江南造山带石耳山新元古代花岗岩的构造变形、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义

王阳阳[1)],宋传中[1)],李加好[1)],李振伟[1)],袁芳[1)],任升莲[1)],
林寿发[1,2)],王微[3)],葛延鹏[1)],李振强[1)]

1)合肥工业大学资源与环境工程学院,中国合肥,230009;
2)加拿大滑铁卢大学地球科学系,加拿大安大略滑铁卢,N2L3G1;
3)东华理工大学核资源与环境国防重点实验室,中国南昌,330013

内容提要:在江南造山带的东段皖浙赣交界地区发育一系列花岗岩岩体,区域上,岩体呈条带状,NE—SW 向雁行排列,平行于赣东北断裂带分布;微观下,岩浆流动组构残迹、蠕英石的普遍发育及固态塑性变形证明了该地区岩体变形经历了从岩浆—亚岩浆—固态变形的一个持续转变的过程;岩体锆石年龄与邻区岩体的变质变形年龄有很好的耦合性。由此可见研究区变形花岗岩体为同构造花岗岩,是岩浆在侵位冷凝过程中受到赣东北断裂带强烈构造作用影响的产物。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年结果表明:灵山岩体形成于 783±14 Ma;莲花山岩体形成于 780±12 Ma,属于新元古代岩浆活动。扬子板块与华夏板块碰撞导致江南造山带新元古界的岩群普遍遭受区域变质、变形作用,同构造花岗岩的构造变形特征正是区域构造变形的表现,因此该同构造岩体的年龄可能作为扬子板块与华夏板块仍在挤压、碰撞的年代学证据。

关键词:江南造山带;板块汇聚;同构造花岗岩;锆石 U-Pb 年龄

花岗岩作为地壳的重要组成部分,一直是众多地质学家的一个重要研究对象。花岗岩岩浆的形成、上升、侵位及变形全过程与区域构造演化密切相关,蕴含着丰富的构造动力学信息(王涛等,2007)。在造山带内部往往发育有大量的花岗岩,这些花岗岩的侵位与变形记录了造山带演化的动力过程,可为区域构造演化历史提供证据(杨坤光等,2002)。因此,通过对造山带内花岗岩的构造变形特征进行研究,不仅可以探讨花岗岩变形组构与区域构造变形的关系,而且能够揭示造山带演化重要的动力学信息,更能够为研究花岗岩与造山带构造演化关系提供新思路(Simpson, 1985; Mamtani and Greiling, 2005; Njanko et al., 2010; Paterson et al., 2010)。

江南造山带东段皖浙赣交界地区出露有大面积变形明显的花岗岩,前人利用同位素年代学、地球化学等手段对该花岗岩体进行了大量的研究工作,并取得了大量的成果,但对其形成时代与构造环境仍存在一定的争议(刘伯根,1997;唐红峰等,1997b; Li Zhengxiang et al., 2003;吴荣新等,2005;张国斌和吕绍远,2008; Zheng Yongfei et al.,2008;薛怀民等,2010;徐先兵等,2015;邓奇等,2016b; Li Longming et al.,2017)。另外,前人对该地区花岗岩的构造变形特征及其与江南造山带的构造演化关系研究较少。因此,本次对江南造山带皖浙赣地区花岗岩体进行了详细的野外地质调查、系统的样品采集及构造变形分析,从岩体的变形特征入手,结合岩浆锆石 U-Pb 测年,探讨该地区岩体的侵位、变形环境及形成时限。这对认识江南造山带、乃至整个华南板块的演化都具有重要的意义。

1 区域地质背景

江南造山带是华南前寒武纪重要的构造单元,其北部以石台—九江隐伏断裂为界与扬子板块相连,南部以江山—绍兴断裂为界与华夏板块相接,是扬子板块与华夏板块多期相互作用的产物。其空间上呈向北西弧形突出北东东—南西西向延伸的前南

注:本文为中国地质调查局项目(编号:DD20160082)和国家自然科学基金资助项目(编号:41272222)的成果。
收稿日期:2018-01-27;改回日期:2018-07-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2019.01.007
作者简介:王阳阳,男,1988 年生,博士研究生,构造地质学专业, Email:1986175647@qq.com。通讯作者:宋传中,男,1954 年生,博士,教授,主要从事构造地质学研究, Email:czsong69@163.com。

华纪基底出露带,绵延逾 1500 km,宽约 200 km,主要是由一套浅变质、强变形的中—新元古代巨厚沉积—火山岩系及时代相当的侵入体所构成(图 1)。

赣东北断裂带(也称德兴—黄山断裂带、东乡—歙县断裂带)是江南造山带东段一条重要的构造带(图 1),为一横跨皖、浙、赣三省,呈 NNE 向展布的深大断裂(Shu Liangshu and Charvet., 1996;邓国辉等,2002)。该断裂形成于新元古代,是一条多期活动构造带,由一系列北东—北北东向的压性冲断层或压剪性斜冲断层组成;晋宁晚期成为怀玉地体与郯公山地体拼贴的边界断裂;赣东北地区不同时期的岩浆活动都受到赣东北断裂带控制,包括前寒武纪大量的基性—超基性岩和中酸性岩,中生代的中酸性岩,以及可能的新生代超基性岩等(余心起等,2007;陆慧娟等,2007)。

研究区位于江南造山带东段的皖浙赣交界地

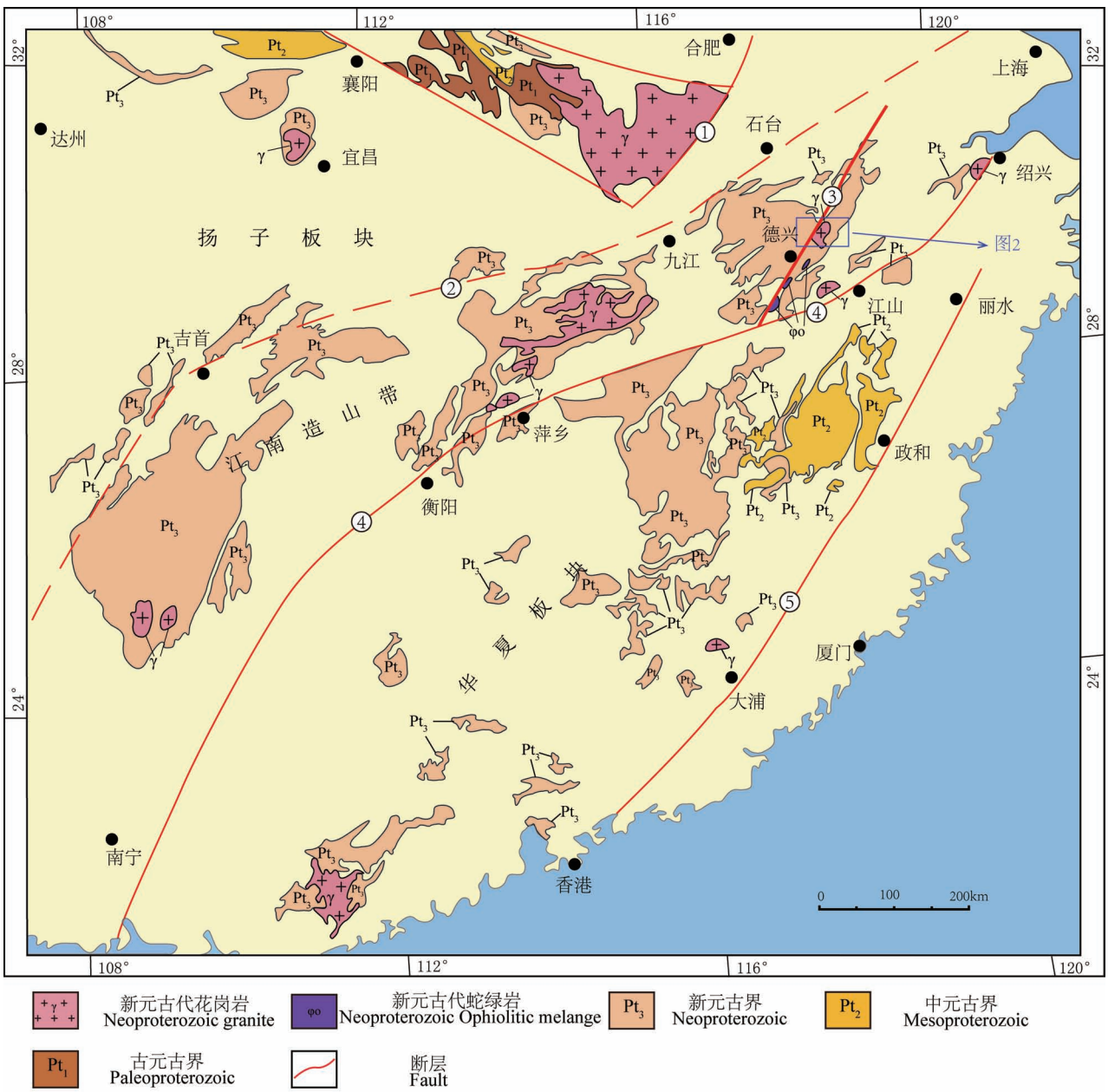


图 1 江南造山带区域构造简图(据 Yao Jinlong et al.,2013 修改)

Fig. 1 Tectonic sketch map of Jiangnan orogen belt(modified from Yao Jinlong et al., 2013)

① 郯庐断裂带;② 九江—石台隐伏断裂;③ 赣东北断裂带;④ 绍兴—江山—萍乡断裂带;⑤ 政和—大埔断裂带

① Tanlu fault; ② Jiujiang—Shitai buried fault; ③ Northeast Jiangxi fault;

④ Shaoxing—Jiangshan—Pingxiang fault; ⑤ Zhenghe—Dapu fault

区,处于赣东北断裂的北东端(图 1),区域内出露的地层主要为新元古代变质碎屑岩沉积—火山岩系,可被区域角度不整合分为上下两个次级构造单元。角度不整合面以下为与冷家溪群相当的以低绿片岩相变质为主的褶皱沉积岩系,该岩系在浙北和赣东北分别被称为双溪坞群和双桥山群,在皖南被称为上溪群或溪口群(表 1)。上溪(溪口)群自下往上可划分为樟前组、板桥组、木坑组和牛屋组。该岩群以碎屑岩为主,间夹火山熔岩,主要岩性为板岩、千枚岩,变形较强,原生沉积结构部分被透入性面理置换,较难恢复层序,属非斯密斯地层单位(吴新华等,2004)。不整合面以上为与板溪群相当的似盖层沉积岩系(低绿片岩相变质)(丁孝忠等,2014),该岩系在浙北称为河上镇群,在皖南被称为历口群(表 1)。该地区出露的岩组在赣东北和浙西北称为上墅组、皖南为井潭组,主要为火山岩沉积,分布在歙县井潭村—黄山市以南一带,呈 NE 向延伸(图 2),主要是由安山岩、英安岩、流纹质熔岩和火山碎屑岩组成,部分岩石发生浅变质和变形(吴荣新等,2007)。整个区域上,在这些浅变质岩系之上的未变质盖层沉积为南华纪和震旦纪地层(表 1)。

在皖、浙、赣交界地区新元古代岩浆活动强烈,出露有大量的花岗岩体,因浙赣交界线上的石耳山而得名,总面积达 500 km^2,在皖南被称为灵山岩体、莲花山岩体和白际山岩体(唐红峰,1997;吴荣新等,2005)。其中灵山岩体和莲花山岩体以斑状花岗岩为主,白际山岩体主要为流纹斑岩。岩体受赣东北断裂带的构造控制,总体呈 NE 向雁行展布,侵入的最老围岩为上溪群或溪口群,最新围岩是历口群的井潭组(皖南)或上墅组(赣东北、浙西北)。岩体总体上以斑状—似斑状结构为特征,表明岩体具有浅层、超浅层高就位特征,且岩体具有明显的变形特征(程光华和汪应庚,2000)。

