

doi: 10.12029/gc20210519

武彬,张雪辉,余峰,孙建东,张勇,吕劲松,徐敏成,高天山,叶现韬. 2021. 江西婺源东坑口酸性岩体年代学及成因研究[J]. 中国地质, 48(5): 1580–1595.

Wu Bin, Zhang Xuehui, Yu Feng, Sun Jiandong, Zhang Yong, Lü Jinsong, Xu Mincheng, Gao Tianshan, Ye Xiantao. 2021. Geochronology and genesis of Dongkengkou acid pluton in Wuyuan, Jiangxi Province[J]. Geology in China, 48(5): 1580–1595(in Chinese with English abstract).

## 江西婺源东坑口酸性岩体年代学及成因研究

武彬<sup>1</sup>,张雪辉<sup>1</sup>,余峰<sup>2</sup>,孙建东<sup>1</sup>,张勇<sup>1</sup>,吕劲松<sup>1</sup>,徐敏成<sup>1</sup>,高天山<sup>1</sup>,叶现韬<sup>3</sup>

(1. 中国地质调查局南京地质调查中心,江苏南京 210016;2. 江山市自然资源和规划局,浙江江山 324100;  
3. 河海大学海洋学院,江苏南京 210098)

**摘要:**文章选取赣东北地区东坑口酸性岩体作为研究对象,对酸性岩体的岩相学、年代学及锆石原位 Hf 同位素、岩石地球化学进行研究。通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年得出东坑口酸性岩体中花岗斑岩的年龄为(134.25±0.99) Ma,花岗闪长斑岩加权平均年龄为(132.6±1.3)Ma,可以判断其形成时代属燕山晚期。东坑口酸性岩体主量元素地球化学特征基本一致,均为高钾钙碱性花岗岩, SiO<sub>2</sub> 含量较高,铝饱和指数 A/CNK 值均小于 1.1,属于典型的 I 型花岗岩;微量元素地球化学表现为富集大离子亲石元素 Rb、Th、U,明显亏损高场强元素 Ti、P,轻微亏损 Ba、Sr 的特征;酸性岩体稀土元素特征具有一致性, Eu 亏损不明显。结合 Hf 同位素表明酸性岩体的岩浆由下地壳变质砂岩部分熔融组合形成,且东坑口岩体具有典型的埃达克岩特征,为低 Mg<sup>#</sup>埃达克岩系。该酸性岩体是在陆陆碰撞过程中,碰撞挤压致使下地壳加厚以后,向伸展减薄转换的体制中形成的。产出环境为陆内造山环境,太平洋板块向华南大陆俯冲引起的弧后多阶段岩石圈伸展作用。

**关键词:**酸性岩体;年代学;成因;地质调查工程;东坑口;婺源;江西

中图分类号:P588.12<sup>1</sup>;P597 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2021)05-1580-16

## Geochronology and genesis of Dongkengkou acid pluton in Wuyuan, Jiangxi Province

WU Bin<sup>1</sup>, ZHANG Xuehui<sup>1</sup>, YU feng<sup>2</sup>, SUN Jiandong<sup>1</sup>, ZHANG Yong<sup>1</sup>, LÜ Jinsong<sup>1</sup>,  
XU Mincheng<sup>1</sup>, GAO Tianshan<sup>1</sup>, YE Xiantao<sup>3</sup>

(1. Nanjing center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China; 2. Jiangshan Natural Resources and Planning Bureau, Jiangshan 324100, Zhejiang, China; 3. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

**Abstract:** Dongkengkou acid pluton in northeast Jiangxi Province was selected as a study case to expound its petrography, chronology, zircon Hf isotopes and petrogeochemistry. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of granite porphyry and granodiorite porphyry yields ages of (134.25±0.99) Ma and (132.6±1.3) Ma respectively, indicating that the Dongkengkou pluton was emplaced during the late Yanshanian. The main element geochemical characteristics of Dongkengkou acidic pluton are basically the same. They are all high-k calc-alkaline granites with high SiO<sub>2</sub> content and aluminum saturation index A/CNK values less than 1.1,

收稿日期:2019-04-30;改回日期:2020-05-02

基金项目:中国地质调查局项目(DD20160038)资助。

作者简介:武彬,男,1982生,高级工程师,主要从事矿产地质调查与成矿研究;E-mail: 119825061@qq.com。

which belong to typical I-type granite. The pluton is enriched in large ion lithophile elements such as Rb, Th and U, depleted in high field strength elements such as Ti and P, and slightly depleted in Ba and Sr. The characteristics of rare earth elements in acidic rocks are consistent, but Eu deficit is not obvious. Combined with Hf isotopes, it is indicated that the magma of the pluton was formed by the partial melting of metamorphic sandstone from the lower crust. It has typical characteristics of adakite rocks with low Mg. It is inferred that the pluton was formed during the transformation from crust thickening due to collision and compression to crust thinning due to extension in the process of continent–continent collision. The tectonic environment is intracontinental orogen. The subduction of the Pacific plate to the South China Continent results in the back–arc multi–stage lithospheric extension.

**Key words:** acid pluton; chronology; genesis; geological survey engineering; Dongkengkou; Wuyuan; Jiangxi

**About the first author:** WU Bin, male, born in 1982, senior engineer, engaged in geological survey and metallogeny; E-mail: 119825061@qq.com.

**Found support:** Supported by the project of China Geological Survey (No. DD20160038).

## 1 引言

东坑口酸性岩体位于钦杭成矿带内的核心部位(图1),钦杭成矿带内分布了大量的燕山期岩体,是华南地区燕山期岩浆岩研究的重要地带,前人对钦杭成矿带东段燕山期岩体和矿床做过大量的研究,并划分了“两期四阶段”(李晓峰等,2009;Guo et al,2012;丰成友等,2012;黄兰椿,2012;杨泽黎等,2014;陈国华等,2015;吕劲松等,2017;张志辉等,2020)。近年来地质找矿工作在东坑口酸性岩体附近发现了多处钨钼小矿点,现已构成了一个矿化集中区,显示了东坑口酸性岩体在婺源地区钨钼多金属成矿作用中的重要地位。然而,东坑口酸性岩体目前还没有开展系统性的地球化学和年代学分析等研究工作。对认识酸性岩体的构造环境有一定的局限性。因此,本文对东坑口酸性岩体中花岗闪长斑岩和花岗斑岩进行详细研究,从而对进一步研究钦杭成矿带燕山期岩浆活动和大地构造背景提供数据和理论支持,并为该地区的成矿潜力预测提供理论依据。

## 2 地质及矿化特征

东坑口酸性岩体出露受进贤—婺源断裂控制,呈北东向分布。酸性岩体岩性以花岗斑岩为主,呈稀疏分布(图1)。岩体边部出露地层为新元古代郑家坞岩组,其下部岩性为灰绿色绢云母板状千枚岩,偶夹千枚状变沉凝灰岩、变细碧岩、变角斑岩。上部岩性为灰绿色薄—厚层状砂质板状千枚岩与绢云板状千枚岩互层,夹少量深灰绿色厚层状变细碧岩。

东坑口酸性岩体岩群沿北东向断裂构造侵入,

呈岩脉、岩墙、小岩株状产出,面积约0.4 km<sup>2</sup>。岩性主要有花岗闪长斑岩、石英闪长玢岩、花岗斑岩。

石英闪长玢岩(图2a,b):主要矿物为斜长石、石英、碱性长石、角闪石、黑云母。斜长石斑晶含量(25%),粒径1~4 mm,自形较好。石英斑晶含量(8%),他形粒状,粒径0.6~2 mm。碱性长石含量约5%,粒度1~4 mm,常见卡式双晶。基质具微晶结构,主要由角闪石、黑云母微—细晶、微晶长英质矿物和隐晶质物质组成,黄铁矿化,多以石英黄铁矿化细脉发育,脉厚0.5~2 mm。岩石多有程度不同的碳酸盐化、绢云母化现象,偶见较强绿帘石化,局部见云母化褪色蚀变现象。

花岗闪长斑岩:斑状结构,斑晶主要由斜长石、碱性长石、石英组成(图2c,d)。斜长石(20%)呈宽板状,短柱状,粒度多为0.5~6 mm,斜长石大量发育聚片双晶,环带结构发育,局部见嵌晶结构,碱性长石含量(10%),呈半自形—自形。石英粒度多为1~3 mm,边部多被熔蚀呈浑圆状。基质中碳酸盐化强烈,碳酸盐矿物呈团块状分布,普遍见星点状黄铁矿化,局部见脉状黄铁矿化。

花岗斑岩:斑状结构,块状构造,斑晶主要由钾长石、石英、斜长石组成(图2e,f),均为半自形。钾长石(10%),粒度介于0.5~5 mm,可见卡式双晶,发生了较强烈的黏土化和绢云母化;石英(25%)粒度以1.5~4 mm为主,可见港湾状、穿孔状熔蚀。基质主要由钾长石、石英、斜长石组成,岩石中辉钼矿矿化发育,呈浸染状、条带状分布,矿化发育地段,热液蚀变强烈,表现为硅化,石英脉发育。

结合地质矿产调查成果发现沿进贤—婺源断裂带断续分布有W、Cu、Mo矿化,且化探异常亦呈

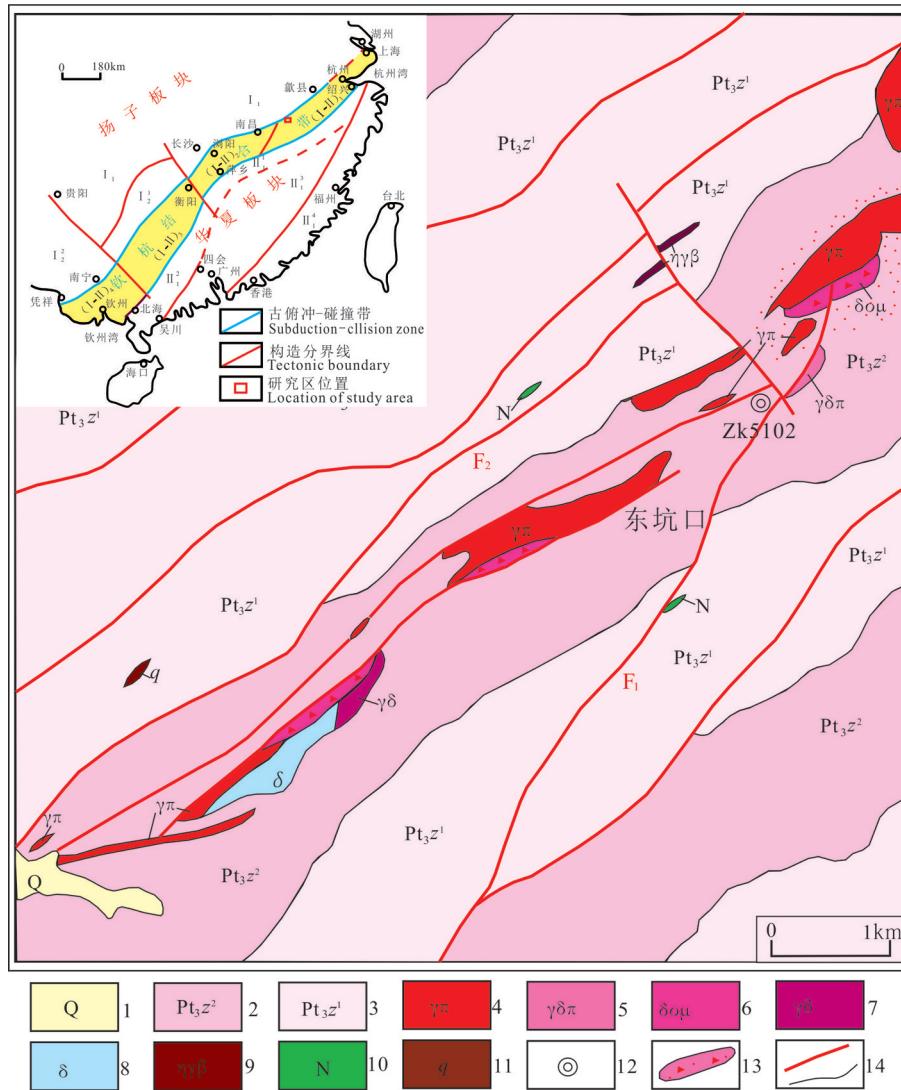


图1 东坑口地质图(据江西省有色四队,2017,有修改)

