

# 皖南绩溪县靠背尖高 Ba-Sr 花岗闪长斑岩年代学及其成因\*

周翔<sup>1</sup> 余心起<sup>1\*\*</sup> 杨赫鸣<sup>1</sup> 王德恩<sup>2</sup> 杜玉雕<sup>1</sup> 柯宏飙<sup>2</sup>

ZHOU Xiang<sup>1</sup>, YU XinQi<sup>1\*\*</sup>, YANG HeMing<sup>1</sup>, WANG DeEn<sup>2</sup>, DU YuDiao<sup>1</sup> and KE HongBiao<sup>2</sup>

1. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

2. 安徽省地质矿产勘查局 332 地质队, 黄山 245000

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. 332 Geological Team of Anhui Bureau of Geology and Mineral Resources, Huangshan 245000, China

2012-06-18 收稿, 2012-08-12 改回.

Zhou X, Yu XQ, Yang HM, Wang DE, Du YD and Ke HB. 2012. Petrogenesis and geochronology of the high Ba-Sr Kaobeijian granodiorite porphyry, Jixi County, South Anhui Province. *Acta Petrologica Sinica*, 28(10):3403–3417

**Abstract** The Kaobeijian granodiorite porphyry, outcrop area of 0.7 km<sup>2</sup>, is a small stock which intruded into Neoproterozoic-Paleozoic marine sedimentary strata in Jixi County, South Anhui Province. With hornblende grains, this porphyry are composed of SiO<sub>2</sub> 64.05% ~ 69.64% and total alkalis (K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O) 6.1% ~ 11.5%, with A/CNK values 0.77 ~ 0.98. Their LREE/HREE ratios are high and Eu is a bit depleted. It belongs to I-type granitoid formed in an island-arc environment. The Kaobeijian granodiorite porphyry have  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  values of -3.69 ~ -6.24 and initial <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ratios of 0.70784 ~ 0.71033, roughly in conformity to the syntectonic type granites of southern China. The unusual high Ba-Sr composition comes from Neoproterozoic granodiorites which was enriched of Ba-Sr. The mantle-derived materials likely played an important role in the generation of the magma, letting the S-type magma gradually transformed into I-type magma in mixing process. In addition, lots of felsic-quartz veins and hydrothermal alteration indicate that the stock had been underwent an intensively residual melting and/or hydrothermal fluid activities. And the quartz of granodiorite were transformed into sub-grains under high temperature. All these indicate that pervious <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar age of 134.3 ± 1.4 Ma for biotite from the Kaobeijian granodiorite porphyry is more likely to document a tectonic-thermal event, rather than the forming age of the rock. SHRIMP zircon U-Pb analyses yield consistent ages of 151.9 ± 1.1 Ma, 152.9 ± 1.1 Ma and 147.7 ± 1.3 Ma for three samples of granodiorite, indicate the magma was emplaced in Late Jurassic.

**Key words** High Ba-Sr; petrogenesis; SHRIMP zircon U-Pb dating; Kaobeijian granodiorite porphyry; South Anhui

**摘要** 皖南绩溪县靠背尖花岗闪长斑岩侵入位于新元古代南华系、震旦系和下古生界海相沉积盖层中, 岩石学、地球化学研究表明其为高钾钙碱性系列准铝质 I 型斑岩体, 稀土、微量元素及 Sm-Nd、Rd-Sr 同位素数据指示其主要来自地壳重熔, 并有幔源物质的加入。异常高的 Ba-Sr 含量源于对区域早期富 Ba-Sr 岩浆岩物质的继承, 幔源物质的加入使岩浆由 S 型转为 I 型。微量元素构造判别图指示其形成于岛弧环境。三件样品锆石 SHRIMP U-Pb 测年得出的年龄加权平均值分别为 151.9 ± 1.1 Ma、147.7 ± 1.3 Ma 和 152.7 ± 1.1 Ma, 表明岩体侵入于晚侏罗世。靠背尖岩体受后期热液影响广泛发育钾化、硅化等高温蚀变, 并可能有高温条件的韧性变形, 因此前人报道的黑云母 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄 134.3 ± 1.4 Ma 可能代表构造热事件的年龄。

**关键词** 花岗闪长斑岩; 高 Ba-Sr; 年代学及成因; 靠背尖; 皖南

中图法分类号 P588.13; P597.3

## 1 引言

皖南地区地处长江中下游成矿带和钦杭成矿带之间, 属

于全国 19 个成矿区带之外的非重点成矿区带。区内发育大量晋宁期、燕山期侵入岩。随着近期越来越多的大中型 W-Mo 矿床被连续发现, 侏罗-白垩纪花岗质岩浆作用与成矿关系的研究越来越受到重视。

\* 本文受国家自然科学基金项目(41272232)和安徽省国土资源厅公益性地质(科研)工作项目(2009-20)联合资助。

第一作者简介: 周翔, 男, 1987 年生, 硕士生, 构造地质学专业, E-mail: zhouxiangcugb@foxmail.com

\*\* 通讯作者: 余心起, 男, 1962 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石大地构造学、应用构造地质学研究, E-mail: yuxinqi@cugb.edu.cn

近几年涉及浙赣皖相邻区花岗岩的研究取得了长足进展。大部分研究者认为,浙赣皖相邻区的岩浆活动可以大致分为 180~160Ma 和 <145Ma 的两期(周涛发等,2004; Jiang *et al.*, 2005; 2009; 2011; 赵鹏等,2010; He and Xu, 2011; Li *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012)。第一期以花岗闪长岩为主,最早在赣东北一带形成,时代大约从 180Ma 开始(王强等,2004; 杨昔林等,2011),最近发现在 167~155Ma 左右即扩大到浙西、皖南一带(汪建国等,2010; 邱骏挺等,2011),部分区域延续至 146~140Ma(薛怀民等,2009; 秦燕等,2010; 周翔等,2011; 王德恩等,2011)。第二期以花岗岩为主,主要形成于早白垩世(Jiang *et al.*, 2009; 2011; 赵鹏等,2010; He and Xu, 2011; 薛怀民等,2009; 张招崇等,2007)。

然而,由于研究周期或研究范围的限制,加之高山峻岭为主的浙赣皖相邻区通行条件很差,近期的研究难免疏漏部分花岗岩体,很多 0.5~1km<sup>2</sup> 左右或更小的侵入体在容易收集到的中小比例尺地质图中被忽略,致使对花岗岩区域性时空分布、成岩作用等的研究以及最新成果资料的系统梳理尚不完全。不同测年方法对同一花岗岩体所获得的测年值相差 10~15Ma 的情况在未测年花岗岩体中可能同样存在。以往不同研究者对岩浆岩起源、形成构造背景的分析 and 总结中一些不同见解也未能基本统一。特别是形成于 172~146Ma 期间、0.3~1km<sup>2</sup> 左右的小型侵入体是近几年找矿突破和远景勘察的主要目标区(王强等,2004; 秦燕等,2010; 邱骏挺等,2011; 杨昔林等,2011; 周翔等,2011; 王德恩等,2011; 陈师奇等,2011),它们的起源及演化、成因类型和构造背景研究也是当务之急,但大多缺少对含矿岩体的高精度测年和岩石属性的深入探讨。其中,位于陡峭山岭之上的靠背尖岩体是皖南较有代表性的中生代花岗闪长斑岩,已发现多处 Cu、Mo、W 矿化,被认为具有一定找矿潜力,而前人报道的黑云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄 134.3 ± 1.4Ma(侯明金,2005),与浙赣皖相邻区大部分成矿岩体的年代有所差别,因而 134.3 ± 1.4Ma 的 <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄代表岩浆的侵位年龄还是构造热事件的年龄尚有待证实。

同时,目前研究者普遍认为第二期白垩纪岩浆活动与伊佐奈岐板块对欧亚大陆的俯冲碰撞有关(周涛发等,2004; Jiang *et al.*, 2005, 2009, 2011; 赵鹏等,2010; He and Xu, 2011; Li *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012; 袁峰等,2005,2006; 赵海玲等,2007),那么,第一期岩浆作用形成于何种构造背景? 已有研究者注意到,德兴花岗闪长斑岩老的继承锆石很少,具有高的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  (-1.14 ~ +1.80) 和极低的初始 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值(0.7044 ~ 0.7047),暗示地幔物质可能在德兴花岗闪长斑岩的成因中发挥了重要作用,应属于板内岩浆活动(王强等,2004; 袁峰等,2005, 2006)。绩溪逍遥地区的花岗闪长斑岩应属于哪种岩石类型? 形成于何种环境?

本文对逍遥地区的花岗闪长斑岩进行了系统的岩石学-地球化学-年代学研究,以期为进一步研究该区中生代构造-岩浆演化提供可靠资料。

## 2 区域地质背景

绩溪逍遥地区位于扬子地块东南部、江南隆起带东段的北缘。北邻江南深断裂,往南在江绍断裂带一带与华夏地块拼贴(图 1a)。

区内出露南华系休宁组(Nh<sub>1x</sub>)、南沱组(Nh<sub>2n</sub>)、下震旦统兰田组(Z<sub>1l</sub>)、上震旦-下寒武统皮园村组(Z<sub>1p</sub>-C<sub>1p</sub>)、下寒武统荷塘组(C<sub>1h</sub>)、大陈岭组(C<sub>1d</sub>)和中寒武统杨柳岗组(C<sub>2y</sub>)(图 1b)。南华纪-震旦纪为华南沉积盆地的形成阶段,海水由浅加深,形成以砾岩为底(磨拉石建造)、顶部为深水相硅质岩建造的沉积旋回。寒武纪开始形成沉降带,地层厚度巨大,具有被动大陆边缘坳陷盆地沉积的特征。与靠背尖岩体接触的休宁组、南沱组、兰田组沉积岩经过热液交代蚀变形成砂卡岩、角岩并有白钨矿富集(安徽省地质矿产勘查局 332 地质队,2008)。

燕山期花岗质侵入岩以钾长花岗岩和花岗闪长(斑)岩为主。钾长花岗岩为西北角伏岭岩体的主要岩性,而研究区自北向南依次出露的荆桐崖、靠背尖和逍遥三个岩体主要为花岗闪长(斑)岩(图 1b)。构成陡峭地貌的靠背尖花岗闪长斑岩位于研究区中部,出露面积约 0.7km<sup>2</sup>。其北 100m 出露荆桐崖小型花岗闪长斑岩岩株,面积小于 0.1km<sup>2</sup>。逍遥花岗闪长岩出露于研究区南部,侵入于逍遥背斜核部休宁组地层中,面积约 1.5km<sup>2</sup>,曾被认为是复式岩体(侯明金,2005)。

研究区发育北东向褶皱和断裂构造。褶皱构造包括荆州向斜和逍遥背斜(图 1b)。荆州向斜长 12km,宽 2.5~3km,轴向北东,北西翼产状总体上倾角中等,南东翼产状总体上倾角较陡,轴面倾向南东,核部为杨柳岗组,翼部为兰田组,向斜南东翼被逍遥-方家湾断层切割、破坏,南西部为靠背尖岩体所侵入;逍遥背斜核部为休宁组翼部为兰田组,背斜北西翼被逍遥-方家湾断层切割,仅保留南东翼,并伴随逍遥岩体侵入。区域上荆州向斜和逍遥背斜构成逍遥复背斜。断裂构造以逍遥-方家湾逆断层为主,走向北东,倾向南东,沿断裂带有石英斑岩脉充填,对区内岩体及成矿起控制作用;另外发育有小规模的荆桐崖北西向断裂。

## 3 靠背尖花岗闪长斑岩岩石学特征

靠背尖地处绩溪县北东 63km。靠背尖花岗闪长斑岩大体呈等轴岩株状侵入于荆州向斜核部的寒武系杨柳岗组、大陈岭组、荷塘组中,出露面积 0.7km<sup>2</sup>。据钻孔显示(安徽省地质矿产勘查局 332 地质队内部资料,2012),岩体西部边界向东缓倾斜,南部边界往北倾斜(倾角略陡),北部和东部边界分别往北和往东倾斜,即整体向北北东倾斜(图 1c)。

