

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*

薛怀民¹ 马芳² 宋永勤³ 谢亚平⁴

XUE HuaiMin¹, MA Fang², SONG YongQin³ and XIE YaPing⁴

1. 中国地质科学院地质研究所,北京 100037

2. 北京大学地球与空间科学学院,北京 100871

3. 浙江省地质矿产研究所,杭州 310007

4. 安徽省地质矿产局 332 地质队,屯溪 245000

1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

3. Zhejiang Institute of Geology and Mineral Resources, Hangzhou 310007, China

4. 332 Team, Bureau of Geology and Mineral Resources of Anhui Province, Tunxi 245000, China

2010-04-29 收稿, 2010-06-21 改回.

Xue HM, Ma F, Song YQ and Xie YP. 2010. Geochronology and geochemistry 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

Abstract There are a series of Neoproterozoic granitoids developed in eastern segment of the Jiangnan orogen, LA-ICP-MS zircon U-Pb ages and whole-rock geochemical compositions were determined for those main granitoid intrusions, including Xucun body, Shexian body, Xiuning body, Lingshan body, Lianhuashan body and Shi'ershan body. The granitoid intrusions in the region can be classified into S-type and A-type in petrology and geochemistry, and the former belong to synorogenic magmatic rocks and are mainly granodioritic in component, while the latter belong to late-orogenic magmatic rocks and are granitic in component. The S-type granodioritic magma was generated by partial melting of immature metamorphic sedimentary-volcanic rock series under dynamic background of collision and crust thicken. But from synorogenic to late-orogenic stages, along with the stress changed from extrusion to extension, the A-type granites formed include obvious mantle-derived matter. The two types intrusions distributed regularly in space, show obvious southward (ocean side) migration with time. The synorogenic S-type granodioritic intrusions are all located at the north of the South Anhui suture belt (and inside the suture zone), the Xucun intrusion of S-type granodiorite, situated at the most north part, has the earliest emplacement age of 850 ± 10 Ma; Shexian intrusion of S-type granodiorite, which located inside the Anhui suture zone and has the feature of syntectonic, has the emplacement age of 838 ± 11 Ma; and also located inside the suture zone but has the feature of late tectonic, the Xiuning intrusion of S-type granodiorite has the intrusion age of 826 ± 6 Ma. Whereas late-orogenic A-type granites are all located at the south of the suture zone, emplacement ages for Lingshan and Lianhuashan A-type granites are 823 ± 18 Ma and 814 ± 26 respectively, the two ages are consistent each other considering the errors, and can represent as the time of late-orogenic stage magmatism. The Shi'ershan granite-porphry formed in post-orogenic rift setting has the emplacement age of 785 ± 11 Ma. We consider that the Jiangnan orogen formed in Neoproterozoic era, with characteristics of poly-island arcs amalgamation and poly-sutures. The closing times for different sutures are difference, the earliest closing suture may be the Northeast Jiangxi suture, followed by the Jiangshan-Shaoxin suture, the South Anhui suture was final closed. The arc-type volcanic rocks related with different suture are difference in geochemistry, the two former were developed on oceanic crust background, while the latter was formed on immature continental crust. The Jiangnan orogen had been destroyed by post-orogenic rifting before long it formed, just up to the telophase of Early Paleozoic, the rift between the Yangtze and Cathaysia cratons had final been closed and formed unionized continent of South

* 本文受中国地质调查项目(1212010811048)资助。

第一作者简介:薛怀民,男,1962年生,研究员,主要从事岩石学与地球化学研究,E-mail:huaiminx@sina.com

China.

Key words Zircon dating; Neoproterozoic; S-type granite; A-type granite; Jiangnan orogen; Yangtze craton

摘要 江南造山带东段发育了一系列新元古代的花岗岩类侵入体,本文用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法对区内出露的主要岩体(包括许村岩体、歙县岩体、休宁岩体、灵山岩体、莲花山岩体、石耳山岩体)进行了定年,并分析了这些岩体代表性样品的主量和微量元素含量。结果表明,区内的花岗岩类侵入体分属 S-型和 A-型两类,前者属于同造山的岩浆岩,成分主要为花岗闪长质;后者为晚造山的岩浆岩,成分为花岗质。S-型花岗闪长质岩浆是在碰撞、地壳加厚后由不成熟的变质沉积-火山岩系经减压熔融形成的。由同造山到晚造山阶段,随着地壳应力由挤压转为拉张,所形成的 A-型花岗岩中有明显的新生地幔物质的加入。两类岩体的空间分布有明显的规律,且随时间具有明显的向南(大洋侧)迁移的趋势。同造山的 S-型花岗闪长质侵入体均分布在皖南蛇绿混杂岩带的北侧(及缝合带内),其中空间位置最北突的许村岩体的侵位时间最早,为 $850 \pm 10\text{Ma}$;位于皖南蛇绿混杂岩带内,具有同构造特点的歙县岩体的侵位时间为 $838 \pm 11\text{Ma}$;同样侵位于该缝合带内,具有晚构造特点的休宁岩体的侵位时间为 $826 \pm 6\text{Ma}$ 。而晚造山的 A 型花岗岩均分布在该缝合带的南侧,其中灵山岩体和莲花山岩体的侵位年龄分别为 $823 \pm 18\text{Ma}$ 和 $814 \pm 26\text{Ma}$,两者的侵位时间在误差范围内一致。后造山裂谷环境下形成的石耳山花岗岩斑岩的年龄为 $785 \pm 11\text{Ma}$ 。我们认为江南造山带形成于新元古代,造山过程具有多岛弧拼贴、多缝合的特点。不同缝合带上洋盆闭合的时间存在着差异,最早闭合的可能是赣东北带(蛇绿岩套)、其次是江山-绍兴带,最后是皖南带(歙县蛇绿岩套)。不同缝合带上发育的岛弧型火山岩在地球化学性质上存在着明显的差异,前两者是在洋壳基础上发育起来的,而后者是在不成熟的陆壳基础上发育起来的。江南造山带形成后不久,其南侧即遭受到后造山裂谷(南华裂谷系?)作用的破坏,只是到了早古生代末期(加里东期)扬子克拉通与华夏地块之间的裂谷才最终闭会形成华南统一大陆。