1—第四系;2—郑家坞岩组二段;3—郑家坞岩组一段;4—花岗斑岩;5—花岗闪长斑岩;6—石英闪长玢岩;7—花岗闪长岩;8—闪长岩;  
9—二长花岗岩;10—基性岩脉;11—石英脉;12—钻孔位置;13—角岩化带;14—地质界线、断层

Fig. 1 Geological map of Dongkengkou (modified from Jiangxi Nonferrous No.4 Geological Party, 2017)

1-Quaternary; 2-Zhengjiawu Formation; 3-Zhengjiawu Formation; 4-Granite porphyry; 5-Granodiorite porphyry; 6-Quartz diorite porphyry; 7-Granodiorite; 8-Diorite; 9-Monzonitic granite; 10-Mafic dike; 11-Quartz Vein; 12-Drill hole location; 13-Hornblende zone; 14-Geological boundary and fault

带状分布。钻孔验证发现钼矿体及铜矿化体。矿体主要产于燕山期花岗斑岩侵入体内外接触带。东坑口酸性岩体与W、Cu、Mo矿化关系密切,黄铁矿、黄铜矿、辉钼矿主要分布于花岗斑岩中的石英细脉和裂隙中,矿化不均匀,呈薄细脉状和浸染状分布,矿化地段硅化强烈。在郑家坞岩组与燕山期花岗斑岩及花岗闪长岩外接触带,岩石硅化强烈,蚀变主要为硅化和黄铁矿化,伴有绿泥石化、绢云

母化和褐铁矿化。有用矿物为辉钼矿、黄铜矿,其他矿物为黄铁矿、石英、钾长石、绢云母等。岩体为隐伏一半隐伏产出于主构造带内,受构造带两侧主断裂控制,呈多次杂岩体,透镜状或板状产出。岩性以花岗斑岩、花岗闪长岩、石英闪长岩为主。根据矿化蚀变特征及年代学成果,结合前人对钦杭成矿带东段成矿规律研究成果,东坑口酸性岩体成矿专属性与钨钼成矿相关(吕劲松,2017)。

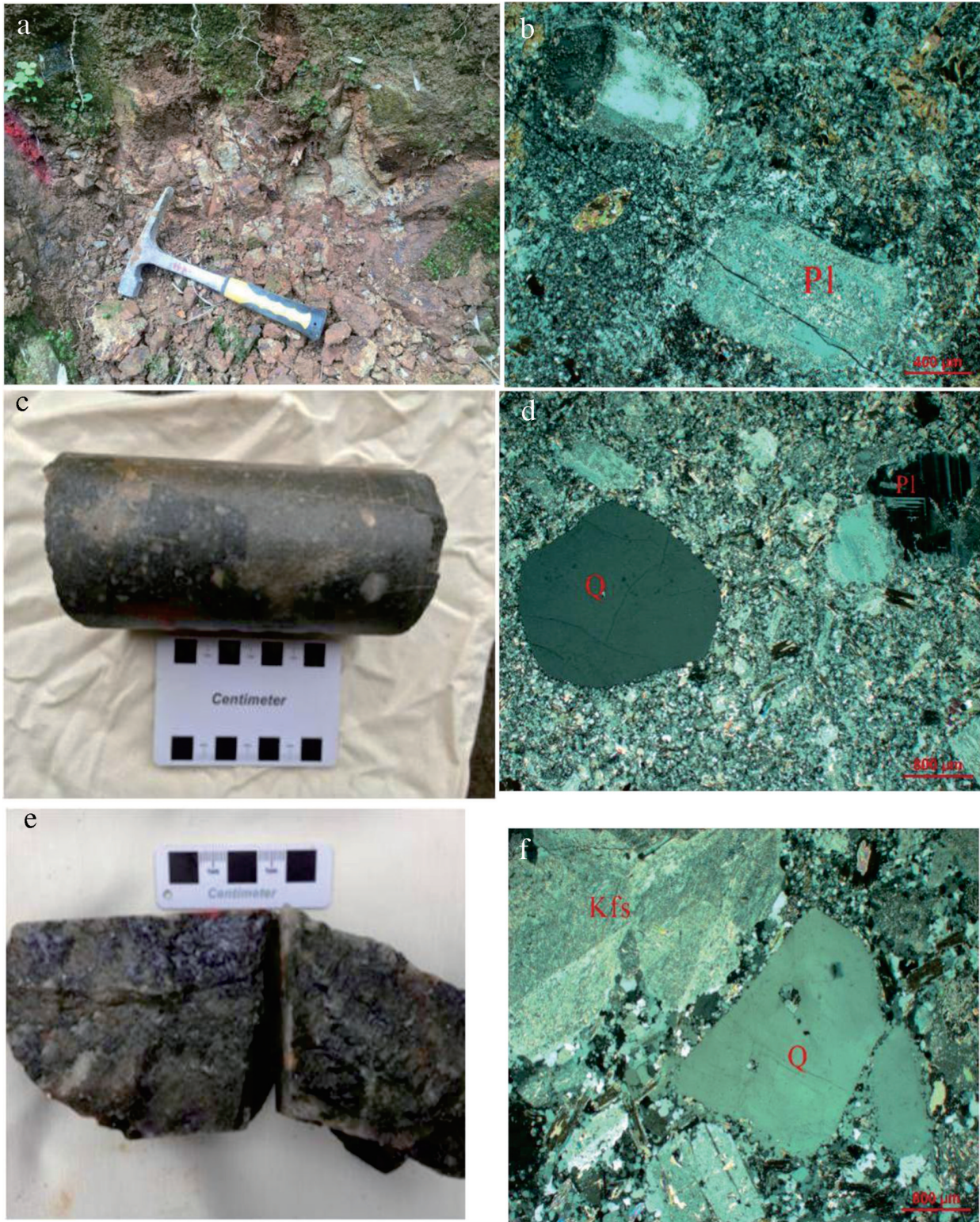


图2 有关岩石的野外及镜下特征  
 a—石英闪长玢岩;b—石英闪长玢岩(正交);c—花岗闪长玢岩;d—花岗闪长玢岩(正交);e—花岗斑岩中辉钼矿;f—石英斑晶(正交);Bt—黑云母;Pl—斜长石;Q—石英;Kfs—钾长石

Fig.2 Field and microscopic features of rocks

a—Quartz diorite porphyry;b—quartz diorite porphyry (orthogonal);c—Granodiorite porphyry; d—Granodiorite porphyry (orthogonal); e—Molybdenite in granite porphyry;f—Quartz porphyry (orthogonal); Bt—Biotite; Pl—Plagioclase; Q—Quartz; Kfs—Potassium feldspar

### 3 样品和分析方法

本文对4件花岗斑岩和花岗闪长斑岩样品进行了岩石化学、稀土微量元素分析,对2件花岗斑岩样品开展了锆石 LA-ICP-MS 定年,同时对两种岩石进行了镜下鉴定。样品均采自钻孔 ZK5102 中,由于岩石蚀变较强,野外采集样品时,尽量采集新鲜、远离矿化蚀变的样品。

锆石的挑选采用了传统的人工重砂法和磁选法,首先从样品中初步挑选出锆石单矿物,然后利用显微镜从其中再挑选出晶体形态完好的,没有裂缝和包体的锆石单矿物,排放整齐之后将其安置在环氧树脂中制靶,并将其抛光,再利用反射光和阴极发光扫描电镜拍摄锆石的图像。最后参照锆石图像对其进行综合分析,以检查锆石内部结构信息,从中挑选出岩浆环带明显、无缝隙和包体的岩浆锆石定年。本次选取东坑口酸性岩体中的花岗斑岩、花岗闪长斑岩作为测试对象,对其进行锆石 U-Pb 定年及锆石原位 Hf 同位素测试。实验是在南京大学内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室完成的。测试使用与 New Wave 213 nm 激光取样系统连接起来的 Agilent 7500a ICP-MS 完成。分析过程中,激光束斑直径采用 20~30  $\mu\text{m}$ ,频率为 5 Hz。样品经激光剥蚀后,由 He 气作为载气,再和 Ar 气混合后进入 ICP-MS 进行分析。U-Pb 分馏据澳大利亚锆石标样 GEMOC GJ-1 (Jackson et al., 2004) 来校正,锆石标样 Mud Tank (Black and Gulson, 1978) 作为内标,控制分析精度。每个测试流程的开头和结尾分别测 2 个 GJ 标样,另外测试 1 个 MT 标样和 10~15 个待测样品点。U-Pb 年龄和 U、Th、Pb 的计数由 GLITTER 软件 (ver.4.4) (www.mq.edu.au/GEMOC) 在线测得。详细的分析方法和流程参考文献 (Griffin et al., 2004; Jackson et al., 2004)。因为  $^{204}\text{Pb}$  的信号极低,以及载气中  $^{204}\text{Hg}$  的干扰,该方法不能直接精确测得其含量,因此,使用嵌入 EXCEL 的 ComPbCorr#3\_15G 程序 (Andersen, 2002) 来进行普通铅校正。

锆石原位 Hf 同位素测试仪器采用的是 Thermo Neptune plus 多接收等离子质谱仪 (MC-ICP-MS)、激光剥蚀系统为 New wave UP 193, 实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气。根据显微镜下观察得出

的锆石的大小,采用的激光剥蚀的直径为 35 mm,激光的频率为 8 Hz,激光剥蚀的时间为 26 s。实验过程中使用 MT-1 和 Penglai 作为测试过程中的标准样,用于确保实验数据的准确性,实验过程中 2 个标样的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值为  $0.282655 \pm 0.000012$  ( $n=13$ ,  $2\sigma$ ) 和  $0.0282915 \pm 0.000021$  ( $n=11$ ,  $2\sigma$ ), 数据均在误差允许范围之内 (侯可军等, 2007)。