表1 江南造山带中东部新元古代地层（据Zhao Guochun and Cawood, 2012修改）

Table 1 Neoproterozoic strata in the central and eastern part of the Jiangnan (south Yangtze River) orogenic belt (modified from Zhao Guochun and Cawood, 2012)

地质年代	地层 \ 区域	湖南	皖南	赣东北 浙西	
新元古界	震旦系	留茶坡组	皮园村组	西峰寺组	灯影组
		金家洞组	兰田组		陡山沱组
	南华系	洪江组 湘锰组	雷公坞组	雷公坞组	
		江口组	休宁组	志棠组	
	青白口系	板溪群	历口群：井潭组/铺岭组；邓家组	河上镇群：上墅组；虹赤村组；骆家门组	
		冷家溪群	上溪（溪口）群：牛屋组；木坑组；板桥组；樟前组	双溪坞群	

2 花岗岩体变形特征

2.1 宏观构造特征

研究区大地构造位置处于江南造山带东段,赣东北深大断裂的南侧边缘(刘伯根,1997)。由于受到断裂带的构造控制,岩体多呈条带状,长宽比为 5~10∶1,NE 向呈雁行排列,其长轴方向与构造线平行一致,岩体形状与区域构造协调一致(图 2a)。

受断裂带的剪切构造活动影响,绝大部分花岗岩都经历了剪切活动而发生糜棱化作用,发育多种韧性变形组构,主要有:

(1)糜棱面理,是一种强面理带,透入性发育于

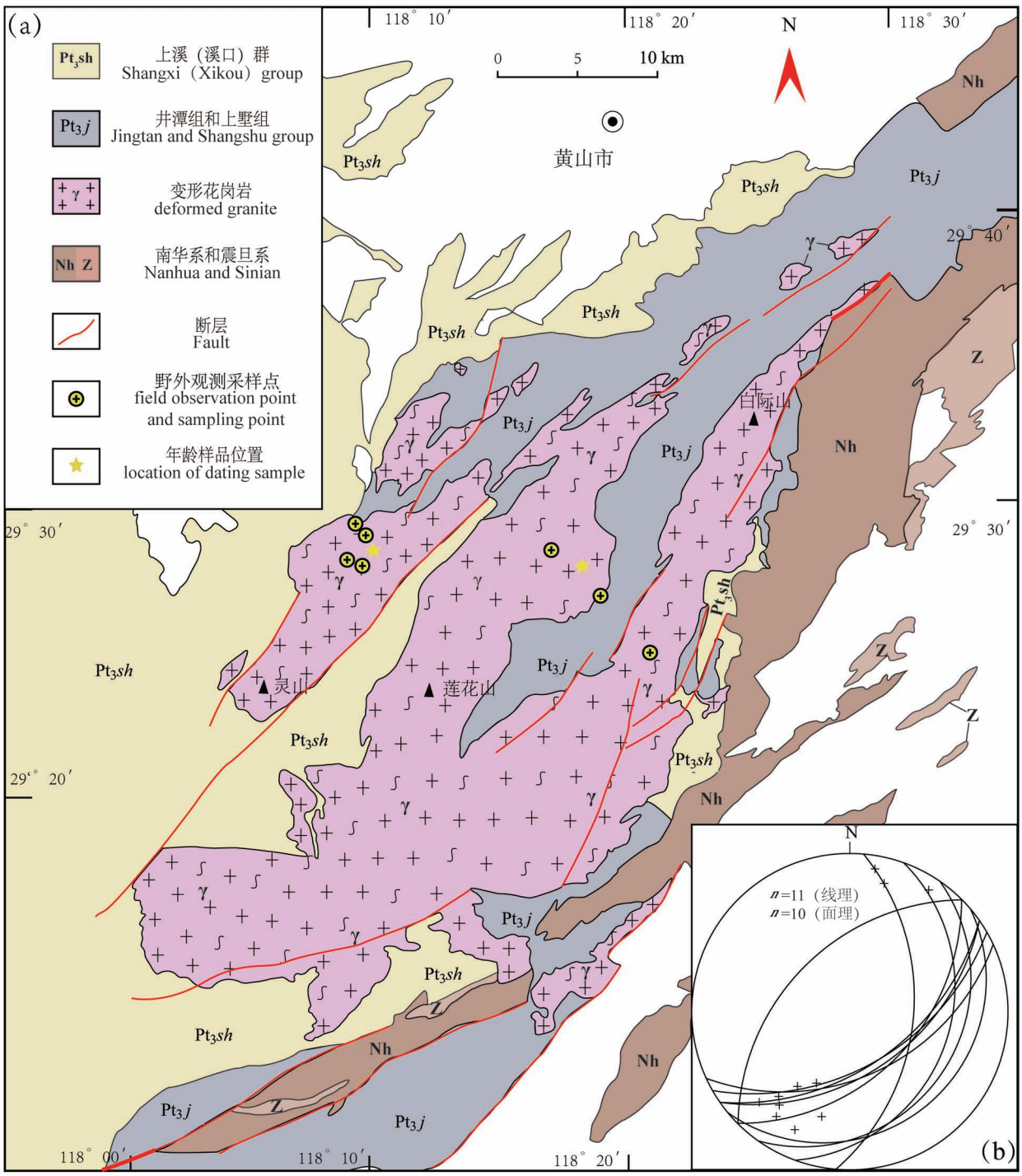


图 2 皖浙赣交界地区前寒武纪地质简图及采样位置

Fig. 2 Simplified geological map of Precambrain and sampling sites in Anhui—Zhejiang—Jiangxi border area

该地区的花岗岩体中,主要由强烈拉伸的基质矿物与眼球状碎斑定向排列或由暗色矿物与浅色矿物相间定向排列构成(图 3a)。面理的倾向为 95°~145°,总体倾向为 SE,面理倾角为 20°~51°,多数大于 40°(图 2b)。

(2)拉伸线理,在该变形岩体中糜棱面理上发育有清晰的线理,拉伸线理主要由长石、石英及云母等矿物集合体的强烈拉伸或定向排列构成(图 3b)。线理产状总体倾伏向为 SW,倾伏角近水平(图 2b)。

(3)旋转碎斑系,在野外露头上可以观察到这类变形组构十分发育,在该变形岩体剪切流动过程中,由刚性的碎斑及其周缘微粒石英或云母集合体发生旋转构成的。在糜棱岩化的岩体中常形成“σ”或“δ”型旋碎斑,碎斑主要为长石、石英,其颗粒大小一般为 2.5~5 mm(图 3c)。

(4)S—C 组构,通过对该变形岩体在野外露头尺度和显微尺度上观察,能够见到 S—C 组构,但发育规模一般不是很大。平行于断裂带边界 C 面理是由细粒化、拉长、强定向的石英、云母及长石矿物集合体排列组成;S 面理由透镜状的长石集合体或长石残斑长轴优选方位的斜列构成,与 C 面理斜交形成 S—C 组构(图 3d)。

2.2　显微构造特征

在构造作用下,皖浙赣交界地区花岗岩体发生了较强烈的韧性变形,岩石不仅表现出宏观变形特征,微观变形组构也十分丰富。通过对变形岩石薄片在显微镜下进行观察,可以观察到残留少量的早期岩浆流动组构、广泛发育的蠕英石及岩石中长石、石英和云母等矿物固态塑性变形,如波状消光、亚颗粒、动态重结晶、旋转残斑、书斜构造、矿物动态重结晶等显微构造现象。

(1)早期岩浆流动机制及组构残迹,早期岩浆



图 3 皖浙赣交界地区变形花岗岩的野外照片

Fig. 3 Field photos ofdeformational granite in Anhui—Zhejiang—Jiangxi border area

(a)糜棱面理;(b)糜棱线理,(c)旋转残斑;(d)S—C 组构

(a) Foliation of mylonite; (b) Mineral lineation of mylonite; (c) The rotated porphyroblasts; (d) S—C fabrics

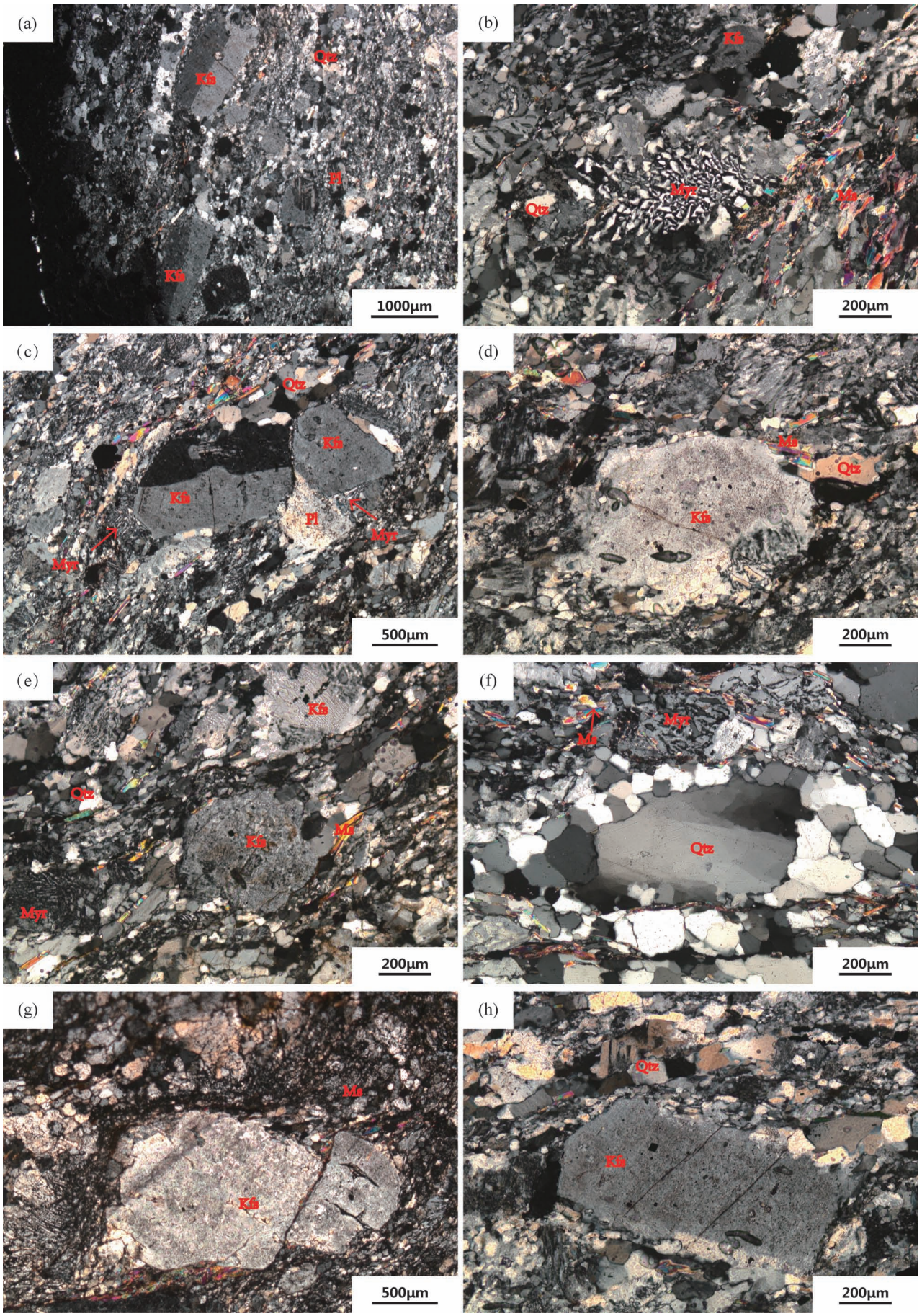

(a)
Qtz
Kfs
Pl
Kfs
1000μm
(b)
Kfs
Myr
Qtz
Ms
200μm
(c)
Qtz
Kfs
Kfs
Pl
Myr
Myr
500μm
(d)
Ms
Qtz
Kfs
200μm
(e)
Kfs
Qtz
Kfs
Ms
Myr
200μm
(f)
Myr
Ms
Qtz
200μm
(g)
Ms
Kfs
500μm
(h)
Qtz
Kfs
200μm

