

## 湘东北金鸡金矿床岩体成岩机制

隗含涛<sup>1, 2, 3)</sup>, 邵拥军<sup>2, 3)</sup>, 汪 程<sup>2, 3)</sup>, 刘清泉<sup>2, 3)</sup>, 刘忠法<sup>2, 3)</sup>, 肖克炎<sup>1)</sup>

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2) 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083;

3) 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, 湖南长沙 410083

**摘 要:** 江南造山带湖南段中早古生代花岗质岩石对于研究早古生代构造演化以及金成矿作用具有重要的意义。位于该区中段的金鸡金矿床钻孔中新发现有两类花岗质岩石, 分别为花岗岩和花岗闪长岩。对两类岩体样品进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年, 获得的年龄分别为(425.2±1.5) Ma 和(430.6±1.5) Ma。岩石地球化学数据表明, 花岗岩属 I 型花岗岩, 其来源于地壳中变泥质岩石的部分熔融; 花岗闪长岩属埃达克岩, 其起源于地壳中变砂质岩石的部分熔融。Sr-Nd 同位素分析显示, 金鸡花岗闪长岩具有较高的 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> (0.722 369~0.722 488)、较低的(<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>i</sub> (0.511 941~0.511 990)以及 εNd(t)值较低(-8.2~-7.2), 并且金鸡花岗闪长岩的二阶段 Nd 模式年龄值为 1.75~1.84 Ga, 与江南造山带变质基底的二阶段模式年龄(1.65~2.14 Ga)一致。金鸡金矿床花岗岩和花岗闪长岩的岩石地球化学、年代学以及 Sr-Nd 同位素特征表明二者是华南早古生代陆内造山事件的产物, 岩体成因及地球动力学背景的研究将有助于揭示湘东北地区金矿形成的地球动力学机制。

**关键词:** 花岗岩; 花岗闪长岩; 岩石地球化学; 年代学; 金鸡金矿床; 江南造山带

中图分类号: P581 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2020.010701

## Petrogenesis of the Granitoids in the Jinji Au Deposit, Northeastern Hunan Province

WEI Han-tao<sup>1, 2, 3)</sup>, SHAO Yong-jun<sup>2, 3)</sup>, WANG Cheng<sup>2, 3)</sup>, LIU Qing-quan<sup>2, 3)</sup>,  
LIU Zhong-fa<sup>2, 3)</sup>, XIAO Ke-yan<sup>1)</sup>

1) MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha, Hunan 410083;

3) Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring (Ministry of Education), Central South University, Changsha, Hunan 410083

**Abstract:** The Middle–Early Paleozoic granitoids in Hunan section of the Jiangnan orogenic belt are of great significance for the study of the Early Paleozoic tectonic evolution and gold mineralization. Two types of granitoids, i.e., granite and granodiorite, were recently found in the Jinji gold deposit, which is located in the central section of the orogenic belt. Two types of rock samples were dated by zircon La-ICPMS U-Pb technique, and the results show that the granite and granodiorite yielded U-Pb zircon ages of (425.2±1.5) Ma and (430.6±1.5) Ma, respectively. The geochemical data shows that the granite belongs to I-type granite, which was derived from partial melting of metapelitic rocks in the crust; the granodiorite belongs to adakite, which was derived from partial melting of metasandy rocks in the crust. The Sr-Nd isotopic analysis shows that the granodiorite has higher (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub> values of 0.722 369 and 0.722 488, lower (<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>i</sub> values of 0.511 941 and 0.511 990 and lower εNd(t) values of 8.2 and 7.2, and the two-stage Nd model ages of the granodiorite are

本文由国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项课题(编号: 2017YFC0601501)和中南大学创新驱动计划(编号: 1053320180985)联合资助。

收稿日期: 2019-11-20; 改回日期: 2019-12-23; 网络首发日期: 2020-01-08。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 隗含涛, 男, 1988 年生。博士后。主要从事铅锌及金成矿学研究。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。

E-mail: csuwht@126.com。

1.75 Ga and 1.84 Ga, which are consistent with the ages of metamorphic basement in the Jiangnan orogenic belt (1.65~2.14 Ga). The petrogeochemical, geochronologic and Sr-Nd isotopic characteristics of granites and granodiorites in the Jinji gold deposit indicate that they were produced by Early Paleozoic intracontinental orogenic events in South China, and the results help to investigate the geodynamic mechanism for Au mineralization in northeastern Hunan Province.

**Key words:** granite; granodiorite; petrogeochemistry; geochronology; Jinji Au deposit; Jiangnan orogenic belt

华南地块位于特提斯构造域和滨太平洋构造域的中间部位,是由扬子和华夏板块在格林威尔造山事件中汇聚形成的(Li et al., 2002)。华南地块在形成统一的华南大陆之后,又遭受了多期的构造运动改造(早古生代的加里东运动、中生代的印支运动和燕山运动)(舒良树, 2006; Wang et al., 2007; Li et al., 2010; Wang and Shu, 2012; 黄建中等, 2020; 孙骥等, 2020)。在华南地块的东部分布有大量的呈面状展布的早古生代花岗质岩石(Faure et al., 2009; Charvet et al., 2010; Li et al., 2010; Wang et al., 2010; 张岳桥等, 2012),总面积 2 万余 km<sup>2</sup>(舒良树, 2006)。然而,华南加里东期花岗质岩石相比印支期、特别是燕山期花岗质岩,研究程度相对薄弱(许德如等, 2009)。由于对华南晚前寒武—早古生代地球动力学背景认识上的差异(周新民, 2003; 王德滋和沈渭洲, 2003),使得对华南加里东期花岗质岩石的成因及相应的构造岩浆事件的认知尚未统一,存在两种截然不同的动力学模式观点:(1)陆-弧-陆碰撞模式,距今 400~800 Ma 前,由于华南大陆的裂解在扬子板块和华夏板块之间可能形成了多个陆间海(饶家荣等 1993; 余达淦, 1994),或者存在一个成熟的洋盆(曾勇和杨明桂, 1999)。在约 400 Ma 前,多阶段的俯冲-碰撞导致了加里东期花岗质岩石的形成(饶家荣等 1993; 余达淦, 1994)。相似地,孙明志和徐克勤(1990)认为加里东早期花岗岩(>420 Ma)是华南海(浙赣湘粤桂大洋)与扬子地块相互作用的产物,而加里东晚期花岗岩(<420 Ma)是华夏板块与扬子板块相互碰撞的产物。由于洋片沿北西方向向扬子板块东南缘俯冲,华夏板块逐渐向扬子板块靠拢,并首先与大陆边缘弧发生碰撞,造成洋盆关闭、蛇绿岩侵位及加里东早期花岗质岩产生(许德如等, 2006)。该弧-陆碰撞进而触发了扬子板块东南缘的弧后盆地关闭及扬子与华夏板块间的最终碰撞,并使扬子板块东南缘弧下地壳加厚,该事件的发生时间为 460~400 Ma(许德如等, 2006)。(2)陆内造山模式,早古生代华南大陆经历了强烈的造山作用,导致陆壳显著缩短和加厚,前泥盆纪岩石变形变质,并诱发地壳广泛熔融形成大规模 S 型花岗岩(e.g., Faure et al., 2009; Charvet et al., 2010; Shu et al., 2014)。此外,华南早古生代花岗岩远离板块边界,缺失早古生代蛇绿岩套和岛弧型花岗岩,这些均认

为是陆内造山作用的证据(Faure et al., 2009; Charvet et al., 2010; Li et al., 2010; Wang et al., 2010; 张岳桥等, 2012)。华南早古生代陆内造山作用可划分为两个阶段,早期挤压造山诱发南华裂谷盆地强烈褶皱和逆冲推覆,导致地壳加厚并发生部分熔融,形成高温高压变质和深熔作用(Li et al., 2010; 李建华等, 2015);晚期后造山伸展导致造山带伸展垮塌,并诱发大规模后造山花岗质岩浆侵位(徐先兵等, 2009; 李建华等, 2015)。

金鸡矿床是湘东北地区新近发现的一个中型早古生代金矿床,矿床地质特征、流体包裹体以及 H-O-S-Pb 同位素组成特征显示(数据未发表),金成矿与早古生代花岗质岩浆有密切的成因联系,其成矿流体与造山型金矿床及与侵入岩有关的金矿床的成矿流体的特征相似。尽管造山型金矿床和与侵入体有关的金矿床在某些特征方面具有一定的相似性,如与单相侵入体之间不精确的成因联系,金属矿物和矿化分带不发育,成矿和成岩之间存在明显的时间间隔,成矿流体具有低盐度、富 CO<sub>2</sub> 包裹体特征(Sillitoe et al., 1998),但与侵入体有关的金矿床的成矿作用更为复杂,与不同的构造环境有关(Sillitoe and Thompson, 1998; Goldfarb and Groves, 2015)。因此对本区早古生代花岗质岩浆的地球化学特征及成矿动力学背景的研究有助于解释金鸡矿床的成因类型,指导下一步找矿勘查工作的方向。

本次研究选择金鸡矿床钻孔中发现的两类早古生代花岗质岩石样品进行岩石地球化学、锆石 LA-ICPMS U-Pb 年龄以及 Sr-Nd 同位素组成测试,约束其成岩年龄、成岩物质来源以及形成的大地构造背景,旨在探讨早古生代江南造山带中段的动力学背景以及为准确厘定金鸡矿床的成因夯实基础。

## 1 区域地质特征

湘东北地区位于江南造山带中段(图 1a),区域地层包括中元古代冷家溪群变质沉积岩和中生代原冲积-浅海-河流相的红色碎屑岩。此外,在黄金洞矿区还产出太古宙至古元古代连山群变质岩和古元古代江西冲群的地层。连山群变质岩的岩性为一列原岩为火山沉积岩的角闪岩相黑云母片岩,局部含斜长片麻岩层和斜长角闪岩的夹层。江西冲群的岩石主要由变质火山碎屑岩和磁铁矿石岩组成(约

2.0~1.8 Ga)。

区域尺度的断裂可分为三组: 北西向断裂、东西向断裂和北东向至北北东向断裂(图 1b)。早新元古代造山运动(武陵造山运动)中, 冷家溪组地层在南北向挤压作用下发生强烈的褶皱和断裂。随后的中新元古代造山运动(雪峰造山运动)引起了第二期的褶皱和断裂作用, 形成了本区北西向的构造(Xu et al., 2017)。东西向构造形成于加里东造山运动中(Xu et al., 2017; Deng et al., 2017), 构造形式主要为反转褶皱, 并伴有韧性和脆性逆冲褶皱。根据地球物理数据, 上述东西向褶皱可能延伸到地壳的底部(许德如等, 2009; Deng et al., 2017)。由于印支板块和欧亚板块在早中生代发生碰撞, 构造的远程效应是湘东北地区 NW-SE 向发生最大压缩的主要原因(Chu et al., 2012; Wang and Shu, 2012), 并形成一系列轴向为北东向和北北东的逆冲褶皱(许德如等, 2009; 李三忠等, 2011)。随着北西—南东向的应力场的减弱, 南北向压缩仍在继续。在多重性质和多方向的构造影响下, 湘东北地区形成了一系列北东走向变形带, 包括北东向褶皱、韧性剪切带和叠