### 4 锆石 U-Pb 年龄

分析结果详见表 1, 代表性锆石颗粒的阴极发光 (CL) 图像及测定点位相应的  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄示于图 3 和图 4。

花岗斑岩测试的锆石在单偏光镜下呈淡棕—棕黄色,透明—半透明状,形态上呈柱状或长柱状,直径 150~350  $\mu\text{m}$ ,长宽比为 2:1~3:1。花岗斑岩样品中锆石阴极发光 (CL) 图像上可见典型岩浆锆石韵律环带。本次测定的 19 个锆石样品中, Th/U 值介于 0.08~0.79, 平均为 0.28 (表 1), 符合燕山期岩浆锆石特征 (李长民, 2009)。花岗斑岩 19 个测点  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄全在谐和线上, 表示锆石未遭受明显的后期热事件影响, 没有发生显著的 Pb 丢失, 且集中于 129~142 Ma, 其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $(134.25 \pm 0.99)$  Ma ( $n=19$ , MSWD=0.35), 代表花岗斑岩的成岩年龄, 也即中酸性侵入岩岩浆最终结晶年龄, 因此东坑口花岗斑岩属于燕山晚期岩浆活动产物; 花岗闪长斑岩锆石在单偏光镜下呈淡棕—棕黄色, 透明—半透明状, 形态上呈柱状或长柱状, 直径 150~400  $\mu\text{m}$ , 长宽比为 2:1~4:1。岩样品中锆石阴极发光 (CL) 图像 (图 4) 上可见典型岩浆锆石韵律环带。19 个测点  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄全在谐和线上, 表示锆石未遭受明显的后期热事件影响, 没有发生显著的 Pb 丢失, 且集中于 127~134 Ma (图 4), 其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $(132.6 \pm 1.3)$  Ma ( $n=19$ , MSWD=0.44), 代表花岗闪长斑岩的成岩年龄, 也是岩浆最终结晶年龄, 因此东坑口花岗闪长斑岩属于燕山晚期岩浆活动产物。

### 5 岩石地球化学特征

从东坑口花岗闪长斑岩、花岗斑岩地球化学分析结果 (表 2) 可知: 花岗闪长斑岩  $\text{SiO}_2$  含量介于 67.58%~69.04%, 平均为 68.31%;  $\text{TiO}_2$  含量介于 0.36%~0.42%, 平均为 0.39%;  $\text{MgO}$  含量介于 1.04%~

表1 东坑口酸性岩体花岗斑岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测定结果  
Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating of granite porphyry in Dongkengkou pluton

分析点号	$^{232}\text{Th}/10^{-6}$	$^{238}\text{U}/10^{-6}$	Tu/U	同位素比值						表面年龄/Ma					
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
					$\sigma$		$\sigma$		$\sigma$		$\sigma$		$\sigma$		$\sigma$
ZK5102-2-1	33611	376899	0.09	0.0487	0.0011	0.14018	0.00333	0.02087	0.00031	134	55	133	3	133	2
ZK5102-2-2	47687	613816	0.08	0.0492	0.0013	0.14257	0.00385	0.02103	0.00033	156	64	135	3	134	2
ZK5102-2-3	61530	541694	0.11	0.0502	0.0016	0.14314	0.00456	0.02069	0.00036	203	75	136	4	132	2
ZK5102-2-4	32844	152462	0.22	0.0485	0.0016	0.14242	0.00461	0.02129	0.00034	125	76	135	4	136	2
ZK5102-2-5	13524	37092	0.36	0.0481	0.0082	0.1409	0.02331	0.02128	0.00092	105	313	134	21	136	6
ZK5102-2-6	52216	133379	0.39	0.0490	0.0017	0.14232	0.00497	0.02106	0.00034	149	82	135	4	134	2
ZK5102-2-7	40488	233255	0.17	0.0489	0.0020	0.14293	0.00576	0.02122	0.00038	141	94	136	5	135	2
ZK5102-2-8	53429	198335	0.27	0.0489	0.0013	0.14183	0.00396	0.02105	0.00032	142	66	135	4	134	2
ZK5102-2-9	53853	269353	0.2	0.0484	0.0015	0.14223	0.00437	0.02131	0.00035	119	71	135	4	136	2
ZK5102-2-10	63106	100209	0.63	0.0477	0.0028	0.1412	0.00801	0.02145	0.00043	86	128	134	7	137	3
ZK5102-2-11	48867	535407	0.09	0.0485	0.0010	0.14209	0.00318	0.02123	0.00032	126	51	135	3	135	2
ZK5102-2-12	63797	149362	0.43	0.0488	0.0017	0.1421	0.00479	0.02112	0.00034	139	79	135	4	135	2
ZK5102-2-13	57547	555080	0.1	0.0489	0.0011	0.14219	0.00348	0.02109	0.00033	143	56	135	3	135	2
ZK5102-2-14	61342	118915	0.52	0.0491	0.0029	0.14123	0.00814	0.02086	0.00044	153	134	134	7	133	3
ZK5102-2-15	41786	52697	0.79	0.0492	0.0048	0.14128	0.01328	0.02085	0.00058	155	220	134	12	133	4
ZK5102-2-16	43784	334566	0.13	0.0500	0.0013	0.14289	0.00369	0.02073	0.00032	195	59	136	3	132	2
ZK5102-2-17	76514	175170	0.44	0.0493	0.0025	0.14283	0.00709	0.02101	0.00043	163	116	136	6	134	3
ZK5102-2-18	39307	379605	0.1	0.0487	0.0011	0.14151	0.0033	0.02107	0.00032	135	53	134	3	134	2
ZK5102-2-19	36065	346603	0.1	0.0486	0.0011	0.14114	0.00334	0.02107	0.00031	128	55	134	3	134	2
ZK5102-1-1	24618	48780	0.50	0.04859	0.00404	0.13954	0.01142	0.02082	0.00047	128	188	133	10	133	3
ZK5102-1-2	48523	370592	0.13	0.04875	0.00194	0.14062	0.00558	0.02092	0.0004	136	92	134	5	133	3
ZK5102-1-3	36008	108191	0.33	0.0488	0.00282	0.1387	0.00783	0.02061	0.00042	138	131	132	7	132	3
ZK5102-1-4	49462	293439	0.17	0.04787	0.00171	0.13771	0.00493	0.02086	0.00037	93	81	131	4	133	2
ZK5102-1-5	15934	27895	0.57	0.0494	0.01195	0.13889	0.03275	0.0204	0.00116	167	424	132	29	130	7
ZK5102-1-6	19316	29613	0.65	0.04748	0.00932	0.13557	0.026	0.02071	0.00095	73	347	129	23	132	6
ZK5102-1-7	67778	178773	0.38	0.0495	0.00182	0.14437	0.00528	0.02115	0.00036	172	87	137	5	135	2
ZK5102-1-8	33724	43596	0.77	0.0505	0.00894	0.1439	0.02474	0.02066	0.00096	218	337	137	22	132	6
ZK5102-1-9	87873	127418	0.69	0.04863	0.00169	0.13945	0.00486	0.0208	0.00033	130	81	133	4	133	2
ZK5102-1-10	19623	37688	0.52	0.0487	0.00605	0.13919	0.01692	0.02073	0.00064	133	258	132	15	132	4
ZK5102-1-11	51698	73632	0.70	0.04919	0.00392	0.13744	0.01071	0.02026	0.00049	157	181	131	10	129	3
ZK5102-1-12	58564	110882	0.53	0.04868	0.00322	0.14194	0.00911	0.02116	0.00047	132	150	135	8	135	3
ZK5102-1-13	56457	378953	0.15	0.05245	0.00377	0.1444	0.01001	0.01996	0.00054	305	166	137	9	127	3
ZK5102-1-14	85790	208257	0.41	0.04935	0.00188	0.14208	0.00539	0.02088	0.00037	164	90	135	5	133	2
ZK5102-1-15	57956	199359	0.29	0.04857	0.00242	0.1383	0.00677	0.02065	0.00042	127	113	132	6	132	3
ZK5102-1-16	125944	149080	0.84	0.04894	0.00508	0.14028	0.01397	0.02079	0.00068	145	232	133	12	133	4
ZK5102-1-17	22593	27281	0.83	0.0481	0.0086	0.13904	0.02433	0.02097	0.00086	104	328	132	22	134	5
ZK5102-1-18	56208	74290	0.76	0.04878	0.0039	0.13821	0.01079	0.02055	0.00051	137	181	131	10	131	3
ZK5102-1-19	38153	53411	0.71	0.04833	0.00758	0.13969	0.02125	0.02097	0.00086	115	296	133	19	134	5

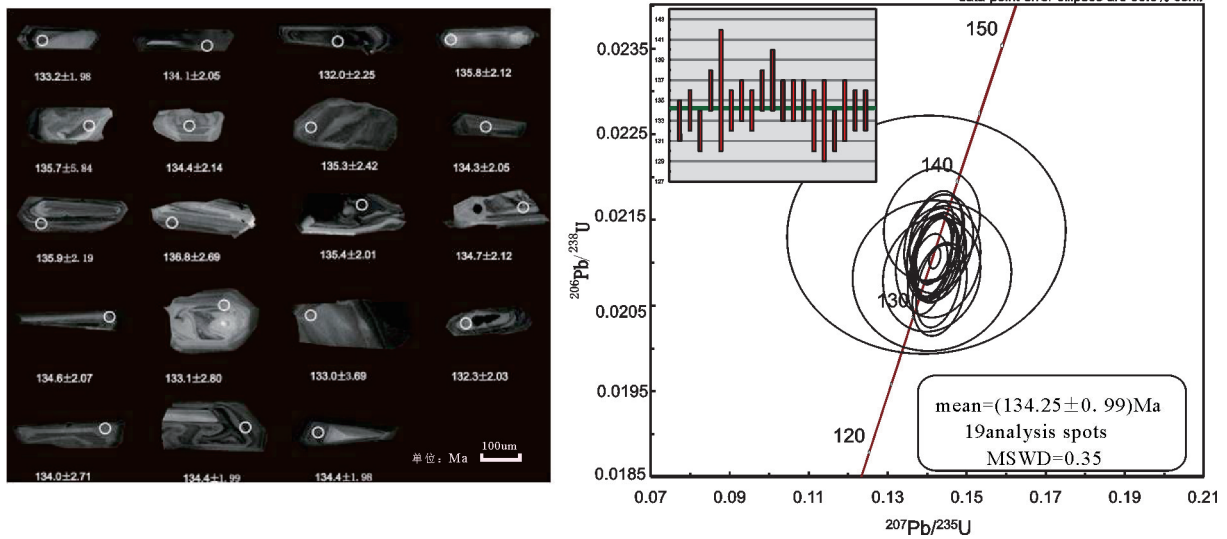


图3 花岗斑岩中锆石阴极发光图像及U-Pb年龄谱和图  
Fig.3 Zircon cathodoluminescence images and U-Pb age of granite porphyry

