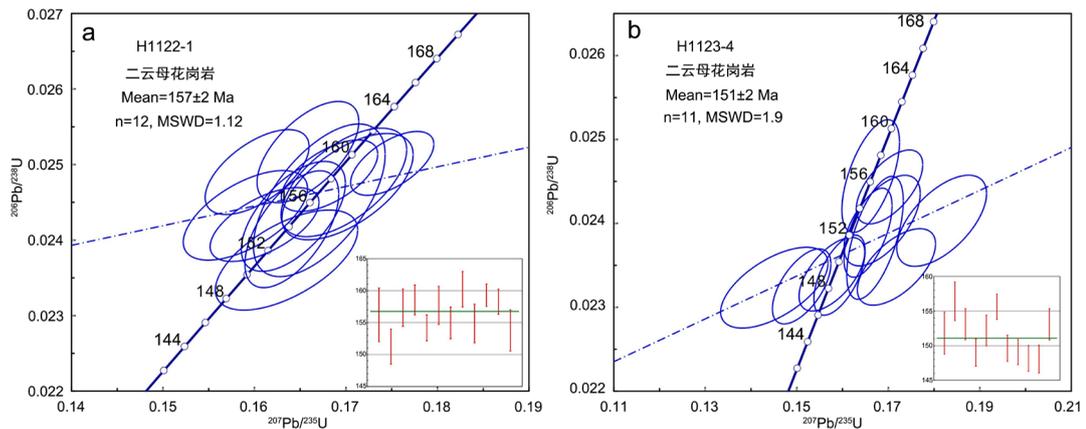
#### 5.2. 锆石 Hf 同位素结果

两个花岗岩样品的锆石初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值较一致, 大部分集中在 0.282304~0.282366 之间。样品 H1122-1 的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值在 -13.14~-11.06 之间, 变化范围较小, 可能显示其源区相对均一; 两阶段模式年龄( $t_{\text{DM2}}$ )

为 1910 Ma~2041 Ma (平均值 = 1966 Ma)。样品 H1123-4 的  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值在 -18.76~0.51 之间, 变化范围较大, 可能显示其源区物质不均一; 两阶段模式年龄( $t_{\text{DM2}}$ )为 1172 Ma~2393 Ma (平均值 = 1935 Ma)。两个样品  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值均为负值, 反映其源区为壳源[16]。



**Figure 3.** Zircon cathodoluminescence image and  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age of two-mica granite  
**图 3.** 二云母花岗岩锆石阴极发光图像及  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄



**Figure 4.** U-Pb concordia diagrams showing zircon ages for two-mica granites in Baishifeng  
**图 4.** 白石峰岩体二云母花岗岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

### 5.3. 全岩地球化学结果

全岩的主微量元素结果如表 2 所示, 分析结果表明白石峰岩体花岗岩样品中  $\text{SiO}_2$  含量 72.22 wt%~74.62 wt%, 平均值为 73.34 wt%, 具有酸性岩的特征(图 5(a));  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的含量为 14.37~15.80 wt%, 平均值为 14.94 wt%, 含量较高。  $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  含量为 7.14 wt%~9.16 wt%,  $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  在 1.22~2.12 之间, 为高钾钙碱性系列(图 5(b)); A/CNK 值在 1.07~1.61 (平均值为 1.25 > 1.1) 之间, 显示强过铝质特征(图 5(c)); 样品还均有高的 MgO 含量为 0.178 wt%~0.37 wt%, 显示为镁质花岗岩特征(图 5(d))。

样品二云母花岗岩  $\Sigma\text{REE}$  含量较低( $50.4 \times 10^{-6}$ ~ $197.6 \times 10^{-6}$ ) (表 3), 稀土配分图显示明显的轻稀土富集和重稀土亏损的特征(图 6(a))。其中  $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  在 1.7~48.6 之间, 同时表现出明显的负 Eu 异常( $\delta \text{Eu}$  为 0.32~0.62)。此外, 样品中微量元素表现出 Ba、Nb、Sr 和 Ti 相对亏损和 Cs 与 Pb 相对富集的特征(图 6(b)、表 4)。

**Table 1.** Results of LA-ICP-MS zircon U-Pb dating analysis of Baishifeng granite  
**表 1.** 白石峰花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年分析结果