关键词 锆石定年;新元古代;S 型花岗岩;A 型花岗岩;江南造山带;扬子克拉通**中图法分类号** P597.3

江南造山带是指露于扬子板块与华夏板块之间,主要由一套浅变质、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的地质构造单元,它呈弧形跨越了桂北、黔东、湘西、湘北、赣北、皖南和浙北的广大区域(图 1a),制约着我国南方显生宙以来地质构造的演化。对于该造山带的构造属性一直有着不同的认识,且目前依然处于争论之中,对此的名称表述也较繁多。早先一部分学者持古陆的观点,如黄汲清(1945)最早将它称为“江南古陆”,或“江南-雪峰古陆”、“江南地轴”(黄汲清,1954)。郭令智先后将此称为“江南地背斜”(郭令智等,1963)、古岛弧褶皱带(郭令智等,1980),并在此基础上进一步分出了几个不同的地体(郭令智等,1984)。陈冠宝等(1998a)从岩石学、岩石地球化学、生物地层学 and 同位素地质等方面也论证它是一个造山带,而不是古陆。对于造山作用的年代,大多学者持新元古代的观点(如水涛等,1986;徐备,1990;程海,1991;马长信等,1992;马荣生和王爱国,1994;郭令智等,1996)。徐备等(1992)以及舒良树等(1995)甚至认为它是一个元古代的多期碰撞造山带。Wu *et al.* (2006)和 Zheng *et al.* (2007)也认为,江南造山带是新元古代早期格林威尔期(Grenville)造山作用过程中形成的弧-陆碰撞造山带,虽然在罗迪尼亚(Rodinia)超大陆裂解时受到拉张作用,但是没有裂解开来,因此属于失败的裂谷。但周金诚等(2008)从比较地质学的角度认为,无论是从造山事件的年限、变质作用程度、主要岩石类型,还是构造演化等诸方面目前都无法确定江南造山带是不是格林威尔期造山带。除新元古代造山的观点外,还有持其他时代造山的观点,如曾勇和杨明桂(1999)认为江南造山带是新元古代-古生代形成的造山带;陈冠宝等(2007)

则认为它是早古生代晚期的造山带;朱夏(1980)认为该构造带是大陆岩石圈内部印支期拆离形成的推覆体;许靖华等(1987)认为所谓的江南隆起带是一个来自华夏地块的阿尔卑斯式推覆体;丘元禧等(1998)提出位于雪峰山地区的江南隆起主要是加里东以来多期次的陆内造山带;而朱光和刘国生(2000)则认为,皖南地区的江南隆起带为印支-早燕山期的陆内造山带,它形成于北部华北与扬子板块发生陆-陆碰撞、南部华南板块向北推挤的区域动力学背景下。

由于构成江南造山带的主体是套巨厚的、成熟度较高的变沉积岩系,火山物质仅在局部地段(或层位)有较多的发育,而且造山带内的这套地层变质程度微弱(主要为低绿片岩相)但变形很强,所有这些都为研究造山带的结构、原岩时代、造山作用的年代与过程带来极大的不便。但在江南造山带内广泛发育了新元古代的花岗岩类侵入体,典型的岩体包括西南段的龙有、大寨、寨滚、蒙洞口、洞马、本洞、平英、田朋、三防(摩天岭)、元宝山等岩体,中段以九岭岩体最具代表性(出露规模达到 2500km^2),东段的典型岩体包括许村、歙县、休宁、灵山、莲花山等岩体。从其与造山作用的关系来看,这些岩体既有属同造山的 S 型花岗岩类,如龙有、大寨、寨滚、蒙洞口、洞马、本洞、九岭、许村、歙县、休宁等岩体(李志昌和赵子杰,1991;李献华,1999;葛文春等,2001;邱检生等,2002;周汉文等,2002;曾雯等,2005;陈文西等,2007),又有属晚造山和/或后造山的 A 型花岗岩,如平英、田朋、三防、元宝山、灵山、莲花山等岩体。它们提供了研究造山作用的年代、过程及其动力学机制的重要对象。

相对于整个江南造山带而言,其东段受后期(这里主要是指加里东期和印支期-早燕山期)造山作用改造的程度要

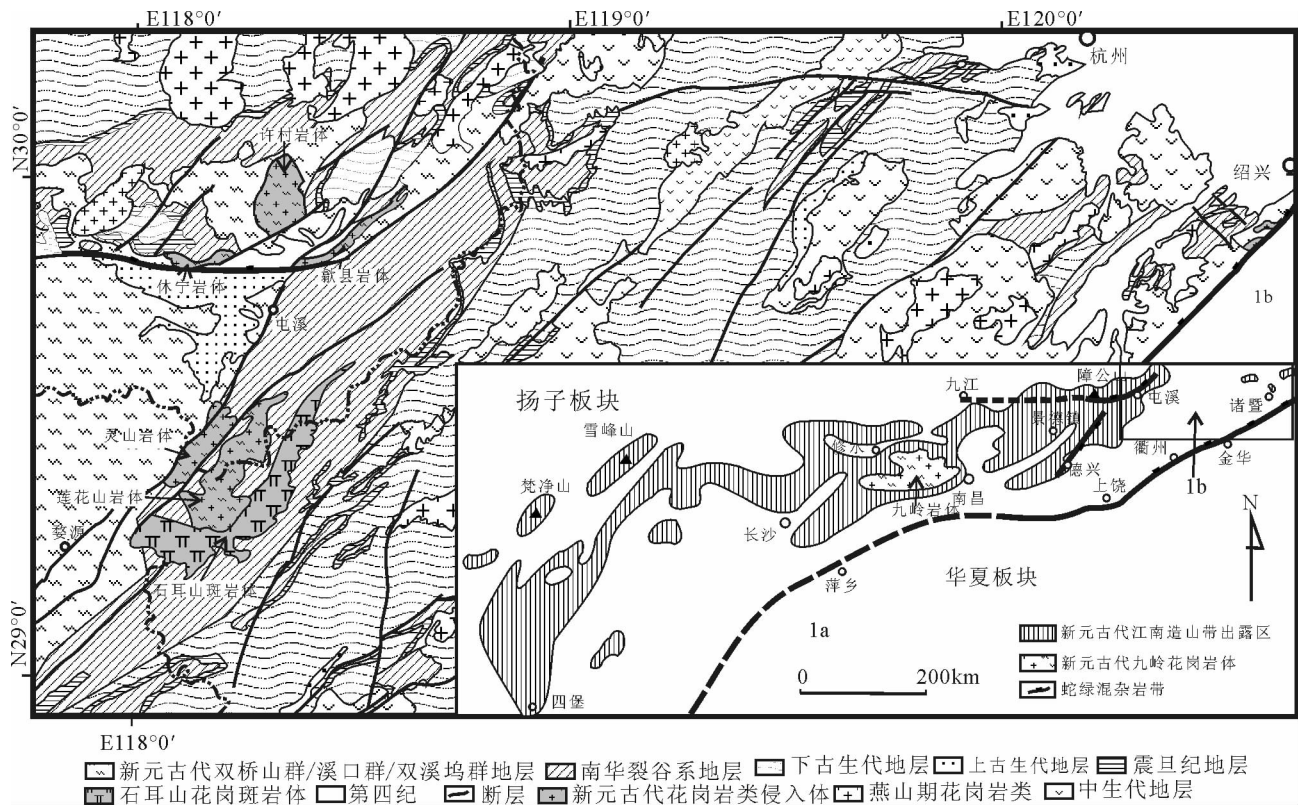


图1 江南造山带东段地质简图

Fig. 1 Simplified geological map for eastern segment of Jiangnan orogen

明显低于西南段的桂北、黔东和湘南等地,是研究江南造山带新元古造山作用过程相对较理想的地段。对于该段出露的新元古代花岗岩类侵入体,前人无论是在年代学还是在地球化学上都已做了较多的工作(如周新民和王德滋,1988;邢凤鸣,1990;刘伯根,1997;唐红峰等,1997;李献华等,2002;吴荣新等,2005a, b;Ye *et al.*, 2007;Wang *et al.*, 2010)。本文在同一实验条件下,用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法对江南造山带东段的许村岩体、歙县岩体、休宁岩体、灵山岩体和莲花山岩体以及较晚侵位的石耳山钾长花岗岩斑岩进行了较精确的定年,并系统测定了这些岩体代表性样品的主量和微量元素含量。这些岩体几乎垂直贯穿了整个造山带,通过对这些岩体侵位时间、性质及其与造山带空间关系的研究,尝试对江南造山带东段的造山过程进行标定。