1.12%, 平均为 1.08%; CaO 含量介于 2.12%~2.14%, 平均为 2.13%; Na<sub>2</sub>O 含量介于 3.64%~3.99%, 平均为 3.82%; K<sub>2</sub>O 含量介于 3.82%~4.08%, 平均为 3.95%; TFeO 含量介于 1.94%~2.44%, 平均为 2.19%。里特曼指数 ( $\sigma$ ) 介于 2.14~2.65, (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) 含量介于 7.46%~8.07%, K<sub>2</sub>O 含量略大于 Na<sub>2</sub>O, 在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解上, 花岗闪长斑岩样品均投在高钾钙碱性区域内。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量介于 14.71%~15.30%, 平均为 15.01%, 含量较高, A/CNK 值介于 1.03~1.05, A/NK 值介于 1.39~1.45, 平均值为 1.42, 在 A/CNK-A/NK

图解中(图 5), 花岗闪长斑岩样品均投在过铝质范围内, 花岗闪长斑岩为过铝质高钾钙碱性花岗岩。花岗斑岩主量元素特征: SiO<sub>2</sub> 含量介于 67%~68.91%, 平均为 67.96%; TiO<sub>2</sub> 含量介于 0.32%~0.35%, 平均为 0.34%; MgO 平均含量为 0.94%; CaO 含量介于 2.25%~2.64%, 平均为 2.45%; Na<sub>2</sub>O 含量介于 3.03%~3.95%, 平均为 3.49%; K<sub>2</sub>O 含量介于 4.10%~4.96%, 平均为 4.53%; TFeO 含量介于 1.60%~1.87%。里特曼指数 ( $\sigma$ ) 介于 2.46~2.70, (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) 含量介于 7.13%~8.91%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量介于

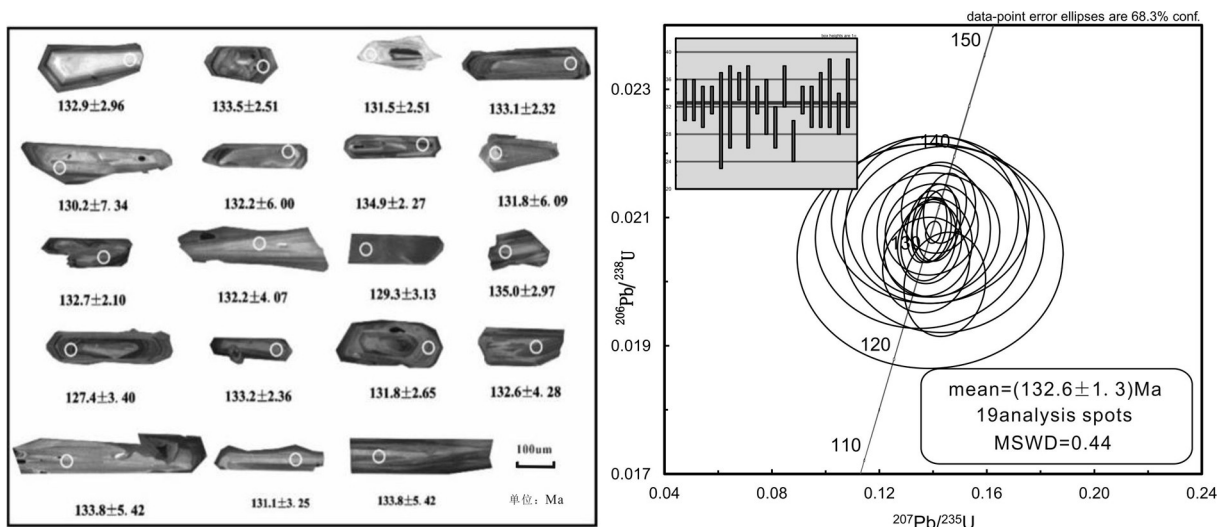


图4 花岗闪长斑岩中锆石阴极发光图像及U-Pb年龄谱和图  
Fig 4 Zircon cathodoluminescence images and U-Pb age of granodiorite porphyry

表2 东坑口酸性岩体主量(%)微量元素含量( $10^{-6}$ )  
Table 2 Contents of major (%) and trace elements ( $10^{-6}$ ) of Dongkengkou pluton

测试项目	样品编号及岩性			
	ZK5102-YQ1 花岗闪长斑岩	ZK5102-YQ2 花岗闪长斑岩	ZK5102-YQ3 花岗斑岩	ZK5102-YQ4 花岗斑岩
SiO <sub>2</sub>	69.04	67.58	67	68.91
TiO <sub>2</sub>	0.42	0.36	0.35	0.32
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.71	15.3	15.07	14.41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.7	0.6	0.56	0.48
FeO	1.81	1.4	1.37	1.17
MnO	0.046	0.049	0.052	0.036
MgO	1.12	1.04	0.94	0.94
CaO	2.14	2.12	2.64	2.25
Na <sub>2</sub> O	3.64	3.99	3.95	3.03
K <sub>2</sub> O	3.82	4.08	4.1	4.96
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.11	0.13	0.12	0.097
L.O.I	1.79	2.68	3.02	2.83
Total	99.35	99.32	99.17	99.43
K <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> O	1.05	1.02	1.04	1.64
K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O	7.46	8.07	8.05	7.99
A/CNK	1.05	1.03	0.96	1
A/NK	1.45	1.39	1.38	1.39
$\sigma$	2.14	2.65	2.7	2.46
Rb	176	201	216	218
Ba	691	822	710	676
Th	5.67	5	4.66	5.99
U	18.6	17	16	16.3
Ta	0.58	0.5	0.43	0.59
Nb	6.79	5.5	5.48	6.34
La	35.4	46.4	43.9	30.4
Ce	62.8	84.6	79.5	54.5
Sr	1190	640	535	341
Nd	26.3	35.8	33.6	23.1
Zr	136	163	153	128
Hf	5	5.4	5.5	3.7
Sm	4.31	5.3	5.06	3.82
Y	13.8	9.2	8.89	9.45
Yb	0.94	0.54	0.5	0.55
Lu	0.15	0.08	0.08	0.09
Nb/Ta	11.71	11	12.74	10.75
Rb/Nb	25.92	36.55	39.42	34.38
Rb/Sr	0.15	0.31	0.4	0.64
Sr/Y	86.23	69.57	60.18	36.08
La	35.4	46.4	43.9	30.4
Ce	62.8	84.6	79.5	54.5
Pr	7.29	10	9.38	6.35
Nd	26.3	35.8	33.6	23.1
Sm	4.31	5.3	5.06	3.82
Eu	1.04	1.3	1.21	0.95
Gd	3.15	3.6	3.41	2.7
Tb	0.42	0.41	0.39	0.35
Dy	1.9	1.5	1.36	1.4
Ho	0.38	0.25	0.24	0.25
Er	0.99	0.65	0.61	0.62
Tm	0.17	0.098	0.093	0.1
Yb	0.94	0.54	0.5	0.55
Lu	0.15	0.084	0.079	0.09
$\Sigma$ REE	145.24	190.532	179.332	125.175
LREE/HREE	16.93	25.72	25.84	19.67
$\delta$ Eu	0.82	0.86	0.84	0.86
(La/Yb) <sub>N</sub>	27.01	61.63	62.98	39.65
La/Yb	37.66	86.93	87.8	55.27
La/Sm	8.21	8.75	8.68	7.96
Sm/Yb	4.59	9.81	10.12	6.95

注:(La/Yb)<sub>N</sub>为球粒陨石标准化La/Yb比值(球粒陨石标准化数据来源于Sun et al., 1989)

14.41%~15.07%, A/CNK 值介于 0.96~1.00, A/NK 值介于 1.38~1.39。在 A/CNK-A/NK 图解中,花岗斑岩样品均投在准铝质范围内。可见,花岗斑岩和花岗闪长斑岩均为亚碱性花岗岩,化学性质上均为高钾钙碱性系列,且铝饱和指数均 < 1.1,花岗闪长斑岩的铝饱和指数略大于花岗斑岩。

在东坑口酸性岩体微量元素原始地幔标准化图解上(图6),花岗闪长斑岩、花岗斑岩的微量元素蛛网图形态极为相似,具有相似的配分模式,表明二者具有同源特征。由表2可知,Rb/Sr 比值介于 0.15~0.64,平均值为 0.38,略高于中国东部上地壳的平均值(高山等,1999);花岗闪长斑岩、花岗斑岩的 Rb/Nb 比值介于 26~39,平均值为 34,明显高于中国东部上地壳的平均值(高山等,1999);岩体的 U 含量介于  $16 \times 10^{-6}$ ~ $18.6 \times 10^{-6}$ ,平均值为  $16.98 \times 10^{-6}$ ,高于中国东部上地壳的平均值( $1.5 \times 10^{-6}$ )(高山等,1999),说明岩浆来源于地壳深部。花岗闪长斑岩、花岗斑岩的 Nb/Ta 比值介于 10.75~12.75,平均值为 12,略低于地壳的平均值(Defant et al., 1993),说明岩浆具有壳源特征。Sr/Y 值大于 40,表明形成岩体的岩浆源区残留相有石榴子石,Sr/Y 比值小于 40,说明形成岩体的岩浆岩源区残留相无石榴子石,有长石(陈小明等,2002),东坑口岩体的 Sr/Y 值介于 36.08~69.57,总体大于 40,表明岩浆源区残留石榴石相。

微量元素富集大离子亲石元素(LILE)Rb、Ba、U、Sr,明显亏损 Ta、Ti、Nb、P、Zr 等高场强元素(HFSE)。这些微量元素特征可以说明在岩浆的演化过程中可能存在富 Ti 相矿物、磷灰石以及角闪石的分离结晶。且东坑口酸性岩体的微量元素特征与俯冲板块俯冲形成的花岗岩的微量元素特征相似。岩石强烈亏损 P 表明岩浆岩源有磷灰石等富含 P 的矿物残留,岩石强烈亏损 Ti,表明岩浆岩源区可能有钙钛石、金红石等富含 Ti 的矿物残留。东坑口酸性岩体具有 Nb 亏损的特征,Nb 亏损表明原生岩浆来源于陆壳的典型标志(Jahn et al., 1999),表明东坑口酸性岩体的原生岩浆来源于陆壳。

花岗闪长斑岩的稀土元素总量  $\Sigma$  REE 介于  $145.24 \times 10^{-6}$ ~ $190.532 \times 10^{-6}$ (不含 Y),平均值为  $167.89 \times 10^{-6}$ 。轻重稀土比值 LREE/HREE 介于 16.93~25.72,平均值为 21.3。(La/Yb)<sub>N</sub>=37.66~61.53,平均为 49.60,轻重稀土分馏明显,稀土元素配分图