分析点	含量( $\times 10^{-6}$ )						同位素比值						同位素年龄(Ma)	
	Th	U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$1\sigma$	$^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$1\sigma$
	H1122-1													
H1122-1-01	208.7	8141.3	0.0245	0.0007	0.1671	0.0048	0.0494	0.0006	0.0115	0.0008	110.71	156.2	4.2	
H1122-1-02	393.1	1161.9	0.0237	0.0004	0.1635	0.0051	0.0498	0.0012	0.0074	0.0004	1.93	151.2	2.8	
H1122-1-03	126.3	1856.1	0.0247	0.0005	0.1702	0.0047	0.0498	0.0009	0.0084	0.0004	17.99	157.3	2.9	
H1122-1-04	357.1	1339.9	0.0249	0.0004	0.1603	0.0038	0.0466	0.0009	0.0084	0.0003	2.49	158.6	2.3	
H1122-1-05	87.0	1386.9	0.0242	0.0003	0.1611	0.0039	0.0481	0.0009	0.0079	0.0004	10.65	154.2	2.0	
H1122-1-06	366.6	2307.0	0.0248	0.0005	0.1698	0.0045	0.0500	0.0012	0.0091	0.0005	3.91	157.7	3.0	
H1122-1-07	241.2	873.1	0.0243	0.0004	0.1590	0.0045	0.0473	0.0011	0.0085	0.0004	2.46	154.9	2.5	
H1122-1-08	199.1	2444.7	0.0252	0.0004	0.1658	0.0037	0.0478	0.0008	0.0088	0.0004	7.82	160.2	2.8	
H1122-1-09	383.1	3110.7	0.0243	0.0005	0.1643	0.0038	0.0489	0.0006	0.0079	0.0003	6.14	154.9	3.0	
H1122-1-10	36.6	1767.8	0.0250	0.0003	0.1751	0.0030	0.0507	0.0009	0.0096	0.0011	33.12	159.3	1.8	
H1122-1-11	660.5	1680.2	0.0249	0.0003	0.1682	0.0035	0.0491	0.0010	0.0070	0.0003	3.39	158.3	2.0	
H1122-1-12	39.6	7702.5	0.0241	0.0005	0.1641	0.0034	0.0492	0.0007	0.0253	0.0036	131.53	153.8	3.2	
	H1123-4													
H1123-4-01	181.0	2272.6	0.0238	0.0005	0.1671	0.0041	0.0509	0.0009	0.0082	0.0004	9.61	151.8	3.0	
H1123-4-02	94.2	3078.9	0.0246	0.0004	0.1661	0.0042	0.0489	0.0008	0.0116	0.0009	22.29	156.4	2.8	
H1123-4-03	303.7	1146.0	0.0240	0.0004	0.1686	0.0055	0.0509	0.0014	0.0087	0.0004	2.55	153.1	2.2	
H1123-4-04	4238.9	2133.1	0.0234	0.0003	0.1593	0.0037	0.0493	0.0009	0.0098	0.0005	2.29	149.0	2.0	
H1123-4-05	287.7	1982.7	0.0239	0.0004	0.1656	0.0035	0.0502	0.0007	0.0079	0.0003	5.29	152.2	2.2	
H1123-4-06	22.5	1132.6	0.0244	0.0003	0.1703	0.0048	0.0504	0.0012	0.0100	0.0007	41.26	155.6	1.8	
H1123-4-07	486.6	1117.0	0.0235	0.0003	0.1718	0.0056	0.0530	0.0016	0.0102	0.0006	2.38	149.6	1.9	
H1123-4-08	626.4	1474.9	0.0234	0.0003	0.1577	0.0047	0.0489	0.0014	0.0089	0.0007	4.18	149.1	1.8	
H1123-4-09	148.2	630.0	0.0232	0.0003	0.1511	0.0042	0.0472	0.0012	0.0079	0.0003	3.42	148.2	1.9	
H1123-4-10	227.8	549.2	0.0232	0.0003	0.1451	0.0077	0.0454	0.0026	0.0085	0.0004	2.05	148.1	2.0	
H1123-4-11	258.0	2000.1	0.0240	0.0004	0.1817	0.0065	0.0544	0.0013	0.0106	0.0009	6.87	153.1	2.3	