1 地质背景与岩体地质

1.1 江南造山带东段的结构

对于江南造山带东段的结构,众多学者先后对其进行了划分,概括起来有沟弧盆体系(郭令智等,1980;水涛等,1986;徐备,1990)、地体构造(郭令智等,1984;徐备等,1992;马长信等,1992;刘继顺,1992;舒良树等,1995;徐跃通等,1998)、碰撞混杂岩带(许靖华等,1987;李继亮等,1989;李继

亮,1992;马荣生和王爱国,1994;曾勇和杨明桂,1999)等多种观点。郭令智等(1984)最早将江南造山带东段出露的元古代地层分为九岭、怀玉、会稽三个地体,其中九岭地体与怀玉地体之间以赣东北断裂带为界,会稽地体以江绍断裂带为界与陈蔡地体相隔。至于怀玉地体与会稽地体之间的界限则不明(凌洪飞等,1993)。张祖还(1991)认为,所谓会稽地体的双溪坞群可能是扬子地块与华夏地块沿江绍断裂带碰撞拼接时引起的幔源岩浆上涌产物,不必作为一个地体划分出来。

徐树桐等(1993)在江南造山带的皖南地段分出了4个单元,自南而北包括:华南板块沿江山-绍兴断裂带向扬子大陆板块边缘之下俯冲形成的火山-沉积建造,该单元是造山带的主体;俯冲过程中形成弧后盆地的沉积楔,由复理石油积岩组成,呈东西向延伸;陆缘拉张带,是扬子大陆板块的前震旦纪基底,属于造山带的前缘;构造混杂岩带,是碰撞造山的产物,经后期构造挤出,代表造山带的根部带。

邓国辉(2005)认为江南造山带东段经历了中元古代-新元古代晋宁早期俯冲和晚期碰撞两个造山阶段,自北而南可划分为九岭褶皱变形区、鄣公山构造混杂岩带、江山-绍兴对接带。在鄣公山构造混杂岩带中又进一步划分出了屯溪构造单元、乐平构造单元、万年构造单元、赣东北蛇绿混杂岩带、怀玉山构造单元等五个次级构造单元。

总之,有关江南造山带东段的结构目前还不是很清楚,

争议也较大。但扬子板块与华夏板块最终沿江山-绍兴断裂带发生对接,赣东北和皖南歙县存在着冷侵入的蛇绿岩套、造山带内的火山岩(包括双溪坞群、溪口群和漆工群等)具有岛弧环境下成因的特点这几点已基本得到公认,结合我们最近在赣西北的庐山地区发现时代为 $840 \pm 7\text{Ma}$ (SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄)的代表洋壳的枕状熔岩(成分为细碧岩-角斑岩),可以初步认定,江南造山带具有多岛弧拼贴、多期次和多部位缝合的特点。

1.2 江南造山带东段的构造岩群

区内前震旦系的构造岩群主要分三套,一是被动大陆边缘的浊流相沉积建造,这套地层在浙北是缺失的,在赣北被称为双桥山群(下亚群),在皖南被称为溪口群(下段)。另一套是岛弧环境下形成的火山-沉积建造,在浙北被称为双溪坞群,在赣东北被称为漆工群(双桥山群上亚群),在皖南被称为溪口群(上段)。这两套构造岩群又被南华裂谷系沉积-火山建造不整合覆盖,在浙北被称为河上镇群,在皖南被称为历口群,在赣东北被称为登山群。

1.2.1 双桥山群/溪口群

双桥山群是指分布于赣北地区的一套浅变质的成熟度较高的巨厚泥砂质沉积岩,其中的火山岩成分较少,岩石组合比较单一,以板岩和变质砂岩为主。对于双桥山群的沉积环境,有滨海-半深海(如黄修保等,2003)和半深海-深海(如陈柏林等,2002)的浊流相之争。该群自下而上分为(鄣公山组)、横涌组、计林组、安乐林组和修水组,各组之间为连续沉积。岩石普遍遭受了绿片岩相区域变质作用和强烈的构造变形作用,变形以褶皱作用为主,伴有透入性板劈理,同褶皱期断裂构造较少发育。这套地层的变质程度虽然较低但构造变形强烈,具造山带构造变形的特征(秦松贤等,2002)。岩石类型从北到南可由板岩渐变为千枚状板岩、千枚岩,局部出现片岩,总体显现变质程度逐渐加深的趋势。

对于双桥山群的形成时代,早先的研究多认为属中元古代,如马长信等(1992)测得其上部细碧岩(铁罗山组)的全岩 Sm-Nd 等时线年龄为 $1112.9 \pm 53\text{Ma}$,王昆等(1993)测得流纹岩(弋阳铁砂街群)单颗粒锆石 U-Pb 等时线年龄为 $1196 \pm 6\text{Ma}$,马长信(1991)测得最下部障公组中细碧岩-角斑岩的全岩 Sm-Nd 等时线年龄为 $1936 \pm 162\text{Ma}$ 。但近年来,高林志等(2008)在双桥山群的横涌组和安乐林组的斑脱岩中分别获得了 $831 \pm 5\text{Ma}$ 和 $829 \pm 5\text{Ma}$ 的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄,证明其时代属于新元古代。

溪口群是指分布在皖南地区历口群之下的一套浅变质岩系,自下而上分为樟前(岩)组、板桥(岩)组、木坑(岩)组、牛屋组。岩性主要是一套浅变质的板岩和千枚岩,局部夹薄层灰岩条带或灰岩透镜体。岩石的粒度以砂-粉砂级和粘土级占优势,碎屑成分复杂,其中樟前组、板桥组和木坑组富含火山碎屑成分。这套岩石中发育由递变式韵律层理组成的复理石层和舌状、长条状印模及微细层理,发育较完整

的鲍马序列。复理石特征以板桥组及牛屋组最为清楚,反映海槽(盆)相环境。

近年来,江西省地质调查院的部分学者(如吴新华等,2005)把分布于的婺源-乐平一带(宜丰-景德镇-歙县断裂带与进贤-婺源韧性剪切带之间)的一套原划为双桥山群的浅变质岩,基于其中含有较多的火山物质(成分有变细碧岩、变角斑岩等),也划为溪口群,以示与几乎不含火山物质的典型的双桥山群区别。