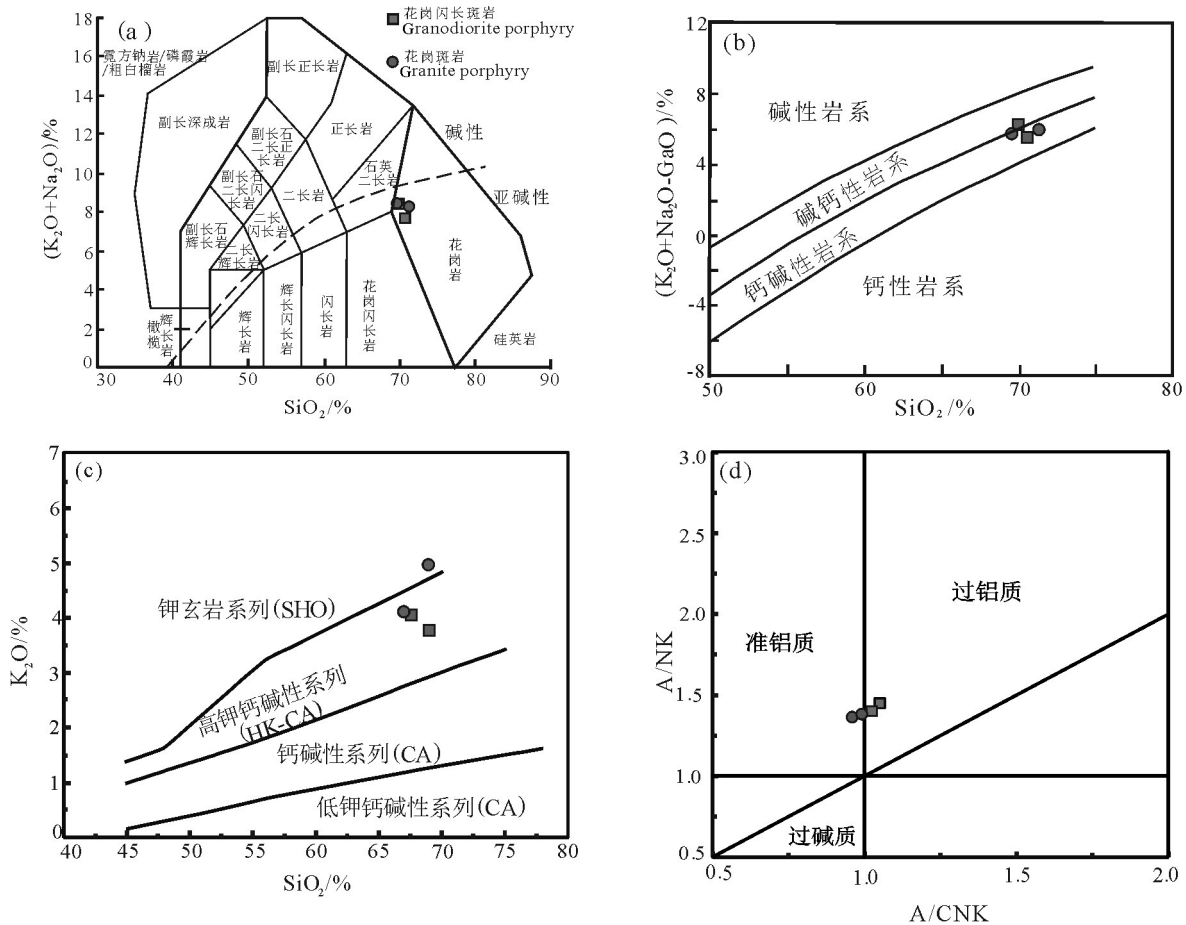


图5 东坑口酸性岩体花岗岩类型和系列划分图解(据 Middlemost,1994;Frost, 2001)  
Fig.5 Diagram of granite types and series of Dongkengkou pluton (after Middlemost,1994;Frost, 2001)

呈右倾型,轻稀土明显富集,重稀土明显亏损(图7)。 $\delta Eu=0.82\sim 0.86$ ,平均值为0.84, Eu 亏损不明显;花岗斑岩的的稀土元素总量  $\Sigma REE$  介于  $125.18\times 10^{-6}\sim 179.33\times 10^{-6}$  (不含 Y),平均值为  $152.26\times 10^{-6}$ 。轻重稀土比值 LREE/HREE 介于 19.67~25.84,平均值为 22.76。 $(La/Yb)_N=39.65\sim 62.98$ ,平均值为 51.30,轻重稀土分馏明显,稀土元素配分图呈右倾型,轻稀土明显富集,重稀土明显亏损(图7)。 $\delta Eu=0.84\sim 0.86$ ,平均值为0.85, Eu 亏损不明显。花岗闪长斑岩的稀土元素总量( $\Sigma REE$ )和  $(La/Yb)_N$  值较花岗斑岩略高,花岗斑岩的 LREE/HREE 值较花岗闪长斑岩略高,花岗闪长斑岩和花岗斑岩的稀土元素特征具有相似性:二者的 LREE/HREE 值和  $(La/Yb)_N$  值均较大,反映其轻稀土和重稀土分馏程度高;均富集轻稀土元素、亏损重稀土元素,轻重稀土分异十分明显,不具明显的 Eu 亏损,稀土元素配分图中球粒陨石标准化曲线均为向右陡倾型。

锆石形成时的 Lu-Hf 初始比值可以由 Lu-Hf 比值代表,为其在成因方面的研究提供重要信息(吴福元等,2007)。

对锆石 U-Pb 定年的样品,笔者也进行了原位锆石 Hf 同位素组成测定,测定结果见表3,东坑口花岗斑岩共分析了19颗锆石的 Hf 同位素组成(图8),锆石  $^{176}Yb/^{177}Hf$  值介于 0.032061~0.076041;  $^{176}Lu/^{177}Hf$  值介于 0.000744~0.001911;  $^{176}Hf/^{177}Hf$  值介于 0.282249~0.282702,对应的  $\epsilon_{Hf}(t)$  变化范围为 -16.01~-0.04。提供证据  $\epsilon_{Hf}(t)-t$  关系图上东坑口酸性岩体的花岗斑岩的投点情况,数据点均位于下地壳。

## 6 岩体成因及构造背景探讨

### 6.1 岩浆源区特征及成因

根据 C/MF-A/MF 图解可进行花岗岩岩浆源区物质的性质判别(图9)。数据点都位于变质杂砂岩区域内,表明东坑口酸性岩体的源区以变质杂砂岩

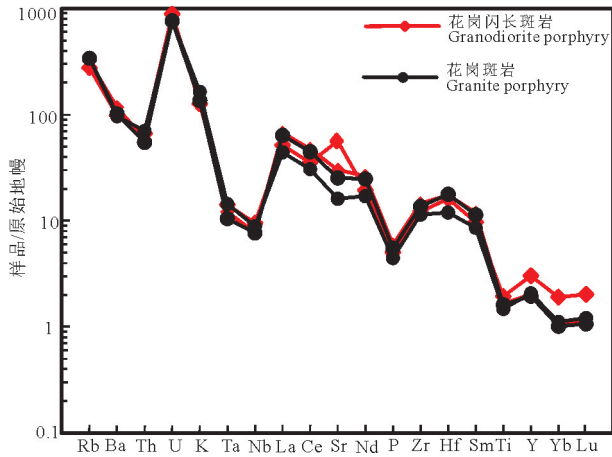


图6 东坑口岩体微量元素蛛网图(标准值据 Thompson et al., 1982)

Fig.6 Spider-web map of trace elements in Dongkengkou pluton (normalized values from Thompson et al., 1982)

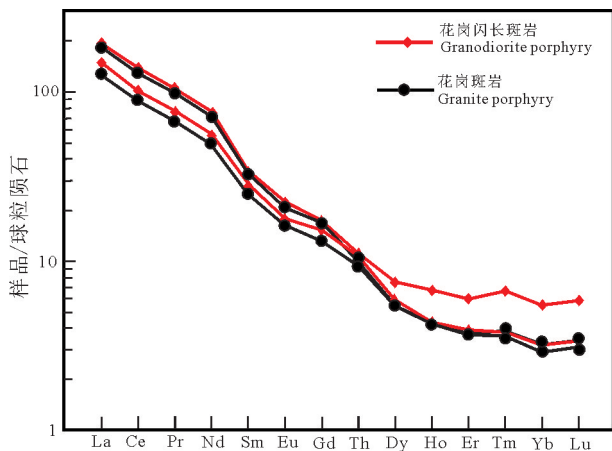


图7 东坑口酸性岩体稀土元素球粒隕石标准化曲线图(标准值据 Boynton,1984)

Fig.7 Standardized curve of rare earth element chondrite in Dongkengkou pluton (normalized values after reference Boynton,1984)

为主。根据主微量稀土分析结果可知东坑口酸性岩体的源区物质是壳源物质为主,且主要来源于下地壳。

东坑口酸性岩体 Y 含量介于  $9.2 \times 10^{-6} \sim 13.8 \times 10^{-6}$ ; Yb 元素含量介于  $0.54 \times 10^{-6} \sim 0.94 \times 10^{-6}$ , Sr 的平均含量为  $915 \times 10^{-6}$ , Sr/Y 值平均为 77.90, La/Yb 值介于 27.01~61.63。花岗斑岩的 Y 含量介于  $8.89 \times 10^{-6} \sim 9.45 \times 10^{-6}$ ; Yb 元素含量介于  $0.50 \times 10^{-6} \sim 0.55 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $0.53 \times 10^{-6}$ ; Sr 含量平均为  $438 \times 10^{-6}$ ; Sr/Y 值平

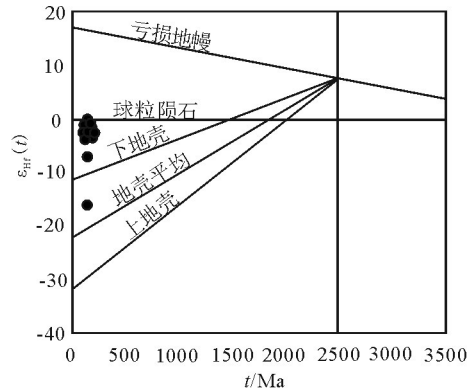


图8  $\epsilon_{Hf}(t) - t$ 关系图(据吴福元等,2007)

Fig.8  $\epsilon_{Hf}(t) - t$  diagram (after Wu et al., 2007)

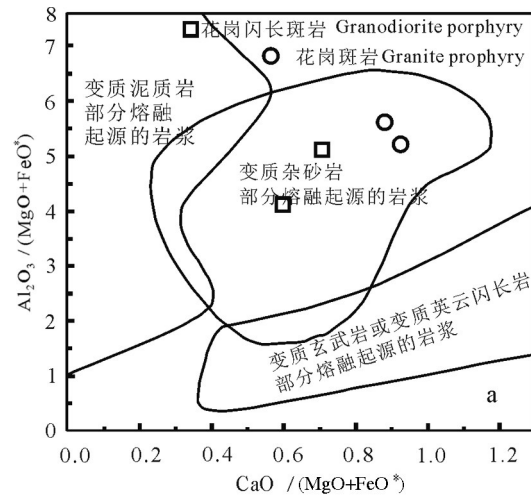


图9 东坑口酸性岩体的C/MF-A/MF(据 Altherr et al., 1998)图解  
Fig.9 C/MF-A/MF diagram of Dongkengkou pluton (according to Altherr et al.,1998)