**Table 2.** Analysis results of major elements of Baishifeng granite  
**表 2.** 白石峰花岗岩主量元素分析结果

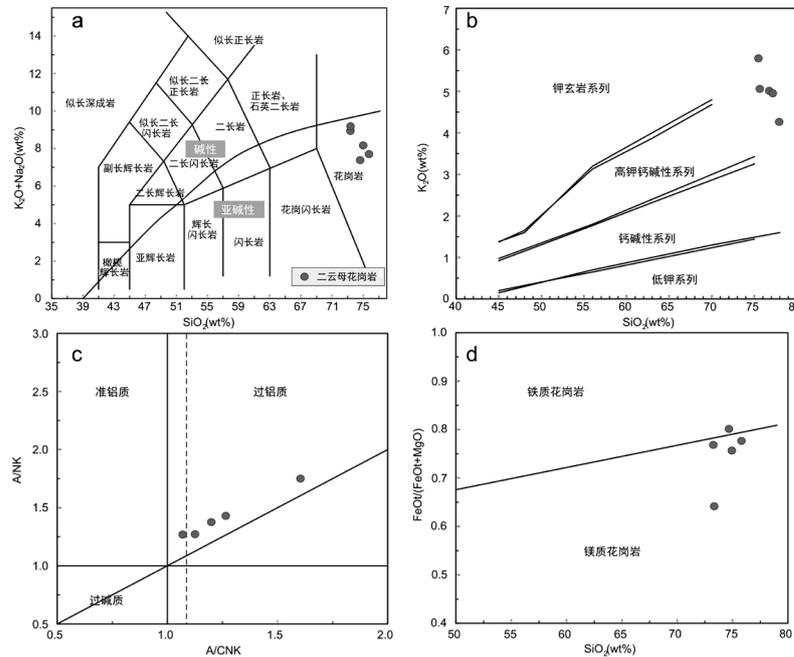
岩性	样品编号	SiO <sub>2</sub> %	TiO <sub>2</sub> %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> T%	FeOT%	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	FeO%	CaO%	MgO%	K <sub>2</sub> O%	Na <sub>2</sub> O%	MnO%	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> %	烧失量%	total%
二云母 花岗岩	H1122-1	74.11	0.116	14.49	0.844	0.76	0.10	0.67	0.859	0.244	4.89	3.18	0.021	0.093	1.13	99.98
	H1122-8	73.19	0.079	15.58	0.507	0.46	0.02	0.44	0.889	0.254	5.03	4.13	0.01	0.088	0.23	99.99
	H1123-3	72.58	0.178	14.37	1.36	1.22	0.27	0.98	1.17	0.37	5.74	3.1	0.023	0.148	0.87	99.91
	H1123-4	74.62	0.07	14.46	0.685	0.62	0.05	0.57	0.731	0.178	4.2	3.38	0.025	0.151	1.45	99.95
	H1123-5	72.22	0.066	15.8	0.836	0.75	0.21	0.56	0.446	0.18	4.85	2.29	0.024	0.159	3.07	99.94

**Table 3.** Rare earth elemental analysis results of Baishifeng granite ( $\times 10^{-6}$ )  
**表 3.** 白石峰花岗岩稀土元素分析结果( $\times 10^{-6}$ )

岩性	样品编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	REE	$\delta$ Eu	(La/Yb) <sub>N</sub>
二云母 花岗岩	H1122-1	15.5	29.5	3.35	11.9	2.66	0.495	2.04	0.3	1.32	0.178	0.478	0.071	0.436	0.066	68.3	0.62	25.50
	H1122-8	7.73	15.9	1.9	7.29	2.44	0.278	2.66	0.72	4.85	1.01	2.9	0.529	3.21	0.422	51.8	0.33	1.73
	H1123-3	43.4	89.9	10.3	36.1	7.12	0.656	4.82	0.658	2.58	0.347	0.904	0.103	0.64	0.077	197.6	0.32	48.64
	H1123-4	10.2	18.9	2.3	8.13	1.88	0.328	1.4	0.228	1.1	0.155	0.406	0.059	0.379	0.048	45.5	0.59	19.30
	H1123-5	9.85	20.3	2.26	8.3	2.37	0.299	2.27	0.499	2.29	0.318	0.726	0.109	0.711	0.098	50.4	0.39	9.94