主体岩性由中细粒花岗闪长斑岩组成,沿开凿公路常见有呈球状风化的中(粗)粒花岗闪长斑岩,但分布不均匀且极不规则,和中细粒花岗闪长斑岩渐变过渡,二者无明显界限。

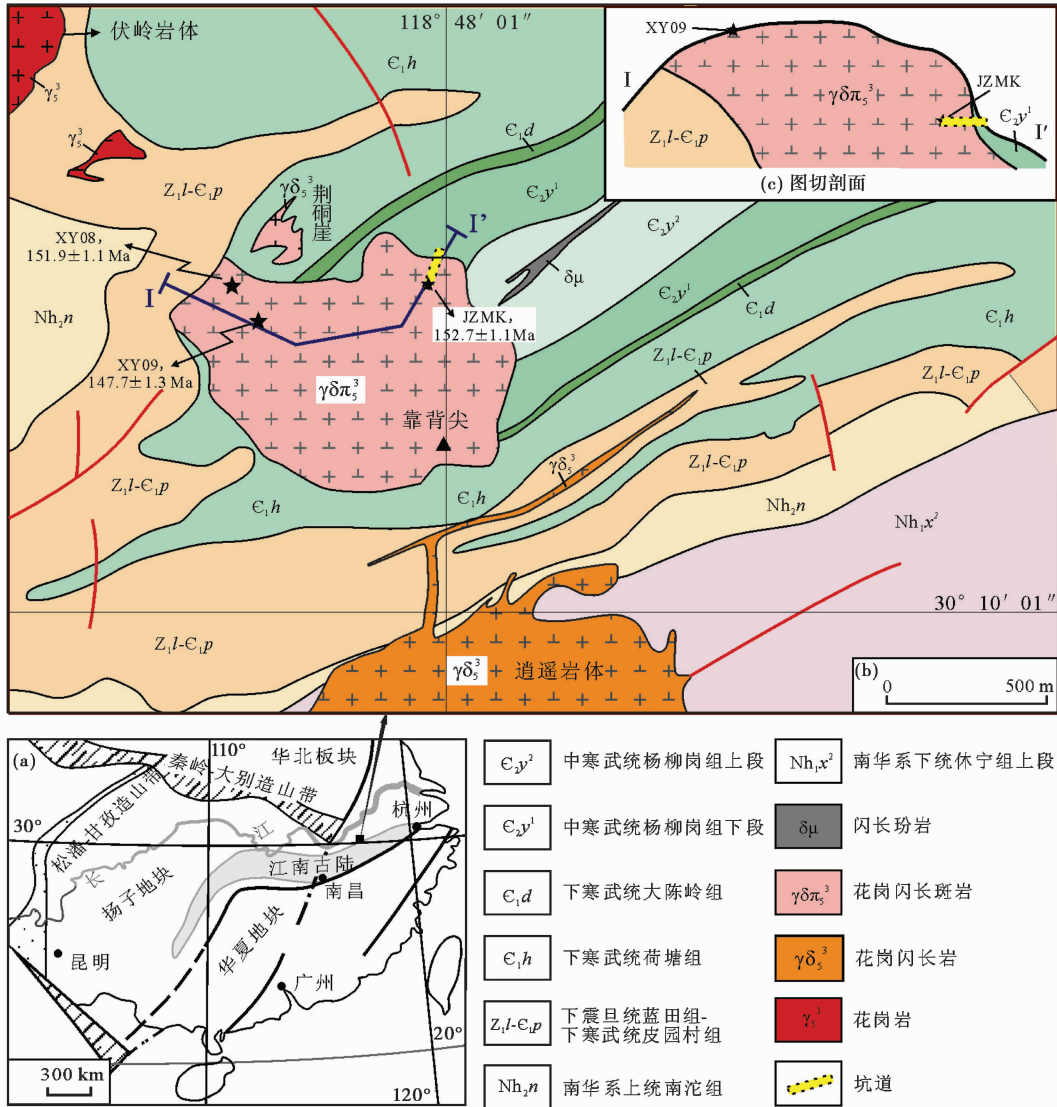


图1 皖南绩溪县靠背尖岩体地质简图(据安徽省地质矿产勘查局332地质队,2008<sup>①</sup>)

Fig.1 Geological sketch map of Kaobeijian pluton, Jixi County, South Anhui

岩体中部岩石露头石英斑晶明显而突出,外表似中粗粒花岗闪长斑岩,但基质仍为中细粒结构。局部有暗色基性包裹体(图2),包体体积较小且数量稀少。岩体发育多期次节理(裂隙),并被后期脉体填充(图3)。岩体多个不同部位可见到白钨矿、辉钼矿、黄铜矿,岩体北东边界附近辉钼矿矿化明显,形成可采矿体,被称为荆州钼矿,测年样品JZMK即采自该矿区坑道内。

中细粒花岗闪长斑岩呈灰白色,似斑状结构,基质细粒半自形粒状结构,块状构造;斑晶主要为斜长石(50%)(图4a)、石英(10%)、角闪石(5%),均为半自形晶,大小0.5~2mm;斜长石板状,常见环带,局部绢云母化、黝帘石化,表面脏;石英可见港湾状熔蚀,部分重结晶明显;黑云母

解理弯曲,膝折发育,局部葡萄石化、绿泥石化;角闪石半自形柱状,0.2~0.5mm,退色明显,局部被绿泥石、绿帘石、微晶黑云母交代交代,呈假象产出;基质为斜长石(5%)、钾长石(20%)、石英(10%)、黑云母,大小0.01~0.03mm,略定向分布;斜长石半自形板状,绢云母化,表面脏;钾长石及石英他形粒状,杂乱分布;黑云母星散状分布,绿泥石化;副矿物包括磁铁矿、锆石、磷灰石、榍石、褐帘石。

呈不规则状散乱分布的中粗粒花岗闪长斑岩呈灰白色,似斑状结构,基质细粒半自形粒状结构,块状构造;斑晶主要为斜长石(15%)、石英(5%),均为半自形晶,大小2.5~3.5mm;斜长石板状,环带发育,局部绢云母化;石英边缘不规则状;基质为斜长石(45%)、钾长石(10%)、石英(15%)、

① 安徽省地质矿产勘查局332地质队. 2008. 安徽省绩溪县逍遥矿区钨多金属矿普查设计书



图2 靠背尖花岗闪长岩内的暗色微粒包体

Fig. 2 The mafic microgranular enclaves (MMEs) in the Kaobeijian granodiorite porphyry

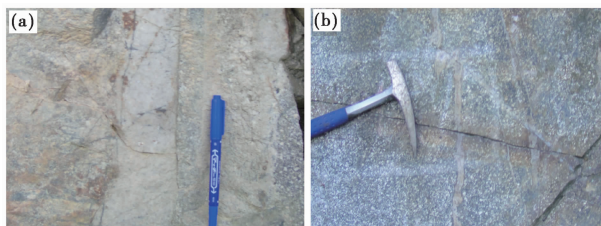


图3 靠背尖花岗闪长岩内的长英质脉体

Fig. 3 Felsic quartz veins in the Kaobeijian granodiorite porphyry

黑云母(10%)、角闪石(1%~5%),大小0.5~1mm,杂乱分布;斜长石半自形板状,常见环带,局部绢云母化;钾长石半自形-他形粒状,部分珠边状分布斜长石周围;石英他形粒状,填隙状分布;角闪石局部绿泥石化、部分被阳起石交代;黑云母多绿泥石化。副矿物包括磁铁矿、锆石、磷灰石、褐帘石。

同时,显微镜下矿物形态研究表明,采自靠背尖岩体北

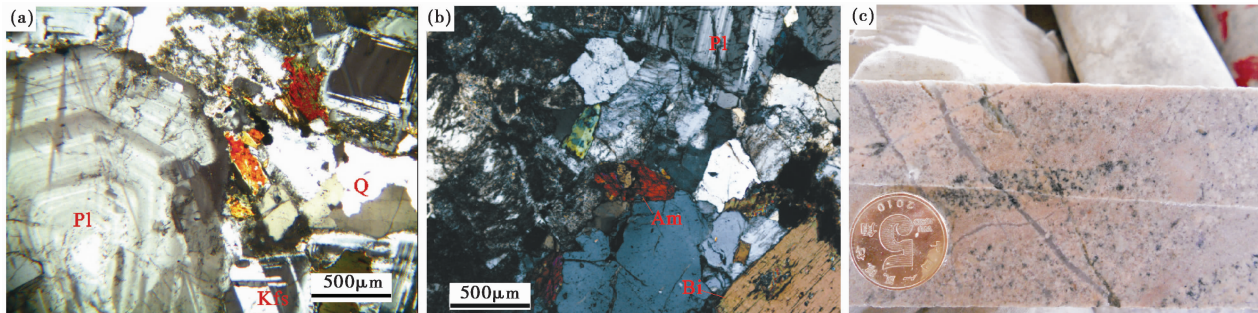


图4 靠背尖花岗闪长斑岩显微照片及蚀变特征

(a)-JX01-B16 花岗闪长斑岩显微结构(斜长石呈斑晶,钾长石形成晚于石英);(b)-花岗闪长斑岩样品 JX01-B19 中的角闪石(Am)、黑云母(Bi)及其长石蚀变;(c)-发育钾化蚀变的的花岗闪长斑岩岩心

Fig. 4 Photomicrographs of the Kaobeijian granodiorite porphyry and its alteration

(a)-microstructure of the sample JX01-B16; granodiorite porphyry (plagioclase as phenocryst, K-feldspar formed after quartz); (b)-amphibole (Am) and biotite (Bi) and altered plagioclase in the sample JX01-B19, granodiorite porphyry; (c)-potassic alteration in core sample ZK5201-236m; granodiorite porphyry

西部的样品中石英具有明显波状消光,并伴有动态重结晶现象,石英亚颗粒形态、大小、颗粒边界不规则(图5a,b),达颗粒边界迁移重结晶水平(CBM)。

靠背尖花岗闪长斑岩发育钾化、硅化、绢云母化、绿泥石化等蚀变。经钾化的花岗闪长岩斑晶由石英和钾长石组成,钾长石晶粒之间的边界不规则;基质由等粒的钾长石和石英组成。露头观察可见多处岩体钾化,钻孔岩心样品也有明显钾化现象(图4c),岩石呈浅肉红色,显微镜下可见大量斜长石晶体因蚀变而失去原有光学性质的现象(图4b)。绢云母化以出现石英+绢云母的矿物组合为特征,长石为绢云母交代,在靠背尖岩体各部位中普遍存在。岩体北缘与南缘都具有强烈绿泥石化,表现为角闪石、黑云母蚀变形成绿泥石、绢云母。

## 4 靠背尖岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究

### 4.1 样品采集与预处理

在野外调查过程中,采集了三件样品 JZMK、XY08、XY09 用于 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年,采样位置以星号标注于图1b。

样品的锆石挑选工作在河北省廊坊区域地质调查研究院完成。样品经常规的粉碎、磁选和重选,然后在双目镜下挑选晶形完好的锆石颗粒,和标准锆石 TEM 粘贴在环氧树脂表面,抛光后制成样靶,用于阴极发光(CL)照相和随后的 SHRIMP 锆石 U-Pb 分析。

### 4.2 分析方法

锆石样品首先在北京大学物理学院进行透射光反射光和阴极发光图像拍照,随后在中国地质科学院离子探针中心 SHRIMP-II 仪器上用标准测定程序进行分析。分析流程和原理可参考相关文献(Compston *et al.*, 1998; 刘敦一等,2003)。

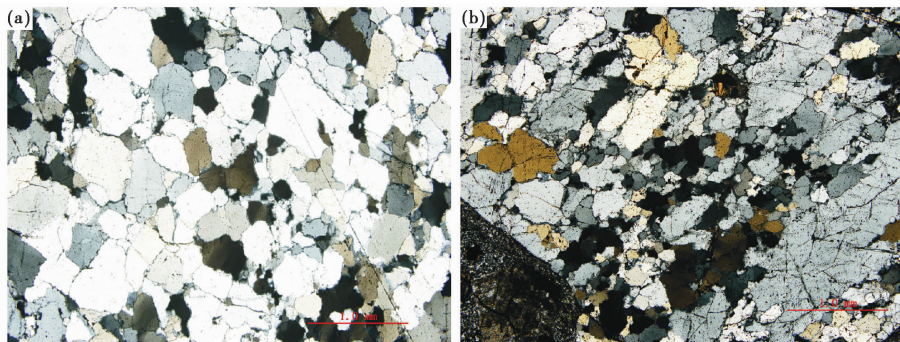


图5 靠背尖花岗闪长岩石英亚颗粒形态

Fig. 5 Photomicrographs of quartz sub-grains from the Kaobeijian granodiorite porphyry

分析过程中结合透射光、反射光和阴极发光图像,选择环带比较明显、表面光洁、没有裂纹和包体的区域进行分析;离子束斑直径为 $20 \sim 30 \mu\text{m}$ ;数据采集在5个扫描仪上进行;所有年龄结果均用 $^{204}\text{Pb}$ 含量作了普通铅校正;所给定的同位素比值和年龄的误差在 $1\sigma$ 水平,测定结果列于表1,谐和曲线见图6。