均为 48.13; La/Yb 值介于 39.65~62.98。通过 Y-(Sr/Y) 和  $Yb_N - (La_N/Yb_N)$  图解(图 10)可判别东坑口酸性岩体均为埃达克岩。根据埃达克岩形成时物质来源的不同将其分为 3 类: ①地幔重熔而形成的高 Mg 埃达克岩系(HMAs); ②以俯冲板块(榴辉岩相)重熔体为主,还伴随有地幔重熔体混入的高 Mg<sup>#</sup>埃达克岩系; ③以俯冲板块(榴辉岩相)重熔为主,地幔重熔体的作用和影响非常轻微的低 Mg<sup>#</sup>埃达克岩系(董申保, 2004)。东坑口酸性岩体 SiO<sub>2</sub> 含量介于 59%~70%, Mg<sup>#</sup> 介于 0.45~0.51, 总体偏低, 属于该分类体系下的低 Mg<sup>#</sup>埃达克岩系, 表明东坑口酸性岩体的岩浆来源主要为俯冲板块(榴辉岩相)重融。太平洋板块向华南大陆俯冲引起的华夏和扬

表3 东坑口酸性岩体花岗斑岩锆石原位 Hf 同位素分析  
Table 3 Zircon Hf isotope data of granite porphyry in Dongkengkou pluton

点号	Age/Ma	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$T_{\text{DM}}/\text{Ga}$	$T_{\text{DMcrustal}}$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\text{Hf}_{\text{Chur}}(t)$	$\text{Hf}_{\text{DM}}(t)$
ZK1502-2-1	134.1	0.282607	0.000016	0.001179	0.049171	0.282605	0.92	1.38	-3.43	0.282701	0.283155
ZK1502-2-2	132	0.282674	0.000015	0.001911	0.076042	0.282669	0.84	1.24	-1.13	0.282701	0.283155
ZK1502-2-3	135.8	0.282698	0.000020	0.001520	0.062276	0.282695	0.80	1.18	-0.27	0.282702	0.283156
ZK1502-2-4	135.7	0.282687	0.000016	0.001519	0.065388	0.282683	0.81	1.20	-0.60	0.282700	0.283154
ZK1502-2-5	134.4	0.282616	0.000016	0.001237	0.051849	0.282613	0.91	1.36	-3.07	0.282700	0.283154
ZK1502-2-6	135.3	0.282640	0.000017	0.000898	0.037241	0.282638	0.87	1.31	-2.23	0.282701	0.283155
ZK1502-2-7	134.3	0.282695	0.000015	0.000973	0.040408	0.282692	0.79	1.18	-0.28	0.282700	0.283154
ZK1502-2-8	135.9	0.282666	0.000016	0.001713	0.071725	0.282662	0.85	1.25	-1.38	0.282701	0.283155
ZK1502-2-9	136.8	0.282644	0.000015	0.001310	0.056081	0.282640	0.87	1.30	-2.10	0.282700	0.283154
ZK1502-2-10	135.4	0.282619	0.000020	0.001146	0.046460	0.282616	0.90	1.35	-2.95	0.282699	0.283153
ZK1502-2-11	134.7	0.282642	0.000016	0.001023	0.041733	0.282639	0.87	1.30	-2.15	0.282700	0.283154
ZK1502-2-12	134.6	0.282634	0.000016	0.001379	0.057930	0.282631	0.88	1.32	-2.47	0.282700	0.283154
ZK1502-2-13	133.1	0.282624	0.000017	0.001661	0.067441	0.282620	0.91	1.35	-2.85	0.282701	0.283154
ZK1502-2-14	134.1	0.282633	0.000015	0.001121	0.046248	0.282630	0.88	1.32	-2.52	0.282701	0.283156
ZK1502-2-15	133	0.282514	0.000038	0.001834	0.075437	0.282510	1.07	1.59	-6.79	0.282702	0.283156
ZK1502-2-16	132.3	0.282253	0.000016	0.001307	0.052369	0.282249	1.42	2.17	-16.01	0.282702	0.283156
ZK1502-2-17	134	0.282637	0.000017	0.001323	0.053682	0.282633	0.88	1.32	-2.39	0.282701	0.283155
ZK1502-2-18	134.4	0.282704	0.000016	0.000744	0.032061	0.282702	0.77	1.16	-0.04	0.282701	0.283155
ZK1502-2-19	134.4	0.282659	0.000017	0.000869	0.035093	0.282657	0.84	1.26	-1.56	0.282701	0.283155

子陆块在钦杭结合部位强烈挤压,致使下地壳加厚。产出环境为陆内碰撞造山环境向伸展作用转换阶段,与邢光福等(2017)认为钦杭成矿带在燕山期表现为早期挤压、晚期伸展,变化时间大约在 140 Ma 较为一致。

大陆地壳具有最低的 Nb/Ta 值为 11.0~12.3,亏损地幔 Nb/Ta 值为  $15.5 \pm 1$  (Rudnick et al., 2009),原

始地幔 Nb/Ta 值 17.5 (McDonough et al., 1995)。东坑口酸性岩体的 Nb/Ta 值介于 11~12.74,平均值为 12,符合在大陆地壳的值范围内。岩石中 Ni 和 Cr 含量以及  $\text{MgO}^{\#}$  值总体偏低,而  $\text{FeO}/\text{MgO}$  值较高,说明受地幔中橄榄岩混染很少。因此东坑口酸性岩体不是来源于底侵或拆沉下地壳物质重熔。根据特征元素图解(图 11),东坑口酸性岩主要位于增厚

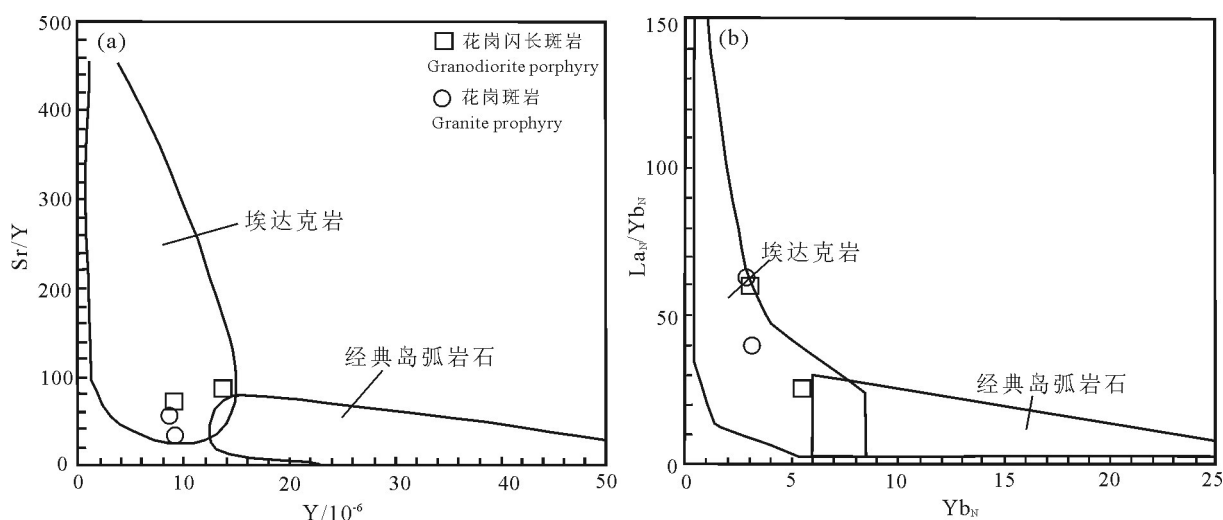


图 10 东坑口斑岩体  $\text{Y}-\text{Sr}/\text{Y}$  (a) 和  $\text{Yb}_N - (\text{La}_N/\text{Yb}_N)$  (b) 判别图 (据 Defan et al., 1990; Martin, 1999)

Fig 10  $\text{Y}-\text{Sr}/\text{Y}$  (a) and  $\text{Yb}_N - (\text{La}_N/\text{Yb}_N)$  (b) discriminant diagrams of Dongkengkou (after Defan et al., 1990; Martin, 1999)

下地壳形成的埃达克岩范围内。因此,研究区内酸性岩体应是增厚下地壳部分重熔形成,其高钾钙特征可能是上地壳物质的混染所造成。

东坑口酸性岩体,从主量元素特征分析,岩体CaO含量介于2.12%~2.64%,SiO<sub>2</sub>含量介于67%~69.04%,(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)含量介于7.46%~8.07%,平均值为7.89%,不具备A型花岗岩低钙、高SiO<sub>2</sub>和碱的特征,从微量元素特征分析,岩体的Zr+Nb+Ce+Y值较A型花岗岩偏低,不具备贫Sr、Eu、Ba、Ti的特征,且没有P和Eu的强烈亏损,不具备A型花岗岩的特征(张旗,2012)。从稀土元素特征分析,岩体稀土元素配分曲线无明显Eu负异常,与A型花岗岩稀土配分曲线特征不一致。所以,东坑口酸性岩体不是A型花岗岩。东坑口酸性岩体从矿物组合特征上来看,并没有堇青石、白云母等S型花岗岩具有的典型过铝质矿物。从稀土元素特征上来看,岩体的稀土元素配分图与S型花岗岩的海鸥式稀土元素配分图不一致。东坑口酸性岩体的含铝指数A/CNK的值

都小于1.1,而S型花岗岩含铝指数A/CNK值一般大于1.1。可见,东坑口酸性岩体为I型花岗岩,与前人在钦杭带上同时代与钨钼成矿有关岩体类型相同(陈雪霏等,2013;唐燕文等,2013)。

### 6.2 成岩构造环境判别

东坑口岩体在Y-Nb和(Y+Nb)-Rb构造环境判别图(图12)中,花岗闪长斑岩和花岗斑岩数据投点落在火山弧花岗岩和碰撞花岗岩分界线附近,显示东坑口酸性岩体形成的构造环境可能是陆内造山阶段的板块碰撞结合带环境。

东坑口酸性岩体微量元素分析结果表明二者皆富集大离子亲石元素(LILE),如Rb、Ba、U、Sr,而且还明显亏损高场强元素(HFSE),如Ta、Ti、Nb、P、Zr等。这些微量元素地球化学特征和与俯冲有关的花岗岩类的典型特征相似。说明东坑口酸性岩体的形成可能与板块俯冲作用有关;在岩石学特征上东坑口酸性岩体富含黑云母矿物,不含白云母和堇青石。东坑口酸性岩体矿物组合的特征与富钾