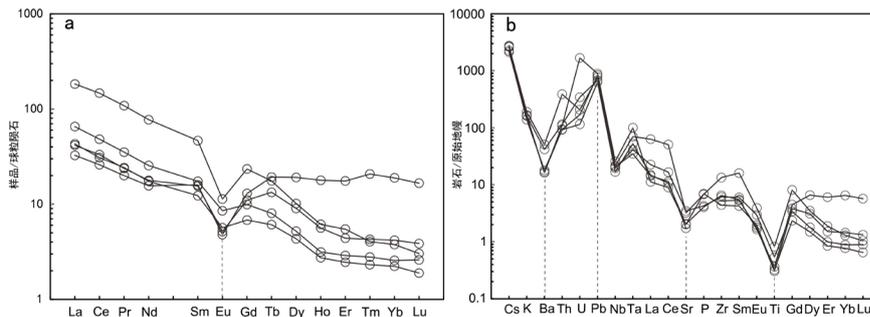
**Table 4.** Trace element analysis results of Baishifeng granite ( $\times 10^{-6}$ )  
**表 4.** 白石峰花岗岩微量元素分析结果 ( $\times 10^{-6}$ )

岩性	样品编号	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Mo	Cd	In	Sb	Cs	Ba	W	Tl	Pb	Bi	Th	U	Nb	Ta	Zr	Hf
二云母 花岗岩	H1122-1	74.4	4.81	3.19	5.55	1.05	0.736	0.654	2.35	34.6	23.2	303	73	5.74	0.056	0.068	0.093	0.051	21.8	292	2.94	1.81	48.2	4.73	9.76	7.23	14	1.69	68.4	2.15
	H1122-8	19	9.16	9.17	4.2	0.679	0.533	0.616	1.81	15.8	22.6	337	43.4	32.5	0.088	0.056	0.096	0.028	16.8	113	6.34	2	63.2	2.49	9.31	35.3	18.4	4.1	73	2.04
	H1123-3	134	6.22	2.97	13.1	3.52	1.73	1.67	5.53	51.2	22.1	336	67.7	8.94	0.071	0.076	0.084	0.057	21.2	354	1.82	2.07	54.5	1.02	32.9	4.35	15.3	2.87	150	3.85
	H1123-4	99.9	6.99	2.26	3.73	1.56	0.732	0.724	1.11	36.7	21.6	287	42.6	4.15	0.031	0.083	0.08	0.067	17.8	126	2.65	1.75	44.8	1.23	7.86	2.41	12	2.16	49.2	1.44
	H1123-5	124	4.93	3.28	3.79	0.8	1.67	0.549	1.32	45.4	24.5	358	36.4	7.56	0.019	0.067	0.096	0.096	5.09	20.6	118	2.82	2.2	59.2	3.21	7.97	3.54	14.8	1.43	58.4



**Figure 5.** TAS diagram of two-mica granite (a, after [21]); MALi-SiO<sub>2</sub> diagram (b, after [22]); A/CNK-A/NK diagram (c, after [23]); FeO/(FeO+MgO)-SiO<sub>2</sub> diagram (d, after [24])

**图 5.** 二云母花岗岩 TAS 图解(a, 据文献[21]); MALi-SiO<sub>2</sub> 图解(b, 据文献[22]); A/CNK-A/NK 图解(c, 据文献[23]); FeO/(FeO+MgO)-SiO<sub>2</sub> 图解(d, 据文献[24])



**Figure 6.** Chondrite-normalized REE and primitive mantle normalized spider diagrams for two-mica granites (value of chondrite and primitive mantle after [25])