瓦状逆冲褶皱(许德如等, 2017)。中生代晚期, 主应力方向转换为北西向, 早期的东西向、北东向、北西向断裂处于张拉状态, 形成本区以北北东为主的构造体系(Xu et al., 2017)。

区域上的岩浆活动大致分为四期: 晚新元古代、早古生代、早中生代和晚中生代(Zhou et al., 2006; Zhao and Cawood, 2012; Shu et al., 2014, 2015)。在新元古代晚期, 湘东北在地幔柱作用下形成了一个活跃的大陆岛弧, 导致华南地块解体, 形成了裂谷盆地, 由此引发了大规模的岩浆活动。该期岩浆活动的时间峰值约为 825 Ma、800 Ma、780 Ma 和 750 Ma (李建华等, 2015), 在湘东北地区形成了长山背、大围山、葛腾岭和半北等花岗质侵入体(Xu et al., 2017)。早古生代陆内造山作用导致华南裂谷盆地闭合(Faure et al., 2009; Charvet et al., 2010; 李建华等, 2015), 伴随有地壳的增厚熔融、同造山作用的岩浆侵入和高级变质作用(李建华等, 2015), 形成了板杉铺和宏夏桥花岗闪长岩体(许德如等, 2006; 李建华等, 2015)。随着特提斯洋在早中生代的闭合(250~230 Ma), 华南地块沿着南北两个缝合带分别与印支板块和华北板块碰撞, 形成松马缝合带和秦岭—大别缝合带(Carter et al., 2001), 并且在随后的后造山伸展时期(约 230~210 Ma)在华南地区(包括湘东北地区)诱发了大量的花岗岩浆(Li et al., 2014; 李建华等, 2015)。在中生代末期(约 136~85 Ma), 由于古太平洋板块的北西向俯冲, 华南陆块挤压增厚→扩展崩塌, 形成一系列 NE-SW 向的侵入岩穹隆, 以及伴随的大规模的侵入和火山喷发的岩浆(张岳桥等, 2012), 例如, 连云山花岗岩体(易祖水等, 2010)。

## 2 岩体地质特征

矿区西侧靠近板杉铺和宏夏桥岩体, 但在对矿区的野外露头进行调研时并未发现有岩体出露。在对金鸡金矿床的钻孔进行岩芯编录时, 在钻孔 ZK501 和 ZK801 中发现有 2 类岩体产出。在 ZK501 钻孔的 159 m 处发现花岗岩(图 2a, b), 中-细粒, 主要矿物为石英(~40%)、钾长石(~40%)、斜长石(~10%)和黑云母(~10%), 副矿物为锆石和磷灰石。在 ZK801 钻孔的 140 m 处发现花岗闪长岩(图 2c, d), 中-细粒, 主要矿物为斜长石(~55%)、钾长石(~10%)、黑云母(~5%)、角闪石(~15%)、石英(~15%), 副矿物为锆石和磷灰石。

## 3 岩体地球化学特征

### 3.1 主量元素

主量元素测试的分析仪器为 X 荧光光谱分析仪,

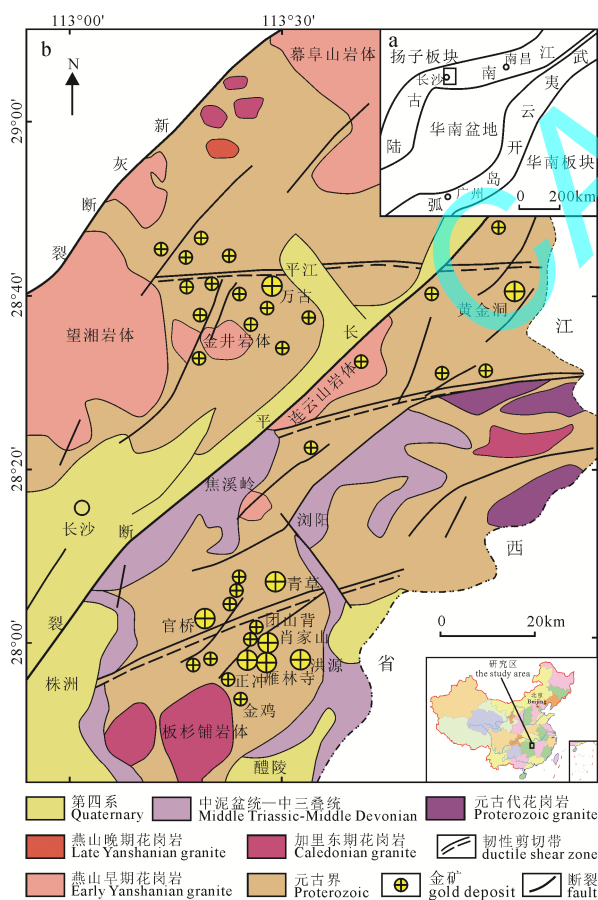


图 1 华南构造划分(a)及湘东北区域地质、构造、岩浆和矿产图(b)

Fig. 1 Tectonic map of South China Block (a) and regional geological, structural, magmatic and metallogenic map of northeastern Hunan Province in the Jiangnan orogenic belt (b)



微量、稀土元素测试的分析仪器为质谱/光谱分析仪,测试单位为广州澳实分析检测有限公司,测试方法为:ME-XRF26d 进行主量元素测试,ME-MS81+ME-ICP61 进行微量、稀土元素测试。

#### (1)花岗岩

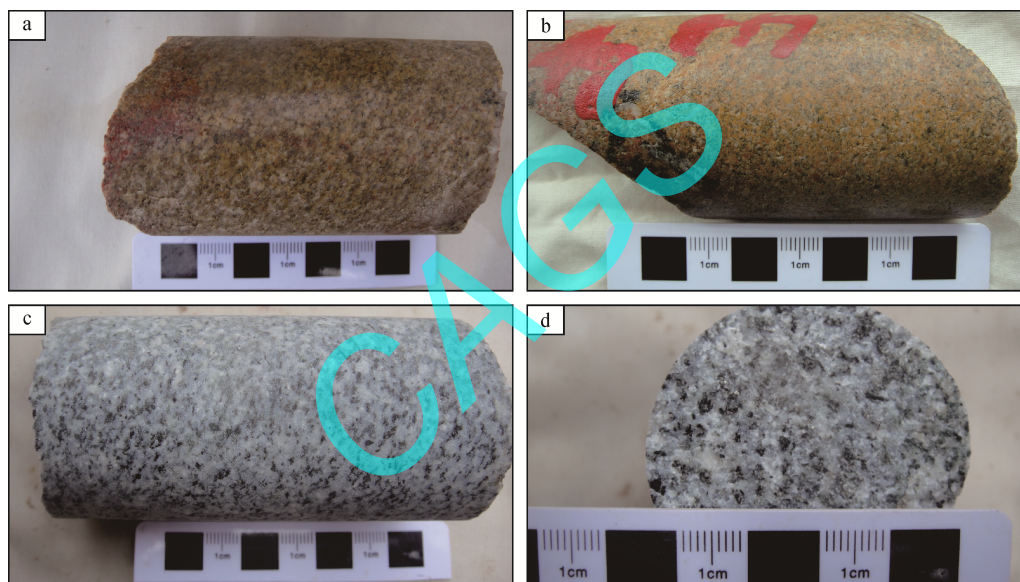
花岗岩主量元素特征如下(表 1): (1)SiO<sub>2</sub> 含量为 71.44%~74.47%, 属酸性岩类。贫 Mg (MgO=0.73%~1.20%), 贫 钙 (CaO=0.05%~0.12%), 低 TiO<sub>2</sub> (0.18%~0.24%) 和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0.01%~0.03%); (2)岩石中(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)为 5.73%~6.82%, K<sub>2</sub>O 含量在 5.64%~6.70%, Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O 值为 0.016~0.020, 岩石富钾; 碱度率 AR 为 2.30~2.76, 里特曼组合指数(σ)为 1.03~1.52, 属于钙碱性岩。在 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 图解(图 3)中, 样品点落于钾玄岩系列区域内, 表明花岗岩为钾玄岩系列岩石; (3)铝饱和指数 A/CKN 为 1.90~2.29, 在岩体 A/NK-A/CKN 图解(图 3)中, 岩

体样品点均落于过铝质岩石范围内, 显示本区岩体为过铝质岩石。

#### (2)花岗闪长岩

花岗闪长岩主量元素特征如下(表 1):

(1)SiO<sub>2</sub> 含量为 64.52%~66.06%, 属酸性岩类。富 Mg(MgO=2.03~2.36%), 富 钙 (CaO=3.53~3.78%), 低 TiO<sub>2</sub>(0.43%~0.50%) 和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(0.12%~0.14%); (2)岩石中(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O)为 5.96%~6.71%, K<sub>2</sub>O 含量为 2.65%~3.27%, Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O 值为 1.05~1.25, 岩石相对富钾; 碱度率 AR 为 1.90~2.06, 里特曼组合指数(σ)为 1.61~1.93。在 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 图解(图 3)中, 样品点落于高钾钙碱性系列的区域内, 表明花岗闪长岩为高钾钙碱性系列岩石; (3)铝饱和指数 A/CKN 为 0.99~1.07, 在岩体 A/NK-A/CKN 图解(图 3)中, 样品点均在过铝质范围内, 显示岩体为过铝质岩石。



a, b—花岗岩; c, d—花岗闪长岩。

a, b—granite; c, d—granodiorite.