### 4.3 分析结果

锆石阴极发光图像上显示绝大多数样品具有震荡环带型生长边,表明多数锆石为典型岩浆锆石(Williams and Claesson, 1987; Kinny *et al.*, 1990; Hidaka *et al.*, 2002; Wu and Zheng, 2004; Chen *et al.*, 2010)。除 XY08-2-9.1 测点 Th/U 比值为略低于 0.1,其余锆石的 Th/U 比值分布范围 0.17~0.89,且同一样品的锆石之间差别不大。几乎所有的锆石分析年龄都集中在谐和曲线上(图6),表明这些锆石颗粒在形成后的 U-Pb 同位素体系基本上是封闭的,没有明显的 U 或 Pb 同位素丢失或加入,可以代表锆石的形成年龄。JZMK 加权平均年龄为  $152.7 \pm 1.7\text{Ma}$ (共 13 个测点,  $\text{MSWD} = 1.5$ ); XY08 加权平均年龄为  $151.9 \pm 1.1\text{Ma}$ (共 12 个测点,  $\text{MSWD} = 0.56$ ); XY09 加权平均年龄为  $147.7 \pm 1.3\text{Ma}$ (共 10 个测点,  $\text{MSWD} = 1.3$ );结果均属于晚侏罗世。

## 5 靠背尖花岗闪长斑岩地球化学特征

### 5.1 样品采集与测试方法

在野外调查的基础上,对靠背尖一带蚀变较弱的新鲜花岗闪长斑岩进行了系统采样用于全岩地球化学分析,测试分析由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所完成。采用粉末样品压片制样,用 X 射线荧光光谱仪直接测量样品中  $\text{SiO}_2$  等 10 项主量元素以及 Cr, Rb, Sr, Ba, Zr 等 34 个微量元素,经 GAU9aGSR1、GAU10aGSR2、GAU11aGSR3 和 GAU12GSD9 标样监控,主量元素分析精度优于 5%;所用仪器型号:帕纳克公司 PW4400。其中 FeO 采用容量法分析,烧失为  $1000^\circ\text{C}$  时的烧失量。各分析元素采用经验系数法与散

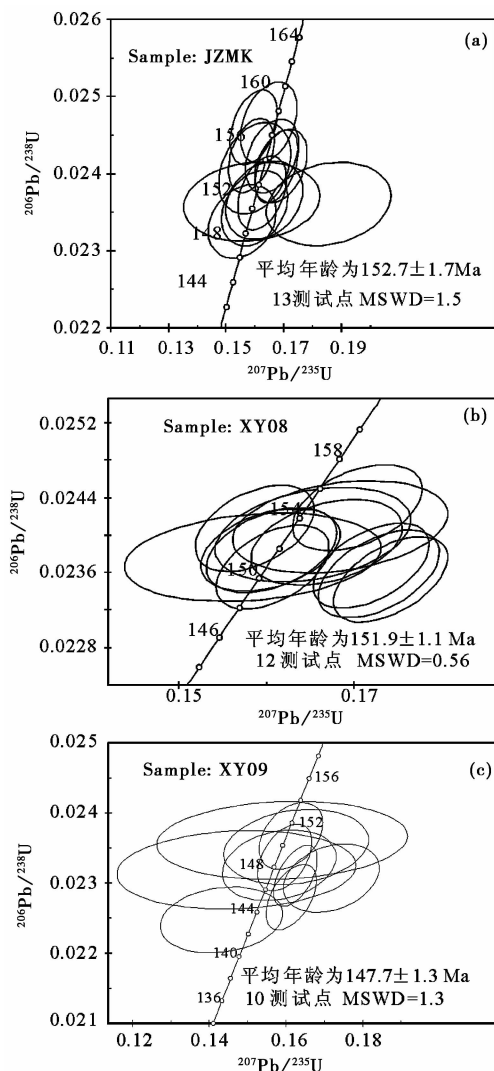


图6 皖南靠背尖花岗闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 Concordia diagram of SHRIMP zircon U-Pb dating for the Kaobeijian granodiorite porphyry

表 1 皖南绩溪县靠背尖花岗闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年数据

Table 1 SHRIMP zircon U-Pb isotopic dating result for the Kaobeijian granodiorite porphyry

测点号	U ( $\times 10^{-6}$ )	Th ( $\times 10^{-6}$ )	$^{232}\text{Th}/$ $^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*$ ( $\times 10^{-6}$ )	common $^{206}\text{Pb}\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ 年龄 (Ma) $\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ $\pm 1\sigma\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$ $\pm 1\sigma\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ $\pm 1\sigma\%$	$^{208}\text{Pb}^*/^{232}\text{Th}$ $\pm 1\sigma\%$
JZMK, 花岗闪长斑岩										
3.1	475	228	0.50	9.7	0.77	150.6 $\pm$ 2.1	0.0238 $\pm$ 1.3	0.0549 $\pm$ 2.2	0.16 $\pm$ 9.8	0.0069 $\pm$ 8.6
3.2	531	298	0.58	11.0	0.30	153.5 $\pm$ 2.0	0.0241 $\pm$ 1.3	0.0532 $\pm$ 2.2	0.17 $\pm$ 3.6	0.0076 $\pm$ 3.0
3.3	530	299	0.58	11.3	0.55	156.7 $\pm$ 2.0	0.0248 $\pm$ 1.3	0.0515 $\pm$ 2.2	0.16 $\pm$ 3.4	0.0072 $\pm$ 2.8
3.4	522	197	0.39	10.9	0.43	154.3 $\pm$ 2.0	0.0243 $\pm$ 1.3	0.0532 $\pm$ 2.6	0.17 $\pm$ 3.7	0.0074 $\pm$ 3.5
3.5	567	302	0.55	11.6	0.40	151.3 $\pm$ 2.0	0.0237 $\pm$ 1.3	0.0528 $\pm$ 2.1	0.16 $\pm$ 3.4	0.0076 $\pm$ 3.0
3.6	458	234	0.53	9.5	0.72	153.3 $\pm$ 2.5	0.0242 $\pm$ 1.6	0.0540 $\pm$ 2.5	0.16 $\pm$ 5.1	0.0070 $\pm$ 4.4
3.7	646	353	0.56	13.7	0.41	157.0 $\pm$ 2.2	0.0248 $\pm$ 1.4	0.0517 $\pm$ 2.0	0.16 $\pm$ 3.9	0.0074 $\pm$ 3.2
3.8	553	315	0.59	11.4	0.00	153.5 $\pm$ 2.0	0.0240 $\pm$ 1.3	0.0505 $\pm$ 2.3	0.17 $\pm$ 2.9	0.0078 $\pm$ 2.6
3.9	449	187	0.43	9.1	0.68	149.0 $\pm$ 2.0	0.0235 $\pm$ 1.3	0.0537 $\pm$ 2.4	0.16 $\pm$ 5.0	0.0071 $\pm$ 5.5
3.10	335	166	0.51	6.8	0.68	150.7 $\pm$ 2.1	0.0237 $\pm$ 1.4	0.0555 $\pm$ 2.9	0.16 $\pm$ 5.4	0.0074 $\pm$ 4.6
3.11	303	135	0.46	6.1	0.00	150.4 $\pm$ 2.2	0.0235 $\pm$ 1.4	0.0571 $\pm$ 2.9	0.19 $\pm$ 7.7	0.0081 $\pm$ 7.4
3.12	470	336	0.74	9.9	0.79	154.4 $\pm$ 2.0	0.0244 $\pm$ 1.3	0.0538 $\pm$ 2.2	0.16 $\pm$ 3.3	0.0074 $\pm$ 2.7
6.2	389	337	0.89	7.9	0.32	150.1 $\pm$ 2.0	0.0239 $\pm$ 1.4	0.0518 $\pm$ 2.6	0.16 $\pm$ 4.7	0.0067 $\pm$ 3.1
XY08-2, 花岗闪长斑岩										
1.1	431	76	0.18	8.93	0.09	153.2 $\pm$ 2.1	0.02404 $\pm$ 1.3	0.04920 $\pm$ 2.5	0.16300 $\pm$ 2.9	0.0081 $\pm$ 9.3
2.1	619	138	0.23	12.70	0.34	151.6 $\pm$ 2.0	0.02379 $\pm$ 1.3	0.04920 $\pm$ 2.1	0.16140 $\pm$ 2.5	0.0073 $\pm$ 10.4
3.1	937	308	0.34	19.40	0.34	152.8 $\pm$ 2.2	0.02398 $\pm$ 1.4	0.04920 $\pm$ 2.6	0.16260 $\pm$ 2.9	0.0077 $\pm$ 4.7
4.1	687	173	0.26	14.00	0.30	150.9 $\pm$ 2.0	0.02369 $\pm$ 1.3	0.05020 $\pm$ 2.0	0.16410 $\pm$ 2.4	0.0073 $\pm$ 3.4
5.1	481	158	0.34	9.75	0.00	150.1 $\pm$ 2.1	0.02355 $\pm$ 1.3	0.05210 $\pm$ 2.3	0.16910 $\pm$ 2.7	0.0076 $\pm$ 3.0
6.1	658	110	0.17	13.80	0.13	154.7 $\pm$ 2.0	0.02429 $\pm$ 1.3	0.05090 $\pm$ 2.4	0.17050 $\pm$ 2.7	0.0077 $\pm$ 3.9
7.1	581	137	0.24	11.70	-0.03	149.8 $\pm$ 2.0	0.02351 $\pm$ 1.3	0.05330 $\pm$ 2.1	0.17270 $\pm$ 2.5	0.0075 $\pm$ 3.2
8.1	663	175	0.27	13.60	-0.28	151.7 $\pm$ 2.0	0.02381 $\pm$ 1.3	0.04670 $\pm$ 2.9	0.15340 $\pm$ 3.2	0.0084 $\pm$ 3.7
9.1	608	50	0.09	12.30	-0.10	150.5 $\pm$ 1.9	0.02362 $\pm$ 1.3	0.05090 $\pm$ 2.1	0.16570 $\pm$ 2.5	0.0088 $\pm$ 6.0
10.1	954	352	0.38	19.60	0.37	152.3 $\pm$ 1.9	0.02391 $\pm$ 1.2	0.05101 $\pm$ 1.6	0.16820 $\pm$ 2.0	0.0072 $\pm$ 3.5
11.1	669	252	0.39	13.70	0.14	151.8 $\pm$ 2.0	0.02383 $\pm$ 1.2	0.04850 $\pm$ 2.0	0.15940 $\pm$ 2.3	0.0076 $\pm$ 3.2
12.1	636	163	0.26	13.20	0.31	153.8 $\pm$ 2.0	0.02415 $\pm$ 1.3	0.05020 $\pm$ 2.0	0.16730 $\pm$ 2.4	0.0071 $\pm$ 3.7
XY09, 花岗闪长斑岩										
1.1	619	386	0.64	12.6	0.34	150.8 $\pm$ 2.0	0.0238 $\pm$ 1.3	0.0521 $\pm$ 2.1	0.1642 $\pm$ 2.6	0.0074 $\pm$ 2.7
2.1	369	206	0.58	7.5	0.59	149.8 $\pm$ 2.2	0.0237 $\pm$ 1.4	0.0549 $\pm$ 2.7	0.1566 $\pm$ 3.4	0.0076 $\pm$ 6.5
3.1	440	184	0.43	9.1	1.93	150.4 $\pm$ 2.3	0.0241 $\pm$ 1.3	0.0642 $\pm$ 2.3	0.1691 $\pm$ 3.2	0.0070 $\pm$ 13.5
6.1	355	142	0.41	7.1	0.89	147.8 $\pm$ 2.3	0.0234 $\pm$ 1.4	0.0531 $\pm$ 2.9	0.1598 $\pm$ 3.4	0.0068 $\pm$ 13.7
7.1	463	262	0.58	9.1	-0.31	147.0 $\pm$ 2.0	0.0230 $\pm$ 1.4	0.0515 $\pm$ 2.8	0.1739 $\pm$ 3.0	0.0072 $\pm$ 4.1
8.1	342	91	0.27	6.9	0.64	148.2 $\pm$ 2.1	0.0234 $\pm$ 1.4	0.0544 $\pm$ 2.8	0.1772 $\pm$ 3.1	0.0062 $\pm$ 11.7
9.1	500	277	0.57	10.1	0.19	148.9 $\pm$ 2.0	0.0234 $\pm$ 1.3	0.0511 $\pm$ 2.3	0.1893 $\pm$ 2.4	0.0066 $\pm$ 5.0
10.1	483	210	0.45	9.5	-0.03	145.3 $\pm$ 1.9	0.0228 $\pm$ 1.4	0.0511 $\pm$ 2.3	0.1700 $\pm$ 2.6	0.0069 $\pm$ 2.8
11.1	655	368	0.58	13.0	-0.08	147.2 $\pm$ 1.8	0.0231 $\pm$ 1.3	0.0504 $\pm$ 2.0	0.1727 $\pm$ 2.2	0.0070 $\pm$ 2.7
12.1	410	219	0.55	8.0	0.80	143.3 $\pm$ 2.0	0.0227 $\pm$ 1.3	0.0526 $\pm$ 3.2	0.1737 $\pm$ 3.3	0.0062 $\pm$ 5.7