对于溪口群的形成时代,高林志等(2009)测得上部牛屋组中英安岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $866 \pm 9\text{Ma}$ 。江西省地质调查院在从事赋春幅 1:5 万地质调查中,用稀释法测得木坑岩组变斑状石英角斑岩中单颗粒锆石的 U-Pb 年龄为 $1113 \pm 118\text{Ma}$ 。在涌山幅 1:5 万地质调查中,分别在木坑岩组、郑家坞岩组所夹变角斑岩、变石英角斑岩中获得 $1334 \pm 10\text{Ma}$ 和 $1308 \pm 9\text{Ma}$ 的锆石 U-Pb 年龄(吴新华等,2005)。根据溪口群中火山岩较为发育,出露有变细碧岩、变角斑岩等,推测其形成环境应为火山弧-弧后盆地,但与属于典型火山弧产物的双溪坞群之间的关系尚待进一步探讨。

1.2.2 双溪坞群/漆工群

双溪坞群(浙西北)和漆工群(赣东北)的分布都明显受到构造的控制,其中双溪坞群分布于江山-绍兴断裂带的西北侧,并大致沿该断裂带展布。而漆工群则沿赣东北断裂带的东南侧分布。两者在岩石组合和地球化学性质上都具有岛弧环境下岩浆作用的特点。

双溪坞群为一套以中基性到中酸性熔岩和火山碎屑岩为主的火山岩建造,夹有砂质、硅质和炭质页岩和灰岩透镜体。岩石经绿片岩相变质成为板岩、千枚岩,局部为绢云石英片岩。其中的火山岩既有复理石杂砂岩和细碧角斑岩组合,也有钙碱性系列的中酸性陆相喷出岩类组合。前者主要出露于绍兴-平水一带,下部为中基性熔岩、角砾熔岩,上部以中性至中酸性火山碎屑岩和角砾熔岩为主。后者主要出露于富阳-常山一带,为酸性、中酸性变质火山碎屑岩带,属岛弧型钙碱系列。整个双溪坞群火山岩以爆发为主,熔结凝灰岩广泛发育,反映其形成环境以陆相喷发为主。岩相和岩石组合表明双溪坞群为岛弧环境下的产物,地球化学性质也与现代岛弧钙碱系列安山岩十分相似(兰玉琦和叶瑛,1991;程海,1993;沈渭洲等,1993;Ye *et al.*, 2007)。

对于双溪坞群的形成时代,目前已有了较多的同位素年龄资料。徐步台和水涛(1983)测得绍兴西裘矿区双溪坞群(原岩是古火山不同喷发旋回的中酸性熔岩、凝灰岩及基性熔岩)的 Rb-Sr 等时线年龄为 $705 \pm 39\text{Ma}$;章邦桐等(1990)测得绍兴西裘细碧-角斑岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 $928 \pm 44\text{Ma}$;徐步台和邱郁双(1996)测得富阳双溪坞群变安山玢岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 $1154 \pm 122\text{Ma}$,全岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 坪年龄为 $952 \pm 19\text{Ma}$;程海(1993)用热离子发射质谱计测得双溪坞群英安岩中单颗粒锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别为 $904 \pm 4\text{Ma}$ 和 $875 \pm 4\text{Ma}$ 。侵入其中的西裘石英闪长岩的全岩 Rb-

Sr 等时线年龄为 $853 \pm 18\text{Ma}$ (沈渭洲等, 1991)。最近, 陈志洪等 (2009) 用 LA-ICP-MS 法分别测得江山-绍兴拼合带平水地区高 Mg 闪长岩、富 Nb 玄武玢岩和斜长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 $932 \pm 7\text{Ma}$ 、 $916 \pm 6\text{Ma}$ 和 $902 \pm 5\text{Ma}$ 。Ye *et al.* (2007) 用 SHRIMP 法测得侵入到双溪坞群下部平水组的桃红和西裘英云闪长岩-花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄分别为 $913 \pm 15\text{Ma}$ 和 $905 \pm 14\text{Ma}$, 这两个岩体地球化学上属于典型的构造大陆边缘形成的钙碱性花岗岩类。因此, 扬子板块与华夏板块会聚前发育的一套以双溪坞群为代表的岛弧岩浆作用的时代可以较好的限定在约 935 ~ 900Ma 的新元古代早期。

漆工群 漆工群目前使用的已不多, 在有些文献中归为双桥山群的上亚群或归为溪口群, 但基于其产出的构造位置特殊, 具有混杂岩的特性, 我们建议予以保留。漆工群呈带状分布于赣东北断裂带的东南侧, 由具深海相浊积岩特征的复理石和细碧角斑岩组成。其中见一连串具“冷侵入”特征、大小不等近 200 个超基性、基性岩体。岩石普遍片理化及低绿片岩相区域变质, 在蛇绿岩带内局部还发现有蓝闪石-硬柱石片岩带和榴辉岩相系等高压低温变质带 (邓家瑞和张志平, 1998)。根据岩体与漆工群同变形变质特点, 证明岩体与漆工群属同构造背景的产物。所以, 岩体与漆工群共同构成的蛇绿混杂岩带具板块缝合线构造特征。李献华等 (1994) 用 SHRIMP 法测得蛇绿混杂岩带中埃达克质岩脉的锆石 U-Pb 年龄为 $968 \pm 23\text{Ma}$ 。由此可见, 浙西-赣东北地区双溪坞群与漆工群共同构成扬子克拉通新元古代早期的活动陆缘, 如果上述埃达克质岩脉的年龄可靠且可代表洋壳俯冲的年龄, 似乎意味着赣东北缝合带的形成要略早于江山-绍兴缝合带。

1.2.3 河上镇群/历口群/登山群

河上镇群、历口群和登山群均被震旦纪地层不整合覆盖, 属于新元古代末期沉积-火山作用的产物 (南华裂谷系)。至于它们与下伏地层的关系则有争议, 如河上镇群与双溪坞群的关系, 核心是对河上镇群下段骆家门组砂砾岩的认识, 若把它看作是底砾岩, 则与下伏双溪坞群是区域性角度不整合。但唐红峰等 (1998) 认为它是新元古代造山作用后期前陆盆地的山间堆积磨拉石, 与双溪坞群的最终接触关系为滑脱断层关系。

河上镇群 分布在浙北的萧山、富阳至江山一带, 即江南造山带的东南缘。自下而上分为骆家门组、虹赤村组和上墅组, 其上被震旦纪的志棠组不整合覆盖, 并叠覆于前震旦纪双溪坞群中酸性陆相火山岩之上。骆家门组是一套以杂砂岩和砂板岩为主的碎屑岩系, 其中的砾岩具有冰成特征; 虹赤村组为紫红色厚层砂岩; 上墅组是陆相基性和酸性火山岩组合, 下部以玄武岩为主, 而上部为流纹岩, 具双峰式特征。

河上镇群中唯一可作同位素年龄测定的是顶部的上墅组, 下段玄武岩和上段流纹岩的 Sm-Nd 等时线年龄分别为

$894 \pm 75\text{Ma}$ 和 $808 \pm 59\text{Ma}$ (徐步台和邱郁双, 1996)。近年来, 高林志等 (2008) 在河上镇群上墅组的斑脱岩中获得了 $767 \pm 5\text{Ma}$ 的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄。