**图 6.** 二云母花岗岩稀土元素配分图和微量元素蛛网图(球粒陨石和原始地幔的值据文献[25])

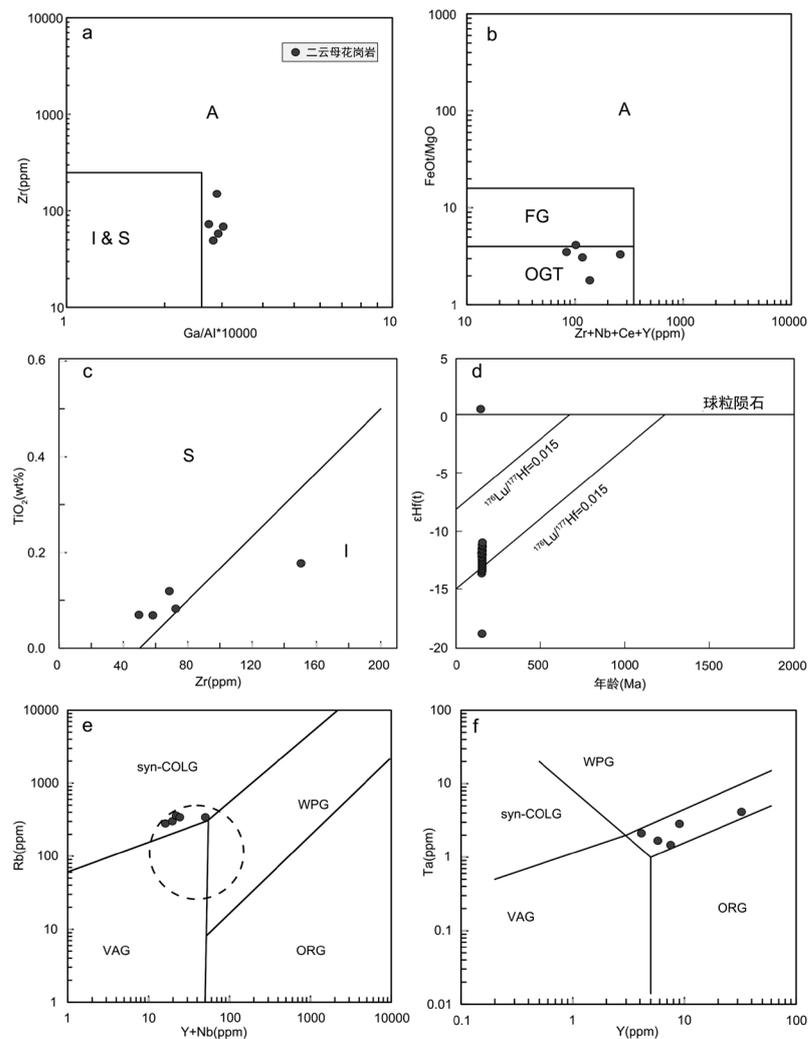
## 6. 讨论

### 6.1. 岩石成因

根据野外观测与室内研究表明,白石峰岩体的岩石组成较为简单,为二云母花岗岩,白云母含量较高,根据全岩地球化学结果显示,该花岗岩的 SiO<sub>2</sub> 含量较高(72.22 wt%~74.62 wt%),为酸性岩。通过主量元素图解判别可知,该岩体为强过铝质、镁质花岗岩,为高钾钙碱性系列。对白石峰花岗岩类型的判别时,贾大成等[26]将白石峰花岗岩判定为 A 型花岗岩,但本文数据表明,虽然在个别 A 型花岗岩判别图解(图 7(a))中白石峰花岗岩落入 A 型花岗岩区域,并且该岩体的 Ga/Al × 10,000 > 2.6,但是该岩体不符合 A 型花岗岩含较高的 Zr 值(>250 ppm)和较高的 FeO<sub>t</sub>/MgO 比值的等特征[27]。同时在 Whalen 等[28]提出的 Zr + Nb + Ce + Y 为横坐标的 A 型花岗岩判别图解中,白石峰花岗岩并未落入 A 型花岗岩区域内(图 7(b)),所以白石峰花岗岩并非 A 型花岗岩。根据全岩地球化学特征,白石峰岩体

为强过铝质( $A/CNK > 1.1$ )、矿物组成中白云母含量较高、稀土元素中轻稀土富集及 Ba、Nb、Sr 和 Ti 相对亏损、Hf 同位素显示壳源等特征,结合 S 型与 I 型花岗岩判别图解(图 7(c))绝大多数点落入 S 型花岗岩区域。马铁球等[3]对将该地区进行研究时,并未区分白石峰岩体与南岳岩体,在对测得的早白垩世花岗岩( $140.6 \pm 0.8$  Ma)进行主微量元素分析后,认为其属于 S 型花岗岩,其测得的早白垩世花岗岩与本文中白石峰花岗岩同样具有强过铝质、镁质花岗岩,为高钾钙碱性等特征,可能为白石峰岩体的一部分。因此,综合判断白石峰岩体为 S 型花岗岩。

对锆石 Hf 同位素的测定结果分析可知,白石峰岩体两个样品 H1122-1 与 H1123-4 的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为分别在  $-13.14 \sim -11.06$  之间与在  $-18.76 \sim -0.51$  之间,且相对较为集中(表 5)。并根据  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -Age 图解(图 7(d))可知,除一个点外所有点均在球粒陨石线的下方,反映其源岩主要来自地壳。通过其两段模式年龄可以看出,白石峰花岗岩可能是华南前寒武纪的基底岩石部分熔融形成的