注:由北京离子探针中心分析测试.普通 $^{206}\text{Pb}(\%)$ 指普通铅中的 $^{206}\text{Pb}$ 占全铅 $^{206}\text{Pb}$ 的百分数;用实测 $^{204}\text{Pb}$ 校正普通铅

射线内标法校正元素间的基体效应。15种稀土元素和Ba, Ni, Co, Ga, V, Cs, Hf, Ta, Nd, Pb, Th, U元素采用 ICP-MS 分析,所用仪器型号:美国热电公司 X Series II。

Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素分析由中国地质大学(武汉)岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室采用 MAT261 仪器测试,分析流程见 Zhang HF *et al.* (2002)。采

用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$  和 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$  分别对 Sr 和 Nd 同位素比值标准化。实验中,标样 La Jolla 的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  值为 $0.511853 \pm 9(2\sigma)$ ,标样 BCR-2 的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  值为 $0.512638 \pm 5(2\sigma)$ ,Sr 和 Nd 空白值分别 $<1\text{ng}$  和 $<50\text{pg}$ 。

## 5.2 岩石地球化学特征

靠背尖花岗闪长(斑)岩全岩地球化学数据见表 2。大部分样品在 TAS 分类图解中落入花岗闪长岩区域,个别样品落入花岗岩、石英闪长岩区域内(图 7a)。岩石 $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量中等(14.85%~16.31%),铝饱和指数(A/CNK)主要变化在 0.77~0.98 之间(11 个样品)。 $\text{SiO}_2$  含量在 64.05%~69.64% 之间,全碱(ALK)含量较高, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$  变化于 6.1%~11.5% 之间,钾含量略高于钠, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$  平均值为 1.3, $\text{P}_2\text{O}_5$  为 0.07%~0.21%, $\text{TiO}_2$  为 0.44%~0.69%。综合矿物特征(含角闪石)应属于高钾钙碱性系列的准铝质 I 型侵入岩(图 7b,c)。

除个别样品,靠背尖花岗闪长岩样品稀土总量分布在 $38.0 \times 10^{-6} \sim 138.0 \times 10^{-6}$ ,它们具有较高的轻重稀土比(12 个样品的 LREE/HREE 比值 = 5.3~11.04)和较高的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$  比值(10 个样品为 7.7~15.7)。岩石 Eu 亏损较弱,多数样品 $\delta\text{Eu}$  值为(0.77~0.89),在 $\delta\text{Eu} - (\text{La}/\text{Yb})_N$  图解(图略)上样品几乎全部落入壳幔源区域,指示有幔源物质参与了靠背尖花岗闪长岩的形成。在球粒陨石标准化的稀土元素配分图上,分布曲线明显呈右倾型(图 8a),多数样品与典型的华南亮源改造型花岗岩的“海鸥型”(徐克勤等,1989)曲线不同,而与毛建仁等(2002)、邱检生等(2004)、杨小男等(2007)报道的长江中下游、闽西、粤东等地具壳幔混合成因的花岗质岩石相类似。在原始地幔标准化微量元素蜘蛛图解(图 8b)上,样品显示明显的 Nb-Ta 槽而 K、Rd、U、Hf 元素呈富集趋势。在 La-La/Sm 和 Zr-Zr/Sm 图解(图略)上,靠背尖岩体的全岩数据显示了部分熔融的演化趋势。

## 5.3 Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素特征

靠背尖花岗闪长斑岩四个样品的 Sm-Nd、Rd-Sr 同位素分测试结果见表 3。样品显示相对平均的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  分布,具有较高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$  值(0.70784~0.71033), $\varepsilon_{\text{Sr}}(t)$  值 = 51.2~97.4, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值 = -3.69~-6.24,表明物质应该主要来自地壳。

# 6 讨论

## 6.1 靠背尖岩体年代学特征

此前,安徽省地质矿产局 332 地质队(1990<sup>①</sup>)编写完成的 1:5 万旌德县、岛石坞、绩溪县、顺溪等四幅区域地质质调报告中,报道了靠背尖岩体 K-Ar 法同位素年龄为 75Ma。稍后,侯明金(2005)测定了靠背尖岩体黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄 134.3 $\pm$ 1.4Ma。这两组年龄与近几年在浙赣皖相邻区实现

找矿突破的中生代含矿岩体年龄有显著差别,因而 134.3 $\pm$ 1.4Ma 的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄代表岩浆的侵位年龄还是构造热事件的年龄尚有待证实。本文对靠背尖岩体多处采样,获得 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 151.9 $\pm$ 1.1Ma,147.7 $\pm$ 1.3Ma 和 152.7 $\pm$ 1.1Ma。这一结果与区域上祁门东源(秦燕等,2010;周翔等,2011)、江家(王德恩等,2011)、浙西桐村(邱骏挺等,2011)等含矿岩体的年龄值接近或基本一致,应属于同一期构造-岩浆-成矿事件的产物。

由于同位素年龄与测年载体的封闭温度密切相关,当环境温度高于载体封闭温度时,会导致同位素时钟重置而出现较新的年龄。锆石 U-Pb 同位素体系的封闭温度超过 800 $^{\circ}\text{C}$ (Cliff,1985; Nam *et al.*,2001),封闭温度高、稳定性好,不易受到热液蚀变及构造活动影响,其年龄通常代表岩体的侵位年龄(Hourigan *et al.*,2004; 吴福元等,2005; 赵子福等,2005; 顾辰彦等,2006; Hirt,2007; 孙景贵等,2008; 雍拥等,2008)。 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  体系封闭温度通常较低,体系封闭性易受到后期热事件影响,因此, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  法应谨慎地应用于测定侵入体冷却年龄(桑海清等,1992; 李益龙等,2007)、蚀变年龄(郭桂红和韩峰,2007)、构造活动(闫全人等,2001; 周刚等,2007)或成矿年龄(谭绿贵等,2004; 翟伟等,2010)等。

野外观察发现,靠背尖花岗闪长斑岩普遍发育钾化、硅化、云英岩化和绢云母化等蚀变。钾化是高温高盐度岩浆流体与斑岩发生水-岩反应而形成的一种蚀变,以斜长石的钾长石交代为特征,主要产物为钾长石、石英以及少量黑云母;斑岩体中钾化温度超过 400 $^{\circ}\text{C}$ (Simon *et al.*,1969,1971; Roedder,1971; Reynolds and Richard,1985; 侯增谦,2004),高于黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  体系封闭温度(300 $\pm$ 50 $^{\circ}\text{C}$ )(Cliff,1985),可能导致同位素时钟重置。在岩体内及附近的围岩中大量发育长英质脉体(图 3a,b),这些脉体不同于常见的纯净石英脉,成分上是长石-石英的固溶体,性质上更加接近残余岩浆。为了验证高温流体的存在,我们从钻孔中采取花岗闪长岩中的石英脉,其中气液包裹体均一温度集中在 300~400 $^{\circ}\text{C}$  之间(研究组内部资料),但有相当比例的包裹体在加热到 400 $^{\circ}\text{C}$  时仍不均一。因此,残余岩浆-热液系统提供的热量导致黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  体系在岩浆侵位完成很晚以后才开始封闭时的假设是可能的,左力艳等(2010)对冷水坑斑岩型银铅锌矿床岩体和热液蚀变年龄的研究提供了类似的实例。

此外,石英等矿物颗粒边界迁移重结晶水平(CBM)的变形属于中高温条件(500 $^{\circ}\text{C}$  以上)下的韧性变形(Stipp *et al.*,2002; 向必伟等,2007)。这样的温度条件超过了黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  体系封闭温度。仅在数米到数十米的局部范围内存在高的温压状态,而岩体其他部分不受影响是不太可能的,因此更符合地质事实的解释是:锆石 U-Pb 年龄代表岩浆结晶-侵位的时间,而黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄代表后期韧性变形

① 安徽省地质矿产局 332 地质队. 1990. 1:5 万旌德县、岛石坞、绩溪县、顺溪幅区域地质调查报告

表 2 靠背尖花岗岩闪长斑岩主量元素 (wt%)、稀土及微量元素 ( $\times 10^{-6}$ ) 分析结果Table 2 Major (wt%), rare earth and trace elements ( $\times 10^{-6}$ ) compositions of the Kaobeijian granodiorite porphyry

样品号	xy06-2	xy08-2	xy09	JX01-B9	JX01-B12	JX01-B14	JX01-B15	JX01-B16	JX01-B17	JX01-B19	JX01-B22	JX01-B28
SiO <sub>2</sub>	67.04	64.05	65.16	67.71	68.73	65.95	66.52	64.77	69.64	66.86	66.05	66.21
TiO <sub>2</sub>	0.50	0.45	0.64	0.44	0.44	0.35	0.59	0.69	0.51	0.58	0.59	0.56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.85	16.31	15.31	15.42	15.38	17.25	15.27	15.60	15.50	14.90	15.13	15.48
FeO	2.19	2.78	2.41	1.36	1.06	0.24	2.55	2.87	0.72	2.92	2.74	3.13
FeO <sup>T</sup>	2.55	3.03	4.12	1.70	1.78	1.35	4.16	4.52	1.21	3.86	3.97	3.54
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.40	0.28	1.90	0.37	0.80	1.23	1.79	1.83	0.55	1.04	1.36	0.46
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	2.84	3.37	4.58	1.88	1.98	1.50	4.62	5.02	1.35	4.29	4.41	3.94
MnO	0.07	0.07	0.07	0.05	0.04	0.03	0.07	0.08	0.05	0.06	0.04	0.06
MgO	1.45	1.24	2.32	1.57	1.06	0.70	2.12	2.68	0.90	2.16	2.27	1.81
CaO	4.96	5.32	4.17	4.06	3.35	0.31	3.93	4.17	3.14	3.69	3.96	4.19
Na <sub>2</sub> O	4.12	4.38	4.13	3.85	3.66	2.05	3.36	3.53	3.06	3.33	3.27	3.07
K <sub>2</sub> O	3.31	3.89	2.51	3.79	4.52	9.44	2.73	2.79	4.94	3.25	3.33	3.60
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.19	0.20	0.23	0.16	0.15	0.07	0.19	0.24	0.14	0.20	0.21	0.18
LOI	0.71	0.81	0.86	0.99	0.56	0.87	0.60	0.54	0.59	0.70	0.81	0.67
Total	99.79	99.78	99.70	99.77	99.75	98.49	99.72	99.79	99.73	99.71	99.76	99.43
A/CNK	0.77	0.77	0.90	0.87	0.90	1.22	0.98	0.95	0.96	0.95	0.94	0.93
Mg <sup>#</sup>	0.51	0.42	0.50	0.62	0.52	0.48	0.48	0.52	0.57	0.50	0.51	0.48
Cr	21.20	15.10	30.20	17.00	15.10	17.00	30.70	36.40	29.50	32.50	35.80	22.80
Co	8.18	7.16	11.92	3.79	4.93	1.99	11.01	12.54	3.04	11.77	11.50	10.40
V	75.2	84.7	87.9	69.1	65.1	32.0	81.6	89.5	52.6	80.9	90.7	80.6
Cs	2.73	3.40	4.00	4.88	3.73	12.51	5.28	5.07	2.91	7.82	7.56	3.50
Ni	9.70	6.87	13.35	5.66	4.89	1.61	11.55	13.20	6.83	12.26	14.85	11.55
Ba	1539	1336	702	1010	1343	3016	669	721	2889	697	636	977
Rb	82.6	98.8	80.7	98.7	123	486	92.6	85.2	114	114	119	83.9
Sr	491	542	570	494	467	391	549	541	431	510	529	551
Th	10.6	9.5	10.1	7.6	8.0	11.4	9.2	10.5	11.6	12.0	8.5	10.8
U	4.01	6.46	1.68	3.39	3.62	2.62	2.34	2.39	2.67	4.32	2.61	3.10
Nd	26.83	27.20	30.44	27.12	23.86	11.83	26.60	30.69	18.01	29.26	30.47	31.14
Zr	161.9	168.2	163.7	136.1	129.6	89.9	144.6	139.5	144.7	146.4	136.5	138.4
Hf	6.09	6.79	7.64	6.50	5.00	5.00	5.00	5.00	4.50	4.50	5.00	5.00
Ga	19.56	23.19	21.06	19.46	21.07	16.96	19.89	21.58	18.46	21.08	22.93	21.72
Ta	0.74	0.81	0.62	0.74	0.73	0.74	0.65	0.69	0.86	0.97	0.59	0.78
La	22.0	23.1	34.0	23.6	14.6	4.8	29.3	30.4	7.4	29.9	29.3	33.7
Ce	52.9	57.2	69.9	56.2	42.4	14.8	58.8	67.3	26.0	65.0	63.8	69.7
Pr	6.82	7.26	8.14	6.70	5.72	2.69	6.81	7.90	4.01	7.59	7.56	7.99
Nb	9.08	9.94	8.08	8.28	8.86	6.63	7.66	8.43	8.50	9.79	7.64	9.07
Sm	5.02	4.79	5.07	4.51	4.36	2.31	4.51	5.28	3.49	5.14	5.21	4.86
Eu	1.28	1.32	1.32	1.19	1.01	0.73	1.08	1.23	0.95	1.16	1.32	1.24
Gd	4.03	3.87	4.12	3.76	3.46	1.79	3.59	4.32	3.01	4.18	4.15	3.89
Tb	0.63	0.57	0.60	0.55	0.49	0.29	0.55	0.62	0.47	0.65	0.61	0.58
Dy	3.45	3.14	3.17	2.83	2.53	1.57	2.90	3.21	2.52	3.50	3.08	2.90
Ho	0.64	0.56	0.60	0.52	0.45	0.28	0.53	0.59	0.46	0.65	0.58	0.55
Er	1.83	1.61	1.65	1.48	1.31	0.85	1.53	1.75	1.35	1.87	1.60	1.53
Tm	0.30	0.25	0.26	0.22	0.20	0.15	0.23	0.27	0.22	0.30	0.25	0.24
Yb	1.82	1.60	1.59	1.46	1.36	0.94	1.45	1.68	1.32	1.96	1.48	1.54
Lu	0.25	0.22	0.21	0.21	0.19	0.15	0.21	0.25	0.19	0.26	0.21	0.23
Y	18.53	16.26	16.19	14.74	13.43	7.77	14.92	16.86	13.11	19.41	15.79	15.88
ΣREE	110.0	115.4	138.7	111.5	87.0	38.0	119.1	133.3	60.0	132.0	126.8	138.0
LREE/HREE	7.5	8.8	10.4	9.1	7.7	5.3	9.9	9.5	5.3	8.9	9.6	11.0
La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	8.7	10.3	15.4	11.6	7.7	3.7	14.5	13.0	4.0	10.94	14.2	15.7
δEu	0.87	0.94	0.89	0.89	0.80	1.11	0.82	0.79	0.89	0.77	0.86	0.87
δCe	1.06	1.08	1.03	1.10	1.14	1.01	1.02	1.07	1.17	1.06	1.05	1.04