历口群 主要分布在皖南的祁门和休宁一带, 属于江南造山带的东北缘。自下而上分为邓家组、铺岭组/井潭组, 其上为震旦纪的休宁组不整合覆盖, 并不整合覆盖于溪口群之上。其中邓家组为一套具复理石特征的碎屑沉积岩, 局部含少量薄的细碧岩或玄武岩夹层; 铺岭组为一套气孔状、杏仁状发育的基性火山岩夹沉积岩系, 平行不整合于邓家组之上; 井潭组为一套巨厚的中酸性火山岩和碎屑沉积岩组合, 其中火山碎屑岩占一半以上。

对于历口群中井潭组火山岩的形成时代, 已经有了不少的同位素年龄资料, 早先的定年主要为 Sm-Nd 等时线法, 所获得的年龄误差普遍较大, 如徐备等 (1992) 测得 Sm-Nd 等时线年龄为 $829 \pm 35\text{Ma}$, 陈冠宝等 (1998b) 测得 Sm-Nd 等时线年龄为 $991 \pm 110\text{Ma}$ 。近年, 吴荣新等 (2007) 用 LA-ICP-MS 法在井潭组火山岩中获得了 $776 \pm 10\text{Ma}$ 的锆石 U-Pb 年龄。

从岩石组合上, 皖南井潭组由安山岩、英安岩、流纹岩及其火山碎屑岩组成, 与登山群上部的叶家组、双溪坞群上部的章村组可以对比, 但其时代要明显小于双溪坞群的形成时代。从地球化学上, 一种观点认为形成于岛弧环境 (陈冠宝等, 1998b); 另一种观点认为井潭组火山岩属华南新元古代裂谷沉积序列, 其形成与华南地幔超柱活动和华南裂谷岩浆作用有关 (Wang and Li, 2003); 还有种观点认为是板块-裂谷岩浆活动产物。吴荣新等 (2007) 认为, 皖南地区井潭组与石耳山花岗斑岩是同源异相的产物。

登山群 沿赣东北断裂带及其东南侧分布, 包括下部的拔竹坑组和上部的叶家组。其中拔竹坑组以灰绿色凝灰质杂砂岩、沉凝灰岩和中基性海相火山岩为主。叶家组下部发育玄武岩, 上部则主要是中酸性的火山岩和沉积岩。推测登山群沉积环境在早期为深水-半深水的弧前斜坡带, 以快速堆积的火山浊流复理石为特征, 向上过渡为浅水沉积, 最后演化为水上岩浆喷发。登山群与下伏的漆工群呈不整合接触, 并被震旦纪的响门组不整合覆盖。有关登山群的形成时代, 目前还没有可靠的同位素年龄资料, 仅有的是徐备和乔广生 (1989) 曾测得其中超基性岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 $929.7 \pm 33.8\text{Ma}$, 杨明桂等 (1988) 测得其顶部流纹岩的 Rb-Sr 等时线年龄为 $817.6 \pm 8.5\text{Ma}$ 。

整个登山群的岩石建造特征与浙北的双溪坞群十分类似, 既有早期的复理石杂砂岩和细碧角斑岩组合, 又有晚期的陆相安山质-英安质火山岩组合。两者之间的这种可比性是形成环境类似造成的 (都处在缝合线附近) 还是同时形成的, 由于尚缺少精确的同位素年龄数据, 还需进一步探讨。

1.3 江南造山带东段的新元古代花岗岩类

江南造山带东段广泛发育新元古代的花岗岩类侵入体,

按岩石组合和地球化学特征主要分为二类:一类为具有 S 型花岗岩特点的中酸性岩类,主要岩性为黑云母花岗闪长岩,代表性的岩体有皖南的许村岩体、歙县岩体、休宁岩体等;另一类为具有 A 型花岗岩特点的酸性岩类,主要岩性为钾长花岗岩、少量二长花岗岩及碱长花岗岩等,典型岩体有皖浙赣交界的灵山岩体和莲花山岩体以及浙东北的道林山岩体(Wang *et al.*, 2010)等。除此之外,还有形成相对较晚的石耳山钾长花岗斑岩体(或称齐溪田岩体/白际岩体,吴荣新等,2005b)。

1.3.1 S 型花岗闪长岩类

在江南造山带东段的皖南地区,发育了一条近东西向弧形断裂带(祁门-歙县-三阳坑),该断裂带同时也是皖南的歙县(伏川)蛇绿岩带,因而被看着弧-陆碰撞的一条缝合带。大致沿该断裂带分布有一系列的黑云母花岗闪长岩体(共 11 个,邢凤鸣等,1989),它们组成了一条长约 100km 的 S 型花岗闪长岩带,其中以许村岩体(约 133km²)、休宁岩体(约 32km²)和歙县岩体(约 32km²)的出露面积最大。这些岩体的结构类似,均为中粒到中细粒花岗结构,且除休宁岩体外都或多或少发育了一定程度的片麻状构造。矿物组合也主要为石英和斜长石,其次为钾长石和黑云母,并普遍含高铝矿物堇青石。副矿物包括钛铁矿、石榴石、磷钇矿、锆石和独居石。三个岩体侵入的最新围岩均为溪口群的牛屋组,并被震旦纪的休宁组砾岩沉积不整合覆盖。

许村岩体 该岩体不仅是江南造山带东段一系列新元古代花岗闪长岩体中出露面积最大的一个,位置也最前突,最靠近扬子板块(图 1b)。该岩体虽然大部仍保持中-粗粒花岗结构,块状构造,但岩体的西南侧片麻状构造发育,它与未发育片麻状构造的岩体之间呈渐变过渡的关系。这些片麻理呈北西-南东向带状展布,片麻理产状倾向北东,倾角 46°左右(李应运等,1989)。

歙县岩体 该岩体位于祁门-歙县-三阳坑主断裂带内,平行于断裂带呈北东东向带状延伸(图 1b)。岩体中片麻状构造发育,但其发育程度有从岩体东南侧向西北侧减弱的趋势。片麻理的走向与断裂带的走向平行,向南南东陡倾。从该岩体的产状和构造特征可以认定它属于同构造(同碰撞?)的侵入体。该岩体南侧与皖南的歙县(伏川)蛇绿岩套相连,两者之间呈断裂接触。

休宁岩体 该岩体紧邻祁门-歙县-三阳坑断裂带呈弧形延伸,且其长轴方向大致平行于断裂带和蛇绿岩带(图 1b)。但该岩体同时也是带内 11 个 S 型花岗闪长岩体中唯一没有发育片麻状构造的岩体,岩石仍保持中-粗粒花岗结构、块状构造,矿物无定向排列现象,甚至其石英光轴也无优选方位而随机分布,属均质组构类型(李应运等,1989)。推测其侵位应略晚于歙县(伏川)蛇绿岩的侵位(晚碰撞?)。