图 4 皖浙赣交界地区变形花岗岩体显微构造照片:(a)早期岩浆流动机制及组构残迹;(b)、(c)、d)、(e)蠕英石、长石的动态重结晶和残斑拖尾;(f)石英动态重结晶和核幔构造(g)书斜构造(h)显微破裂

Fig. 4 The microscopic structure photos of deformational granite in Anhui—Zhejiang—Jiangxi border area: (a) Early magmatic flow mechanism and remains of structural fabrics; (b), (c), (d), (e) Myrmekitic, Dynamic recrystallization and porphyroclasts of feldspar; (f) Dynanmic recrystallization of quartz and core—mantle structure; (g) Domino structure; (h) Microfracture of feldspar

Myr—蠕英石;Qtz—石英;Pl—斜长石;Kfs—钾长石;Ms—白云母

Myr—Myrmekite; Qtz—quartz; Pl—Plagiocalse; Kfs—K-feldspar; Ms—Muscovite

流动机制及组构是指岩浆结晶前(类似悬浮液性状)发生流动形成的组构(王涛,1998)。在该岩体中残留有这类组构。在镜下可以观察到,在变形的岩体中发育有少量较大的长板状自形的钾长石晶体平行于面理定向排列,且晶体内部双晶边界也平行于面理(图 4a)。

(2)蠕英石(myrmekite),又称蠕状石,主要是长石和石英的共生(任留东和韩景仪,2006)。蠕英(结构)的出现与压应力有关,属于典型的高温变形组构(Vernon, 2000)。镜下可观察到岩体中蠕英石普遍发育,其形状呈瘤状、棒状、乳滴状等,产出位置常在长石颗粒边部或孤立产出(图 4b、c)。

(3)旋转残斑系,旋转残斑根据斑晶与结晶拖尾的组合形态,可以划分为“σ”型和“δ”型。“σ”型旋转残斑系的特征是发育楔状结晶尾的中线分别位于结晶参考面的两侧;而“δ”型旋转残斑系结晶尾的发育都是沿中线由参考面的一侧转向另一侧。在变形的花岗岩中两种类型旋转残斑系均有发育,但以“σ”型旋转残斑系为主,残斑主要由长石或长石集合体组成,旋转残斑尾部矿主要是由变形的基质或动态重结晶颗粒组成(图 4c、d、e)。

(4)动态重结晶、亚颗粒,研究区岩体定向薄片中可以观察到长石和石英发生动态重结晶作用(图 4d、e、f)。在塑性变形过程中,长石和石英晶体由于位错在颗粒内部分成许多消光位有微弱差异的、有规则界线的消光区,形成亚颗粒。亚颗粒进一步发生旋转重结晶颗粒边界迁移重结晶形成动态重结晶颗粒。

(5)核幔构造、波状消光,发育核幔构造的矿物为石英,在大颗粒的石英颗粒周围发生亚颗粒旋转动态重结晶作用,生成一圈细小的无应变的动态重结晶颗粒,由其构成“幔部”;中间残留大颗粒的石英为“晶核”,在残留的石英颗粒中还保存着一定的应变特征,如波状消光和亚颗粒(图 4f)。

(6)书斜构造,主要出现在长石矿物中,在递进剪切作用下,长石碎斑沿裂隙发生旋转,呈倾斜叠置状(图 4g)。

(7)显微破裂,显微破裂现象多见于较刚性的长石矿物颗粒中,为一些细微的裂隙,既有穿晶裂隙,也有晶内裂隙(图 4h)。显微破裂现象是长石晶体颗粒在低温状态下(300~400℃以下)表现出特征显微变形构造(Pryer,1993;向必伟等,2007)。

2.3　显微变形机制

岩石与矿物在固态塑性变形过程中受控于温度和压力,在不同的温压环境条件下,受不同变形机制的控制,岩石与矿物会表现出不同的变形行为与重结晶方式。故可以根据矿物特定的变形和重结晶方式来推断其固态塑性变形时的温压条件。研究表明,石英和长石等矿物的变形与温度具有良好相关性,可以估计岩石变形时的温度(Simpson, 1985; Gapais, 1989; Cates, 1989; Passchier and Trouw, 2005;向必伟等,2007;纪沫,2008;胡玲等,2009)。

石英在低于 250℃ 的环境下变形为脆性破裂(Passchier and Trouw, 2005; Stipp et al., 2002);在 250~300℃时呈现脆性破裂与塑性拉长共存、波状消光现象,颗粒边缘出现亚颗粒化(Daalen et al., 1999);在 300℃时石英开始发生动态重结晶作用,随着温度的不断升高,重结晶形式依次经历膨凸式重结晶(BLG)、亚颗粒旋转重结晶(SR)、颗粒边界迁移重结晶(GBM)三个过程(Stipp et al., 2002)。具体来说,在 300~380℃时变形主要为膨凸式重结晶(BLG),围绕残斑分布,并伴随有亚颗粒;在 380~420℃时重结晶形式由 BLG 向 SR 转变(Stipp et al., 2002),当温度升高到 420℃时,转变基本完成;在 420~480℃时以 SR 重结晶独立存在,重结晶的石英颗粒大小和形状相似;在 480~530℃时石英动态重结晶机制表现为开始由 SR 向 GBM 转变;530~630℃时为 GBM 型重结晶独立存在。

长石的变形机制与温度的相关性与石英变形规律有着很大的相似性。长石在小于 300℃时变形完全为脆性破裂;在 300~400℃时表现为显微破裂、双晶纹弯曲、波状消光和应力双晶(Pryer et al.,

1993);在 400~500℃时长石塑性变形与脆性显微破裂共存,并在颗粒边缘出现亚颗粒化(Simpson,1985;Gapais,1989;Cates,1989);在 500℃左右(绿片岩相—角闪岩相)时长石开始发生动态重结晶,在 500~650℃时主要 BLG 重结晶,可见不规则突入、镶嵌构造;在 650~700℃范围内为 BLG 与 SR 两类重结晶共存;在 700~800℃温度区间,长石表现为 SR 重结晶独立存在(Lafrance et a1.,1998);在 800~850℃范围内,长石重结晶型式是由 SR 向 GBM 快速转变;在 850℃以上时以 GBM 型重结晶独立存(Anderson et al.,1993;Altenberger et al.,2000)。

皖浙赣交界地区变形花岗岩中的矿物主要为石英和长石。通过大量镜下观察,可以发现石英普遍发育动态重结晶,大多数石英被形成新的重结晶颗粒所取代,少数石英残斑颗粒与重结晶颗粒构成核幔构造,动态重结晶机制为亚颗粒旋转(SR)和颗粒边界迁移式(GBM)动态重结晶共存,变形后期由于静态恢复作用,重结晶颗粒呈 120°角接触(图 4f)。长石主要以残斑形式存在,表现为膨凸式(BLG)动态重结晶,有时可见重结晶颗粒组成的拖尾(图 4d、e)。根据矿物组合和重结晶型式定性判断该地区花岗岩的固态塑性变形温度在 500℃左右,应属于高绿片岩相—低角闪岩相(纪沫,2008)。

3 构造年代学分析

3.1 样品采集及测试方法

本次分别采集灵山岩体和莲花山岩体样品各 1 件,对这些样品进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,样品坐标分别为:灵山岩体样品坐标为 E118°08.607′,N29°28.256′;莲花山岩体样品坐标为 E118°15.864′,N29°27.711′(图 2)。

锆石单矿物分离是在河北地质诚信服务有限公司进行的,将 8~10 kg 重的原岩样品粉碎至自然粒度,经过常规重选和电磁选后,在双目镜选锆石。锆石制靶是在重庆宇劲科技有限公司完成的,是通过双目镜挑选出完整和典型的锆石颗粒,然后用双面胶粘在载玻片上,放上 PVC 环,再将环氧树脂和固化剂进行充分混合后注入 PVC 环中,待树脂充分固化后将样品从载玻片上剥离,并对其进行抛光。然后对抛光后的待测锆石进行阴极发光扫描电镜显微照相(CL),锆石的阴极发光照相是在重庆宇劲科技有限公司完成的。LA-ICPMAS 锆石测年是在合肥工业大学资源与环境工程学院展开的,激光剥蚀系统为美国 Coherent Inc.公司生产的 GeoLasPro,该系统为工作波长 193 nm 的 ComPex102 ArF 准分子激光器,样品上的光斑大小为 4~160 μm,能量密度范围 1~45 J/cm^2,单脉冲能量可达 200 mJ,最高重复频率 20 Hz。样品测定时用 91500 标准锆石和 NIST610 做外标,U-Pb 同位素定年中采用标准锆石 91500 作外标进行同位素分馏校正,NIST610 是用来计算锆石中 U、Th 及 Pb 的含量。

对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U—Th—Pb 同位素比值和年龄计算)采用由中国地质大学(武汉)刘勇胜教授编写的 ICPMSDataCal 软件(Liu Yongosheng et al.,2008a,2010a,b)。锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图的绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot/Ex-ver3 完成。锆石 U—Th—Pb 同位素比值、年龄数据及锆石微量元素的单次测量的标准偏差为 1σ,加权平均年龄采用 2σ。

3.2 锆石 U-Pb 定年结果与分析

3.2.1 灵山花岗岩的构造年代学

锆石呈自形晶,粒状—长柱状,锆石颗粒长轴粒径以 50~100 μm,短轴粒径为 30~50 μm。根据 CL 图像可以观察锆石内部发育有清晰、密集、均匀的震荡生长环带,为典型的岩浆锆石(吴元保和郑永飞,2004;李长民,2009)。部分锆石颗粒核心与外围环带发育程度差异悬殊,少数锆石内部还见有继承锆石的残留。大多数细小的矿物包裹体,且多数锆石发育有裂隙,部分锆石周围生长有絮状物边缘(图 5a)。

本次研究总共对 30 颗锆石颗粒的 30 个点进行了年龄测试(表 2),其中分析点 1 为继承锆石,它的$^{207}Pb/^{206}Pb$ 表面年龄为 1806±57 Ma,明显高于其他分析点,通过 CL 图像锆石特征观察,该点得出的应是继承锆石年龄。分析点 2、16、25、30 的$^{206}Pb/^{238}U$表面年龄分别为 821.0±23.2 Ma、846.0±24.2 Ma、856.0±25.0 Ma、882.0±25.2 Ma,通过锆石 CL 图像锆石特征观察认为这些分析点的所测得的$^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄应为核幔的混合年龄。另外分析测试点 5、11、12、29 明显偏离主要分析点所构成的不一致线上。其余 21 个分析点 Th 含量为 126×10^{-6}~2115×10^{-6},U 含量 468×10^{-6}~1687×10^{-6},Th/U 值 0.40~1.26,均大于 0.4,样品锆石的 Th/U 值和韵律环带均反映锆石为岩浆作用形成的,表明此次分析的锆石具有岩浆成因特点。21 个分析点给出的$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄集中分布在谐和线上或谐和线附近(图 6a),这些测试分析点获取$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄

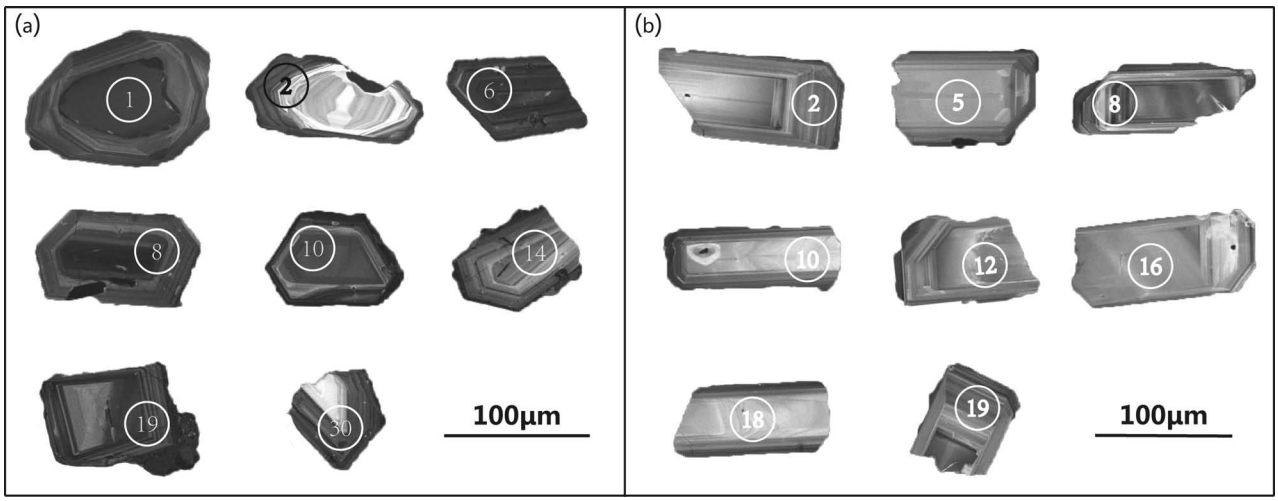


图 5 皖浙赣灵山岩体(a)和莲花山岩体(b)分析测试锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 5 Cathodoluminescence (CL) images of zircons from Lingshan granite and Lianhuashan granite in Anhui—Zhejiang—Jiangxi border area

的加权平均值为 783±14 Ma(n=21, MSWD=0.75)(6b),代表了岩体形成年龄。

3.2.2 莲花山花岗岩的构造年代学

莲花山岩体的锆石呈自形晶,多为长柱状,可见棱角状不完整锆石颗粒,锆石长轴粒径多以 110~160 μm,短轴以 50 μm 为主。锆石发育清晰、致密、均匀的韵律振荡环带,为典型的岩浆锆石。锆石核部未见有明显的残留锆石。多数锆石可见裂纹,且大多数锆石内部含有细小的暗色矿物包裹体(图 5b)。

本次研究总共对 30 颗锆石的 30 个点进行了年龄测试(表 2),其中测试分析点 3、6 可能为核幔的混合年龄,它们的$^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄为 832.0±23.6 Ma 和 861.0±26.3 Ma,明显高于其它分析点。分析点 20、25 明显偏离主要分析点所构成的不一致线且谐和度较差。其余 26 个测点的锆石中的 Th 和 U 的含量多数较低且变化范围较大。锆石 U 的含量为 69.3×10^{-6}~1278×10^{-6},Th 含量为 38.5×10^{-6}~1048×10^{-6},Th/U 值为 0.49~0.82,均大于 0.4,锆石的 Th/U 值及韵律环带反映为这些锆石均为岩浆锆石。26 个测试分析点均落在谐和线上或者谐和线附近(图 6c),这些分析点的$^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 780±12 Ma(n=26, MSWD=0.79)(6d),该年龄值可以代表莲花山岩体的形成年龄。

4 讨论

4.1 岩体形成时代

自 20 世纪 90 年代以来,众多研究者就已经开始对皖浙赣地区的相关岩体开展了大量的同位素测年工作,但由于早期测年方法多为传统的单颗粒 U-Pb 测年法,且方法对年龄较老的样品难以准确测定,所以本文仅收集了通过离子探针质谱法(SHRIMP)和激光剥蚀电感耦合等离子体质谱法(LA-ICP-MS)获得的岩体锆石 U-Pb 同位素年龄结果进行对比和分析。如 Li Zhengxiang 等(2003)通过 SHRIMP U-Pb 法测年得到莲花山岩体的年龄为 779±11 Ma(通过其给出的样品坐标位置应为莲花山岩体);吴荣新等(2005)通过 SHRIMP U-Pb 和 LA-ICP-MS 测年方法得到莲花山岩体同位素年龄为 778±11Ma 和 776±6Ma;Zheng Yongfei 等(2008)通过 LA-ICP-MS 法测得莲花山岩体年龄为 771±17 Ma、777±7 Ma,白际山岩体的年龄为 775±5 Ma;薛怀民等(2010)通过 LA-ICP-MS 测年方法测得灵山岩体年龄为 823±18 Ma、莲花山岩体年龄为 814±14 Ma、白际山岩体年龄为 783±8 Ma;Wang Xiaolei 等(2012)通过 LA-ICP-MS 测得白际山岩体年龄为 797±6 Ma;徐先兵等(2015)通过 LA-ICP-MS 测得灵山岩体年龄为 779±10 Ma,莲花山岩体年龄为 793±12 Ma、795±9 Ma;邓奇等(2016)通过 LA-ICP-MS 测得灵山岩体的年龄为 791.8±2.6 Ma。

通过总结前人对各岩体测年结果可发现,白际山的形成年龄较为明确,但是灵山岩体与莲花山岩体的形成时代仍存在争议。薛怀民等测得的灵山和

表 2 皖浙赣交界地区花岗岩锆石 U-Pb 定年结果

Table 2 Dating results of zircon U-Pb from granites in in Anhui-Zhejiang-Jiangxi border area

测点号	元素含量($\times10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						谐和度(%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	
灵山岩体																	
1	156.6	514	288	1.78	0.1103	0.0035	5.0120	0.1632	0.3276	0.0095	1806	57.4	1821	27.6	1827	45.9	99
2	56.6	148	347	0.43	0.0643	0.0022	1.2077	0.0423	0.1358	0.0041	754	76.8	804	19.5	821	23.2	97
3	164.2	521	998	0.52	0.0643	0.0020	1.1766	0.0385	0.1318	0.0037	750	66.7	790	18.0	798	21.2	98
4	255.7	1140	1488	0.77	0.0645	0.0020	1.1511	0.0378	0.1286	0.0038	761	66.7	778	17.8	780	21.9	99
5	823	3090	5643	0.55	0.0631	0.0020	1.0029	0.0320	0.1145	0.0032	722	67.4	705	16.2	699	18.7	99
6	206.6	648	1256	0.52	0.0630	0.0020	1.1344	0.0370	0.1297	0.0037	709	68.5	770	17.6	786	21.0	97
7	128.7	369	766	0.48	0.0680	0.0022	1.2534	0.0424	0.1326	0.0038	878	-100.0	825	19.1	803	21.7	97
8	276.3	1119	1687	0.66	0.0654	0.0020	1.1486	0.0368	0.1267	0.0038	789	63.0	777	17.4	769	21.6	99
9	185.7	438	1127	0.39	0.0678	0.0021	1.2610	0.0408	0.1343	0.0040	865	63.7	828	18.3	813	22.5	98
10	156.7	549	929	0.59	0.0652	0.0020	1.1732	0.0378	0.1301	0.0038	783	69.4	788	17.7	788	22.0	99
11	72.4	158	374	0.42	0.1345	0.0074	2.4880	0.1526	0.1317	0.0040	2158	96.6	1269	44.4	798	22.7	54
12	31.39	328	266	1.23	0.0755	0.0027	1.0010	0.0391	0.0983	0.0039	1083	72.2	704	19.8	605	22.6	84
13	303	1339	1746	0.77	0.0699	0.0022	1.2696	0.0431	0.1307	0.0038	926	63.7	832	19.3	792	21.6	95
14	139.2	449	857	0.52	0.0687	0.0023	1.2326	0.0426	0.1301	0.0040	900	67.4	815	19.4	789	22.8	96
15	108.6	338	658	0.51	0.0692	0.0024	1.2810	0.0462	0.1337	0.0040	903	70.4	837	20.6	809	22.7	96
16	30.07	61.9	181	0.34	0.0668	0.0026	1.3058	0.0526	0.1420	0.0044	831	82.3	848	23.2	856	25.0	99
17	82.1	396	468	0.85	0.0672	0.0022	1.2184	0.0421	0.1309	0.0038	843	75.0	809	19.3	793	21.8	97
18	122.4	231	764	0.30	0.0715	0.0025	1.3250	0.0468	0.1338	0.0038	972	72.2	857	20.4	810	21.6	94
19	166.8	577	1050	0.55	0.0667	0.0021	1.1833	0.0377	0.1278	0.0036	829	64.8	793	17.5	775	20.7	97
20	42.83	126	264	0.48	0.0698	0.0042	1.2719	0.0807	0.1310	0.0037	924	124.1	833	36.1	794	21.2	95
21	187.6	487	1214	0.40	0.0691	0.0021	1.2169	0.0389	0.1270	0.0037	902	63.0	808	17.8	771	21.1	95
22	293.1	900	1894	0.47	0.0709	0.0021	1.2190	0.0377	0.1238	0.0035	955	59.7	809	17.3	753	20.0	92
23	102.9	371	642	0.58	0.0658	0.0020	1.1589	0.0376	0.1269	0.0036	1200	60.2	781	17.7	770	20.7	98
24	98.9	312	589	0.53	0.0730	0.0023	1.3298	0.0443	0.1315	0.0038	1013	65.3	859	19.3	797	21.6	92
25	90.5	185	573	0.32	0.0677	0.0023	1.3181	0.0482	0.1402	0.0043	861	69.3	854	21.1	846	24.2	99
26	217.5	876	1418	0.62	0.0703	0.0023	1.2004	0.0412	0.1231	0.0036	939	66.7	801	19.0	748	20.9	93
27	311	2115	1679	1.26	0.0665	0.0020	1.1601	0.0364	0.1260	0.0036	833	59.1	782	17.1	765	20.6	97
28	223.5	791	1408	0.56	0.0664	0.0021	1.1766	0.0387	0.1281	0.0039	820	64.8	790	18.1	777	22.1	98
29	310.0	1111	2398	0.46	0.0685	0.0021		0.0393	0.1085	0.0041	883	64.0	715	19.8	664	23.7	92
30	104.6	322	583	0.55	0.0652	0.0022	1.3297	0.0486	0.1467	0.0045	789	70.4	859	21.2	882	25.2	97