**Figure 7.** A-type granite discrimination diagram (a, b, after [28]); Zr vs.  $\text{TiO}_2$  diagram (c);  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -Age diagram (d); Y + Nb vs. Rb and Y vs. Ta diagrams (e, f, after [29]). VAG—volcanic arc granite; WPC—intraplate granite; S-COLG—collisional granite; ORG—mid-ocean ridge granite

**图 7.** A 型花岗岩判别图解(a, b, 据文献[28]); S 型与 I 型花岗岩判别图解(c);  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ -Age 图解(d); 花岗岩微量元素构造环境判别图解(e, f, 据文献[29]) VAG——火山弧花岗岩; WPC——板内花岗岩; S-COLG——同碰撞花岗岩; ORG——洋中脊花岗岩; A-ORG——异常洋中脊花岗岩

Table 5. Zircon Hf isotope analysis of Baishifeng granite  
表 5. 白石峰花岗岩锆石 Hf 同位素分析结果

序号	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2 $\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2 $\sigma$	Age(Ma)	$I_{\text{Hf}}$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM}}$	$T_{\text{DME}}$	$T_{\text{Chur}}$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
Hf1122-1													
1	0.040495	0.001052	0.000025	0.282333	0.000010	156	0.28233	-15.54	-12.21	1300	1982	727	-0.97
2	0.017789	0.000418	0.000008	0.282342	0.000018	151	0.282341	-15.2	-11.93	1265	1959	698	-0.99
3	0.016773	0.000400	0.000007	0.282304	0.000016	157	0.282303	-16.54	-13.14	1317	2041	759	-0.99
4	0.038118	0.000963	0.000005	0.282364	0.000015	159	0.282361	-14.42	-11.06	1253	1910	673	-0.97
5	0.031009	0.000775	0.000024	0.282347	0.000012	154	0.282345	-15.03	-11.72	1270	1948	698	-0.98
6	0.024804	0.000581	0.000006	0.282327	0.000016	158	0.282325	-15.75	-12.35	1292	1991	726	-0.98
7	0.022975	0.000543	0.000003	0.282354	0.000014	155	0.282352	-14.8	-11.46	1254	1933	682	-0.98
8	0.016284	0.000371	0.000014	0.282339	0.000015	160	0.282338	-15.32	-11.83	1268	1961	702	-0.99
9	0.037336	0.000990	0.000046	0.282328	0.000018	155	0.282325	-15.71	-12.41	1304	1992	734	-0.97
10	0.017880	0.000432	0.000018	0.282340	0.000019	159	0.282339	-15.26	-11.82	1268	1958	701	-0.99
11	0.051107	0.001498	0.000012	0.282347	0.000026	158	0.282342	-15.04	-11.74	1295	1951	714	-0.95
Hf1123-4													
1	0.020406	0.000527	0.000019	0.282340	0.000016	152	0.282339	-15.27	-11.98	1272	1965	703	-0.98
2	0.023810	0.000676	0.000010	0.282366	0.000014	156	0.282364	-14.35	-11	1240	1903	664	-0.98
3	0.016728	0.000391	0.000002	0.282344	0.000017	153	0.282343	-15.14	-11.81	1262	1954	694	-0.99
4	0.020465	0.000494	0.000012	0.282345	0.000017	149	0.282344	-15.08	-11.87	1263	1954	694	-0.99
5	0.023631	0.000576	0.000008	0.282693	0.000051	152	0.282692	-2.79	0.51	783	1172	129	-0.98
6	0.047392	0.001325	0.000017	0.282149	0.000020	156	0.282145	-22.03	-18.76	1568	2393	1037	-0.96
7	0.019999	0.000489	0.000015	0.282345	0.000017	150	0.282344	-15.1	-11.86	1263	1953	695	-0.99
8	0.030818	0.000908	0.000013	0.282338	0.000022	149	0.282335	-15.36	-12.19	1288	1974	715	-0.97
9	0.021712	0.000535	0.000020	0.282342	0.000017	148	0.28234	-15.22	-12.03	1270	1964	701	-0.98
10	0.029223	0.000910	0.000015	0.282330	0.000024	148	0.282328	-15.62	-12.46	1298	1990	728	-0.97
11	0.016147	0.000411	0.000013	0.282294	0.000015	153	0.282293	-16.89	-13.58	1331	2065	774	-0.99