1.3.2 A 型花岗岩类

出露于皖浙赣交界地区,包括灵山岩体和莲花山岩体,总面积约 250km²。岩体侵入的最新围岩是新元古代末期的

井潭组(皖南)或上墅组(浙西北、赣东北)。岩体总体上以斑状-似斑状结构为特征,主要矿物组成为钾长石(50%~65%)和石英(20%~35%),其次是斜长石(5%~20%),含少量黑云母和白云母。副矿物有磁铁矿、绿帘石和锆石等(唐红峰等,1997;刘伯根,1997)。岩石地球化学特征显示出 A 型花岗岩的特点(详见本文 3.1 地球化学部分)。出露于浙东北的道林山岩体,经 Wang *et al.* (2010)的研究也属于 A 型花岗岩。

1.3.3 石耳山花岗斑岩

该斑岩体呈北东向带状延伸,其侵入的围岩是历口群的井潭组(皖南)或上墅组(浙西北、赣东北),南西段与莲花山岩体呈侵入接触关系,表明其形成晚于莲花山岩体。吴荣新等(2005b)曾将该斑岩体称为齐溪田/白际岩体。岩性为钾长花岗斑岩,斑晶含量约 25%,主要为斜长石和石英,少量黑云母。其中斜长石斑晶呈自形板柱状,斜长石斑晶内部往往含有大量的细小矿物包裹体而呈斑杂状,表面多已高岭土化。石英斑晶呈不规则粒状态,内部有时含有斜长石包裹体。黑云母斑晶均已发生强烈的暗化蚀变,仅依稀保留有黑云母的片状矿物形貌。基质为霏细结构,由细小的长石和石英组成。

2 分析方法

全岩成分是在核工业北京地质研究院分析测试研究中心分析的。其中主元素是用 X 荧光光谱法(XRF)完成,误差 < 0.5%;微量元素和稀土元素是用德国 Finnigan-MAT 公司生产的 ELEMENT I(离子体质谱仪)分析的,误差一般 5%~10%。分析结果及一些参数见表 1。

锆石是从约 10kg 样品中用常规方法分选出后,在双目镜下仔细挑纯得到的。将挑纯后的锆石与数粒锆石标准样 TEMORA 同置于环氧树脂中,然后磨至约一半,使锆石内部暴露。分析点的选择首先根据已磨至一半的锆石反射和透射照片进行初选,再与阴极发光照片反复对比,力求避开内部矿物包裹体。测试是在北京大学地球与空间科学学院造山带与地壳演化教育部重点实验室进行。激光剥蚀使用的是德国相干公司(Coherent)准分子激光器 COMPex Pro102,激光条件为:激光束斑 32μm,激光能量密度 20J·cm⁻²,频率 5Hz,使用纯度为 99.999% 的 He 作为载气将激光剥蚀出来的物质带入等离子体质谱。质谱分析采用美国安捷伦科技有限公司电感耦合等离子体质谱仪 Agilent ICP-MS 7500ce,功率 1500W,冷却气 15L·min⁻¹,辅助气 1L·min⁻¹,载气 0.96L·min⁻¹,积分时间⁴⁹Ti、²⁰⁷Pb 为 50ms,²⁰⁴Pb、²⁰⁶Pb、²⁰⁸Pb、²³²Th、²³⁸U 为 20ms,其余同位素为 10ms。信号采集时间共 75s,采集信号前先用激光剥蚀 3s 以去除样品表面可能存在的污染,在进行 15s 的空白信号采集后开始触发激光采集样品信号。每 4 个未知样测试 1 个 TEMORA 锆石标样,每 8 个未知样测试 1 个 NIST 610 玻璃标样。数据处理先应用

表1 江南造山带东段新元古代花岗岩类代表性样品的地球化学成分(主量元素: wt%; 稀土和微量元素: $\times 10^{-6}$)Table 1 Geochemical compositions of Neoproterozoic granitoids from the eastern segment of Jiangnan orogen (Major elements: wt%; Trace elements: $\times 10^{-6}$)

岩体 样品号	歙县岩体			许村岩体						休宁岩体
	WN321	WN322	WN325	WN327a	WN327c	WN328	WN340	WN341	WN342	WN350
SiO ₂	65.21	67.63	69.83	67.62	68.79	66.58	69.29	65.70	69.47	75.71
Al ₂ O ₃	14.66	13.92	13.34	13.91	13.62	14.49	13.93	14.90	13.73	12.61
FeO	5.05	4.85	2.80	3.80	3.45	3.40	2.90	4.75	3.70	0.25
Fe ₂ O ₃	0.94	0.39	0.80	0.96	0.56	0.71	0.44	0.95	0.34	2.43
MgO	2.11	1.93	1.16	1.59	1.29	1.61	1.16	1.84	1.41	0.50
CaO	1.38	1.90	1.43	2.14	1.44	2.35	1.27	0.63	1.16	0.15
Na ₂ O	2.40	2.71	2.94	2.59	2.93	1.13	2.50	3.23	2.87	0.14
K ₂ O	2.97	2.87	3.89	3.35	3.90	3.93	4.36	3.48	3.95	4.21
MnO	0.12	0.09	0.06	0.09	0.07	0.07	0.07	0.10	0.07	0.02
TiO ₂	0.88	0.85	0.56	0.70	0.64	0.54	0.53	0.84	0.63	0.71
P ₂ O ₅	0.18	0.14	0.15	0.18	0.16	0.15	0.15	0.22	0.16	0.06
烧失量	3.35	2.01	2.55	2.45	2.59	4.52	2.93	2.63	1.93	2.6
总量	99.25	99.29	99.51	99.38	99.44	99.48	99.53	99.27	99.42	99.39
Sc	16.8	13.9	10.5	12.9	9.34	11.4	9.24	15.5	11.4	9
V	108	105	55.6	79.1	69	62.9	57.9	80.8	74.1	48.7
Cr	72.1	65	31.1	73	47.7	28.5	32.6	58.1	46.6	25.3
Co	17.2	17.4	8.38	13.2	10.9	9.9	9.58	14.7	10.6	5.33
Ni	28.1	26.6	14.2	20.7	17.5	15.5	14.2	20.5	16.9	9.56
Ga	20.7	19.8	18.2	17.8	16	20.6	18.3	19.1	17.6	17.4
Rb	125	117	151	116	123	179	159	114	156	142
Sr	194	201	136	144	114	37	97.1	129	142	29.2
Y	30.6	14.2	32.9	32.6	18.7	52.7	33	46.2	22.1	26.2
Zr	88.2	113	202	91.8	160	153	118	90.8	106	128
Nb	14.1	13.4	11	11.7	11.7	13.2	10	14.1	10.9	12
Ba	577	656	643	467	572	400	664	1193	474	466
Hf	2.63	3.14	5.59	2.99	4.4	4.61	3.77	2.92	3.31	3.8
Ta	1.12	0.969	0.98	0.955	1.02	0.981	0.825	1.12	1.02	0.962
U	2.3	1.45	1.46	2.22	1.97	2.85	1.52	1.76	3.73	2.54
La	38.4	32.6	34.7	30.9	20.9	49.8	42.2	38.4	30.6	33.3
Ce	78.2	66.5	71.5	59.5	61.4	95	65	76.1	62.3	70.2
Pr	9.56	8.12	8.66	7.76	4.86	12.5	9.69	9.6	7.51	8.17
Nd	37	32.3	34	30.5	19.4	50	38.1	38.1	29.7	32.2
Sm	7.3	6.37	7.03	6.45	3.93	10.3	7.57	7.81	5.63	6.31
Eu	1.43	1.39	1.1	1.14	0.765	1.55	1.47	1.35	1.05	1.11
Gd	6.7	5.16	6.01	5.92	3.92	9.5	7.24	7.59	5.32	4.94
Tb	1.07	0.726	1.06	1	0.611	1.57	1.15	1.32	0.816	0.879
Dy	6.07	3.45	6.31	6.13	3.65	9.23	5.98	8.15	4.38	5.44
Ho	1.06	0.511	1.15	1.14	0.657	1.75	1.1	1.66	0.76	1.02
Er	3.11	1.25	3.27	3.43	1.9	5.11	3.19	4.88	2.21	2.83
Tm	0.458	0.166	0.492	0.536	0.318	0.772	0.45	0.754	0.333	0.417
Yb	2.91	1.05	3.3	3.49	1.96	4.91	2.89	4.95	2.19	2.72
Lu	0.443	0.169	0.49	0.521	0.308	0.758	0.429	0.726	0.318	0.366
ΣREE	193.7	159.8	179.1	161.4	129.0	257.4	190.2	204.3	156.4	169.9
(La/Yb) _N	8.92	20.98	7.11	5.98	7.21	6.85	9.87	5.24	9.44	8.27
Eu/Eu*	0.61	0.72	0.51	0.55	0.59	0.47	0.60	0.53	0.58	0.59
K/Rb	197	204	214	240	263	182	228	253	210	246
A/CNK	1.52	1.26	1.15	1.18	1.17	1.40	1.25	1.46	1.24	
T _{zr} (°C)	764	772	817	749	796	808	777	762	766	834