测点号	元素含量(×10⁻⁶)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						谐和度(%)
	Pb	Th	U		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		$n(^{207}Pb)/n(^{206}Pb)$		$n(^{207}Pb)/n(^{235}U)$		$n(^{206}Pb)/n(^{238}U)$		
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	
莲花山岩体																	
1	65.4	222	383	0.58	0.0746	0.0027	1.3879	0.0548	0.1350	0.0044	1059	74.1	884	23.3	816	25.1	92
2	46.8	152	295	0.52	0.0665	0.0024	1.1861	0.0444	0.1302	0.0042	833	74.8	794	20.6	789	23.7	99
3	92.0	321	545	0.59	0.0660	0.0022	1.2437	0.0422	0.1377	0.0042	806	65.7	821	19.1	832	23.6	98
4	55.7	188	342	0.55	0.0650	0.0023	1.1748	0.0414	0.1327	0.0039	774	78.7	789	19.3	803	22.5	98
5	44.3	187	264	0.71	0.0668	0.0026	1.1945	0.0447	0.1320	0.0039	831	79.6	798	20.7	799	22.5	99
6	28.6	80.8	142	0.57	0.0910	0.0057	1.6875	0.0818	0.1429	0.0047	1456	119.8	1004	30.9	861	26.3	84
7	11.48	38.5	69.3	0.56	0.0661	0.0032	1.2036	0.0583	0.1337	0.0042	809	100.8	802	26.8	809	24.0	99
8	66.0	297	378	0.79	0.0756	0.0027	1.3372	0.0454	0.1299	0.0038	1085	70.8	862	19.8	787	21.5	90
9	52.7	172	333	0.52	0.0639	0.0023	1.1417	0.0419	0.1295	0.0038	739	74.8	773	19.9	785	21.5	98
10	50.7	209	300	0.70	0.0710	0.0026	1.2570	0.0458	0.1290	0.0038	967	75.9	827	20.6	782	22.0	94
11	47.2	169	288	0.59	0.0691	0.0024	1.2601	0.0459	0.1309	0.0039	902	73.3	828	20.6	793	22.0	95
12	62.1	284	365	0.78	0.0757	0.0035	1.3847	0.0715	0.1299	0.0039	1087	99.1	882	30.5	787	22.4	88
13	50.0	223	303	0.74	0.0649	0.0024	1.1467	0.0430	0.1266	0.0037	769	77.8	776	20.4	768	20.9	99
14	228.2	1048	1278	0.82	0.0791	0.0029	1.4394	0.0507	0.1304	0.0037	1174	78.2	905	21.1	790	21.3	86
15	64.2	261	413	0.63	0.0684	0.0025	1.1811	0.0428	0.1237	0.0036	880	−123.2	792	19.9	752	20.9	94
16	30.2	122	187	0.65	0.0722	0.0030	1.2683	0.0523	0.1255	0.0039	991	84.1	832	23.4	762	22.3	91
17	65.7	220	381	0.58	0.0778	0.0030	1.4537	0.0522	0.1344	0.0039	1143	75.9	911	21.6	813	22.2	88
18	34.6	133	204	0.65	0.0779	0.0033	1.4371	0.0559	0.1318	0.0039	1143	84.1	905	23.3	798	22.2	87
19	39.72	132	262	0.50	0.0663	0.0026	1.1816	0.0457	0.1281	0.0037	817	75.0	792	21.3	777	21.4	98
20	77.0	101	214	0.47	0.3091	0.0431	8.4132	1.2628	0.1783	0.0071	3516	216.7	2277	136.2	1058	38.7	26
21	118.4	398	750	0.53	0.0713	0.0034	1.2296	0.0453	0.1244	0.0037	965	98.2	814	20.6	756	21.0	92
22	54.2	231	315	0.73	0.0718	0.0034	1.2343	0.0475	0.1250	0.0037	989	96.3	816	21.6	759	21.3	92
23	23.91	91.7	149	0.61	0.0667	0.0029	1.1492	0.0475	0.1240	0.0037	828	85.0	777	22.4	754	21.1	96
24	92.3	399	580	0.69	0.0659	0.0022	1.1392	0.0410	0.1238	0.0037	1200	70.4	772	19.5	752	21.2	97
25	61.7	598	843	0.71	0.1837	0.0080	1.0429	0.0473	0.0406	0.0013	2687	71.9	725	23.5	257	8.2	4
26	49.2	156	277	0.56	0.0999	0.0048	1.7430	0.0809	0.1262	0.0039	1622	90.0	1025	30.0	766	22.6	71
27	28.51	83.1	170	0.49	0.0788	0.0043	1.3642	0.0651	0.1257	0.0039	1169	107.4	874	28.0	763	22.6	86
28	50.3	171	317	0.54	0.0682	0.0024	1.1962	0.0440	0.1264	0.0038	874	74.1	799	20.3	767	21.8	95
29	63.7	261	356	0.73	0.0904	0.0032	1.6008	0.0574	0.1275	0.0038	1435	67.1	971	22.4	774	21.6	77
30	33.3	112	194	0.58	0.0733	0.0046	1.3113	0.0711	0.1307	0.0045	1020	121.3	851	31.3	792	25.8	92

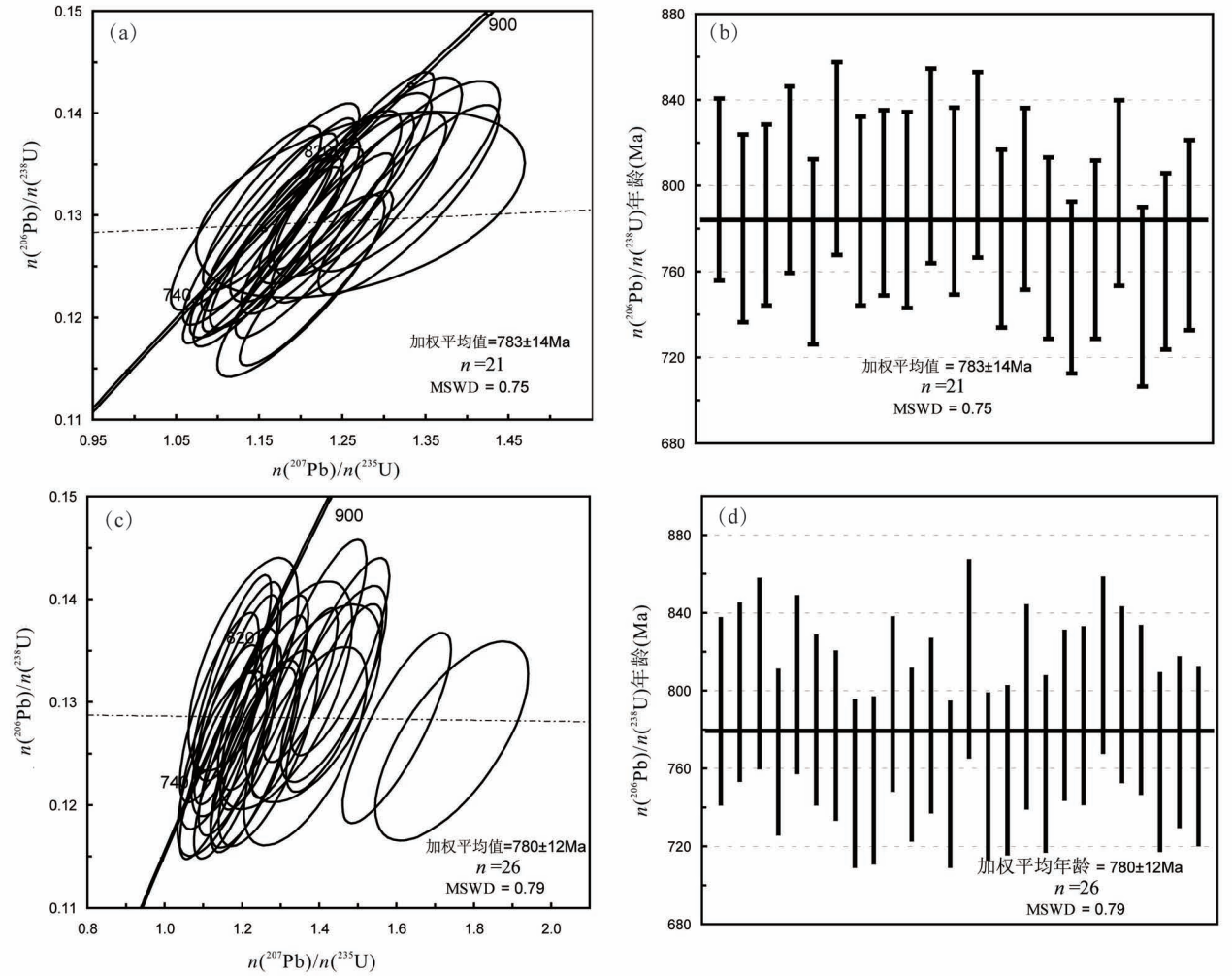


图 6 皖浙赣交界地区灵山岩体和莲花山岩体样品锆石 U-Pb 年龄协和图：(a)、(b)灵山岩体样品锆石 U-Pb 年龄协和图；(c)、(d)莲花山岩体样品锆石 U-Pb 年龄协和图

Fig. 6 The U-Pb Concordia diagram of Zircons from Lingshan Moutain and Lianhua Mountain in Anhui—Zhejiang—Jiangxi border area: (a), (b) The U-Pb Concordia diagram of Zircons from Lingshan granite; (c), (d) The U-Pb Concordia diagram of Zircons from Lianhuashan granite

莲花山岩体的年龄均为不一致线与谐和曲线的上交点年龄，并且误差值较大(薛怀民等，2010)。邓奇等(2016)认为不一致线构成的上交点年龄虽然可以代表锆石的形成年龄，但由于放射性成因铅丢失的复杂性，上交点往往得不到精确年龄。本文通过高精度的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年获得灵山和莲花山的年龄分别为 783±14 Ma、780±12 Ma，这与大多数前人研究的结果接近，表明该地区的岩浆岩形成于新元古代。

本文中灵山岩体的锆石年代学数据显示，存在古元古代的继承锆石，结合以前的锆石 U-Pb 年龄数据和地质资料文献，推测其源岩很有可能是构成基底的中元古代地层或者其相当地层的变沉积岩。

4.2 岩体构造变形特征分析

一般而言，根据花岗岩侵位与区域构造活动的关系，可将其分为构造前、同构造和构造后花岗岩(张进江，1999；谢才富，2002；赵兰等，2006)。花岗岩类侵入体的变形可以发生在岩体形成的不同阶段，既可以发生在岩浆的侵位固结阶段，也可以发生在固态条件下，而每个状态下的变形都有其特别的组构。

区域上，研究地区岩体形态特征表明岩体的形态分布明显是受到断裂带的控制，岩体呈条带状，NE 向雁行排列，长轴与断裂带平行，岩体形态与区域构造协调一致。该地区岩体形态特征与大型走滑带内同构造花岗岩判别标志相符(张进江，1999；王

涛等,2007),揭示了研究区花岗岩体可能是同构造侵位形成的。

通过岩石薄片显微观察到残留的早期岩浆流动机制及组构残迹,如在弱变形区域内,发育有少量较大的长板状自形的长石晶体平行于面理方向定向排列,其内残留的聚片双晶也平行于面理,这种现象表明岩浆流动机制的存在,也暗示了该岩浆在呈“流体”侵位过程中就已经开始受区域构造活动影响,造成岩浆的定向流动(王涛,1998)。

蠕英石作为一种典型的高温变形组构,主要出现于中酸性岩浆岩或中高级变质岩中,尤其是混合岩中。对于蠕英(结构)在花岗质岩石,特别是被剪切变形改造的花岗质岩石中较为发育,但对其成因未获得一致认识。部分学者认为蠕英的生长是在接触变质过程中的稳态加热环境下生成的,但从蠕英石的不对称产出及其分布特点可以认为是固态条件下晶体塑性变形重结晶的产物或亚岩浆状态和高温固态变形阶段交代反应的产物(Cesare et al.,2002 ; Hibbard, 1979; Simpson, 1985; Hopson and Rarnseyer,1990;Vernon,2000)。半固相变形作用可能是蠕英形成的先决条件,虽然变形作用可能并不直接造成蠕英结构的生长,但可以促进蠕英结构的发展(Vernon,2000;曹淑云等,2009)。不论其成因如何,可认为其形成于高温固态或亚固相变形岩石中,能够作为高温变形过程中的一种指示标志(Vernon,1991)。研究区的变形花岗岩中蠕英石普遍发育,由于该地区后期并未经历高温变质作用,基本上可以认为蠕英是在亚岩浆状态下变形的产物,而不是后期变质变形的产物,因此,岩石中蠕英石的广泛发育可以进一步说明岩体在亚岩浆流状态中有受构造变形作用的影响。