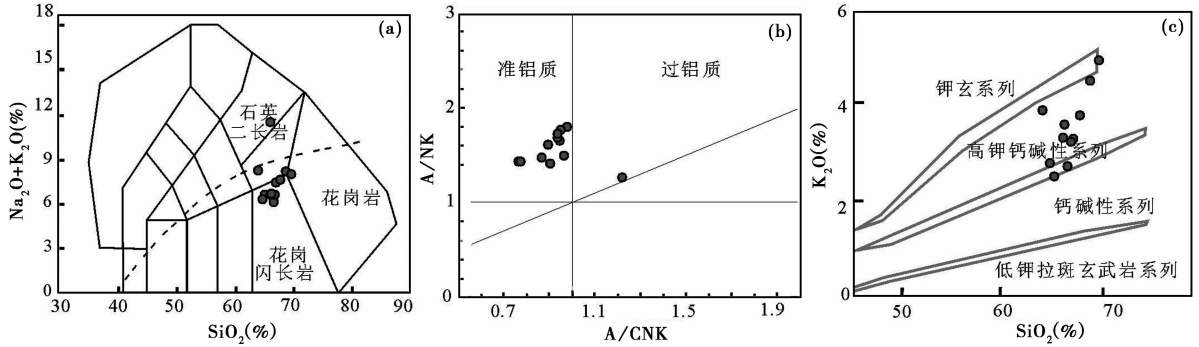


图7 靠背尖岩石类型和系列划分图解

Fig. 7 Classification and series diagrams of the Kaobeijian granodiorite porphyry

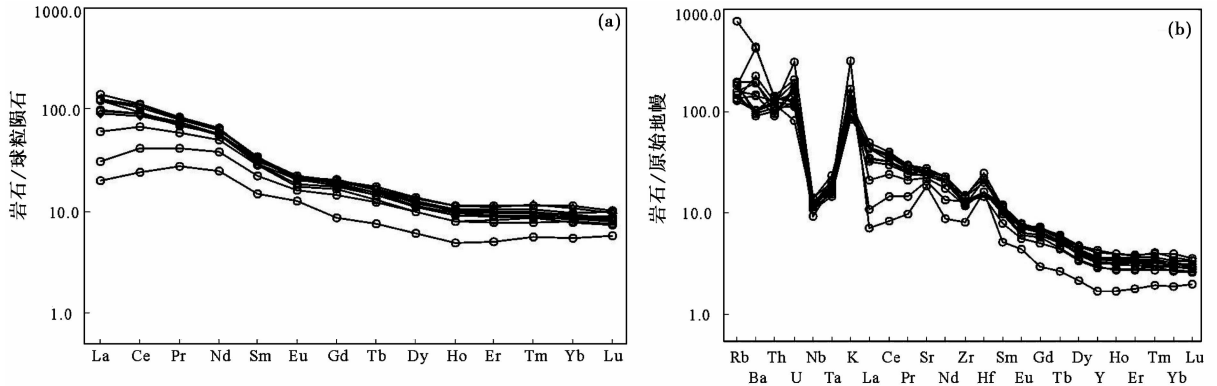


图8 靠背尖花岗闪长斑岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(a, 标准化值据 Boynton, 1984) 和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b, 标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 8 Chondrite-normalized REE (a, normalization values after Boynton, 1984) and primitive-mantle-normalized trace element patterns (b, normalization values after Sun and McDonough, 1989) for the Kaobeijian granodiorite porphyry

的构造热事件时间。安徽省地质矿产局 332 地质队 (1990) 测得靠背尖岩体 K-Ar 法年龄 75Ma, 其 K-Ar 同位素系统的封闭温度更低, 为 200°C 左右, 可能代表的是中生代末期另一次构造热活动, 对应于浙赣皖相邻区晚白垩世末期的玄武岩喷溢活动和超基性岩侵入活动 (安徽省地质矿产局, 1998<sup>①</sup>)。玄武岩呈 12~15m 厚的夹层广泛发育于中生代红层盆地最上部层位的晚白垩世晚期小岩组中部。六个超基性玻基辉橄岩岩筒和七条玻基辉橄岩岩脉分布于歙县洽舍乡山口一带 (距靠背尖 30km), 黑云母 K-Ar 同位素年龄值 73.1Ma (安徽省地质矿产局, 1998)。

## 6.2 靠背尖岩体高 Ba-Sr 成因

靠背尖岩体具有富碱、准铝质的地球化学特征, 铁镁比值较高, 富集 LILE (尤其是 Sr 和 Ba) 和 LREE, 弱的 Eu 负异常,  $Sr/Y = 34.2$ ,  $(La/Yb)_N = 10.8$ ,  $K/Rb = 284$  均较高, 低 Y ( $< 20 \times 10^{-6}$ ),  $Yb (< 1.9 \times 10^{-6})$ 、 $Rb/Sr$  比值 (平均为 0.28), 相对亏损 HREE 和 Nb、Ta、Ti、Y 等高场强元素, 这些特征虽然与埃达克质岩石非常接近, 但靠背尖花岗闪长斑岩

四个全岩样品的  $(^{143}Nd/^{144}Nd)_{S(t)} = 0.51204 \sim 0.51217$ ,  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t = 0.70784 \sim 0.71032$  并不具有埃达克岩所要求的  $(^{143}Nd/^{144}Nd)_{S(t)}$  值分布在 0.5123~0.5126 之间和低  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$  值 (小于 0.7040) 特征 (Defant MJ and Drummond MS, 1990), 因此靠背尖岩体不宜归为埃达克岩。

靠背尖的另一个显著特征是其 Ba ( $1294.6 \times 10^{-6}$ )、Sr ( $505.5 \times 10^{-6}$ ) 含量比中国中生代花岗岩类的统计平均值 (Ba,  $181 \times 10^{-6}$ , Sr,  $54 \times 10^{-6}$ ) (Changyi Shi *et al.*, 2011) 高一个数量级, 与典型的高 Ba-Sr 花岗岩的八达岭岩基 (钱青等, 2006)、赣西北麦斜岩基 (农军年等, 2012)、胶东半岛三佛山岩体 (张华锋等, 2006) 的 Ba-Sr 含量相当, 比陕西老牛山复式花岗岩基 (王艳芬等, 2012) 略低, 但仍在同一数量级, 上述岩体被认为有着各不相同的成因。

地球化学分析已经表明靠背尖花岗闪长斑岩属于高钾钙碱性, 据 Barbarin (1999) 的总结, 钙碱性花岗岩均为地壳及

① 安徽省地质矿产局. 1998. 1:5 万兰田幅、休宁县幅、屯溪幅区域地质调查报告

表 3 靠背尖花岗闪长斑岩 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素组成特征

Table 3 Rb-Sr and Sm-Nd isotopic composition of the Kaobeijian granodiorite porphyry

样品号	Rb ( $\times 10^{-6}$ )	Sr ( $\times 10^{-6}$ )	$^{87}\text{Sr}/$ $^{86}\text{Sr}$	$\pm 2\sigma$ ( $\times 10^{-6}$ )	$^{87}\text{Rb}/$ $^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/$ $^{86}\text{Sr})/t$	$\epsilon_{\text{Sr}}(t)$	Sm ( $\times 10^{-6}$ )	Nd ( $\times 10^{-6}$ )	$^{143}\text{Nd}/$ $^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$ ( $\times 10^{-6}$ )	$^{87}\text{Rb}/$ $^{86}\text{Sr}$	$(^{143}\text{Nd}/$ $^{144}\text{Nd})_{\text{S}(t)}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{\text{DM}}$ (Ga)	$t_{2\text{DM}}$ (Ga)
xy06-2	82.6	490.8	0.71070	5	0.48789	0.70969	80.4	5.0	26.8	0.512198	44	0.1132	0.512035	-6.24	1.44	1.51
xy07-2	158.8	632.2	0.71190	6	0.72819	0.71033	97.4	5.1	23.1	0.512275	6	0.1326	0.512084	-5.28	1.64	1.42
xy09	80.7	570.0	0.70887	5	0.41044	0.70798	54.5	5.1	30.4	0.512279	6	0.1007	0.512134	-4.31	1.18	1.36
xy13	74.0	580.0	0.70864	5	0.36987	0.70784	51.2	6.9	42.7	0.512307	6	0.0979	0.512166	-3.69	1.11	1.31

地幔物质混合成因的；且稀土配分模式支持靠背尖为“壳幔混合成因”；更重要的是在野外调查中多次观察到花岗闪长斑岩内发育有暗色包体(图2)，这些包体分布极稀疏，体积普遍较小，最大者仅为 $5 \times 5\text{cm}$ 左右；其颜色很深，颗粒细小且致密，成分为基性岩石。由于包体体积小且受到花岗闪长斑岩的交代、破坏，无法有效地测试其原始化学组成，但它们的出现直接指示了存在岩浆壳幔混合的事实。

朱金初等(1990)总结华南中生代壳-幔混合型花岗岩类(即同熔系列花岗岩类)的同位素特征为： $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})/t$ 值一般在 $0.705 \sim 0.710$ ， $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 多数为 $-2.0 \sim -5.0$ 。靠背尖岩体的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值( $-3.69 \sim -6.24$ )与上述范围大体一致。靠背尖两阶段 Nd 模式年龄  $t_{2\text{DM}}$  ( $1.31 \sim 1.51\text{Ga}$ )比陈江峰等(1999)识别出的低 Nd 模式年龄花岗岩带( $t_{2\text{DM}}$ 为 $1.5 \sim 1.8\text{Ga}$ )内岩石更低，也说明此次岩浆活动中确实有新的幔源组分加入。