续表 1

Continued Table 1

岩体 样品号	灵山岩体					莲花山岩体		石耳山花岗斑岩
	WN305	WN303	WN304	WN306	WN307	WN312	WN314	WN311
SiO ₂	71.67	77.11	78.13	77.21	77.70	77.26	77.16	77.44
Al ₂ O ₃	12.64	11.90	11.22	11.51	11.04	11.36	10.93	11.74
FeO	0.60	0.25	0.10	0.80	1.00	0.35	0.60	0.10
Fe ₂ O ₃	0.72	1.06	0.85	0.32	0.32	1.16	0.87	1.08
MgO	0.14	0.11	0.08	0.14	0.16	0.07	0.06	0.13
CaO	2.20	0.09	0.08	0.56	0.66	0.14	0.60	0.16
Na ₂ O	4.47	3.23	3.78	3.45	3.71	3.79	4.07	2.06
K ₂ O	5.21	4.92	5.00	5.10	4.46	4.95	4.64	6.00
MnO	0.03	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02
TiO ₂	0.15	0.10	0.07	0.11	0.13	0.14	0.13	0.09
P ₂ O ₅	0.02	0.01	0.01	0.03	0.03	0.02	0.01	0.04
烧失量	1.85	0.99	0.52	0.52	0.50	0.54	0.65	0.96
总量	99.7	99.79	99.85	99.77	99.73	99.81	99.75	99.82
Sc	6.96	5.98	5.29	2.52	6.13	10.5	10.7	4.63
V	6.54	2.7	2.75	4.72	6.91	2.66	2.31	3.83
Cr	3.76	4.55	1.99	3.39	21.5	2.03	2.08	1.75
Co	1.24	0.392	0.306	0.839	1.13	0.334	0.365	0.615
Ni	2.44	0.561	0.51	0.986	1.52	0.505	0.767	0.599
Ga	19.7	16.6	14.6	14.7	18.7	19.8	20.3	13.3
Rb	255	213	271	183	160	200	188	353
Sr	31.4	15.6	8.14	6.78	23.1	20.9	21.8	6.52
Y	79.5	69.9	51	33.6	65.3	54.7	77.5	33.9
Zr	193	241	136	148	175	283	243	139
Nb	19	14.8	18.1	13.7	13.2	14.8	15.8	12.2
Ba	213	617	73.4	80.4	424	675	640	60.4
Hf	8.32	10.3	6.35	6.28	6.9	10.1	8.86	6.06
Ta	1.98	1.37	1.77	1.56	1.15	1.26	1.3	1.47
U	6.32	2.81	3.47	3.17	3.64	3.24	3.89	4.39
La	40.0	20.4	13.5	17.0	36.7	37.5	52.5	6.67
Ce	85.1	65.5	18.1	49.9	77.9	104	103	33.3
Pr	10.5	4.83	3.91	4.42	9.36	9.68	13.1	2.02
Nd	42.7	19.4	16.4	17.4	38.6	38.6	53	7.75
Sm	10.3	4.6	4.67	4.13	8.7	7.72	11.5	2.5
Eu	0.522	0.658	0.107	0.187	0.748	0.933	1.32	0.069
Gd	10.4	5.54	5.74	4.34	9.07	7.65	11.7	3.14
Tb	2.06	1.41	1.26	0.811	1.76	1.46	2.13	0.796
Dy	13.8	11.1	8.75	5.64	11.4	9.8	14.2	5.82
Ho	2.76	2.42	1.79	1.12	2.26	2.02	2.8	1.23
Er	8.44	7.82	5.63	3.59	6.77	6.4	8.37	3.98
Tm	1.32	1.24	0.898	0.573	1.07	1.06	1.3	0.68
Yb	8.98	8.51	6.14	3.95	6.98	7.35	8.49	4.89
Lu	1.42	1.35	0.918	0.638	1.11	1.14	1.33	0.791
∑REE	238.3	154.8	87.81	113.7	212.4	235.3	284.7	73.64
(La/Yb) _N	3.01	1.62	1.49	2.91	3.55	3.45	4.18	0.92
Eu/Eu*	0.15	0.40	0.06	0.13	0.26	0.37	0.34	0.08
K/Rb	170	192	153	231	231	205	205	141
A/CNK	0.74	1.10	0.95	0.94	0.91	0.96	0.85	1.15
Na ₂ O + K ₂ O	9.68	8.15	8.78	8.55	8.17	8.74	8.71	8.06
FeO*/MgO	8.91	10.95	10.81	7.77	8.05	19.91	23.05	8.25