图 2 金鸡两类岩体的手标本照片

Fig. 2 Hand specimen photographs of the Jinji granitoids

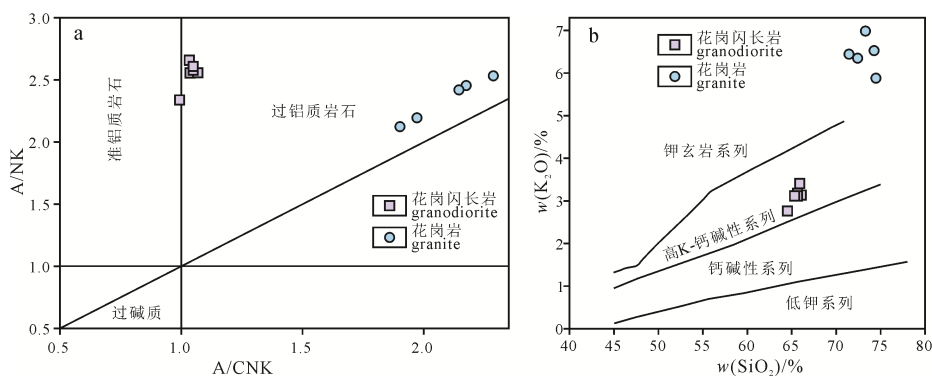


图 3 金鸡花岗岩和花岗闪长岩的 A/NK-A/CKN (a, 据 Maniar and Piccoli, 1989) 和  $w(K_2O)-w(SiO_2)$  (b, 据 Morrison, 1980)图解

Fig. 3 Discriminating diagrams of A/NK-A/CKN (a, after Maniar and Piccoli, 1989) and  $w(K_2O)-w(SiO_2)$  (b, after Morrison, 1980) for the Jinji granitoids



表 1 金鸡两类岩体全岩分析结果及岩石化学特征值表/%  
Table 1 Major elements contents and characteristic values of the Jinji granitoids/%

样号	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BaO	CaO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SiO <sub>2</sub>	SrO	TiO <sub>2</sub>	LOI	Total
ZK501-3-5	14.51	0.07	0.05	<0.01	1.53	5.64	0.74	0.01	0.09	0.01	74.47	0.01	0.18	2.29	99.60
ZK501-3-2	14.48	0.07	0.09	0.01	2.02	6.70	0.73	0.01	0.12	0.03	73.29	0.01	0.22	2.20	99.98
ZK501-3-1	15.24	0.06	0.12	<0.01	2.10	6.18	1.20	0.01	0.12	0.03	71.44	0.01	0.24	2.90	99.65
ZK501-3-3	15.24	0.07	0.12	<0.01	2.06	6.09	1.03	0.04	0.12	0.02	72.41	0.01	0.24	2.69	100.14
ZK501-3-4	14.00	0.07	0.07	0.01	1.91	6.26	0.92	0.02	0.12	0.02	74.26	0.01	0.21	2.07	99.95
ZK801-19	16.09	0.11	3.78	0.01	4.00	2.99	2.30	0.07	3.18	0.14	65.32	0.05	0.49	1.89	100.42
ZK801-16	15.69	0.09	3.63	0.01	3.58	3.27	2.03	0.06	3.44	0.13	65.90	0.04	0.43	2.23	100.53
ZK801-18	15.84	0.08	3.86	0.01	4.10	2.65	2.36	0.06	3.31	0.14	64.52	0.05	0.50	2.43	99.91
ZK801-15	16.06	0.08	3.71	0.01	3.90	2.99	2.22	0.06	3.24	0.14	65.64	0.05	0.47	1.51	100.08
ZK801-17	16.06	0.10	3.53	0.01	3.98	3.05	2.27	0.07	3.23	0.14	65.65	0.05	0.48	1.60	100.22
ZK801-14	15.82	0.07	3.73	0.01	3.86	3.01	2.20	0.06	3.18	0.12	66.06	0.04	0.48	1.27	99.91

表 2 金鸡两类岩体微量元素及稀土元素组成/10<sup>-6</sup>  
Table 2 Trace and rare earth elements contents of the Jinji granitoids/10<sup>-6</sup>

样号	Rb	Ba	Th	U	Ta	Nb	Sr	Zr	Hf	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y
501-3-5	451.0	590	15.70	5.67	1.0	7.1	22.6	176	4.8	23.2	41.6	4.46	16.1	3.26	0.55	1.91	0.28	1.48	0.26	0.71	0.10	0.68	0.10	8.0
501-3-2	441.0	630	17.05	4.91	0.8	7.3	53.8	200	5.0	27.2	49.5	5.18	18.0	3.10	0.57	2.15	0.28	1.49	0.27	0.73	0.11	0.72	0.11	9.1
501-3-1	400.0	590	16.05	5.13	1.2	8.2	59.0	159	4.7	27.1	46.8	5.08	16.7	2.94	0.57	2.25	0.31	1.50	0.29	0.79	0.11	0.74	0.11	8.5
501-3-3	419.0	640	16.50	4.04	1.0	7.3	59.7	189	5.6	33.6	50.1	6.53	21.6	4.09	1.01	3.46	0.40	1.82	0.34	0.79	0.11	0.67	0.10	11.8
501-3-4	457.0	640	14.55	4.16	0.8	6.6	51.8	259	7.0	19.6	32.6	3.81	12.7	2.44	0.52	1.70	0.24	1.23	0.24	0.68	0.10	0.66	0.10	9.2
801-19	124.5	890	20.00	10.00	0.6	7.5	455.0	274	6.9	42.9	80.9	8.30	28.6	4.37	0.91	2.55	0.37	2.15	0.43	1.09	0.15	0.99	0.15	12.7
801-16	136.0	710	20.00	10.00	0.5	7.4	335.0	258	6.5	39.7	76.0	7.86	26.9	4.17	0.82	2.79	0.38	2.18	0.43	1.04	0.17	1.12	0.17	12.9
801-18	123.5	690	20.00	10.00	0.6	8.5	402.0	270	6.8	42.6	81.0	8.39	28.8	4.61	0.84	2.80	0.40	2.31	0.42	1.19	0.17	1.08	0.17	13.4
801-15	142.5	700	20.00	10.00	0.5	7.9	385.0	255	6.1	39.3	75.1	7.81	26.8	4.09	0.87	2.50	0.37	2.05	0.39	1.01	0.14	0.94	0.14	11.8
801-17	145.0	820	20.00	10.00	0.7	8.0	424.0	291	7.8	38.2	70.8	7.57	25.5	4.33	0.89	3.18	0.43	2.22	0.43	1.16	0.17	1.15	0.18	14.5
801-14	149.0	620	30.00	10.00	0.7	7.4	358.0	296	7.8	37.5	65.1	7.12	23.7	3.74	0.93	2.70	0.35	1.89	0.41	1.11	0.16	1.01	0.16	12.9

### 3.2 微量元素

#### (1) 花岗岩

金鸡花岗岩的微量元素特征值见表 2, 微量元素蛛网图表明岩体的大离子亲石元素含量出现分化, 显著富集 Ba、Th、U 等元素, 强烈亏损 Nb、Ta、Sr(图 4a)。稀土总量( $\Sigma\text{REE}$ )在  $156.9 \times 10^{-6} \sim 182.6 \times 10^{-6}$  之间。轻稀土总量(LREE)的变化范围为  $76.62 \times 10^{-6} \sim 124.62 \times 10^{-6}$ , 平均含量为  $102.13 \times 10^{-6}$ ; 重稀土总量(HREE)的变化范围为  $4.95 \times 10^{-6} \sim 7.69 \times 10^{-6}$ , 平均为  $6.02 \times 10^{-6}$ ; 轻重稀土的比值(LREE/HREE)为 14.48~17.67, 平均值为 15.95。岩体的稀土配分模式呈右倾分布(图 4b), 轻稀土强烈富集, 表明轻重稀土之间分异程度较高。 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  为 21.30~35.97, 表明轻稀土元素内部也发生了强烈的分异作用。铕异常( $\delta\text{Eu}$ )值在 0.62~0.80 之间, 呈现出明显的 Eu 负异常, 铈异常( $\delta\text{Ce}$ )值变化范围为 0.78~0.96, 呈弱 Ce 负异常。

#### (2) 花岗闪长岩

金鸡花岗闪长岩的微量元素特征值见表 2, 微量元素蛛网图表明岩体的大离子亲石元素含量出现分化, 显著富集 Ba、Th、U 等元素, 而强烈亏损 Nb、Ta、Sr(图 4a)。稀土总量( $\Sigma\text{REE}$ )在  $145.88 \times 10^{-6} \sim 174.78 \times 10^{-6}$  之间。轻稀土总量(LREE)的变化范围为  $138.09 \times 10^{-6} \sim 166.24 \times 10^{-6}$ , 平均含量为  $154.50 \times 10^{-6}$ ; 重稀土总量(HREE)的变化范围为  $7.54 \times 10^{-6} \sim$

$8.92 \times 10^{-6}$ , 平均为  $8.16 \times 10^{-6}$ ; 轻重稀土的比值(LREE/HREE)为 16.51~21.06, 平均值为 18.99。岩体的稀土配分模式呈右倾分布(图 4b), 轻稀土强烈富集, 表明轻重稀土之间的分异程度较高。 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$  为 23.83~31.08, 表明轻稀土元素内部也发生了强烈的分异作用。铕异常( $\delta\text{Eu}$ )值在 0.66~0.85 之间, 呈现出明显的 Eu 负异常, 铈异常( $\delta\text{Ce}$ )值变化范围为 0.91~0.99, 呈弱 Ce 负异常。

### 4 岩体锆石 U-Pb 年代学特征

锆石的单矿物挑选、制靶及阴极发光照相(CL)在河北廊坊宏信公司进行。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年在南京聚谱有限公司进行, 仪器的工作状态为: 加速电压 15 kV, 束电流  $2 \times 10^{-8}$  A。仪器型号为 Thermo Xseries 2, 配置 Coherent 公司生产的 COMPexPro CO2F Geolas 193nm Ar F 准分子激光剥蚀系统, 分析过程中, 激光束斑直径为 30~40  $\mu\text{m}$ , 频率为 8 Hz, 能量密度  $8.5 \text{ J}/\text{cm}^2$ , 剥蚀时间 110 秒。最后使用 ICPMSDataCal-10.4 软件来处理数据结果。

#### 4.1 花岗岩

花岗岩锆石均呈自形柱状, 振荡环带和韵律环带发育, 具有内核, 为岩浆结晶的产物(图 5a), 其环带宽度较均匀, 暗示岩浆中锆石结晶时温度变化较均匀。锆石的粒径为 50~150  $\mu\text{m}$ , 长宽比为 1:1~4:1, 晶面和锥体形态较完好, 没有后期蚀变现象。