经矿物学和地球化学分析确认靠背尖为 I 型花岗岩类，这一分类最早由 Chappell and White (1974) 对澳大利亚 Lachlan 褶皱带内花岗岩类的研究提出，其原始定义是：I 型花岗岩源岩主要是未经地表风化的火成岩，尤其是基性程度偏高的火成岩、变质火成岩，因此继承了一些火成岩的基本特征。皖南地区元古代的代表性火山岩地层为铺岭组玄武岩、变质安山岩、安山质凝灰岩等，其 Ba-Sr 含量并不突出 (Ba,  $249.6 \times 10^{-6}$ 、Sr,  $156.8 \times 10^{-6}$ ) (唐红峰等, 1997)。皖南代表性的新元古代花岗闪长岩中 Ba-Sr 元素则已经有所富集 (Ba,  $642.9 \times 10^{-6}$ 、Sr,  $183.2 \times 10^{-6}$ ) (吴荣新等, 2005)。Ba-Sr 同为大离子亲石元素又都有亲岩浆的特点，在矿物中固结后，重新部分熔融时再次富集于岩浆是完全可能的。由此我们认为，靠背尖岩体高 Ba-Sr 的成因主要是区域上晋宁期火山岩、岩浆岩重熔为靠背尖岩体提供了大量的物质，这与我们在锆石定年研究中发现大量元古代继承锆石(研究组内部资料, 800Ma 左右为主，并有个别更老的颗粒)提供的信息是一致的。因此靠背尖花岗闪长斑岩岩浆主要来自早期火山岩、岩浆岩物质重熔并有幔源组分加入。

许村、休宁和歙县岩体等皖南新元古代花岗闪长岩中没有角闪石而含有堇青石且属于过铝质(相当于 S 型花岗岩)，仅这样的成分重熔无法形成比源岩更偏基性(含有角闪石)的岩浆。已有研究表明，地幔物质混入到大陆地壳物质中，会使地壳源区原本低的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  升高，使得岩浆性质发生过铝质向准铝质的转变，这种幔源物质的混入过程已经应用于一些花岗岩的成因解释 (Patiño-Douce, 1999; Clemens, 2003; Healy *et al.*, 2004; 吴福元等, 2007; Zhu *et al.*, 2009)。由于多项证据证明靠背尖的岩浆存在混合作用，此模式可以很好的解释其地球化学及同位素特征，说明壳幔混合确实是岩浆成分向 I 型转化的原因。

### 6.3 构造意义分析

靠背尖岩体所处的区域发育多组 NE 向断裂，岩体位于

绩溪-宁国断裂(燕山期皖浙赣主断裂)和西天目山-皖浙边界断裂所切割的数十千米宽的夹块内。遥感图像显示, 迢遥、靠背尖岩体主要受 NW 向的基底断裂所控制, 可能为该较早的区域性的控岩断裂构造。与此类似的是靠背尖南西方向近百公里外的祁门东源、江家系列花岗闪长斑岩, 它们发育在 NE 和 NW 向断裂的交汇位置, 均显示岩浆成岩受断裂控制的特点。

Wu *et al.* (2012) 近期研究表明, 中国东部中生代岩浆活动发生在两个明确的阶段, 即早-中侏罗世(190 ~ 150Ma) 和早白垩世(135 ~ 115Ma), 但下扬子沿江地区、皖浙赣相邻区及其西延的带状区域发育独特的 150 ~ 135Ma 岩浆活动, 其构造动力学背景可能是由古太平洋板块在华北克拉通与中国东南部地区的俯冲角度变化不同而形成的, 俯冲角度的变化引起了板片撕裂, 并引发了其后的早白垩世岩浆活动。

靠背尖花岗闪长斑岩微量元素构造判别图指示其形成的晚侏罗世时期的构造背景为岛弧环境(图 9a-d), 此时板片撕裂尚在初期, 有少量的幔源物质沿细小而窄长的板片裂隙(窗)混入壳源岩浆, 与弧间裂谷有关的花岗质岩浆侵入活动引发了浙赣皖相邻区晚侏罗世的构造-岩浆-成矿事件。此后我国华南岩石圈由挤压环境转向拉张环境(毛建仁等, 1997; 朱光等, 2000; 余心起等, 2005), 形成大面积的 A-型花岗岩(Jiang *et al.*, 2005, 2009, 2011; Wong *et al.*, 2009; 赵鹏等, 2010; He and Xu, 2011; Li *et al.*, 2012; Yang *et al.*, 2012)。

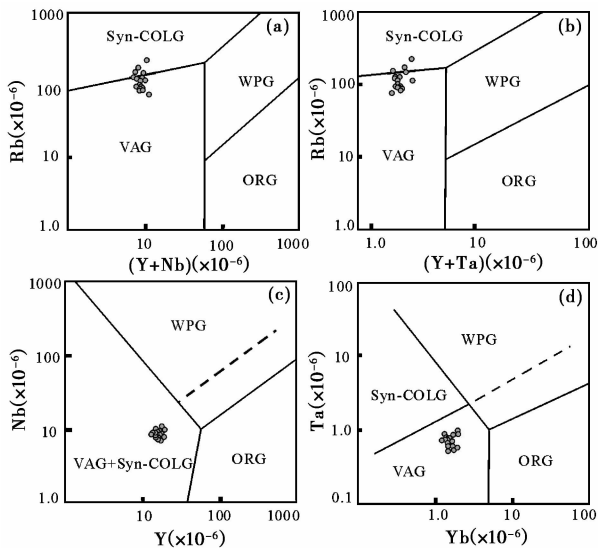


图 9 靠背尖花岗闪长岩构造环境判别图(底图据 Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 9 Discrimination diagrams for settings for (after Pearce *et al.*, 1984)

岩株, 发育少量暗色基性岩包体, 具有异常高的 Ba-Sr 含量, 具有较高的( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )  $t$  值和负的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值, 其主要成因是壳幔混源的岩浆对区域上晋宁期火山岩、岩浆岩富 Ba-Sr 物质的继承。SHRIMP 锆石 U-Pb 测年结果表明, 绩溪靠背尖中细粒花岗闪长斑岩加权平均年龄分别为  $151.9 \pm 1.1\text{Ma}$ 、 $152.7 \pm 1.1\text{Ma}$  和  $147.7 \pm 1.3\text{Ma}$ , 表明靠背尖花岗闪长斑岩形成于晚侏罗世。微量元素构造判别图指示其形成于岛弧环境, 幔源组分的加入造成了岩浆由 S-型向 I-型的转变。

**致谢** SHRIMP 锆石 U-Pb 测年在北京离子探针中心 SHRIMP II 上完成; 野外工作中得到安徽省地质矿产勘查局 332 地质队的支持; 研究过程得到中国地质大学(北京)刘俊来教授的指导及邱骏挺同学的帮助; 在此一并致以诚挚的谢意!

## References

- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46 (3): 605 - 626
- Boynton WV. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, 63 - 114
- Chappell BW and White AJR. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8: 173 - 174
- Chen JF, Guo XS, Tang JF and Zhou TX. 1999. Nd isotopic model ages: Implications of the growth of the continental crust of southeastern China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 35 (6): 649 - 658 (in Chinese with English abstract)
- Chen RX, Zheng YF and Xie LW. 2010. Metamorphic growth and recrystallization of zircon: Distinction by simultaneous in-situ analyses of trace elements, U-Th-Pb and Lu-Hf isotopes in zircons from eclogite-facies rocks in the Sulu orogen. *Lithos*, 114 (1 - 2): 132 - 154
- Chen SQ, Yu XQ, Zhang DH, Dai YP, Li HK and Qiu JT. 2011. Geochemical characteristics of Kaihua Tongcun granitic porphyry in western Zhejiang and ore-prospecting potential. *Metal Mine*, (3): 108 - 111 (in Chinese with English abstract)
- Clemens JD. 2003. S-type granitic magmas-petrogenetic issues, models and evidence. *Earth-Science Reviews*, 61 (1 - 2): 1 - 18
- Cliff RA. 1985. Isotopic dating in metamorphic belts. *Journal of the Geological Society*, 142 (1): 97 - 110
- Compton W, Williams IS and Meyer C. 1998. U-Pb geochronology of zircons from Lunar Breccia 73217 using a Sensitive High Mass-Resolution Ion Microprobe. *Journal of Geophysical Research*, 89 (S2): B525-B534
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347 (6294): 662 - 665
- Gu CY, Hua RM and Qi HW. 2006. Study on zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and Sr-Nd isotope of the Guposhan granite in Guangxi. *Acta Geologica Sinica*, 80 (4): 543 - 553 (in Chinese with English abstract)
- Guo GH and Han F. 2007. The overview of dating methods and the geophysical dating. *Progress in Geophysics*, 22 (1): 87 - 94 (in Chinese with English abstract)
- He ZY and Xu XS. 2011. Petrogenesis of the Late Yanshanian mantle-derived intrusions in southeastern China: Response to the geodynamics of paleo-Pacific plate subduction. *Chemical Geology*, doi: 10.1016/j.chemgeo.2011.09.014