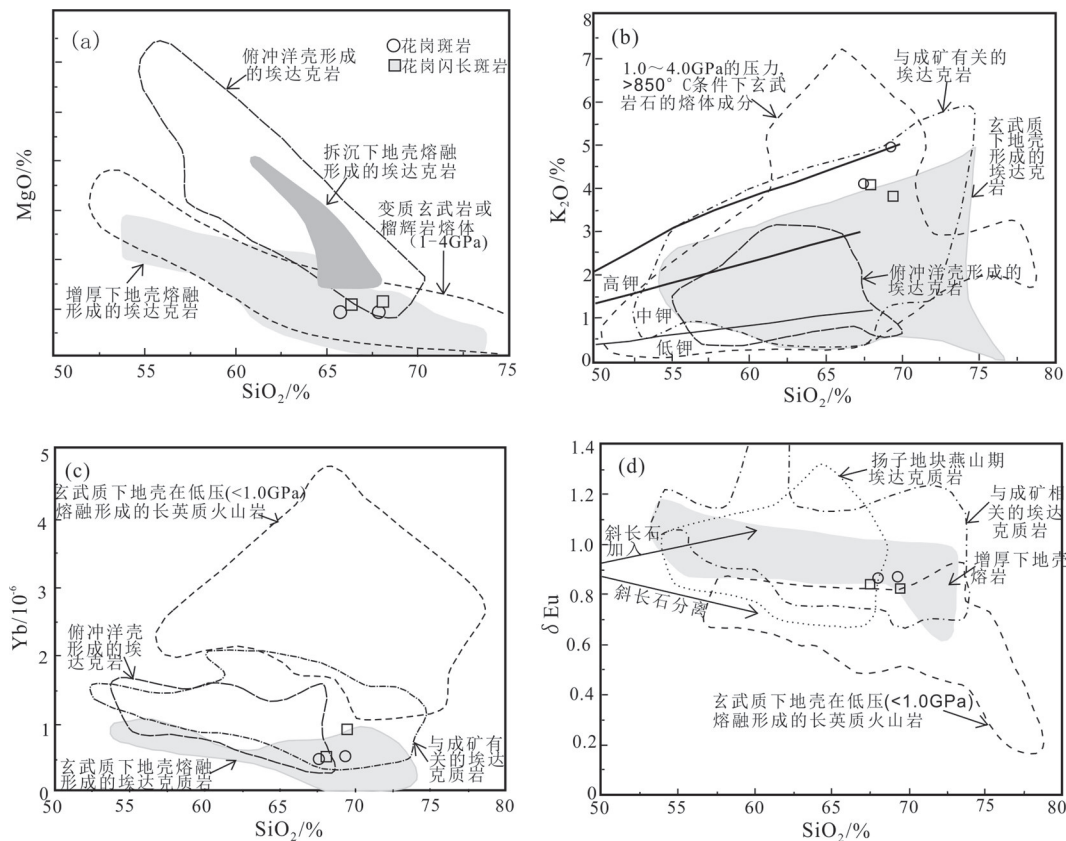


图11 研究区中酸性岩石SiO<sub>2</sub>-MgO(a)、SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O(b)、SiO<sub>2</sub>-Yb(c)、SiO<sub>2</sub>-δEu(d)图解(图解据王强等,2002,2004)  
 Fig.11 Diagrams of SiO<sub>2</sub>-MgO(a), SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O(b), SiO<sub>2</sub>-Yb(c) and delta SiO<sub>2</sub>-δEu(d) of intermediate and acidic rocks in the study area (the diagrams from Wang Qiang et al., 2002,2004)

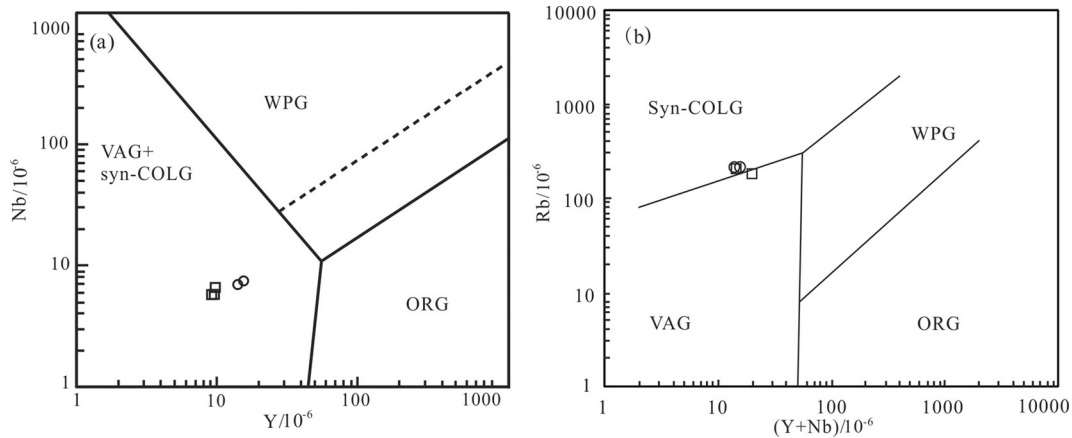


图 12 东坑口酸性岩体 Nb-Y(a)与 Rb-(Y+Nb)构造环境判别图解判别图(b)(底图据 Pearce et al., 1984)

VAG—火山弧花岗岩; ORG—洋中脊花岗岩; WPG—板内花岗岩; Syn—COLG—同碰撞花岗岩

Fig. 12 Discriminant diagram of Nb-Y(a) and Rb-(Y+Nb)(b) showing tectonic environment of Dongkengkou pluton (b) (Base figure from Pearce et al., 1984)

VAG—Volcanic arc granite; ORG—Mid-ocean ridge granite; WPG—Intraplate granite; Syn—COLG—collisional granite

及钾长石斑状钙碱性花岗岩类(KCG)的矿物组合相同,可以推断东坑口酸性岩体属于富钾及钾长石斑状钙碱性花岗岩(KCG),其一般产生在转换体制环境中,如在碰撞事件主峰期间分开的张弛阶段,或者是在挤压体制向拉张体制转化的过程中(Barbarin, 1999),依据以上可以推断东坑口酸性岩体形成的构造环境为陆陆碰撞挤压之后,大陆向外伸展,地壳减薄过程的大地构造环境。

三叠纪时期华南地块的不同构造单元拼接在一起,形成一个统一的整体,在这之后,它们有着相同或者相似的地质构造演化历史。东亚古特提斯构造系与古亚洲洋构造系向环太平洋主动大陆边缘转变的重要转折时期是中生代的侏罗纪,即华南燕山期岩浆活动时期(Whalen et al., 1987)。且华南在早中侏罗世经历了一次从东西向古亚洲构造域向北东、向西太平洋构造域的体制转换(毛景文等, 2004, 2007, 2008)。舒良树(2012)在研究华南地区的岩浆岩活动中提出华南地块在经过中侏罗世这一时间段内的构造体制的转换之后,其转变成为了西太平洋活动大陆边缘的一个重要的组成部分,整体的构造环境发生了改变,成为了弧后伸展区。在中国的东南部沿海地区发现了现陆缘伸展型的双峰式火山岩、双峰式侵入岩和A型花岗岩组合,通过锆石U-Pb测年测定它们大部分都属于晚中生代时期形成的岩石,说明在晚中生代时期,中国东南沿海地区即东南大陆边缘为弧后伸展区,地壳处在

伸展拉张阶段。胡瑞忠等(2007)在研究华南地区的过程中提出华南地区从白垩纪开始就已经处于伸展的构造运动环境之下。谢桂青(2003)在研究华南岩浆岩活动时提出在180~160 Ma、~140Ma、~125 Ma、100~110 Ma和80~90 Ma这6个地质历史时期内,华南地区的岩石圈处在伸展运动的大地构造背景环境之下;毛景文等(2004)认为在180~155 Ma、145~125 Ma和110~75 Ma这3个时期内,华南处于一个伸展运动的阶段;邢光福等(2017)认为140 Ma左右恰处于燕山晚期挤压向伸展转换时期。

东坑口酸性岩体所在的赣东北地区发育大量燕山期形成的岩体,在总结前人研究工作的基础上,发现区域上岩体形成的时间主要集中在中侏罗世(171 Ma)和早白垩世(131~133 Ma和120 Ma)(吕劲松等, 2017),这与谢桂青(2003)和毛景文等(2004)提出的伸展运动的时期相符,说明该区域内的花岗岩形成的大地构造环境为太平洋板块向华南大陆俯冲引起的弧后多阶段岩石圈伸展作用。结合测得东坑口花岗斑岩岩体的成岩年龄为(134.25±0.99)Ma,地球化学元素构造环境判别及区域大地构造演化,推测该岩体形成于碰撞造山挤压向伸展转换阶段。

## 7 结 论

(1)确定了东坑口酸性岩体花岗斑岩的锆石U-Pb年龄(134.25±0.99)Ma,花岗闪长斑岩的锆石

U-Pb 年龄 ( $132.6 \pm 1.3$ ) Ma, 岩体于早白垩世侵位, 属于华南燕山期晚期岩浆活动的产物, 岩体成矿专属性主要为钨钼。

(2) 东坑口酸性岩体中花岗斑岩和花岗闪长斑岩元素地球化学特征基本一致, 均为高钾钙碱性花岗岩, 铝饱和指数 A/CNK 值均小于 1.1, 属于典型的 I 型花岗岩。

(3) 东坑口酸性岩体岩浆源区为变质杂砂岩, 且岩体的源区是壳源物质, 主要为下地壳; 岩体的地球化学特征为典型的埃达克岩, 为低 Mg<sup>#</sup> 埃达克岩系。

(4) 区域上岩体是在陆陆碰撞之后, 碰撞挤压致使下地壳加厚以后, 向伸展减薄转换的体制中形成的。东坑口酸性岩体产出环境为陆内造山环境, 太平洋板块向华南大陆俯冲引起华夏和扬子陆块在软杭结合部位强烈挤压及伸展作用, 推测形成于碰撞造山挤压向伸展构造转换阶段。

## References

- Altherr R, Holl A. 1998. Break-up of the greater Indo-Australian continent and accretion of blocks framing South and East Asia[J]. *Geodinamics*, 26: 149-170.
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report <sup>204</sup>Pb[J]. *Chemical Geology*, 192(1/2): 59-79.
- Barbarin B. 1999. A review of relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. *Lithos*, 46: 605-626.
- Boynton W V. 1984. *Geochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite studies*[M]/Henderson P(ed). Rare Earth Element Geochemistry, Elsevier: 63-114.
- Chen Guohua, Shu Liangshu, Shu Licheng, Zhang Cheng, Ouyang Yongpeng. 2015. Geological characteristics and metallogenic background of Zhuxi tungsten(copper) polymetallic deposit in the eastern part of Jiangnan[J]. *Science China*, 45(12): 1799-1818(in Chinese).
- Chen Xiaoming, Tan Qingquan, Zhao Guangtao. 2002. Plagioclases from the basalt of Okinawa Trough and its petrogenesis significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 482-488(in Chinese with English abstract).
- Chen Xuefei, Wang Yinggeng, Sun Weidong, Yang Xiaoyng. 2013. Zircon U-Pb chronology, geochemistry and genesis of the Zhuxiling granite in Ningguo, southern Anhui[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(11): 1662-1678(in Chinese with English abstract).
- Defant M J, Drummond M S. 1990. Derivation of some morden arc magmas by of young subducted lithosphere[J]. *Nature*, 347: 662-665.
- Defant M J, Drummond M S. 1993. Mout St. Helens: Potential example of partial melting of subducted lithosphere in a volcanic arc[J]. *Geology*, 21: 547-550.
- Dong Shenbao, Tian Wei. 2004. The nomenclature, characteristics and petrogenesis of adakite[J]. *Earth Science Frontiers*, (4): 585-594 (in Chinese with English abstract).
- Feng Chengyou, Zhang Dequan, Xiang Xinkui, Li Daxin, Qu Hongying, Liu Jiannan, Xiao Ye. 2012. Re-Os isotopic dating of molybdenite from the Dahutang tungsten deposit in northwestern Jiangxi Province and its geological implication[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 3858-3868(in Chinese with English abstract).
- Frost. 2001. A geochemitic classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 42:2033-2048.
- Gao Shan, Luo Tingchuan, Zhang Benren, Zhang Hongfei, Han Yinwen, Zhao Zhidan, Hartmut Kern. 1999. Structure and composition of the crust in eastern China[J]. *Science China(series D)*, (3): 204-213(in Chinese).
- Griffin W L, Belousova E A, Shee S R, Pearson N J, O'Reilly S Y. 2004. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons[J]. *Precambrian Research*, 131(3/4): 231-282.
- Guo Shuo, Zhao Yuanyi, Qu Huanchun, Wu Dexin, Xu Hong, Li Chao, Liu Yan, Zhu Xiaoyun, Wang Zengke. 2012. Geological characteristics and ore-forming time of the Dexing porphyry copper ore mine in Jiangxi Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(3): 691-699.
- Huang Lanchun, Jiang Shaoyong. 2012. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and petrogenesis of the porphyry-like muscovite granite in the Dahutang tungsten deposit, Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 3887-3900(in Chinese with English abstract).
- Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Peng Jiantang, Liu Shen, Zhong Hong, Zhao Hongjun, Jiang Guohao. 2007. Some problems concerning relationship between Mesozoic-Cenozoic lithospheric extension and uranium metallogenesis in South China[J]. *Mineral Deposits*, (2): 139-152(in Chinese with English abstract).
- Hou Kejun, Li Yanhe, Zou Tianren, Qu Xiaoming, Shi Yuruo, Xie Guiqing. 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, (10): 2595-2604(in Chinese with English abstract).
- Jackson S E, Pearson N J, Griffin W L, Belousova E A. 2004. The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U-Pb zircon Geochronology[J]. *Chemical Geology*, 211(1/2): 47-69.
- Jahn B M, Wu F Y, Lo C H. 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust, geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional: Mafic ultramafic intrusions of the northern Dabie complex central China[J].