## 6.2. 构造意义

白石峰二云母花岗岩, 本次锆石 U-Pb 定年结果分别为  $157 \pm 2$  Ma 与  $151 \pm 2$  Ma, 考虑误差等因素, 两个样品测年结果差距不大。此外, 李建华[10]测得白石峰花岗岩岩体的年龄为 151 Ma~150 Ma, 与本文年龄差别不大。综合考虑, 可以确定白石峰岩体为燕山期岩体, 年代为晚侏罗世。

花岗岩地球化学特征既可以反映其源区性质, 也可提供构造环境方面信息。在微量元素构造环境判别图解中(图 7(e)、图 7(f)), 白石峰二云母花岗岩落入后碰撞花岗岩的区域, 指示花岗岩形成于碰撞作用后的后碰撞造山环境, 应力状态为伸展[30]。汪洋等[31]在分析湘东北晚燕山期强过铝质花岗岩时, 同样指出该地区的花岗岩形成于后造山的背景中, 并且根据其提出的该地区晚燕山期强过铝质花岗岩分类, 本文中的白石峰花岗岩基本属于 Frost 等[22]定义的镁质的钙碱性 - 碱钙质过铝花岗岩类, 属于高钾钙碱性系列。

华南地区的构造环境在燕山期主要受到古太平洋的影响, 周新民等[32]等在对南岭地区研究时提出, 洋对陆的消减过程中的伸展造山作用形成了晚中生代燕山期的花岗岩。许志琴等[33]认为中晚中生代(170 Ma~135 Ma)大规模的地壳伸展发生在中国东部。在晚中生代, 古太平洋板块由斜向俯冲转为平行于欧亚大陆边缘, 并且造成了大规模的地壳伸展、岩石圈减薄以及软流圈物质上涌[34]。综上, 该区域在晚中生代, 区域上的构造环境以伸展为主, 结合白石峰岩体的年龄与主微量元素特征, 白石峰花岗岩为后碰撞花岗岩, 产生于区域伸展的构造环境之下, 来自软流圈地幔的平流热传递和基性岩浆对地壳的加热作用形成了白石峰花岗岩。

## 7. 结论

1) 样品花岗岩测得锆石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为  $157 \pm 2$  Ma 与  $151 \pm 2$  Ma, 显示白石峰岩体形成于晚侏罗世。

2) 白石峰花岗岩具有强过铝质、镁质、高钾钙碱性等特征。其岩石组成与全岩地球化学特征均具有 S 型花岗岩的特征, 其源岩主要来自地壳, 可能来源于该地区前寒武纪基底的部分熔融。

3) 结合地球化学特征显示, 白石峰花岗岩形成于后碰撞造山环境。华南地区晚中生代以来构造转入伸展的环境, 而白石峰花岗岩的形成受区域伸展作用的影响, 与地壳伸展和岩石圈减薄有关。

## 基金项目

中国地质调查项目(121201102000150009)。

## 参考文献

- [1] 任纪舜. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [2] 任纪舜. 论中国南部的大地构造[J]. 地质学报, 1990(4): 275-288.
- [3] 任纪舜. 印支运动及其在中国大地构造演化中的意义[J]. 地球学报, 1984, 6(2): 31-44.
- [4] 陈卫锋, 陈培荣, 黄宏业, 等. 湖南白马山岩体花岗岩及其包体的年代学和地球化学研究[J]. 中国科学, 2007, 37(7): 873-893.
- [5] 刘建清, 谢渊, 赵瞻, 等. 湖南雪峰山地区白马山花岗岩年代学特征及构造意义[J]. 地学前缘, 2013, 20(5): 25-35.
- [6] 刘清泉, 邵拥军, 陈昕梦, 等. 豫南新县岩体地球化学、年代学和 Hf 同位素特征及地质意义[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2016, 41(8): 1275-1294.
- [7] 姚远, 陈骏, 陆建军, 等. 湘东锡田 A 型花岗岩的年代学、Hf 同位素、地球化学特征及其地质意义[J]. 矿床地质, 2013, 32(3): 467-488.