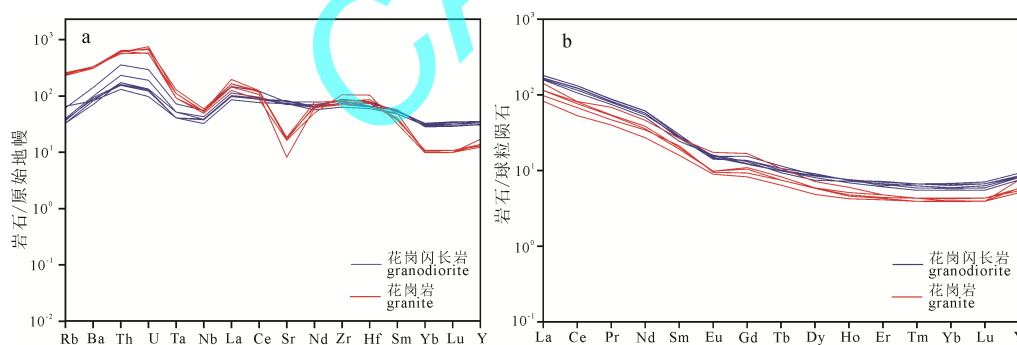


图 4 金鸡两类岩体微量元素蛛网图(a)及稀土元素配分图解(b)

Fig. 4 Primitive mantle-normalized spidergram (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of the Jinji granitoids

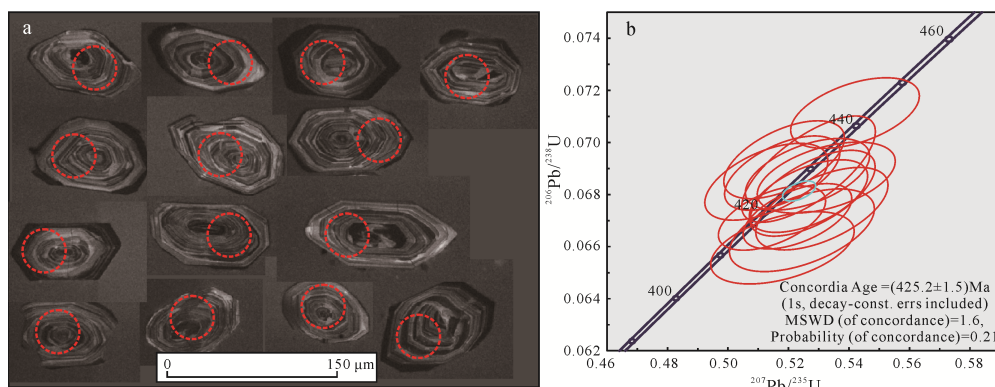


图 5 金鸡花岗岩锆石阴极发光图像及 U-Pb 年龄协和图解

Fig. 5 Cathodoluminescence (CL) images and zircon U-Pb concordia diagram of the Jinji granite

不同成因锆石 Th、U 含量及其比值不同。岩浆锆石中 Th 和 U 含量高, Th/U 值多在 0.1~1.0 之间 (Belousova et al., 2002), 一般大于 0.5, 而变质锆石的 Th、U 含量低, Th/U 值一般小于 0.1, 多在 0.01 左右 (Hoskin and Schaltegger, 2003)。花岗岩锆石微量元素测试结果显示 (表 3, Z2065), Th 的含量为  $260 \times 10^{-6} \sim 726 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $445 \times 10^{-6}$ 。U 的含量为  $387 \times 10^{-6} \sim 742 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $517 \times 10^{-6}$ 。其中 Th/U 值为 0.7~1.1, 平均值为 0.8。

金鸡花岗岩  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄区间为  $(411.8 \pm 5.5) \text{ Ma} \sim (442.9 \pm 5.4) \text{ Ma}$  (表 3)。本文用 ISOPLOT 程序对金鸡花岗岩岩体 14 颗锆石进行了谐和曲线投影, 并对  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄进行了加权平均计算, 岩体锆石 U-Pb 年龄均在谐和线上及其附近 (图 5b), 谐和年龄为  $(425.2 \pm 1.5) \text{ Ma}$  ( $1\sigma$ , MSWD=1.6,  $N=14$ ), 由于测试锆石均为岩浆锆石, 其加权平均年龄代表了金鸡花岗岩岩体的结晶年龄, 表明该岩体形成于晚志留世。

#### 4.2 花岗闪长岩

花岗闪长岩锆石均呈自形柱状, 振荡环带和韵律环带发育, 具有内核, 为岩浆结晶的产物 (图 6a), 其环带宽度较均匀, 暗示岩浆中锆石结晶时温度变化较均匀。锆石的粒径为 50~200  $\mu\text{m}$ , 长宽比为 1:1~4:1, 晶面和锥体形态较完好, 没有后期蚀变现象。

花岗闪长岩锆石微量元素测试结果显示 (表 3, Z2066), Th 的含量为  $272 \times 10^{-6} \sim 449 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $383 \times 10^{-6}$ 。U 的含量为  $349 \times 10^{-6} \sim 565 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $462 \times 10^{-6}$ 。其中 Th/U 的值为 0.7~1.1, 平均值为 0.8。金鸡花岗闪长岩  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄区间为  $(422.8 \pm 5.8) \text{ Ma} \sim (435.5 \pm 6.8) \text{ Ma}$ , 这些数据点均位于谐和线上或附近 (图 6b), 谐和年龄为  $(430.6 \pm 1.5) \text{ Ma}$  ( $1\sigma$ , MSWD=3.4,  $N=14$ ), 代表了金鸡花岗闪长岩岩体的结晶年龄, 表明该岩体形成于中志留世。

## 5 岩体 Sr-Nd 同位素组成

Sr-Nd 同位素分析在核工业北京地质研究院分析测试中心完成。使用 MAT-262 多接收热电离质谱仪进行同位素比值测试。测量精度优于 0.003%。

根据金鸡花岗岩锆石 U-Pb 年龄 (425 Ma) 算出花岗岩的 Sr 同位素初始比值  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.64609 \sim 0.64563$  (表 4), 低于地球初始 Sr 的含量, 表明岩石形成后遭受过后期热液蚀变, 将岩石中的 Sr 迁移出去, 所以花岗岩的初始 Sr 并不具有地质意义。

根据金鸡花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄 (430 Ma) 算出花岗闪长岩 Sr 同位素初始比值  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.71518 \sim 0.71548$ ,  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i = 0.511662 \sim 0.511716$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -8.2 \sim -7.2$ , Nd 同位素单阶段模式年龄  $T_{\text{DM1}} = 1.61 \sim 1.52 \text{ Ga}$ , 两阶段模式年龄  $T_{\text{DM2}} = 1.84 \sim 1.75 \text{ Ga}$  (表 4)。

## 6 讨论

### 6.1 岩石成因

根据花岗岩的源岩性质, 一般分为 I 型、S 型、M 型和 A 型花岗岩, 其中 M 型花岗质岩石鲜有报道。使用单一判别方法都会造成岩石类型判定的扩大, 因此, 本次研究尝试采用多种方法进行综合判断。Whalen et al. (1987) 的指标是目前最有效的花岗岩类型判定依据, 本次研究采用该指标进行花岗岩判定。在  $w(\text{Zr}+\text{Ce}+\text{Y}+\text{Nb}) - [(Ga/Al) \times 10^4]$ 、 $w(\text{FeO})/w(\text{MgO}) - w(\text{Zr}+\text{Ce}+\text{Y}+\text{Nb})$  和  $w(\text{Nb}) - [(Ga/Al) \times 10^4]$  组合指标图解中 (图 7a, b, c), 本区花岗岩落入 I 和/或 S 型的叠加区域内。相对于 S 型花岗岩, Sr、Ba 和 Eu 在 I 型花岗岩中的亏损程度更高 (Whalen et al., 1987; Chappell, 1999)。在微量元素蛛网图和稀土元素配分曲线上, 金鸡花岗岩呈现出强烈的 Sr、Ba 和 Eu 亏损的特征。不仅如此, 伴随着岩浆分异

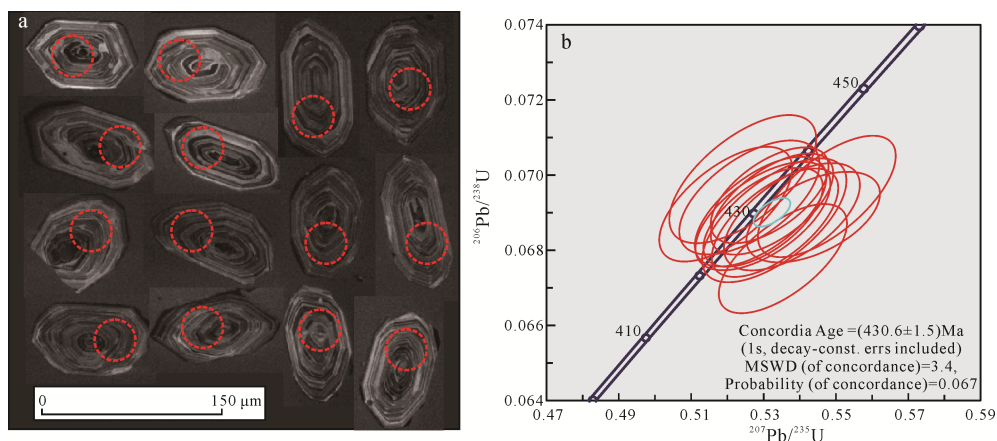


图 6 金鸡花岗闪长岩锆石阴极发光图像及 U-Pb 年龄协和图解

Fig. 6 Cathodoluminescence images and zircon U-Pb concordia diagram of the Jinji granodiorite