本文通过对皖浙赣交界地区变形花岗岩变形特征分析,发现岩石主要为固态塑性变形,宏观构造表现为面理、拉伸线理、不对称旋斑系、S—C 组构的发育等,微观构造主要为矿物的动态重结晶、亚颗粒、核幔构造、不对称旋斑系、书斜构造等。根据矿物组合及重结晶型式定性判断岩石的变形温度在 500℃,应属于高绿片岩相—低角闪岩相环境。

江南造山带出露的地层主要为一套浅变质、强变形的(中)新元古代巨厚沉积—火山岩系,前人通过对该套地层的变质变形环境进行研究,结果表明其变质变形温度在 300~400℃范围内,其变质相相当于低绿片岩相(楼法生等,2000;李民和章泽军,2006),局部地区的地层变质作用较高,如庐山地区星子岩群的变质程度为高绿片岩相至低角闪岩相,明显高于造山带内部其它地区新元古代地层的变质程度,但人们认为其变质作用是中生代岩浆上侵过程中热变质的结果(李中兰等,2007;董树文等,2010;关俊朋等,2010;王继林等,2013)。研究区的岩体类型主要为斑状花岗岩和流纹斑岩,具有浅层、超浅层高就位特征,且岩体的形成年龄多集中在 780 Ma(刘伯根,1997;唐红峰等,1997b;程光华和汪应庚,2000;Li Zhengxiang et al., 2003;吴荣新等,2005; Zheng Yongfei et al.,2008;薛怀民等,2010;徐先兵等;邓奇等,2016;Li Longming et al.,2017)。在一定的变质条件下,岩石的锆石大多会被改造或熔蚀,从而生成变质锆石或热液锆石(李长民,2009)。然而前文对该岩体进行锆石 U-Pb 定年研究时,发现锆石的韵律振荡环带清晰、致密、均匀,且锆石的 Th/U 值均大于 0.4,为典型的岩浆锆石,并未见到锆石经过变质或热液改造作用。岩体变形特征与区域地质资料综合分析,表明岩石的固态塑性变形可能是岩体在冷凝固结过程中叠加区域构造活动的结果。

此外,花岗岩体的侵位年龄与区域变质变形年龄的一致是确定同构造岩体最有力的证据之一(王涛等,2007)。在皖南歙县地区有新元古代花岗闪长岩侵入体,该花岗闪长岩岩体的形成时代为 821±7 Ma(吴荣新等,2005),由于受到后期构造活动影响,该岩体发生糜棱岩化,前人对片该麻状花岗闪长岩进行 Rb-Sr 全岩测年及白云母$^{40}Ar/^{39}Ar$ 测年,均得出其变质年龄为 768 Ma(李应运等,1989;徐备,1992;胡世玲等,1992)。在误差范围内,歙县地区糜棱状花岗闪长岩的动力变质时间与皖浙赣交界地区的花岗岩体侵位是一致的,应该是同一区域构造事件的产物。

综上所述,区域上,岩体呈条带状,NE 向雁行排列,长轴与断裂带平行,岩体形态与区域构造协调一致,表明研究区花岗岩体是受赣东北断裂带的剪切构造活动控制的;微观下,早期岩浆流动组构残迹、蠕英石的普遍发育及固态塑性变形证明了该地区岩体变形经历了从岩浆—亚岩浆—固态变形的一个持续转变的过程;此外,岩体锆石年龄与邻区岩体的变质变形年龄有很好的的耦合性。因此,我们认为研究区新元古代花岗质岩浆的上升与就位直接受断裂带走滑剪切作用的制约,并遭受剪切作用强烈改造,即研究区花岗岩属于同构造花岗岩。

4.3 岩体形成构造环境

对于皖浙赣交界地区的花岗岩体,前人已经做了大量的研究工作,主要集中在年代学和地球化学的研究上,并对其形成的构造环境进行过探讨,然而不同的研究学者对该岩体形成的构造环境有不同的认识。如有部分学者通过地球化学手段认为该地区花岗岩属于 S 型花岗岩,与碰撞造山作用有关,岩体是在碰撞挤压的构造环境下形成的(刘伯根,1997;张国斌和吕绍远,2008);也有学者认为该地区花岗岩属于 A 型花岗岩,与地幔柱引起的裂谷活动或造山后伸展活动有关,岩体是在拉伸的构造环境下侵位形成的(唐红峰等,1997;Li Zhengxiang et al.,2003;邓奇等,2016;Li Longming et al.,2017)。可见,对该岩体的形成构造环境并未形成统一的认识。

本文尝试通过对皖浙赣交界地区的变形花岗岩体进行构造解析,在结合前人对区域构造变形研究资料基础上,从构造地质学的角度来探讨该地区的岩石形成构造环境,这对研究江南造山带、乃至整个华南板块的演化具有重要意义。

本次研究通过对皖浙赣交界地区变形花岗岩构造变形特征进行研究,从宏观与微观变形特征入手,认为该岩体是形成在一个挤压变形的构造环境中。皖浙赣交界地区的岩体受剪切断裂带控制整体呈条带状沿 NE—SW 向分布及岩体中保留的早期岩浆流动组构残迹,板柱状长石晶体定向排列,晶体长轴平行于面理向展布,均能表明该岩体在侵位冷凝过程中受到 NW—SE 向的挤压。

关于该地区岩石的变质变形特征及其形成机制,舒良树等(1996)认为赣东北断裂发生韧性剪切活动的时间为 770 Ma,是发生在碰撞事件的晚期阶段;徐备等(1992)通过对皖南岩石构造变形进行研究认为皖南地区在 768~769 Ma 发生碰撞造山活动;张彦杰等(2010)通过对皖赣相邻鄣公山地区的韧性变形构造带进行了详细的调查研究,并获得该地区片理化闪长岩脉锆石 U-Pb 年龄为 788.0±6.8 Ma,认为该地区的韧性变形带是江南造山带北缘一带遭受强烈的挤压隆升导致的。

综合已有的研究表明,皖浙赣交界地区花岗岩体是在岩浆上升、侵位、冷凝的过程中受到碰撞挤压的构造应力影响而形成的同构造花岗岩,该时期形成的变形的岩浆岩表明江南造山带东段的皖浙赣相邻地区在 780 Ma 前后处于碰撞挤压状态,导致该地区及相邻地区的岩石发生构造变形,这一时期扬子板块与华夏板块可能仍处于汇聚碰撞造山阶段。

5 结论

本文通过对皖浙赣交界地区变形花岗岩体构造变形特征和岩体中 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年代学的研究,可以得出如下结论:

(1)皖浙赣交界地区变形花岗岩体,区域上,受北东向赣东北断裂带控制,呈条带状沿 NE—SW 向雁行排列;微观下岩浆流动构造的残迹、蠕英石的发育及岩石固态塑性变形,表明该地区的新元古代花岗质岩浆的上升与就位直接受断裂带走滑剪切作用的制约,并遭受剪切作用强烈改造,即研究区花岗岩属于同构造花岗岩。

(2)皖浙赣交界地区同构造花岗岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为:灵山岩体为 783±14 Ma;莲花山岩体为 780±12 Ma,均属于新元古代。

(3)皖浙赣交界地区的同构造花岗岩形成于一个挤压、剪切的构造环境中,我们初步认为其可能是扬子板块与华夏板块发生陆陆碰撞的产物。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

曹淑云, 刘俊来, Leiss B, Vollbrecht A,邹运鑫,张春强. 2009. 哀牢山—红河剪切带左行走滑作用起始时间约束——点苍山高温糜棱岩的显微构造与热年代学证据. 地质学报, 83(10): 1388~1400.

程光华,汪应庚.2000.江南东段构造格架.安徽地质,10(1):1~8.

邓国辉,罗春林,楼法生,廖六根,凌联海.2002.德兴—黄山断裂带及其邻区的地质研究进展.资源调查与环境,23(4):250~256.

邓奇, 王剑,汪正江,崔晓庄,施美凤,杜秋定,马龙,廖世勇,任光明.2016.江南造山带新元古代中期(830~750 Ma)岩浆活动及对构造演化的制约.大地构造与成矿学,40(4):753~771.

丁孝忠,高林志,刘燕学,韩坤英,庞健峰.2013.江南古陆新元古代地层格架及年代学制约.地层学杂志, 37(4): 626~627.

董树文, 薛怀民, 项新葵, 马立成. 2010. 赣北庐山地区新元古代细碧—角斑岩系枕状熔岩的发现及其地质意义. 中国地质, 37(4):1021~1033.

关俊朋, 何斌, 李德威. 2010. 庐山地区星子群碎屑锆石 SIMS U-Pb 年龄及其地质意义. 大地构造与成矿学, 34(3):402~407.

胡世玲, 邹海波, 周新民. 1992.江南元古宙碰撞造山带的两个$^{40}Ar/^{39}Ar$年龄值.科学通报,37(3): 286~286.

纪沫, 胡玲, 刘俊来, 曹淑云. 2008. 主要造岩矿物动态重结晶作用及其变质条件. 地学前缘, 15(3):226~233.

李长民. 2009. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述.地质调查与研究,32(3):161~174.

李民, 章泽军. 2006. 江南隆起带褶皱基底变质变形温压条件研究. 地球学报, 27(6):543~550.

李应运, 徐祥, 邢凤鸣. 1989.皖南前寒武纪花岗岩类中片麻状构造的成因. 地质科学, (1): 59~66.