- [8] 马铁球, 李彬, 陈焰明, 等. 湖南南岳岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地球化学特征[J]. 中国地质, 2013, 40(6): 1712-1724.
- [9] 肖庆辉. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社, 2002.
- [10] 李建华. 华南中生代大地构造过程[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质科学院, 2013.
- [11] 张进业. 衡山变质核杂岩体西缘构造特征[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 1994(1): 18-22.
- [12] Jianhua, L.I., Zhang, Y., Dong, S., *et al.* (2013) The Hengshan Low-Angle Normal Fault Zone: Structural and Geochronological Constraints on the Late Mesozoic Crustal Extension in South China. *Tectonophysics*, **606**, 97-115. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.05.013>
- [13] 湖南省地质矿产局. 湖南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1988.
- [14] Liu, Y., Gao, S., Hu, Z., *et al.* (2010) 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. *Journal of Petrology*, **51**, 392-399. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- [15] Söderlund, U., Patchett, P.J., Vervoort, J.D., *et al.* (2004) The  $^{176}\text{Lu}$  Decay constant Determined by Lu-Hf and U-Pb Isotope Systematics of Precambrian Mafic Intrusions. *Earth & Planetary Science Letters*, **219**, 311-324. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(04\)00012-3](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(04)00012-3)
- [16] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 23(2): 185-220.
- [17] Blichert-Toft, J. and Francis, A. (1997) The Lu-Hf Isotope Geochemistry of Chondrites and the Evolution of the Mantle-Crust System. *Earth and Planetary Science Letters*, **148**, 243-258. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(97\)00040-X](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)00040-X)
- [18] Griffin, W., Wang, X., Jackson, S.E., *et al.* (2002) Zircon Chemistry and Magma Mixing, SE China; *In-Situ* Analysis of Hf Isotopes, Tonglu and Pingtan Igneous Complexes. *Lithos*, **61**, 237-269. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(02\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(02)00082-8)
- [19] Norrish, K. and Hutton, J.T. (1969) An Accurate X-Ray Spectrographic Method for the Analysis of a Wide Range of Geological Samples. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, **33**, 431-453. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(69\)90126-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(69)90126-4)
- [20] 闫欣, 许荣华. 等离子体质谱法测定岩石中的锆、铪、铌、钽[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(4): 458-460.
- [21] Le Maitre, R.W., Bateman, P. and Dudek, A. (1989) A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms: Recommendations of the IUGS, Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Blackwell, Oxford.
- [22] Frost, B.R., Barnes, C.G., Collins, W.J., *et al.* (2001) A Geochemical Classification for Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, **42**, 2033-2048. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.11.2033>
- [23] Maniar, P.D. and Piccoli, P.M. (1989) Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of American Bulletin*, **101**, 635-643. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101<0635:TDOG>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<0635:TDOG>2.3.CO;2)
- [24] Frost, B.R. and Frost, C.D. (2008) A Geochemical Classification for Feldspathic Igneous Rocks. *Journal of Petrology*, **49**, 1955-1969. <https://doi.org/10.1093/petrology/egn054>
- [25] Sun, S.S. and McDonough, W.F. (1989) Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Process. In: Saunders, A.D. and Norry, M.J., Eds., *Magmatism in the Ocean Basins*, Geological Society Special Publications, Vol. 42, 313-345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- [26] 贾大成, 胡瑞忠. 湘东北燕山晚期花岗岩构造环境判别[J]. 地球与环境, 2002, 30(2): 10-14.
- [27] 张旗, 冉峰, 李承东. A型花岗岩的实质是什么?[J]. 岩石矿物学杂志, 2012, 31(4): 621-626.
- [28] Whalen, J.B., Currie, K.L. and Chappell, B.W. (1987) A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **95**, 407-419. <https://doi.org/10.1007/BF00402202>
- [29] Pearce, J.A., Harris, N.B.W. and Tindle, A.G. (1984) Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, **25**, 956-983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- [30] 韩宝福. 后碰撞花岗岩类的多样性及其构造环境判别的复杂性[J]. 地学前缘, 2007, 14(3): 64-72.
- [31] 汪洋, 邓晋福. 湘东北地区燕山晚期强过铝质花岗岩的岩石化学特征及构造背景探讨[J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(1): 60-68.
- [32] 周新民, 陈培荣, 徐夕生. 南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [33] 许志琴, 张泽明, 刘福来, 等. 苏鲁高压-超高压变质带的折返构造及折返机制[J]. 地质学报, 2003, 77(4): 433-450.
- [34] 毛景文, 张作衡, 余金杰, 等. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示[J]. 中国科学: 地球科学, 2003, 33(4): 289-299.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2163-3967，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ag@hanspub.org](mailto:ag@hanspub.org)