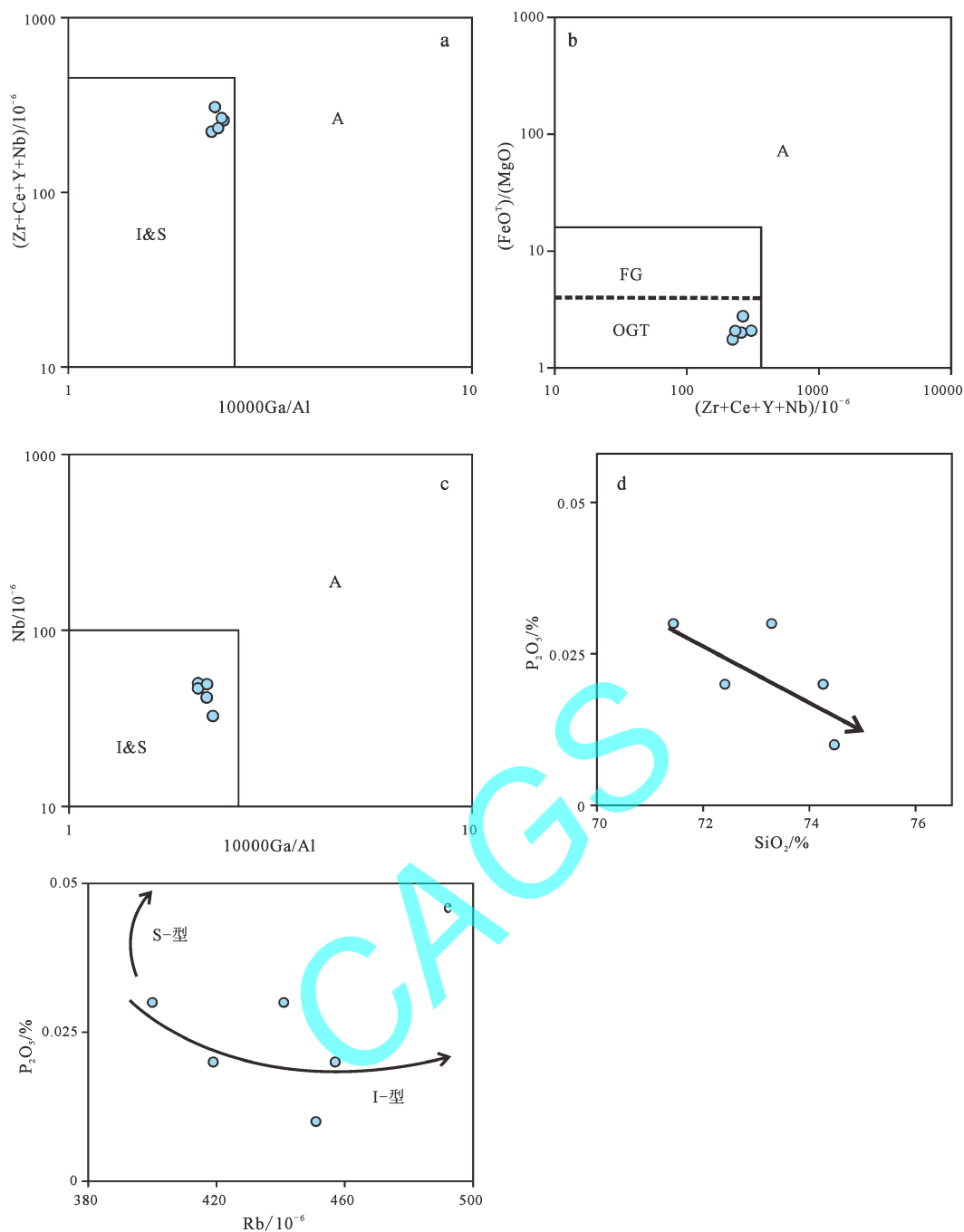


表 3 金鸡两类岩体锆石 U-Pb 年代学结果  
Table 3 The results of zircon U-Pb isotopic dating of the Jinji granitoids

样号	谐和度	Th /10 <sup>-6</sup>	U /10 <sup>-6</sup>	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb			<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U			<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		
				Ratio	1sigma	Ratio	Ratio	1sigma	Ratio	Ratio	1sigma	rho
Z2065-04	97%	267.1	387.4	0.057 0	0.001 7	0.524 4	0.015 8	0.066 6	0.001 0	0.521 0	415.8	6.3
Z2065-05	98%	453.5	454.1	0.054 2	0.001 3	0.518 6	0.013 2	0.069 3	0.001 0	0.560 5	432.2	6.0
Z2065-06	99%	726.2	679.5	0.055 3	0.001 8	0.514 6	0.011 7	0.067 1	0.000 8	0.533 5	418.6	4.9
Z2065-07	97%	295.3	435.0	0.056 9	0.001 9	0.518 0	0.015 7	0.066 0	0.000 9	0.459 8	411.8	5.5
Z2065-08	98%	260.3	399.8	0.054 0	0.001 3	0.512 7	0.013 4	0.068 5	0.001 0	0.543 0	427.1	5.9
Z2065-09	98%	437.5	528.4	0.056 2	0.001 3	0.526 6	0.012 9	0.067 9	0.000 9	0.552 3	423.7	5.6
Z2065-11	98%	326.9	418.3	0.056 1	0.001 5	0.532 5	0.015 1	0.068 6	0.000 9	0.463 4	428.0	5.4
Z2065-12	99%	481.9	607.1	0.055 2	0.001 3	0.526 3	0.013 6	0.068 8	0.000 9	0.511 8	428.8	5.5
Z2065-14	99%	508.9	543.6	0.055 4	0.001 4	0.526 6	0.014 6	0.069 0	0.001 3	0.705 5	430.0	8.1
Z2065-16	97%	464.1	554.5	0.056 9	0.001 4	0.531 1	0.014 4	0.067 5	0.001 0	0.570 3	420.8	6.3
Z2065-18	99%	383.5	425.1	0.055 1	0.001 3	0.542 0	0.014 0	0.071 1	0.000 9	0.485 2	442.9	5.4
Z2065-19	98%	670.0	741.5	0.056 6	0.001 3	0.523 0	0.011 8	0.067 2	0.000 8	0.543 8	419.1	5.0
Z2065-21	98%	382.2	502.3	0.056 1	0.001 2	0.528 0	0.013 6	0.068 1	0.001 1	0.618 5	424.4	6.6
Z2065-22	98%	570.6	555.4	0.054 6	0.001 2	0.517 9	0.012 6	0.068 8	0.000 9	0.562 8	429.1	5.7
Z2066-01	98%	350.4	437.3	0.054 2	0.001 1	0.519 6	0.012 1	0.069 2	0.001 0	0.623 8	431.5	6.1
Z2066-02	99%	392.1	475.9	0.055 3	0.001 3	0.531 7	0.010 7	0.069 5	0.000 8	0.600 1	432.9	5.1
Z2066-03	98%	417.1	392.8	0.054 4	0.001 3	0.524 3	0.013 4	0.069 9	0.001 1	0.630 5	435.5	6.8
Z2066-04	98%	272.6	367.1	0.056 5	0.001 4	0.537 8	0.012 4	0.068 9	0.000 9	0.593 3	429.5	5.7
Z2066-06	99%	413.4	490.4	0.055 5	0.001 1	0.529 2	0.012 0	0.069 0	0.001 0	0.617 0	430.3	5.8
Z2066-07	97%	375.4	526.0	0.057 2	0.001 2	0.535 3	0.011 7	0.067 8	0.001 0	0.647 9	422.8	5.8
Z2066-08	97%	337.5	349.2	0.057 8	0.001 8	0.547 5	0.012 6	0.069 4	0.001 1	0.669 2	432.7	6.4
Z2066-12	97%	431.1	565.2	0.056 9	0.001 3	0.543 7	0.012 2	0.068 9	0.000 8	0.516 1	429.4	4.8
Z2066-13	99%	383.0	477.9	0.054 4	0.001 6	0.526 1	0.012 8	0.069 4	0.001 0	0.594 2	432.6	6.0
Z2066-14	99%	390.5	467.1	0.055 6	0.001 1	0.529 9	0.010 9	0.068 9	0.000 9	0.613 8	429.4	5.2
Z2066-15	98%	374.7	434.5	0.056 0	0.001 2	0.533 0	0.013 2	0.068 8	0.001 1	0.640 5	428.9	6.6
Z2066-18	98%	448.6	556.4	0.056 2	0.001 2	0.533 2	0.011 5	0.068 7	0.001 0	0.640 5	428.5	5.7
Z2066-19	99%	389.1	489.8	0.055 5	0.001 1	0.532 3	0.011 2	0.069 2	0.000 9	0.611 0	431.5	5.4
Z2066-20	99%	392.1	436.4	0.055 7	0.001 4	0.529 8	0.012 3	0.068 9	0.001 0	0.594 9	429.6	5.7

表 4 金鸡两类岩体 Sr、Nd 同位素组成  
Table 4 Sr, Nd isotopic data of the Jinji granitoids

样品	<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr	<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	±2σ	( <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr) <sub>i</sub>	<sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	±2σ	T <sub>DM2</sub> /Ma	T <sub>DM1</sub> /Ma	( <sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd) <sub>i</sub>	ε <sub>Nd(t)</sub>
ZK501-3-1	19.116 309	0.761 806	0.000 012	0.646 09	0.110 490	0.511 943	0.000 008	1887	1781	0.511 635	-8.9
ZK501-3-3	19.789 542	0.765 421	0.000 015	0.645 63	0.118 840	0.511 967	0.000 012	1886	1899	0.511 636	-8.9
ZK801-14	1.173 544	0.722 369	0.000 022	0.715 18	0.099 041	0.511 941	0.000 007	1839	1607	0.511 662	-8.2
ZK801-16	1.144 696	0.722 488	0.000 017	0.715 48	0.097 292	0.511 993	0.000 008	1754	1519	0.511 716	-7.2



FG—分异的 I、S 型花岗岩; OGT—非分异的 I、S 型花岗岩。

FG—differentiated I- and S-type granites; OGT—nondifferentiated I- and S-type granites.

图 7 金鸡花岗岩成因图解

Fig. 7 Genetic diagrams for the Jinji granite

演化, 金鸡花岗岩  $P_2O_5$  含量逐渐降低, 与 S 型花岗岩  $P_2O_5$  含量逐渐升高的特征不符(李献华等, 2007)(图 7d), 并且岩体中并不含有 S 型花岗岩的代表性富铝矿物, 如蓝青石、石榴石和白云母等。在  $P_2O_5$ -Rb 图解中, 金鸡花岗岩也落入 I 型花岗岩的区域(图 7e)。

埃达克岩是一套具典型地球化学特征的中到酸性火山岩和侵入岩:  $SiO_2 \geq 56\%$ ,  $Al_2O_3 \geq 15\%$  和  $MgO$  通常小于 3%(很少高于 6%), 此外, 该岩类还具有低的 Y 和 HREE( $Y \leq 18 \times 10^{-6}$ ,  $Yb \leq 1.9 \times 10^{-6}$ )、

高的 Sr(很少小于  $400 \times 10^{-6}$ )和低的高场强元素(HFSEs)(Defant and Drummond, 1990)。金鸡花岗闪长岩的  $SiO_2$  含量为 64.52%~66.06%,  $Al_2O_3$  含量为 15.69%~16.09%,  $MgO$  含量为 2.03%~2.36%, Y 和 Yb 的含量为  $(11.8 \sim 14.5) \times 10^{-6}$  和  $(0.94 \sim 1.12) \times 10^{-6}$ , Sr 的含量高达  $(335 \sim 455) \times 10^{-6}$ , 金鸡花岗闪长主微量元素与典型埃达克岩的主微量组成具有明显相似性。不仅如此, 金鸡花岗闪长岩体还具有较高的 Sr/Y(27.8~35.8)和  $(La/Yb)_N$ (33.2~43.3), 也与埃达克质岩浆的特征相似(图 8)。