## 7 结论

靠背尖花岗闪长斑岩为高钾钙碱性系列的准铝质 I 型

- Healy B, Collins WJ and Richards SW. 2004. A hybrid origin for Lachlan S-type granites; The Murrumbidgee Batholith example. *Lithos*, 78(1–2): 197–216
- Hidaka H, Shimizu H and Adachi M. 2002. U-Pb geochronology and REE geochemistry of zircons from Palaeoproterozoic paragneiss clasts in the Mesozoic Kamiaso conglomerate, central Japan: Evidence for an Archean provenance. *Chemical Geology*, 187(3–4): 279–293
- Hirt WH. 2007. Petrology of the Mount Whitney intrusive suite, eastern Sierra Nevada, California; Implications for the emplacement and differentiation of composite felsic intrusions. *Geological Society of America Bulletin*, 119(9–10): 1185–1200
- Hou MJ. 2005. The magmatic activities and its deep process of the later Yanshanian granitoids in the Jiangnan uplift in the area of Anhui Province. Ph. D. Dissertation. Hefei: Hefei University of Technology: 1–115 (in Chinese with English summary)
- Hou ZQ. 2004. Porphyry Cu-Mo-Au deposits: Some new insights and advances. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 131–144 (in Chinese with English abstract)
- Hourigan JK, Solov'ev AS, Ledneva GV, Garver JI, Brandon MT and Reiners PW. 2004. Timing of syenite intrusions on the eastern slope of the Sredinnyi Range, Kamchatka: Rate of accretionary structure exhumation. *Geochemistry International*, 42(2): 97–105
- Jiang YH, Ling HF, Jiang SY, Fan HH, Shen WZ and Ni P. 2005. Petrogenesis of a Late Jurassic peraluminous volcanic complex and its high-Mg, potassic, quenched enclaves at Xiangshan, Southeast China. *Journal of Petrology*, 46(6): 1121–1154
- Jiang YH, Jiang SY, Dai BZ, Liao SY, Zhao KD and Ling HF. 2009. Middle to Late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Hunan Province, Southeast China; Implications for a continental arc to rifting. *Lithos*, 107(3–4): 185–204
- Jiang YH, Zhao P, Zhou Q, Liao SY and Jin GD. 2011. Petrogenesis and tectonic implications of Early Cretaceous S- and A-type granites in the northwest of the Gan-Hang rift, SE China. *Lithos*, 121(1–4): 55–73
- Kinny PD, Wijbrans JR, Froude DO, Williams IS and Compston W. 1990. Age constraints on the geological evolution of the Narrayer Gneiss Complex, Western Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 37(1): 51–69
- Li H, Ling MX, Li CY, Zhang H, Ding X, Yang XY, Fan WM, Li YL and Sun WD. 2012. A-type granite belts of two chemical subgroups in central eastern China: Indication of ridge subduction. *Lithos*, doi: 10.1016/j.lithos.2011.09.021
- Li YL, Zhou HW, Li XH and Luo QH. 2007.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  plateau ages of biotite and amphibole from tonalite of Huangling granitoids and their cooling curve. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 1067–1074 (in Chinese with English abstract)
- Liu DY, Jian P, Zhang Q, Zhang FQ, Shi YR, Shi GH, Zhang LQ and Tao H. 2003. SHRIMP dating of adakites in the Tulingkai ophiolite, Inner Mongolia; Evidence for the Early Paleozoic subduction. *Acta Geologica Sinica*, 77(3): 317–327 (in Chinese with English abstract)
- Mao JR, Tao KY, Yang ZL, Zhu YH and Xue HM. 1997. Geodynamic background of the Mesozoic intracontinental magmatism in Southeast China. *Volcanology & Mineral Resources*, 18(2): 95–104 (in Chinese with English abstract)
- Mao JR, Tao KY, LEE CY, Xie FG and Xu NZ. 2002. Geochronology and geochemical characteristics in Late Mesozoic Sifang pluton, southwesten Fujian, and their significance. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 449–458 (in Chinese with English abstract)
- Nam TN, Sano Y, Terada K, Toriumi M, van Quynh P and Dung LT. 2001. First SHRIMP U-Pb zircon dating of granulites from the Kontum massif (Vietnam) and tectonothermal implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 19(1–2): 77–84
- Nong JN, Zhong YF, Liu L, Liu YY, Xiong FH and Zou K. 2012. Petrogenesis of the Maixie Pluton in Northwest Jiangxi Province: Constraints from petrochemistry, zircon U-Pb chronology and Hf isotope. *Geological Science and Technology Information*, 31(2): 9–18 (in Chinese with English abstract)
- Patiño-Douce AE. 1999. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas? In: Castro A, Fernandez C and Vigneresse JL (eds.). *Understanding Granites; Integrating New and Classical Techniques*. London: Geological Society, London, Special Publications, 168: 55–75
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Petrology*, 25(4): 956–983
- Qian Q, Chung SL, Lee TY and Wen DJ. 2002. Geochemical characteristics and petrogenesis of the Badaling high Ba-Sr granitoids: A comparison of igneous rocks from North China and the Dabie-Sulu Orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 275–292 (in Chinese with English abstract)
- Qin Y, Wang DH, Wu LB, Wang KY and Mei YP. 2010. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the mineralized porphyry in the Dongyuan W deposit in Anhui Province and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 84(4): 479–484 (in Chinese with English abstract)
- Qiu JS, Hu J, McInnes BIA, Jiang SY, Xu XS and Allen CM. 2004. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Longwo granodioritic pluton in Guangdong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1363–1374 (in Chinese with English abstract)
- Qiu JT, Yu XQ, Zhang DH, Dai YP, Li HK and Chen SQ. 2011. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Tongcun porphyry in Kaihua County, western Zhejiang Province, and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 30(9): 1360–1368 (in Chinese with English abstract)
- Reynolds TJ and Richard EB. 1985. Evolution of hydrothermal fluid characteristics at the Santa Rita, New Mexico, porphyry copper deposit. *Economic Geology*, 80(5): 1328–1347
- Roedder E. 1971. Fluid inclusion studies on the porphyry-type ore deposits at Bingham, Utah, Butte, Montana and Climax, Colorado. *Economic Geology*, 66(1): 98–118
- Sang HQ, Wang SS, Hu SL and Qiu J. 1992. Closure temperature and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age spectrum of biotites from Mangshan granodiorite-tonalite in Qian'an County, Hebei Province. *Acta Petrologica Sinica*, 8(4): 332–340 (in Chinese with English abstract)
- Shi CY, Yan MC and Chi QH. 2011. Abundances of chemical elements in granitoids of different geological ages and their characteristics in China. *Geoscience Frontiers*, 2(2) (2011) 261–275
- Simon SMF, Nielsen RL and Taylor PH. 1969. Oxygen and hydrogen isotope ratios of clay minerals from porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 64(7): 755–777
- Simon SMF, Nielsen RL and Taylor PH. 1971. Hydrogen and oxygen isotope ratios in minerals from porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 66(4): 515–542
- Stipp M, Stünitz H, Heilbronner R and Schmid SM. 2002. The eastern Tonale fault zone: A 'natural laboratory' for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700°C. *Journal of Structural Geology*, 24(12): 1861–1884
- Sun JG, Chen L, Zhao JK, Men LJ, Jiang W, Chen D and Liang SN. 2008. SHRIMP U-Pb dating of zircons from Late Yanshanian granitic complex in Xiaoxinancha gold-rich copper orefield of Yanbain and its geological implications. *Mineral Deposits*, 27(3): 319–328 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Ocean Basins*. Geological Society of London, Special Publications, 42: 313–345
- Tan LG, Zhou TF and Yuan F. 2004. Fast neutron activation method based on the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  isotopic system and its application in geosciences. *Journal of Hefei University of Technology*, 27(12): 1509–1514 (in Chinese with English abstract)
- Tang HF and Zhou XM. 1997. Geochemical constraints on the petrogenesis of basalts from eastern Jiangnan orogen, south China. *Science in China (Series D)*, 40(6): 627–633

- Wang DE, Zhou X, Yu XQ, Du YD, Yang HM, Fu JZ and Dong HM. 2011. SHRIMP zircon U-Pb dating and characteristics of Hf isotopes of the granodiorite porphyries, Dongyuan W-Mo ore districts, Qimen area, South Anhui. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 36–51 (in Chinese with English abstract)
- Wang JG, Wang LW, Chen XY, Zhao XD, Jiang Y, Zhou ZY, Yu GC and Yu YW. 2010. SHRIMP U-Pb ages of zircons from Kailingjiao and Lichenjia granodiorites in western Zhejiang and their geological implications. *Geology in China*, 37(6): 1559–1565 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Zhao ZH, Jian P, Xu JF, Bao ZW and Ma JL. 2004. SHRIMP zircon geochronology and Nd-Sr isotopic geochemistry of the Dexing granodiorite porphyries. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 315–324 (in Chinese with English abstract)
- Wang YF, Shao Y, Jiang SY, Zhang ZZ, Hu J, Xiao E, Dai BZ and Li HY. 2012. Petrogenesis of Indosinian high Ba-Sr granites in Laoniushan batholith, Shaanxi Province and their tectonic implications. *Geological Journal of China Universities*, 18(1): 133–149 (in Chinese with English abstract)
- Williams IS and Claesson S. 1987. Isotopic evidence for the Precambrian provenance and Caledonian metamorphism of high grade paragneisses from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides; II. Ion microprobe zircon U-Th-Pb. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 97(2): 205–217
- Wong J, Sun M, Xing GF, Li XH, Zhao GC, Wong K, Yuan C, Xia XP, Li LM and Wu FY. 2009. Geochemical and zircon U-Pb and Hf isotopic study of the Baijhuajian metaluminous A-type granite: Extension at 125 ~ 100Ma and its tectonic significance for South China. *Lithos*, 112(3–4): 289–305
- Wu FY, Yang JH and Liu XM. 2005. Geochronological framework of the Mesozoic granitic magmatism in the Liaodong Peninsula, Northeast China. *Journal of China Universities*, 11(3): 305–317 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Li XH, Yang JH and Deng YF. 2007. Discussions on the Petrogenesis of granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217–1238 (in Chinese with English abstract)
- Wu FY, Ji WQ, Sun DH, Yang YH and Li XH. 2012. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions of the Mesozoic granites in southern Anhui Province, China. *Lithos*, doi: 10.1016/j.lithos.2012.03.020
- Wu RX, Zheng YF and Wu YB. 2005. Zircon U-Pb age, element and isotope geochemistry of Neoproterozoic granodiorites in South Anhui. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 587–606 (in Chinese with English abstract)
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554–1569
- Xiang BW, Zhu G, Wang YS, Xie CL and Hu ZQ. 2007. Mineral deformation thermometer for mylonitization. *Advances in Earth Science*, 22(2): 126–135 (in Chinese with English abstract)
- Xu KQ, Zhu JC, Liu CS, Shen WZ and Xu SJ. 1989. The genetic series and material sources of granitoids in South China. *Journal of Nanjing University*, 1(3): 1–17 (in Chinese with English abstract)
- Xue HM, Wang YG, Ma F, Wang C, Wang DE and Zuo YL. 2009. Zircon U-Pb SHRIMP ages of the Taiping (calc-alkaline) – Huangshan (alkaline) composite intrusive: Constraints on Mesozoic lithospheric thinning of the southeastern Yangtze craton, China. *Science in China (Series D)*, 39(9): 979–993 (in Chinese)
- Yan QR, Wang ZQ, Yan Z, Zheng YD, Wu CM, Hu SL, Sang HQ and Wang T. 2001. Detailed dating of deformation/metamorphism of shear zones on the scale of orogen and its application. *Earth Science Frontiers*, 8(3): 147–156 (in Chinese with English abstract)
- Yang SY, Jiang SY, Zhao KD, Jiang YH, Ling HF and Luo L. 2012. Geochronology, geochemistry and tectonic significance of two Early Cretaceous A-type granites in the Gan-Hang Belt, Southeast China. *Lithos*, doi: 10.1016/j.lithos.2012.01.028
- Yang XL, Cao DH, Li YK, Huang YF, Que YS and Liu SX. 2011. Age of Kongjia-Yinshan volcanic basin in Dexing, Jiangxi Province; Evidence from zircon U-Pb chronology. *Geology in China*, 38(1): 86–93 (in Chinese with English abstract)
- Yang XN, Xu ZW, Zhang J, Wang YJ, Xu XS, Jiang SY, Ling HF, Liu LG and Chen DY. 2007. Geochronology and origin of Nanhongchong pluton in Shizishan ore field, Anhui Province. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1543–1551 (in Chinese with English abstract)
- Yong Y, Xiao WJ, Yuan C, Yan Z and Li JL. 2008. Geochronology and geochemistry of Paleozoic granitic plutons from the eastern Central Qilian and their tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 855–866 (in Chinese with English abstract)
- Yu XQ, Wu GG, Zhang D, Di YJ, Zang WS, Zhang XX and Wang QF. 2005. Progress in the transition of the two tectonic systems of Mesozoic in Southeast China. *Progress in Natural Sciences*, 15(10): 1167–1174 (in Chinese with English abstract)
- Yu XQ, Di YJ, Wu GG, Zhang D, Zheng Y and Dai YP. 2009. SHRIMP zircon U-Pb dating of the Early Jurassic magmatic rocks in Dongkeng basin, South Jiangxi Province, and the later tectono-thermal events in southern Jiangxi and northern Guangdong provinces. *Science in China (Series D)*, 52(4): 471–483
- Yuan F, Zhou TF, Fan Y, Yue SC, Zhu G and Hou MJ. 2005. Tectonic setting of granitoids of Yanshanian Stage in the adjoining region of Anhui and Jiangxi provinces and its significance. *Journal of Hefei University of Technology*, 28(9): 1130–1134 (in Chinese with English abstract)
- Yuan F, Zhou TF, Fan Y, Yue SC, Zhu G and Hou MJ. 2006. Characteristics of Nd-Sr isotopes of the Yanshanian magmatic rocks in the Jiangnan rise bordering Anhui and Jiangxi provinces. *Chinese Journal of Geology*, 41(1): 133–142 (in Chinese with English abstract)
- Zhai W, Sun XM, Wu YS, Sun HY, Hua RM, Yang YQ, Li WQ and Li SH. 2010. Zircon shrimp U-Pb dating of the buried granodiorite and muscovite  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of mineralization and geological implications of Meiziwo tungsten deposit, northern Guangdong Province, China. *Geological Journal of China Universities*, 16(2): 177–185 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HF, Gao S, Zhong ZQ, Zhang BR, Zhang L and Hu SH. 2002. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of Cretaceous granitoids: Constraints on tectonic framework and crustal structure of the Dabieshan ultrahigh pressure metamorphic belt, China. *Chemical Geology*, 186(3–4): 281–299
- Zhang HF, Zhai MG, Tong Y, Peng P, Xu BL and Guo JH. 2006. Petrogenesis of the Sanfoshan High-Ba-Sr granite, Jiaodong Peninsula, Eastern China. *Geological Review*, 52(1): 43–53 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZC, Jian P and Wei HR. 2007. SHRIMP ages, geology, geochemistry and petrogenetic type of granites from the Sanqingshan Geopark, Jiangxi Province. *Geological Review*, 53(Suppl. 1): 28–40 (in Chinese with English abstract)
- Zhao HL, Di YJ, Deng JF, Wang C, Dai SQ and Mo Z. 2007. A comparison of Yanshanian granitoids between the Zhejiang-Jiangxi-Anhui border area and the Dexing and Tongling mineralization-concentrated areas, with a discussion on mineralization. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 26(1): 13–20 (in Chinese with English abstract)
- Zhao P, Jiang YH, Liao SY, Zhou Q and Jin GD. 2010. SHRIMP Zircon U-Pb Age, Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry and petrogenesis of the Ehu pluton in northeastern Jiangxi Province. *Geological Journal of China Universities*, 16(2): 218–225 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZF, Deng YF, Chen B and Wu YB. 2005. A geochemical study of element and Sr-Nd isotopes for eclogite and gneiss from CCSD core 734 to 933m. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 325–328 (in Chinese with English abstract)
- Zhou G, Zhang ZC, Wang XK, Wang X, Luo SB, He B and Zhang XL. 2007. Zircon U-Pb shrimp and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of the granitic mylonite in the Mayinebo fault belt of North Xinjiang and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 81(3): 359–369 (in Chinese with English abstract)