- Chemical Geology, 157(1/2): 119–164.
- Li Changmin. 2009. A review on the minerageny and situ microanalytical dating techniques of Zircons[J]. Geological Survey and Research, 32(3): 161–174(in Chinese with English abstract).
- Li Xiaofeng, Yi Xiankui, Zhu Heping. 2009. Source of ore-forming fluids in Jinshan gold deposit of Dexing County: Constraints from microstructures and stable isotopes[J]. Mineral Deposits, 28(1): 42–52(in Chinese with English abstract).
- Lv Jinsong, Zhang Xuehui, Sun Jiandong, Zhang Yong, Wu Bin, Luo Xuequan. 2017. Spatiotemporal evolution and metallogenic regularity of felsic rocks in the Yanshanian of the eastern segment Qinhang metallogenic belt, South China[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(11): 3635–3658(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Li Xiaofeng, Zhang Changqing, Mei Yanxiong. 2004. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in south China[J]. Earth Science Frontiers, 1(1): 45–55(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, Chen Yuchuan. 2007. Large-scale tungsten-tin mineralization in the Nanling region, South China: Metallogenic ages and corresponding geodynamic processes[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(10): 2329–2338(in Chinese with English abstract).
- Mao Jingwen, Xie Guiqing, Guo Chunli, Yuan Shunda, Cheng Yanbo, Chen Yuchuan. 2008. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenic settings[J]. Geological Journal of China Universities, 14(4): 510–526(in Chinese with English abstract).
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoids[J]. Lithos, 46(3): 411–429.
- McDonough W F, Sun S S. 1995. The composition of the Earth[J]. Chemical Geology, 120(3/4): 223–253.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth-Science Reviews, 37(3/4): 215–224.
- 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: 956–983.
- Rudnick R L, Barth M, Horn I, McDonough W F. 2009. Rutile-bearing refractory eclogites: Missing link between continents and depleted mantle[J]. Science, 287(5451): 2780281.
- Shu Liangshu. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. Geological Bulletin of China, 31(7): 1035–1053(in Chinese with English abstract).
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345.
- Tang Yingwen, Xie Yuling, Li Yingxu, Qiu Liming, Zhang Xinxin, Han Yuda, Jiang Yanceng. 2013. LA-CP-MS U-Pb ages, geochemical characteristics of the zircons from Wushanguan complex body in Anji mining area northwestern Zhejiang and their geological significances[J]. Geological Review, 59(4): 702–715(in Chinese with English abstract).
- Thompson R N. 1982. British Tertiary volcanic province[J]. Scottish Journal of Geology, 18: 59–107.
- Wang Qiang, Zhao Zhenghua, Xu Jifeng, Bai Zhenghua, Wang Jianxin. 2004. Geochemical characteristics of adakitic intrusive rocks in Tongshankou, southeastern Hubei: Melting of lower crust and genesis of porphyry copper deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 20(2): 351–360(in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Zhao Zhenghua, Xu Jifeng, Li Xianhua, Xiong Xiaolin, Bao Zhiwei, Liu Yimao. 2002. Yanshanian adakitic rocks and mineralization in the eastern Yangtze block[J]. Science China(series D), 32(S1): 127–136(in Chinese).
- Whalen J B, Currie K I, Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 95: 407–419.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, Gao Shan. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(2): 185–220(in Chinese with English abstract).
- Xie Guiqing. 2003. Geological and Geochemical Characteristics of the Basic Dykes (body) since the Late Mesozoic in Southeastern China and Its Geodynamic Significance—Taking Jiangxi Province as An Example[D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 1–128(in Chinese with English abstract).
- Xing Guangfu, Hong Wentao, Zhang Xuehui, Zhao Xilin, Ban Yizhong, Xiaofan. 2017. Yanshanian granitic magmatism and their mineralizations in East China[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(5): 1571–1590(in Chinese with English abstract).
- Yang Zeli, Qiu Jiangsheng, Xing Guangfu, Yu Minggang, Zhao Jiaolong. 2014. Petrogenesis and magmatic evolution of the Yanshan granite pluton in Yichun, Jiangxi Province, and their constraints on mineralization[J]. Acta Geologica Sinica, 88(5): 850–868(in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi. 2012. A discussion on the low-SiO<sub>2</sub> adakite and high-SiO<sub>2</sub> adakite[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 31(6): 897–900(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhihui, Hu Bojie, Zhang Da, Xiong Guangqiang, Zhu Xinyou, Jia Wenbin, Gong Xiaodong. 2020. Zircon U-Pb age, geochemistry and Hf isotope characteristics of Shimensi granite porphyry in northern Jiangxi Province and its constraint on mineralization. Geological Bulletin of China, 39(8): 1267–1284(in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 陈国华, 舒良树, 舒立旻, 张诚, 欧阳永棚. 2015. 江南东段朱溪钨(铜)多金属矿床的地质特征与成矿背景[J]. 中国科学(地球科学), 45(12): 1799–1818.

- 陈小明, 谭清泉, 赵广涛. 2002. 海底玄武岩中斜长石研究及其岩石学意义[J]. 岩石学报, (4): 482-488.
- 陈雪霏, 汪应庚, 孙卫东, 杨晓勇. 2013. 皖南宁国竹溪岭地区花岗岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学及其成因研究[J]. 地质学报, 87(11): 1662-1678.
- 董申保, 田伟. 2004. 埃达克岩的原义、特征与成因[J]. 地学前缘, (4): 585-594.
- 丰成友, 张德全, 项新葵, 李大新, 瞿泓滢, 刘建楠, 肖晔. 2012. 赣西北大湖塘钨矿床辉钨矿 Re-Os 同位素定年及其意义[J]. 岩石学报, 28(12): 3858-3868.
- 高山, 骆庭川, 张本仁, 张宏飞, 韩吟文, 赵志丹, Hartmut Kern. 1999. 中国东部地壳的结构和组成[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), (3): 204-213.
- 黄兰椿, 蒋少涌. 2012. 江西大湖塘钨矿床似斑状白云母花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及成因研究[J]. 岩石学报, 28(12): 3887-3900.
- 胡瑞忠, 毕献武, 彭建堂, 刘燊, 钟宏, 赵军红, 蒋国豪. 2007. 华南地区中生代以来岩石圈伸展及其与钨成矿关系研究的若干问题[J]. 矿床地质, (02): 139-152.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 曲晓明, 石玉若, 谢桂青. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, (10): 2595-2604.
- 李长民. 2009. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述[J]. 地质调查与研究, 32(3): 161-174.
- 李晓峰, 易先奎, 朱和平. 2009. 德兴金山金矿床成矿流体来源: 小尺度构造和同位素地球化学证据[J]. 矿床地质, 28(1): 42-52.
- 吕劲松, 张雪辉, 孙建东, 张勇, 武彬, 骆学全. 2017. 钦杭成矿带东段燕山期中酸性岩浆活动时空演化与成矿规律[J]. 岩石学报, 33(11): 3635-3658.
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张长青, 梅燕雄. 2004. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J]. 地学前缘, 1(1): 45-55.
- 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 陈毓川. 2007. 南岭地区大规模钨锡多金属成矿作用: 成矿时限及地球动力学背景[J]. 岩石学报, 23(10): 2329-2338.
- 毛景文, 谢贵青, 郭春丽, 袁顺达, 程彦博, 陈毓川. 2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境[J]. 高校地质学报, 14(4): 510-526.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 31(7): 1035-1053.
- 唐燕文, 谢玉玲, 李应棚, 邱立明, 张欣欣, 韩宇达, 姜妍岑. 2013. 浙江安吉多金属矿区坞山关杂岩体锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. 地质论评, 59(4): 702-715.
- 王强, 赵振华, 许继峰, 李献华, 熊小林, 包志伟, 刘义茂. 2002. 扬子地块东部燕山期埃达克质(adakite-like)岩与成矿[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 32(S1): 127-136.
- 王强, 赵振华, 许继峰, 白正华, 王建新. 2004. 鄂东南铜山口、殷祖埃达克质(adakitic)侵入岩的地球化学特征对比: (拆沉)下地壳熔融与斑岩铜矿的成因[J]. 岩石学报, 20(2): 351-360.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, (2): 185-220.
- 谢桂青. 2003. 中国东南部晚中生代以来的基性岩脉(体)的地质地球化学特征及其地球动力学意义初探——以江西省为例[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所博士论文, 1-128.
- 邢光福, 洪文涛, 张雪辉, 赵希林, 班宜忠, 肖凡. 2017. 华东地区燕山期花岗岩岩浆与成矿作用关系研究[J]. 岩石学报, 33(5): 1571-1590.
- 杨泽黎, 邱检生, 邢光福, 余明刚, 赵姣龙. 2014. 江西宜春雅山花岗岩体的成因与演化及其对成矿的制约[J]. 地质学报, 88(5): 850-868.
- 张旗. 2012. 低硅埃达克岩和高硅埃达克岩问题[J]. 岩石矿物学杂志, 31(6): 897-900.
- 张志辉, 胡攀捷, 张达, 熊光强, 祝新友, 贾文彬, 巩小栋. 2020. 赣北石门寺花岗岩斑岩锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学、Hf 同位素特征及其对成矿的制约[J]. 地质通报, 39(8): 1267-1284.