## 6.2 成岩物质来源

金鸡花岗岩和花岗闪长岩的 Nb/Ta 比分别为 6.8~9.1 和 10.6~15.8, 低于原始地幔的 Nb/Ta 比  $17.5 \pm 2.0$  (Green and Pearson, 1986), 金鸡花岗岩的 Nd/Th 值介于 0.87~1.31 之间, 远小于幔源部分熔融的花岗岩 ( $> 15$ ; Bea et al., 2001)。金鸡花岗岩和花岗闪长岩均具有高的 A/CNK 值, 暗示其岩浆可能来源于变沉积岩的部分熔融 (Chappell, 1999)。过铝质花岗岩的主要源区是变质沉积岩 (如泥砂岩、砂屑岩或杂砂岩等) (Sylvester, 1998)。在花岗岩物源性 Rb/Ba-Rb/Sr 图解及  $\text{CaO}/(\text{FeO}^{\text{Total}} + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{FeO}^{\text{Total}} + \text{MgO})$  图解中 (图 9), 金鸡花岗岩样品点均投影于黏土源区的泥岩-页岩区域内, 表明金鸡花岗岩浆起源于地壳中变泥质岩石的部分熔融。金鸡花岗闪长岩体样品点均投影于贫黏土源区的杂砂岩区域内, 表明金鸡花岗闪长岩浆起源于地壳中变砂质岩石的部分熔融。

金鸡花岗闪长岩具有较高的  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$

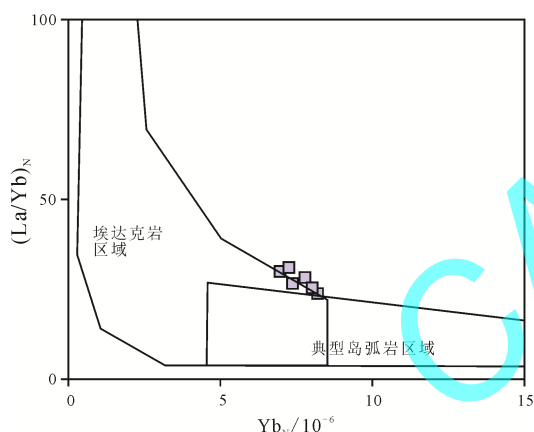


图 8 金鸡花岗闪长岩  $(\text{La}/\text{Yb})_N - \text{Yb}_N$  图解  
(据 Defant and Drummond, 1990)

Fig. 8 Diagrams of  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  versus  $\text{Yb}_N$  for the Jinji granodiorite (after Defant and Drummond, 1990)

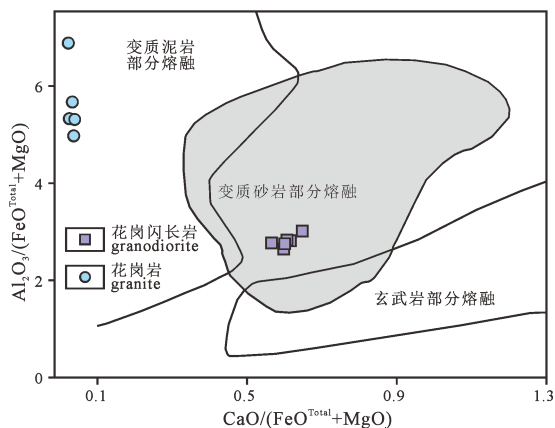
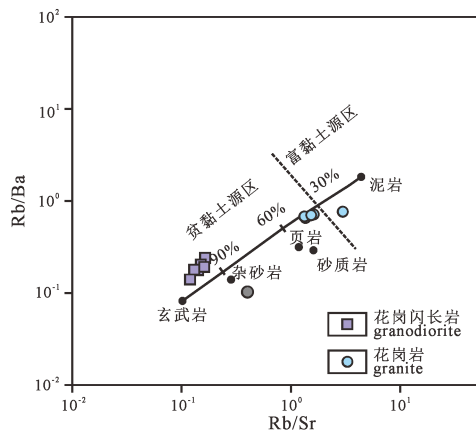


图 9 金鸡矿床中两类花岗质岩石的 Rb/Sr-Rb/Ba 和  $\text{CaO}/(\text{FeO}^{\text{Total}} + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3/(\text{FeO}^{\text{Total}} + \text{MgO})$  二元图解  
(据 Sylvester, 1998)

Fig. 9 Diagrams of Rb/Sr versus Rb/Ba and  $\text{CaO}/(\text{FeO}^{\text{Total}} + \text{MgO})$  versus  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{FeO}^{\text{Total}} + \text{MgO})$  for the Jinji granitoids (after Sylvester, 1998)

(0.722 369~0.722 488)、较低的  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$  (0.511 941~0.511 990) 和  $\epsilon\text{Nd}(t)$  值 ( $-8.2 \sim -7.2$ )。  $\epsilon\text{Nd}(t)$  值以 0 为界, 正值代表岩浆来源于亏损地幔, 负值代表来自地壳或富集地幔 (邵济安等, 2010), 金鸡花岗闪长岩显示出地壳或富集地幔混合的特征。在  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon\text{Nd}(t)$  图解中 (图 10), 样品的投影点均集中于华夏板块新元古代演化区内, 并且金鸡花岗闪长岩的二阶段 Nd 模式年龄值为 1.75~1.84 Ga, 这与江南造山带变质基底的二阶段模式年龄 (1.65~2.14 Ga) 一致 (Chen and Jahn, 1998)。

## 6.3 成岩动力学背景以及对金成矿的指示

关于加里东期花岗质岩石的成因存在两种争议的模式, 陆-弧-陆碰撞模式 (许德如等, 2006) 和早古生代陆内造山作用 (Faure et al., 2009; Charvet et al., 2010; Li et al., 2010; Wang et al., 2010; 张岳强等, 2012)。金鸡花岗闪长岩具显著高的 Sr/Y 和 La/Yb 比值, 与典型的埃达克岩类似 (Martin, 1999)。通常, 埃达克岩的岩石成因与 (1) 地幔玄武质岩浆底侵作用使地壳发生垂向增生, 导致地壳厚度加大并使下地壳保持高热流状态和部分熔融 (Atherton and Petford, 1993), 或 (2) 俯冲洋壳的部分熔融 (Johnston and Thorkelson, 1997) 有关。前者一般形成于陆内造山环境, 而后者在新生代的岛弧火山岩中有较多发现 (李建华等, 2015)。金鸡花岗闪长岩的岩石化学特征暗示其起源于变质杂砂岩的部分熔融 (图 9)。全岩的 Sr-Nd 同位素组成及 Nd 的二阶段模式年龄表明花岗闪长岩的成岩物质起源于新元古代华夏板块的物质的部分熔融。不仅如此, 金鸡花岗闪长岩的岩石化学特征与玄武岩浆底侵到加厚的陆壳 ( $> 50$  km) 底部导致的下地壳麻粒岩部分熔融形成的 C 型埃达克岩相似, 而明显不同于与板块的消减作用有关的 O 型埃达克岩 (张旗等, 2002)。华南早古生代褶



皱和花岗岩呈面状分布, 且远离板块边界, 并缺失早古生代蛇绿岩套和岛弧型花岗岩, 符合陆内造山带的构造属性(Charvet et al., 2010; Shu et al., 2014; 李建华等, 2015)。因此, 本区埃达克质岩石的形成不能用陆-弧-陆碰撞模式来解释。早古生代陆内造山事件的产物在江山—绍兴断裂以南广泛出露(Faure et al., 2009; Charvet et al., 2010), 其时限为 400~460 Ma, 以中泥盆世的区域不整合, 角闪岩相-麻粒岩相的变质, 以及同造山和后造山岩浆(420~450 Ma)的广泛侵位为特征(Wang et al., 2007; Faure et al., 2009; Wang et al., 2010)。本区花岗岩样品在(Yb+Ta)-Rb 和 Ta-Yb 图解中(图 11)落入同碰撞花岗岩的范围内, 早期挤压造山诱发南华裂谷盆地强烈褶皱和逆冲推覆, 导致地壳加厚并发生部分熔融, 形成高温高压变质和深熔作用(Li et al., 2010)。但是关于引起早古生代造山事件的深部动力学背景一直存在争议: (1)Wang et al.(2007)认为其与因扬子地块和华夏地块之间“不成熟洋盆”关闭而诱发的陆-陆碰撞造山作用有关, 这一动力学过程归结于

华北和华南板块古生代俯冲/碰撞造山的远程效应。(2)Faure et al.(2009)提出, 其与华夏地块沿绍兴—江山缝合带向扬子地块的俯冲作用相关。(3)Charvet et al.(2010)认为其与华夏地块内部的陆内俯冲作用有关。(4)Li et al.(2010)则认为其与华夏地块内部沿武夷山东缘边界断裂自南东向北西的逆冲推覆作用相关。

金鸡矿床的某些地质和地球化学特征与侵入岩相关的金矿床相似(Sillitoe and Thompson, 1998; Thompson et al., 1999; Lang and Baker, 2001; Baker, 2002), 例如部分矿体产于花岗质岩石内部, 金成矿流体属于中温、中低盐度和富  $\text{CO}_2$  的流体体系, 矿石金属元素组合为 Au-As-Pb-Zn-Cu, 低硫化物成分, 还原性矿石组合以及硫铅同位素组成(未发表数据)。然而, 金鸡矿床在某些地质特征上又呈现出造山型金矿床的特征(Groves et al., 1998; Goldfarb et al., 2005 and references therein), 比如: (1)含金的碳酸盐-石英脉严格受 WNW 向韧性剪切带控制; (2)含金的多金属硫化物-碳酸盐-石英脉产于劈理和叶理发育的强烈变形的冷家溪变质杂砂岩和板岩中; (3)与金成矿有关的蚀变主要为绿泥石化、绢云母化、硅化作用和碳酸盐化。尽管与侵入岩相关的金矿床和造山型金矿床有许多相似之处(Sillitoe et al., 1998; Goldfarb and Groves, 2015), 但是二者形成的大地构造环境却不尽相同。与金鸡矿床具有相似成矿元素的大多数成矿元素为 Au-As-Pb-Zn-Cu 的侵入岩相关的金矿床的成矿岩体通常为活动大陆边缘的产物(Sillitoe et al., 1998)。然而, 本区花岗闪长岩和花岗岩所指示的金成矿的构造背景为早古生代陆内造山环境, 而与板块的俯冲并不存在成因上的联系, 因此, 金鸡矿床不属于与侵入岩相关的金矿床。此外, 金鸡矿床也缺乏许多与侵入岩相关的金