- Zhou TF, Yuan F, Hou MJ, Du JG, Fan Y, Zhu G and Yue SC. 2004. Genesis and geodynamic background of Yanshanian granitoids in the eastern Jiangnan uplift in the adjacent area of Anhui and Jiangxi provinces, China. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 24(3): 65-71 (in Chinese with English abstract)
- Zhou X, Yu XQ, Wang DE, Zhang DH, Li CL, Fu JZ and Dong HM. 2011. Characteristics and geochronology of the W, Mo-bearing granodiorite porphyry in Dongyuan, southern Anhui. *Geoscience*, 25(2): 201-210 (in Chinese with English abstract)
- Zhu DC, Mo XX, Niu YL, Zhao ZD, Wang LQ, Pan GT and Wu FY. 2009. Zircon U-Pb dating and in-situ Hf isotopic analysis of Permian peraluminous granite in the Lhasa Terrane, southern Tibet: Implications for Permian collisional orogeny and paleogeography. *Tectonophysics*, 469(1-4): 48-60
- Zhu G and Liu GS. 2000. Basic characteristics and Mesozoic orogenic process of the Jiangnan intracontinental orogenic belt in southern Anhui. *Geotectonica et Metallogenia*, 24(2): 103-111 (in Chinese with English abstract)
- Zhu JC, Shen WZ, Liu CS and Xu SJ. 1990. Nd-Sr isotopic characteristics and genetic discussion of mesozoic granitoids of syntaxis series in South China. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 9(2): 97-105 (in Chinese with English abstract)
- Zuo LY, Hou ZQ, Meng XJ, Yang ZM, Song YC and Li Z. 2010. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the ore-bearing rock in the Lengshuikeng porphyry type Ag-Pb-Zn deposit. *Geology in China*, 37(5): 1450-1456 (in Chinese with English abstract)
- 附中文参考文献**
- 陈江峰, 郭新生, 汤加富, 周泰禧. 1999. 中国东南地壳增长与 Nd 同位素模式年龄. *南京大学学报(自然科学版)*, 35(6): 649-658
- 陈帅奇, 余心起, 张德会, 代堰培, 李弘珂, 邱骏挺. 2011. 浙西开化桐村花岗岩斑岩地球化学特征及找矿潜力. *金属矿山*, (3): 108-111
- 顾晟彦, 华仁民, 戚华文. 2006. 广西姑婆山花岗岩单颗粒锆石 LA-ICP-MS U-PB 定年及全岩 SR-ND 同位素研究. *地质学报*, 80(4): 543-553
- 郭桂红, 韩峰. 2007. 地质定年方法综述与地球物理定年. *地球物理学进展*, 22(1): 87-94
- 侯明金. 2005. 江南隆起带(安徽部分)燕山晚期岩浆活动与深部过程. 博士学位论文. 合肥: 合肥工业大学, 1-115
- 侯增谦. 2004. 斑岩 Cu-Mo-Au 矿床: 新认识与新进展. *地学前缘*, 11(1): 131-144
- 李益龙, 周汉文, 李献华, 罗清华. 2007. 黄陵花岗岩基英云闪长岩的黑云母和角闪石  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄及其冷却曲线. *岩石学报*, 23(5): 1067-1074
- 刘敦一, 简平, 张旗, 张福勤, 石玉若, 施光海, 张履桥, 陶华. 2003. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年: 早古生代洋壳消减的证据. *地质学报*, 77(3): 317-327
- 毛建仁, 陶奎元, 杨祝良, 朱云鹤, 薛怀民. 1997. 中国东南部中生代陆内岩浆作用的动力学背景. *火山地质与矿产*, 18(2): 95-104
- 毛建仁, 陶奎元, 李寄嶠, 谢方贵, 许乃政. 2002. 闽西南晚中生代四方岩体同位素年代学、地球化学及其构造意义. *岩石学报*, 18(4): 449-458
- 农军年, 钟玉芳, 刘磊, 刘园园, 熊富浩, 邹瑜. 2012. 赣西北麦斜岩体的成因: 地球化学锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素制约. *地质科技情报*, 31(2): 9-18
- 钱青, 钟孙霖, 李通艺, 温大任. 2002. 八达岭基性岩和高 Ba-Sr 花岗岩地球化学特征及成因探讨: 华北和大别-苏鲁造山带中生代岩浆岩的对比. *岩石学报*, 18(3): 275-292
- 秦燕, 王登红, 吴礼彬, 王克友, 梅玉萍. 2010. 安徽东源钨矿含矿斑岩中的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. *地质学报*, 84(4): 479-484
- 邱检生, 胡建, McInnes BIA, 蒋少涌, 徐夕生, Allen CM. 2004. 广东龙窝花岗岩闪长质岩体的年代学、地球化学及岩石成因. *岩石学报*, 20(6): 1363-1374
- 邱骏挺, 余心起, 张德会, 代堰培, 李弘珂, 陈帅奇. 2011. 浙西开化区桐村花岗岩斑岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年代学及其地质意义. *地质通报*, 30(9): 1360-1368
- 桑海清, 王松山, 胡世玲, 裘冀. 1992. 迁安蟒山岩体黑云母的  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年龄谱及封闭温度. *岩石学报*, 8(4): 332-340
- 孙景贵, 陈雷, 赵俊康, 门兰静, 逢伟, 陈东, 梁树能. 2008. 延边小西南岔富金铜矿田燕山晚期花岗岩杂岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. *矿床地质*, 27(3): 319-328
- 谭绿贵, 周涛发, 袁峰. 2004.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  同位素体系及其在地质上的应用. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 27(12): 1509-1514
- 唐红峰, 周新民. 1997. 江南古陆东段两类玄武岩成因的地球化学制约. *中国科学(D 辑)*, 27(4): 306-311
- 王德恩, 周翔, 余心起, 杜玉雕, 杨赫鸣, 傅健真, 董会明. 2011. 皖南祁门地区东源钨钼矿区花岗岩闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征. *地质通报*, 30(10): 36-51
- 汪建国, 汪隆武, 陈小友, 赵旭东, 姜禹, 周宗尧, 余国春, 俞云文. 2010. 浙西开化脚和里陈家花岗岩闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. *中国地质*, 37(6): 1559-1565
- 王强, 赵振华, 简平, 许继峰, 包志伟, 马金龙. 2004. 德兴花岗岩闪长斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Sr 同位素地球化学. *岩石学报*, 20(2): 315-324
- 王艳芬, 邵毅, 蒋少涌, 张遵忠, 胡建, 肖娥, 戴宝章, 李海勇. 2012. 陕西老牛山印支期高 Ba-Sr 花岗岩成因及其构造指示意义. *高校地质学报*, 18(1): 133-149
- 吴福元, 杨进辉, 柳小明. 2005. 辽东半岛中生代花岗质岩浆作用的年代学格架. *高校地质学报*, 11(3): 305-317
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. *岩石学报*, 23(6): 1217-1238
- 吴荣新, 郑永飞, 吴元保. 2005. 皖南新元古代花岗岩闪长岩体锆石定年以及元素和氧同位素地球化学研究. *岩石学报*, 21(3): 587-606
- 向必伟, 朱光, 王永生, 谢成龙, 胡召齐. 2007. 糜棱岩化过程中矿物变形温度计. *地球科学进展*, 22(2): 126-135
- 徐克勤, 朱金初, 刘昌实, 沈渭洲, 徐士进. 1989. 华南花岗岩类的成因和物质来源. *南京大学学报(地球科学版)*, 1(3): 1-17
- 薛怀民, 汪应庚, 马芳, 汪诚, 王德恩, 左延龙. 2009. 皖南太平-黄山复合岩体的 SHRIMP 年代学: 由钙碱性向碱性转变对扬子克拉通东南部中生代岩石圈减薄时间的约束. *中国科学(D 辑)*, 39(7): 979-993
- 闫全人, 王宗起, 闫臻, 郑亚东, 吴春明, 胡世玲, 桑海清, 王涛. 2001. 构造变形/变质作用的精细测年及其在造山带研究中的

- 应用. 地学前缘, 8(3): 147-156
- 杨昔林, 曹殿华, 李以科, 黄玉凤, 阚迎松, 刘盛祥. 2011. 江西德兴孔家-银山火山盆地的时代归属: 锆石 U-Pb 年代学证据. 中国地质, 38(1): 86-93
- 杨小男, 徐兆文, 张军, 王云健, 徐夕生, 蒋少涌, 凌洪飞, 刘良根, 陈达源. 2007. 安徽狮子山矿田南洪钟岩体形成时代及成因机制研究. 岩石学报, 23(6): 1543-1551
- 雍拥, 肖文交, 袁超, 闫臻, 李继亮. 2008. 中祁连东段古生代花岗岩的年代学、地球化学特征及其大地构造意义. 岩石学报, 24(4): 855-866
- 余心起, 吴淦国, 张达, 狄永军, 臧文拴, 张祥信, 王群峰. 2005. 中国东南部中生代构造体制转换作用研究进展. 自然科学进展, 15(10): 1167-1174
- 袁峰, 周涛发, 范裕, 岳书仓, 朱光, 侯明金. 2005. 皖赣相邻区燕山期花岗岩类构造背景及其意义. 合肥工业大学学报(自然科学版), 28(9): 1130-1134
- 袁峰, 周涛发, 范裕, 岳书仓, 朱光, 侯明金. 2006. 江南隆起带皖赣相邻区燕山期岩体 Nd-Sr 同位素特征. 地质科学, 41(1): 133-142
- 翟伟, 孙晓明, 邬云山, 孙红英, 华仁民, 杨永强, 李文铅, 李社宏. 2010. 粤北梅子窝钨矿区隐伏花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄与<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 成矿年龄及其地质意义. 高校地质学报, 16(2): 177-185
- 张华锋, 翟明国, 童英, 彭澎, 许保良, 郭敬辉. 2006. 胶东半岛三佛山高 Ba-Sr 花岗岩成因. 地质论评, 52(1): 43-53
- 张招崇, 简平, 魏罕蓉. 2007. 江西三清山国家地质公园花岗岩 SHRIMP 年龄、地质-地球化学特征和岩石成因类型. 地质论评, 53(增刊): 28-40
- 赵海玲, 狄永军, 邓晋福, 王成, 戴圣潜, 莫兆. 2007. 浙赣皖相邻区与德兴、铜陵矿集区燕山期花岗岩类岩石对比研究及其成矿. 岩石矿物学杂志, 26(1): 13-20
- 赵鹏, 姜耀辉, 廖世勇, 周清, 靳国栋. 2010. 赣东北鹅湖岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、Sr-Nd-Hf 同位素地球化学与岩石成因. 高校地质学报, 16(2): 218-225
- 赵子福, 郑永飞, 陈斌, 吴元保. 2005. 中国大陆科学钻探工程主孔榴辉岩和片麻岩元素及同位素地球化学研究. 岩石学报, 21(2): 325-328
- 周刚, 张招崇, 王新昆, 王祥, 罗世宾, 何斌, 张小林. 2007. 新疆玛因鄂博断裂带中花岗质糜棱岩锆石 U-Pb SHRIMP 和黑云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年龄及意义. 地质学报, 81(3): 359-369
- 周涛发, 袁峰, 侯明金, 杜建国, 范裕, 朱光, 岳书仓. 2004. 江南隆起带东段皖赣相邻区燕山期花岗岩类的成因及形成的地球动力学背景. 矿物岩石, 24(3): 65-71
- 周翔, 余心起, 王德恩, 张德会, 李春麟, 傅建真, 董会明. 2011. 皖南东源含 W、Mo 花岗闪长斑岩及成矿年代学研究. 现代地质, 25(2): 201-210
- 朱光, 刘国生. 2000. 皖南江南陆内造山带的基本特征与中生代造山过程. 大地构造与成矿学, 24(2): 103-111
- 朱金初, 沈渭洲, 刘昌实, 徐士进. 1990. 华南中生代同熔系列花岗岩类的 Nd-Sr 同位素特征及成因讨论. 岩石矿物学杂志, 9(2): 97-105
- 左力艳, 侯增谦, 孟祥金, 杨志明, 宋玉财, 李政. 2010. 冷水坑斑岩型银铅锌矿床含矿岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究. 中国地质, 37(5): 1450-1456