李中兰, 崔学军, 王冉, 夏斌, 徐力峰, 杨巍然等. 2007. 庐山星子地

区中生代构造—岩浆事件与赣江断裂多期活动的关系. 岩石学报, 23(4):839~848.
刘伯根.1997.浙西石耳山超单元花岗岩演化特征及成因浅析. 浙江地质, 13(1):39~46.
楼法生, 章泽军, 杨建国. 2000.赣西北双桥山群岩石变质变形温压条件分析. 华南地质与矿产,(2):16~21.
陆慧娟,华仁民,毛光周,龙光明.2007.赣东北地区岩浆岩同位素年代学研究及地质演化.地质论评,53(2):207~216.
任留东, 韩景仪.2006.南极中山站区高级片麻岩中蠕英石的形成.中国地质,33(6): 1226~1235.
史志刚. 2014. 江西庐山地区新元古代地层与构造演化研究. 导师:李廷栋,中国地质科学院博士学位论文:44~45.
唐红峰,张光辉,周新民,刘伯根.1997.一个造山后花岗岩基:石耳山花岗岩的形成时代和成因.南京大学学报(自然科学版),33(4):587~595.
王继林, 何斌, 关俊朋. 2013.江西庐山地区星子群变质时代及变质机制探讨. 大地构造与成矿学, 37(3):489~498.
王涛, 王晓霞, 李伍平. 1998.秦岭杂岩中牛角山花岗质古深成岩体变形作用的初步研究及其构造意义.地球科学与环境学报,20(3): 5~10.
王涛,王晓霞,郑亚东,洪大卫,王新社.2007.花岗岩构造研究及花岗岩构造动力学刍议.地质科学,42(1): 91~113.
吴荣新,郑永飞,吴元保.2005.皖南石耳山新元古代花岗岩锆石 U-Pb 定年以及元素和氧同位素地球化学研究.高校地质学报,11(3): 364~382.
吴荣新,郑永飞,吴元保.2007.皖南新元古代井潭组火山岩锆石 U-Pb 定年和同位素地球化学研究.高校地质学报,13(2):282~296.
吴新华,楼法生,刘益辉.2004.江南复合混杂岩带基本特征.资源调查与环境,25(1): 45~54.
吴元保, 郑永飞. 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约.科学通报,49(16): 1589~1604.
向必伟,朱光,王勇生,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.
谢才富.2002.同构造花岗岩的一种显微构造标记.岩石矿物学杂志(2): 179~185.
徐备,郭令智,施央申.1992.皖浙赣地区元古代地体和多期碰撞造山带.北京:地质出版社.
徐先兵,汤帅,李源,章泽军.2015.江南造山带东段新元古代至早中生代多期造山作用特征.中国地质,42(1):33~50.
薛怀民,马芳,宋永勤,谢亚平.2010.江南造山带东段新元古代花岗岩组合的年代学和地球化学:对扬子与华夏地块拼合时间与过程的约束.岩石学报,26(11):3215~3244.
杨坤光,刘强.2002.花岗岩构造与侵位机制研究进展.地球科学进展,17(4): 546~550.
余心起,江来利,许卫,邱瑞龙,杜建国,戴圣潜.2007.皖浙赣断裂带的界定及其基本特征.地学前缘,14(3):102~113.
张桂林.1996.韧性剪切带中 S—C(C′)组构的成因及其运动学意义.桂林工学院学报, (4): 338~343.
张国斌,吕绍远.2008.皖南浅变质岩区的构造演化及矿产分布规律.大地构造与成矿学,32(4): 509~515.
张进江.1999.大型走滑带内同构造花岗岩的判别标志.地质科技情报,18(4): 23~26.
张彦杰,廖圣兵,周效华,王存智,蒋仁,朱意萍.2010.江南造山带北缘郭公山地区新元古代地层构造变形特征及其动力学机制.中国地质,37(4): 978~994.
赵兰,张进江,刘树文.2006.龙泉关韧性剪切带同变形花岗岩的构造特征及其独居石定年.地质学报,80(12): 210~218.
Altenberger U, Wilhelm S. 2000. Ductile deformation of K-feldspar in dry eclogite facies shear zones in the bergen arcs, norway. Tectonophysics, 320(2): 107~121.
Andersen D J, Lindsley D H, Davidson P M. 1993. QUILF: a Pascal program to assess equilibria among Fe—Mg—Mn—Ti oxides, pyroxenes, olivine, and quartz. Computers and Geosciences, 19: 1333~1350.
Berthé D, Choukroune P, Jegouzo P. 1979. Orthogneiss, mylonite and non coaxial deformation of granites: the example of the south armorican shear zone. Journal of Structural Geology, 1(1):31~42.
Cao Shuyun, Liu Junlai, Leiss B, Vollbrecht A, Zou Yunxin, Zhao Chunqiang. 2009&. Timing of Initiation of left-lateral slip along the Ailaoshan—Red River shear zone: microstructural, texture and thermochronological evidence from high temperature mylonites in Diancangshan, SW China. Acta Geologica Sinica, 83(10):1388~1400.
Cates A E, Clover L. 1989. Alleghanian tectono—themal evolution of thedextral transcurrent hylas zone, Virginia Piedmont, USA. Journal of Structure Geology, 11:407~419.
Cesare B, Marchesi C, Connolly J A D. 2002. Growth of myrmekite coronas by contact metamorphism of granitic mylonites in the aureole of cima di vila, eastern alps, Italy. Journal of Metamorphic Geology, 20(1): 203~213.
Cheng Guanghua, Wang Yinggeng. 2000&. The structural framework of the eastern section of Jiangnan orogen, Geology of Anhui, 10(1): 1~8
Daalen M V, Heilbronner R, Kunze K. 1999. Orientation analysis of localized shear deformation in quartz fibres at the brittle—ductile transition. Tectonophysics, 303(1~4): 83~107.
Deng Guohui, Luo Chunlin, Lou Fasheng, Liao Liugen, Ling Lianhai. 2002&. Recent developments in studying geology of Dexing—Huangshan fault zone and its adjacent areas. Resources Survey & Environment, 23(4): 250~256.
Deng Qi, Wang Jian, Wang Zhengjiang, Cui Xiaozhuang, Shi Meifeng, Du Qiuding, Ma Long, Liao Shiyong, Ren Guangmei. 2016&. Middle Neoproterozoic magmatic activities and their constraints on tectonic evolution of the Jiangnan orogen. Geotectonica et Metallogenia, 40(4):753~771.
Ding Xiaozhong, Gao Zhilin, Liu Yanxue, Han Kunying, Pang Jianfeng. 2013&. Neoproterozoic stratigraphic framework and chronology in Jiangnan ancient land. Journal of Stratigraphy, 37(4):626~627.
Dong Shuwen, Xue Huaimin, Xiang Xinkui, Ma Licheng. 2010&. The discovery of Neoproterozoic pillow lava in spilite—ceratophyre of Lushan area, northern Jiangxi Province, and its geological significance. Geology in China, 37(4):1021~1033.
Gapais D. 1989. Shear structures within deformed granites: mechanical and thermal indicators. Geology, 17(17): 1144~1147.
Guan Junpeng, He Bin, Li Dengcheng. 2010&. SIMS U-Pb dating of the detral zircons from the Xingzi Group in Lushan area and its geological significance. Geotectonica et Metallogenia, 34(3):402~407.
Hibbard M J. 1979. Myrmekite as a marker between preaqueous and postaqueous phase saturation in granitic systems: discussion and replyc. Geological Society of America Bulletin, 91(11): 673.
Hopson R F, Rarnseyer K. 1990. Cathodoluminescence microscopy of myrmekite. Geology, 18(4): 336~339.
Hu Shiling, Zhou Haibo, Zhou Xinmin.1992#. Two Neoproterozoic ages of $^{40}Ar/^{39}Ar$ in Jiangnan orogen, Chinese Science Bulletin, 37(3): 286~286.
Ji Mo, Hu Ling, Liu Junlai, Cao Shuyun. 2008&. Dynalllic recrystallization and metamorphic conditions of main rock-forming

minerals. Earth Science Frontiers, 15(3): 226~233.

Lafranee B, John E, Frost B R. 1998. Ultrahigh-temperature and subsolidus shear zones: example from the Poe Moutain anoahosite, Wyoming. Journal of Structure Geology: 945~955.

Li Changmin. 2009&. A review on themineragey and microamalytical dating techniques of zircons. Geological Survey and Research, 33(3): 161~174.

Li Longming, Lin Shoufa, Xing, Guangfu, Jiang, Yang Xia Xiaoping. 2017. Geochronology and geochemistry of volcanic rocks from the Jingtan Formation in the eastern Jiangnan orogen, south China: constraints on petrogenesis and tectonic implications. Precambrian Research, 309(6): 166~180.

Li Min, Zhang Zejun. 2006&. The metamorphic deformational temperature—pressure condition of the folded basement inJiangnan uplift, Acta Geoscientica Sinica, 17(6): 543~550.

Li Yingyun Xu Xiang Xing Fengming. 1989&. Genesis of gneissic structure of the Precambrian granitoids in southern Anhui province. Scientia geologica Sinica, (1): 59~66.

Li Zhengxiang, Li Xianhua, Kinny, P D, Wang Jian, Zhang, S, Zhou, H. 2003. Geochronology of neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, south China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up rodinia. Precambrian Research, 122(1~4): 85~109.

Li Zhonglan, Cui Xuejun, Wang Ran, Xia Bin, Xu Lifeng, Yang Weiran, Zeng Zuoxun Jian Ping. 2007&. Relationship between the Cenozoic tectono-magmatic events in Xingzi area, Lushan and the multiphase activities of Ganjiang fault zone. Acta Petrologica Sinica, 23(4): 839~848.

Liu Bogen. 1997&. Analysis on the evolutionary features and origin of Shiershan superunit granite in western Zhejiang. Geology of Zhejiang, 13(1): 39~46.

Liu Yongsheng, Gao Shan, Hu Zhaochu, Gao Changgui, Zong Keqing, Wang Dongbing. 2010a. Continental and oceanic crust recycling-induced melt—peridotite interactions in the trans-north China orogen: U-Pb dating, hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. Journal of Petrology, 51(51): 392~9.

Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, Detlef G, Xu Juan, Gao Changgui, Chen Haihong . 2008a. In situ, analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. Chemical Geology, 257(1~2): 34~43.

Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zong Keqing, Gao Changgui, Gao Shan. 2010b. Reappraisement and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS. Chinese Science Bulletin, 55(15): 1535~1546.

Lou Fasheng, Zhang Zejun, Yang Jianguo. 2000&. Metamorphic and deformational temperature—pressure condition for the Shuangqiaoshan group in northwestern Jiangxi Province, Geology and Mineral Resources of South China, (2): 16~21.

Lu Huijuan, Hua Renmin, Mao Guangzhou, Long Guangming. 2007&. Isotope geochronological study of igneous rocks in northeastern Jiangxi Province and its implication to geology evolution. Geological Review, 53(2): 207~216.

Mamtani M A, Greiling R O. 2005. Granite emplacement and its relation with regional deformation in the aravalli mountain belt (India)—inferences from magnetic fabric. Journal of Structural Geology, 27(11): 2008~2029.

Michel-Lévy A M. 1874. Structure microscopique des roches acides anciennes. Société Française de Minéralogie et de Cristallographie, Bulletin, 3: 201~222.

Njanko T, Nédélec A, Kwékam M, Siqueira R, Esteban L. 2010. Emplacement and deformation of the fomopéa pluton: implication for the Pan-African history of western Cameroon. Journal of Structural Geology, 32(3): 306~320.

Passchier C W, Trouw R A J. 2005. Microtectonics. Berlin: Springer: 36~45.

Paterson S R, Vernon R H, Tobisch O T. 1989. A review of criteria for identification of magmatic and tectonic foliations in granitoids. Journal of Structural Geology, 11(3): 349~363.

Pryer L. 1993. Microstructures in feldspars from a major crustal thrust zone: the Grenville front, Ontario, Canada. Journal of Structural Geology, 15(1): 21~36.

Ren Liudong, Han Jingyi. 2006&. Origin of myrmekite in high-grade gneiss in the Zhongshan Station area, East Antarctica. Geology in China, 33(6): 1226~1235.

Shi Zhigang. 2014&. Neoproterozoic strata and tectonic evolution in Lushan area, Jiangxi Province. Supervisor: Li Tingdong. Doctoral dissertation of Chinese Academy of Geological Sciences: 44~45.

Shu Liangshu, Charvet J. 1996. Kinematics and geochronology of the Proterozoic Dongxiang—Shexian ductile shear zone: with HP metamorphism and ophiolitic melange (Jiangnan region, south China). Tectonophysics, 267(1~4): 291~302.

Simpson C. 1985. Defomation of gmnitic rocks across the brittle—ductiletransition. Joumal of Structure Geology, 7(5): 503~511.

Stipp M, Stünitz H, Heilbronner R, Schmid S M. 2002. The eastern tonale fault zone: a "natural laboratory" for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700℃. Journal of Structural Geology, 24(12): 1861~1884.

Tang Hongfeng, Zhang Guanghui, Zhou Xinming, Liu Bogen. 1997&. A post-orogenic granite batholith: the age and genesis of Shiershan granite. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 33(4): 587~595.

Vernon R H. 1991. Questions about myrmekite in deformed rocks. Journal Structral Geology, 13(9): 979~985.

Vernon R H. 2000. Review of microstructural evidence of magmatic and solid-state flow. Visual Geosciences, 5(2): 1~23.