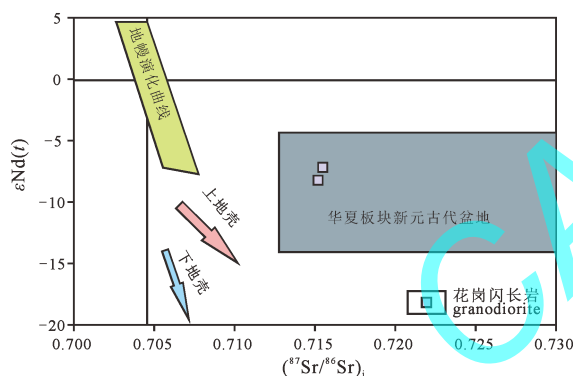
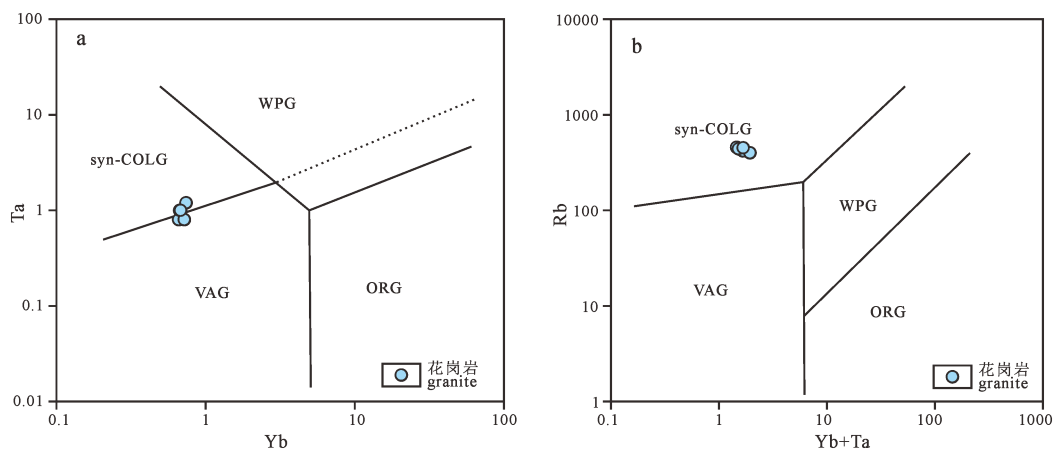


图 10 金鸡花岗闪长岩  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ -( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> 图解 (据 Maniar and Piccoli, 1989)

Fig. 10 Diagrams of  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  versus ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>i</sub> for the Jinji granodiorite (after Maniar and Piccoli, 1989)



WPG—板内花岗岩; ORG—洋中脊花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; syn-COLG—同碰撞型花岗岩。  
WPG—within plate type-granite; ORG—mid-oceanic ridge type-granite; VAG—volcanic arc type-granite;  
syn-COLG—syn-collisional type- and postcollisional type- granites.

图 11 金鸡花岗岩构造环境判别图(据 Pearce et al., 1984)

Fig. 11 Discriminating diagrams for the Jinji granite (after Pearce et al., 1984)

矿床的重要特征,即,矿区未发现钨/锡的成矿作用,未发现含金的晚期岩脉(伟晶岩、细晶岩、花岗岩)以及未发现含 Au-Bi 硫化物的硅酸质岩浆的包裹体(Rhys, 1995; Sillitoe and Thompson, 1998; Mustard et al., 2006; Zachariáš et al., 2014)。

## 7 结论

湘东北金鸡金矿床钻孔中发现的两类岩体分别为花岗岩和花岗闪长岩, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示, 花岗岩形成于  $(425.2 \pm 1.5)$  Ma, 花岗闪长岩形成于  $(430.6 \pm 1.5)$  Ma。地球化学特征显示, 花岗岩属于 I 型花岗岩, 其形成源于地壳中变泥质岩石的部分熔融, 花岗闪长岩属于埃达克岩, 其形成源于地壳中变砂质岩石的部分熔融, 二者均为华南早古生代陆内造山事件的产物。结合矿床地质特征及岩体地球化学特征所反映的大地构造背景, 本文认为金鸡金矿床属于造山型金矿床。

## Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research & Development Program of China (No. 2017YFC0601501), and Central South University (No. 1053320180985).

## 参考文献:

- 黄建中, 孙骥, 周超, 陆文, 肖荣, 郭爱民, 黄革非, 谭仕敏, 隗含涛. 2020. 江南造山带(湖南段)金矿成矿规律与资源潜力[J]. 地球学报, 41(2): 230-252.
- 李建华, 张岳桥, 董树文, 马之力, 李勇. 2015. 湘东宏夏桥和板杉铺岩体 LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 地球学报, 36(2): 187-196.
- 李三忠, 王涛, 金宠, 戴黎明, 刘鑫, 周小军, 王岳军, 张国伟. 2011. 雪峰山基底隆升带及其邻区印支期陆内构造特征与成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 41(1): 93-105.
- 李献华, 李武显, 李正祥. 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义[J]. 科学通报, 52(9): 981-991.
- 饶家荣, 王纪恒, 曹一中. 1993. 湖南深部构造[J]. 国土资源导刊, 7(A08): 1-101.
- 邵济安, 牟保磊, 朱慧忠, 张履桥. 2010. 大兴安岭中南段中生代成矿物质的深部来源与背景[J]. 岩石学报, 26(3): 649-656.
- 舒良树. 2006. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带[J]. 高校地质学报, 12(4): 418-431.
- 孙骥, 周超, 陆文, 郭爱民, 肖荣, 隗含涛, 谭仕敏, 贾朋远. 2020. 湖南古台山金锑矿床成矿流体 He-Ar、Sr 同位素地球化学及深部找矿意义[J]. 地球学报, 41(2): 267-279.
- 孙明志, 徐克勤. 1990. 华南加里东花岗岩及其形成地质环境试析[J]. 南京大学学报(地球科学), 4: 10-22.
- 王德滋, 沈渭洲. 2003. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化[J]. 地学前缘, 10(3): 209-220.
- 徐先兵, 张岳桥, 舒良树, 贾东, 王瑞瑞, 许怀智. 2009. 闽西南玮埔岩体和赣南莒蒲混合岩锆石 LA-ICP-MSU-Pb 年代学:

- 对武夷山加里东运动时代的制约[J]. 地质论评, 55(2): 277-285.
- 许德如, 陈广浩, 夏斌, 李鹏春, 贺转利. 2006. 湘东地区板杉铺加里东期埃达克质花岗闪长岩的成因及地质意义[J]. 高校地质学报, 12(4): 97-111.
- 许德如, 邹凤辉, 宁钧陶, 邓腾, 王智琳, 陈根文, 张建岭, 董国军. 2017. 湘东北地区地质构造演化与成矿响应探讨[J]. 岩石学报, 33(3): 695-715.
- 许德如, 王力, 李鹏春, 陈广浩, 贺转利, 符巩固, 吴俊. 2009. 湘东北地区连云山花岗岩的成因及地球动力学暗示[J]. 岩石学报, 25(5): 1056-1078.
- 易祖水, 罗小亚, 周东红, 肖朝阳. 2010. 浏阳市井冲钻铜多金属矿床地质特征及成因浅析[J]. 华南地质与矿产, (3): 12-18.
- 余达淦, 管太阳, 黄国夫. 1994. 华南(东)晋宁—加里东海盆地形成、演化及封闭[J]. 华东地质学院, 16(4): 301-319.
- 曾勇, 杨明桂. 1999. 赣中碰撞混杂岩带[J]. 中国区域地质, 18(1): 17-22.
- 张旗, 王焰, 刘伟, 王元龙. 2002. 埃达克岩的特征及其意义[J]. 地质通报, 21(7): 69-73.
- 张岳桥, 董树文, 李建华, 崔建军, 施炜, 苏金宝, 李勇. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展[J]. 地球学报, 33(3): 257-279.
- 周新民. 2003. 对华南花岗岩研究的若干思考[J]. 高校地质学报, 9(4): 556-565.

## References:

- ATHERTON M P, PETFORD N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. *Nature*, 362(6416): 144-146.
- BAKER T. 2002. Emplacement depth and carbon dioxide-rich fluid inclusions in intrusion-related gold deposits[J]. *Economic Geology*, 97: 1111-1117.
- BEA F, ARZAMASTSEV A, MONTERO P, ARZAMASTESEVA L. 2001. Anomalous alkaline rocks of Soustov, Kola: Evidence of mantle-derived metasomatic fluids affecting crustal materials[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140(5): 554-566.
- BELOUSOVA E A, GRIFFIN W L, O'REILLY S Y, FISHER N L. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 143(5): 602-622.
- CARTER A, ROQUES D, BRISTOW C, KINNY P. 2001. Understanding Mesozoic accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic thermotectonism[J]. *Geology*, 29(29): 211-214.
- CHAPPELL B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 46(3): 535-551.
- CHARVET J, SHU Liang-shu, FAURE M, CHOULET F, WANG B, LU Hua-fu, BRETON N L. 2010. Structural development of the Lower Paleozoic belt of South China: Genesis of an intracontinental orogen[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39: 309-330.
- CHEN Jiang-feng, JAHN B M. 1998. Crustal evolution of south-eastern China: Nd and Sr isotopic evidence[J]. *Tectonophysics*,

- 284: 101-133.
- CHU Yang, LIN Wei, FAURE M, WANG Qing-chen, JI Wen-bin. 2012. Phanerozoic tectonothermal events of the Xuefengshan Belt, central South China: implications from U-Pb age and Lu-Hf determinations of granites[J]. *Lithos*, 150: 243-255.
- DEFANT M J, DRUMMOND M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 347(6294): 662-665.
- DENG Teng, XU De-ru, CHI Guo-xiang, WANG Zhi-lin, JIAO Qian-qian, NING Jun-tao, DONG Guo-jun, ZOU Feng-hui. 2017. Geology, geochronology, geochemistry and ore genesis of the Wangu gold deposit in northeastern Hunan Province, Jiangnan Orogen, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 88: 619-637.
- FAURE M, SHU Liang-shu, WANG Bo, CHARVET J, CHOLET F, MONIE P. 2009. Intracontinental subduction: a possible mechanism for the Early Paleozoic Orogen of SE China[J]. *Terra Nova*, 21(5): 360-368.
- GOLDFARD R J, BAKER T, DUBE B, GROVES D I, HART C JR, GOSSELIN P. 2005. Distribution, Character, and Genesis of Gold Deposits in Metamorphic Terranes[J]. *Economic Geology*, 100th anniversary, 67: 407-450.
- GOLDFARD R J, GROVES D I. 2015. Orogenic gold: common or evolving fluid and metal sources through time[J]. *Lithos*, 233: 2-26.
- GROVES D I, GOLDFARB R J, GEBRE-MARIAM M, HAGEMANN S G, ROBERT F. 1998. Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types[J]. *Ore Geology Reviews*, 13(1-5): 7-27.
- GREEN T H, PEARSON N J. 1986. Rare earth element partitioning between titanite and coexisting silicate liquid at high pressure and temperature[J]. *Chemical Geology*, 74: 201-216.
- HOSKIN P W O, SCHALTEGGER U. 2003. The composition of zircon and igneous metamorphic petrogenesis[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 27-62.
- HUANG Jian-zhong, SUN Ji, ZHOU Chao, LU Wen, XIAO Rong, GUO Ai-min, HUANG Ge-fei, TAN Shi-min, WEI Han-tao. 2020. Metallogenic Regularity and Resource Potential of Gold Deposits of Hunan Area in the Jiangnan Orogenic Belt, South China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 41(2): 230-252(in Chinese with English abstract).
- JOHNSTON S T, THORKELSON D J. 1997. Cocos-Nazca slab window beneath central America[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 146(3-4): 465-474.
- LANG J R, BAKER T. 2001. Intrusion-related gold systems: the present level of understanding[J]. *Mineralium Deposita*, 36(6): 477-489.
- LI Jian-hua, ZHANG Yue-qiao, DONG Shu-wen, JOHNSTON S T. 2014. Cretaceous tectonic evolution of South China: a preliminary synthesis[J]. *Earth-Science Reviews*, 134: 98-136.
- LI Jian-hua, ZHANG Yue-qiao, DONG Shu-wen, MA Zhi-li, LI Yong. 2015. LA-MC-ICPMS zircon U-Pb geochronology of the Hongxiaqiao and Banshanpu granitoids in eastern Hunan Province and its geological implications[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(2): 187-196(in Chinese with English abstract).
- LI San-zhong, WANG Tao, JIN Chong, DAI Li-ming, LIU Xin, ZHOU Xiao-jun, WANG Yue-jun, ZHANG Guo-wei. 2011. Features and causes of Indosinian intracontinental structures in the Xuefengshan precambrian basement and its neighboring regions[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(1): 93-105(in Chinese with English abstract).
- LI Xian-hua, LI Wu-xian, LI Zheng-xiang. 2007. Study on the genetic types and tectonic significance of the Early Yanshan granites in Nanling[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(9): 981-991(in Chinese).
- LI Zheng-xiang, LI Xian-hua, WARTHON J A, CLARK C, LI Wu-xian, ZHANG Chuan-lin, BAO Chao-min. 2010. Magmatic and metamorphic events during the Early Paleozoic Wuyi-Yunkai Orogeny, southeastern South China: new age constraints and P-T conditions[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 122(5-6): 772-793.
- LI Zheng-xiang, LI Xian-hua, ZHOU Han-wen, KINNY P D. 2002. Grenvillian continental collision in south China: New SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia[J]. *Geology*, 30: 163-166.
- MANIAR P D, PICCOLI P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of American Bulletin*, 101: 635-643.
- MARTIN H. 1999. Adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoids[J]. *Lithos*, 46: 411-429.
- MORRISON G W. 1980. Characteristics and tectonic setting of the shoshonitic rock association[J]. *Lithos*, 13: 97-108.
- MUSTARD R, ULRICH T, KAMENETSKY V S, MERNAGH T. 2006. Gold and metal enrichment in natural granitic melts during fractional crystallization[J]. *Geology*, 34(2): 85-88.
- PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956-983.
- RAO Jia-rong, WANG Ji-heng, CAO Yi-zhong. 1993. Deep structures in Hunan[J]. *Land & Resources Herald*, 7(A08): 1-101(in Chinese with English abstract).
- RHYS D. 1995. The Red Bluff gold-copper porphyry and associated precious and base metal veins, northwestern British Columbia[M]. In: Schroeter, T.G. (Ed.), *Porphyry Deposits of the Northwestern Cordillera of North America*. Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Vancouver, pp. 838-850.
- SHAO Ji-an, MOU Bao-lei, ZHU Hui-zhong, ZHANG Lv-qiao. 2010. Material source and tectonic settings of the Mesozoic mineralization of the Da Hinggan Mts.[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(3): 649-656(in Chinese with English abstract).
- SHU Liang-shu. 2006. Predevonian tectonic evolution of South China: from Cathaysian Block to Caledonian period folded orogenic belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 12(4): 418-431(in Chinese with English abstract).
- SHU Liang-shu, JAHN B M, CHARVET J, SANTOSH M, WANG Bo, XU X S, JIANG S Y. 2014. Early Paleozoic depositional environment and intraplate tectono-magmatism in the Cathaysia Block (South China): evidence from stratigraphic, structural, geochemical and geochronological investiga-



- tions[J]. American Journal of Science, 314(1): 154-186.
- SHU Liang-shu, WANG Bo, CAWOOD P, SANTOSH M, XU Zhi-qin. 2015. Early Paleozoic and Early Mesozoic intraplate tectonic and magmatic events in the Cathaysia Block, south China[J]. Tectonics, 34(8): 1600-1621.
- SILLITOE R, THOMPSON J F H. 1998. Intrusion-related vein gold deposits: types, tectono-magmatic settings and difficulties of distinction from orogenic gold deposits[J]. Resource Geology, 48(4): 237-250.
- SUN Ji, ZHOU Chao, LU Wen, GUO Ai-min, XIAO Rong, WEI Han-tao, TAN Shi-min, JIA Peng-yuan. 2020. He-Ar-Sr Isotope Geochemistry of Ore-forming Fluids in the Gutaishan Au-Sb Deposit in Hunan Province and Its Significance for Deep Prospecting[J]. Acta Geoscientica Sinica, 41(2): 267-279(in Chinese with English abstract).
- SUN Ming-zhi, XU Ke-qing. 1990. The Caledonian granites in South China and preliminary analysis on their geological setting[J]. Journal of Nanjing University (Earth Sciences), 4: 10-22(in Chinese with English abstract).
- SYLVESTER P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. Lithos, 45(1): 29-44.
- THOMPSON J F H, SILLITOE R H, BAKER T, LANG J R, MORTENSEN J K. 1999. Intrusion related gold deposits associated with tungsten-tin provinces[J]. Mineralium Deposita, 34: 323-334.
- WANG De-zi, SHU Liang-shu. 2012. Late Mesozoic basin and range tectonics and related magmatism in Southeast China[J]. Geoscience Frontiers, 3(2): 109-124.
- WANG Xiao-lei, ZHOU Jin-cheng, GRIFFIN W L, WANG Ru-cheng, QIU Jian-sheng, REILLY S Y O, XU Xi-sheng, LIU Xiao-ming, ZHANG Gui-lin. 2007. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: Dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks[J]. Precambrian Research, 159: 117-131.
- WANG Yue-jun, ZHANG Fei-fei, FAN Wei-ming, ZHANG Guo-wei, CHEN S Y, CAWOOD P A, ZHANG A M. 2010. Tectonic setting of the South China Block in the early Paleozoic: Resolving intracontinental and ocean closure models from detrital zircon U-Pb geochronology[J]. Tectonics, 29(6): 6020-6035.
- WHALEN J B, CURRIE K L, CHAPPELL B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95(4): 407-419.
- XU Xian-bing, ZHANG Yue-qiao, SHU Liang-shu, JIA Dong, WANG Rui-rui, XU Huai-zhi. 2009. Zircon La-ICPMS U-Pb dating of the Weipu granitic pluton in Southwest Fujian and the Changpu migmatite in South Jiangxi: constraints to the timing of Caledonian movement in Wuyi mountains[J]. Geological Review, 55(2): 277-285(in Chinese with English abstract).
- XU De-ru, CHEN Guang-hao, XIA Bin, LI Peng-chun, HE Zhuan-li. 2006. The Caledonian a dacite like granodiorites in Banshanpu area, Eastern Hunan Province, South China: petrogenesis and geological significance[J]. Geological Journal of China Universities, 12(4): 97-111(in Chinese with English abstract).
- XU De-ru, ZOU Feng-hui, NING Jun-tao, DE Teng, WANG Zhi-lin, CHEN Gen-wen, ZHANG Jian-ling, DONG Guo-jun. 2017. Discussion on geological and structural characteristics and associated metallogeny in northeastern Hunan Province, South China[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(3): 695-715(in Chinese with English abstract).
- XU De-ru, WANG Li, LI Peng-chun, CHEN Guang-hao, HE Zhuan-li, FU Gong-gu, WU Jun. 2009. Petrogenesis of the Lianyungshan granites in northeastern Hunan Province, South China, and its geodynamic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(5): 1056-1078(in Chinese with English abstract).
- XU De-ru, DENG Teng, CHI Guo-xiang, WANG Zhi-lin, ZOU Feng-hui, ZHANG Jun-ling, ZOU Shao-hao. 2017. Gold mineralization in the Jiangnan orogenic belt of south china: geological, geochemical and geochronological characteristics, ore deposit-type and geodynamic setting[J]. Ore Geology Reviews, 88: 565-618.
- YI Zu-shui, LUO Xiao-ya, ZHOU Dong-hong, XIAO Chao-yang. 2010. Geological characteristics and genesis of Jinchong Co-Cu polymetal deposit, Liuyang, Hunan Province[J]. Geology and Mineral Resources of South China, (3): 12-18(in Chinese with English abstract).
- YU Da-gan, GUAN Tai-yang, HUANG Guo-fu. 1994. The formation, evolution and closure of Jinning- Caledonian seabasin in the East of Huanan[J]. Journal of East China Geological Institute, 16(4): 301-319(in Chinese with English abstract).
- ZACHARIAS J, MORAVEK P, GADAS P, PERTOLDOVA J. 2014. The Mokrsko-West gold deposit, Bohemian Massif, Czech Republic: Mineralogy, deposit setting and classification[J]. Ore Geology Reviews, 58: 238-263.
- ZENG Yong, YANG Ming-gui. 1999. Central Jiangxi collision mélange zone[J]. Regional Geology of China, 18(1): 17-22(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Guo-chun, CAWOOD P A. 2012. Precambrian geology of China[J]. Precambrian Research, 222-223: 13-54.
- ZHANG Qi, WANG Yan, LIU Wei, WANG Yuan-long. 2002. Adakite: its characteristics and implications[J]. Geological Bulletin of China, 21(7): 69-73(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yue-qiao, DONG Shu-wen, LI Jian-hua, CUI Jian-jun, SHI Wei, SU Jin-bao, LI Yong. 2012. The new progress in the study of Mesozoic tectonics of South China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 33(3): 257-279(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Xin-min. 2003. My thinking about granite geneses of South China[J]. Geological Journal of China Universities, 9(4): 556-565(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Xin-min, SUN Tao, SHEN Wei-zhou, SHU Liang-shu, NIU Yao-ling. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: a response to tectonic evolution[J]. Episodes, 29(1): 26-33.