Wang Jilin, He Bin, Guan Junpeng. 2013&. Study on age and mechanism of the metamorphism of the Xingzi Group in the Lushan area, Jiangxi province. Geotectonica et Metallogenia, 37(3): 489~498.

Wang Tao, Wang Xiaoxia, Li Wuping. 1998&. A preliminary study on deformations of the Niujiaoshan granitiod pluton in the Qinling complex and its significance. Journal of Xi'an Engineering University, 20(3): 5~10.

Wang Tao, Wang Xiaoxia, Zheng Yadong, Wang Xinshe. 2007&. Studies on structures of granitic plutons and granitic tectonic dynamics. Chinese Journal of Geology, 42(1): 91~113.

Wang Xiaolei, Shu Liangshu, Xing Guangfu, Zhou Jincheng, Tang Ming, Shu Xujie, Qi Liang, Hu Yanhua. 2012. Post-orogenic extension in the eastern part of the Jiangnan orogen: evidence from ca 800~760 Ma volcanic rocks. Precambrian Research, 222~223: 404~423.

Wu Rongxin, Zheng Yongfei, Wu Yuanbao. 2005&. Zircon U-Pb age, element and oxygen isotopegeochemisty of Neoproterozoic granites at Shiershan in south Anhui Province. Geological Journal of China Universities, 11(3): 364~382.

Wu Rongxin, Zheng Yongfei, Wu Yuanbao. 2007&. Zircon U-Pb age and isotope geochemistry of Neoproterozoic Jingtan volcanics in South Anhui. Geological Journal of China Universities, 13(2): 282~296.

Wu Xinhua, Luo Fasheng, Liu Yihui. 2004&. The basic feature of

Jiangnan recombination melange belt. Resources Survey & Environment, 25(1):45~54.

Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004#. Study on the origin of zircon mineralogy and its restriction on interpretation of U-Pb age. Chinese Science Bulletin, 49(16): 1589~1604.

Xiang Biwei, Zhu Guang, Wang Yongsheng, Hu Zhaoji. 2007&. Mineral deformation thermometer for mylonitization. Advances in Earth Science, 22(2):126~135.

Xie Caifu. 2002&. A microstructure marker of syntectonic granitoids. Acta Petrologica et Mineralogica, 21(2):179~185.

Xu Bei, Guo Lingzhi, Shi Yangshen. 1992&. The Proterozoic Landmass and Multistage Collisional Orogenic Belt in Anhui—Zhejiang—Jiangxi Area. Beijing: Geological Publishing House.

Xu Xianbing, Tang Shuai, Li Yuan, Zhang Zejun. 2015&. Characteristics of Neoproterozoic—Early Mesozoic multiphase orogenic activities of eastern Jiangnan orogen. Geology in China, 42(1): 33~50.

Xue Huaimin, Ma Fang, Song Yongqin, Xie Yaping. 2010&. Geochronology and geochemisty of the Neoproterozoic granitoid association from eastern segment of the Jiangnan orogen, China: Constraints on the timing and process of amalgamation between the Yangtze and Cathaysia blocks. Acta Petrologica Sinica, 26(11): 3215~3244.

Yang Kunguang, Liu Qiang. 2002&. Advances in granitic structures and emplacement mechanisms. Advance in Earth Sciences, 17(4): 546~550.

Yao Jinglong, Shu Liangshu, Santosh M, Li J. 2013. Geochronology and Hf isotope of detrital zircons from Precambrian sequences in the eastern Jiangnan orogen: constraining the assembly of Yangtze and Cathaysia blocks in south China. Journal of Asian Earth Sciences, 74(18):225~243.

Yu Xinqi, Jiang Laili, Xu Wei, Qiu Ruilong, Du Jianguo, Dai Shengqian. 2007&. Identification and basic characteristics of the Anhui—Zhejiang—Jiangxi fault zone. Earth Science Frontiers, 14(3):102~113.

Zhang Guilin. 1996. Geneses of S—C(C') fabrics kinematic significance in ductile shear zone. Journal of Guilin Institute of Technology, 16(4): 338~343.

Zhang Guobin, Lü Shaoyuan. 2008&. The tectonic evolution of lower-metamorphic rocks and the distribution district of mineral in south Anhui. Geotectonica et Metallogenia, 32(4):509~515.

Zhang Jinjiang. 1999&. Indicators for syntectonic granites in large scale strike slip zone. Geologicalence & Technology Information, 18(4): 23~26.

Zhang Yanjie, Liao Shengbing, Zhou Xiaohua, Wang Cunzhi, Jiang Ren, Zhu Yiping. 2010&. Structural deformation features and dynamic mechanism of Neoproterozoic strata in Zhanggongshan area, northern margin of the Jiangnan orogen. Geology in China, 37(4): 978~994.

Zhao Lan, Zhang Jinjiang, Liu Shuwen. 2006&. Syn-deformational granites of the Longquanguan ductile shear zone and their monazite electronic microprobe dating. Acta Petrologica et Mineralogica, 80(12): 210~218.

Zheng Yongfei, Wu Rongxin, Wu Yuanbao, Zhang Shaobing, Yuan Honglin, Wu Fuyuan. 2008. Rift melting of juvenile arc-derived crust: geochemical evidence from neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan orogen, south China. Precambrian Research, 163(3):351~383.

Deformational Characteristics and LA-ICP-MS Zircon U-Pb Ages of Granites at Shiershan in the Jiangnan Orogen and Their Geological Significance

WANG Yangyang[1)], SONG Chuanzhong[1)], LI Jiahao[1)], LI Zhenwei[1)], YUAN Fang[1)], REN Shenglian[1)], LIN Shoufa[1,2)], WANG Wei[3)], GE Yanpeng[1)], LI Zhenqiang[1)]

1) *School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009, China;*

2) *Department of Earth and Sciences, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, N2L3G1, Canada;*

3) *Key Laboratory of nuclear resources and environment of Donghua University of science and technology, Nanchang, 330013, China*

Objectives: There are a large number of deformational granites at the junction of Anhui, Zhejiang, and Jiangxi province in the eastern part of the Jiangnan orogen. A lot of researches have been done by the isotope chronology and geochemistry on the granites. However, the structural deformation characteristics of the granites are little investigated. In this research, we focus on the deformational characteristics and geochronology of granites and their regional geological significant.

Methods: On the basis of detailed field work, the structural analysis and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating are carried out on the granites.

Results: The granites distribute in NE direction and parallel to the northeastern Jiangxi deep-fracture zone. A lot of structures, such as foliation and mineral lineation of mylonite, rotated porphyroblast and S—C fabrics, indicated that the granites had been suffered ductile shearing. Meanwhile, widely developed of the remnants of early magma flow, myrmekite and solid plastic deformation truly recorded the process of semi-solid flow and deformation of the granites. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of two samples is 783 ± 14 Ma and 780 ± 12 Ma, indicating that formation of granites in this region is about at 780 Ma. These ages are in accordance with ages of

regional metamorphic and deformation.

Conclusion: The results show that the granites at the junction of Anhui, Zhejiang, and Jiangxi are syntectonic. They are affected by the ductile shearing in the process of magmatic emplacement—condensation. They are the products of the collision between Yangtze Plate and Cathaysian Plate.

Keywords: Jiangnan orogenic belt; plate convergence; syntectonic granite; zricon U-Pb dating

Acknowledgements: This research was support by the China Geological Survey Projects (No.DD20160082) and the National Natural Science Foundation of China(No.41272222)

First author: WANG Yangyang, male, born in 1988, a doctoral candidate of Hefei University of Technology and majored in structural geology. Email:1986175647@qq.com

Corresponding author: SONG Chuanzhong, male, born in 1954, a professor of Hefei University of Technology, mainly engaged in the teaching and research of structural geology. Email:czsong69@163.com

Manuscript received on: 2018-01-27; Accepted on: 2018-07-20; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2019.01.007

(上接第 64 页)

刊名	核心被引频次	影响因子	刊名	核心被引频次	影响因子	刊名	核心被引频次	影响因子
海洋环境科学	1253	0.580	泥沙研究	845	0.446	西北地质	746	0.322
物探与化探	1359	0.578	科技导报	1839	0.439	新疆地质	792	0.303
海洋测绘	745	0.560	热带海洋学报	901	0.433	Chinese Journal of		
非金属矿	714	0.556	长安大学学报(自)	871	0.432	Oceanology and	531	0.281
同济大学学报(自)	2544	0.547	西安石油大学学报(自)	756	0.423	Limnology		
海洋科学进展	676	0.545	古生物学报	617	0.419	矿产勘查	399	0.273
海相油气地质	559	0.545	海洋地质前沿	529	0.418	合肥工业大学学报(自)	1163	0.263
海洋地质与第四纪地质	1597	0.544	地下空间与工程学报	1587	0.408	古脊椎动物学报	341	0.262
中山大学学报(自)	1095	0.542	矿产综合利用	467	0.405	Acta Oceanologica Sinica	432	0.261
地震研究	591	0.538	中国科学院大学学报	491	0.402	Journal of Ocean	275	0.260
矿产保护与利用	447	0.536	海洋湖沼通报	582	0.396	University of China		
西南石油大学学报((自))	1870	0.530	应用海洋学学报	611	0.393	矿产与地质	687	0.255
大地测量与地球动力学	1453	0.511	中国海洋大学学报(自)	1591	0.391	盐湖研究	316	0.253
云南大学学报(自)	703	0.510	中国矿业	1486	0.390	昆明理工大学学报(自)	461	0.238
中南大学学报(自)	3768	0.508	工程勘察	877	0.384	华北地震科学	225	0.229
地震	536	0.500	海洋学研究	377	0.373	地质找矿论丛	416	0.216
金属矿山	2438	0.497	西北大学学报(自)	859	0.371	地质与资源	431	0.208
极地研究	365	0.496	地震工程与工程振动	1584	0.370	黄金	644	0.196
矿冶	636	0.494	震灾防御技术	306	0.369	福州大学学报(自)	371	0.193
华南地震	244	0.492	北京师范大学学报(自)	767	0.365	世界地震工程	600	0.181
China Ocean Engineering	326	0.479	中国锰业	326	0.363	粉煤灰综合利用	214	0.175
Geosceince Frontiers	251	0.479	微体古生物学报	337	0.359	铀矿冶	149	0.169
水文	821	0.470	海洋工程	605	0.351	中国科学技术大学学报	496	0.166
贵金属	282	0.466	海洋预报	389	0.350	物探化探计算技术	406	0.166
石油化工	1369	0.459	北京大学学报(自)	453	0.344	贵州大学学报(自)	281	0.165
地球环境学报	94	0.458	海洋技术学报	449	0.339	岩土工程技术	151	0.117
地质力学学报	556	0.451	桂林理工大学学报	504	0.336	Advances in Polar Science	21	0.029

注:① 数据来源:中国科学技术信息研究所.2018.中国科技期刊引证报告(核心版)(自然科学卷).北京:科学技术文献出版社.② 本表按影响因子降序排列。某期刊 2017 年度的影响因子 = $\frac{\text{该期刊 2016 和 2015 年发表文章被统计源期刊于 2017 年度引用的总次数}}{\text{该期刊 2016 和 2015 年发表文章总篇数}}$。影响因子是期刊影响力的重要指标之一,但与期刊学术水平,特别是与期刊所载各别论文的学术水平没有关联。某篇论文是否高被引与多因素有关,学术水平高低不一定是主因。③ 刊名中的"(自)"是指"自然科学版"。④ 未包括台湾、香港和澳门地区的期刊。

Editorial Department of *Geological Review*: 2017's Impact Factors and Total Citation of the Main Chinese Academic Core Periodicals Related to Geology