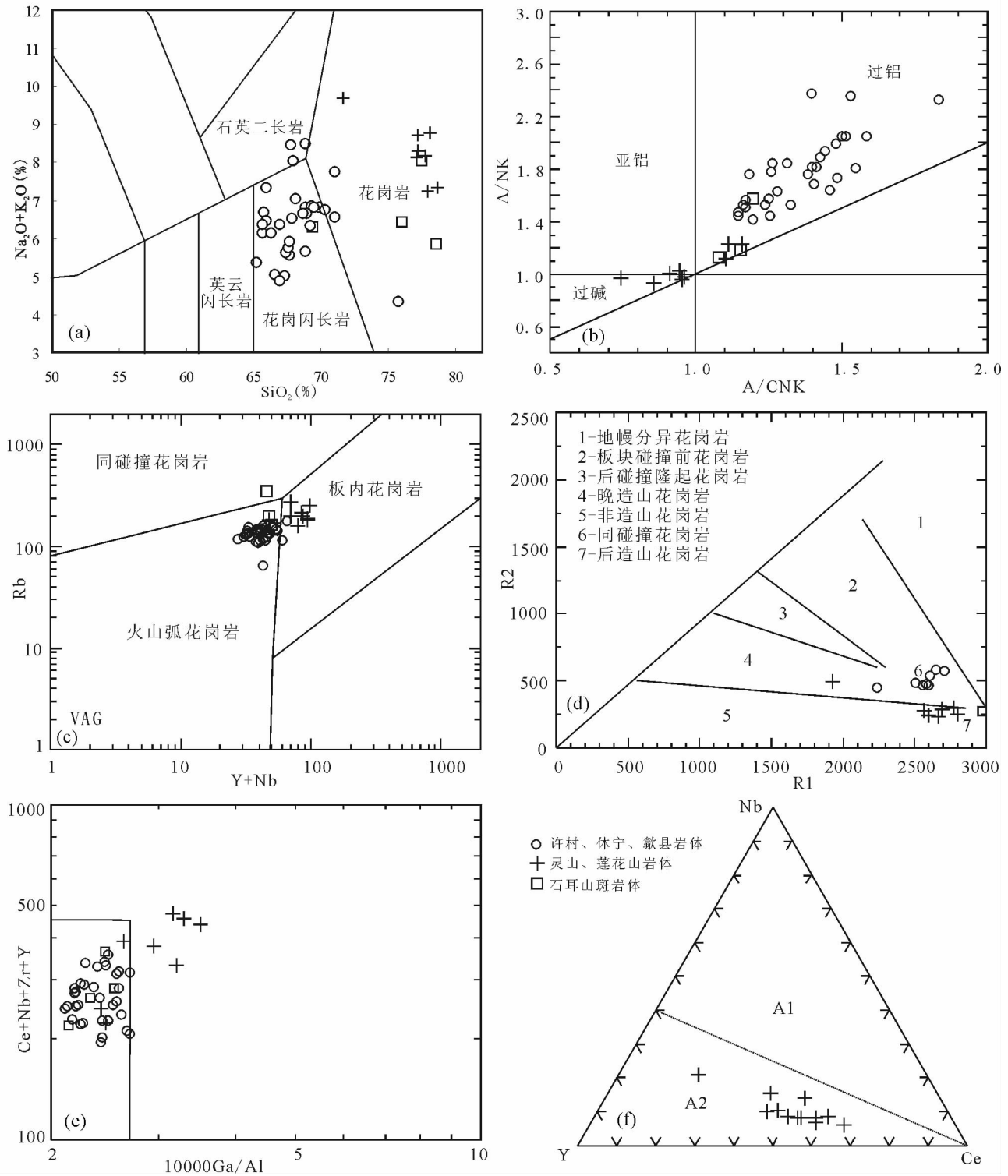


图2 江南造山带东段新元古代花岗岩类的地球化学图解

(a)-TAS分类图 (Le Base *et al.*, 1986); (b)- A/NK - A/CNK ; (c)- Rb - $Y + Nb$ 判别图 (Pearce *et al.*, 1984); (d)- $R1$ - $R2$ 判别图 (Batchelor and Bowden, 1985); (e)- $(\text{Ce} + \text{Zr} + \text{Nb} + \text{Y})$ - $10000\text{Ga}/\text{Al}$ 成因分类图 (Whalen *et al.*, 1987); (f)- Nb - Y - Ce 判别图解 (Eby, 1992). 资料来源: 本文; 李献华等, 2002; 吴荣新等, 2005a, b

Fig. 2 Geochemical diagrams of Neoproterozoic granitoids from the eastern segment of Jiangnan orogen

(a)-TAS classification diagram (Le Base *et al.*, 1986); (b)- A/NK - A/CNK ; (c)- Rb - $Y + Nb$ tectonic discrimination diagrams (Pearce *et al.*, 1984); (d)- $R1$ - $R2$ discrimination diagram (Batchelor and Bowden, 1985); (e)- $(\text{Ce} + \text{Zr} + \text{Nb} + \text{Y})$ - $10000\text{Ga}/\text{Al}$ granitoid discrimination diagram (Whalen *et al.*, 1987); (f)- Nb - Y - Ce discrimination diagram (Eby, 1992). Sources of data: this paper; Li *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2005a, b

表2 江南造山带东段新元古代花岗岩类锆石的 LA-ICP-MS 分析结果

Table 2 LA-ICP-MS analytical results for zircons from the Neoproterozoic granitoid outcropped in eastern segment of Jiangnan orogen

	含量($\times 10^{-6}$)			比值					年龄(Ma)							
	Th	U	Pb	Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$
许村岩体																
WN327-01	63.38	185.13	30.38	0.34	0.06754	0.00150	1.28986	0.02714	0.13852	0.00133	0.04204	0.00105	854.5 ± 45.4	841.2 ± 12.0	836.3 ± 7.6	832.4 ± 20.4
WN327-02	44.45	180.91	29.96	0.25	0.06780	0.00164	1.33176	0.03067	0.14248	0.00146	0.04780	0.00140	862.4 ± 49.5	859.6 ± 13.4	858.7 ± 8.2	943.7 ± 27.0
WN327-03	60.43	175.85	29.21	0.34	0.06761	0.00154	1.30907	0.02835	0.14045	0.00137	0.04172	0.00108	856.5 ± 46.7	849.7 ± 12.5	847.2 ± 7.8	826.1 ± 20.9
WN327-04	122.91	81.09	26.09	1.52	0.08581	0.00221	2.42567	0.05922	0.20503	0.00228	0.06077	0.00146	1333.9 ± 49.00	1250.2 ± 17.6	1202.3 ± 12.2	1192.4 ± 27.8
WN327-05	69.11	115.35	21.01	0.60	0.06849	0.00161	1.36691	0.03045	0.14476	0.00144	0.04159	0.00103	883.4 ± 47.8	874.8 ± 13.1	871.5 ± 8.1	823.6 ± 19.9
WN327-06	77.19	97.81	18.62	0.79	0.06745	0.00166	1.34024	0.03136	0.14413	0.00147	0.04241	0.00105	851.7 ± 50.41	863.3 ± 13.6	867.9 ± 8.3	839.5 ± 20.3
WN327-07	108.28	216.66	37.14	0.50	0.06702	0.00158	1.27859	0.02864	0.13837	0.00137	0.04304	0.00108	838.5 ± 48.3	836.2 ± 12.8	835.4 ± 7.8	851.8 ± 20.9
WN327-08	54.38	167.97	27.31	0.32	0.06656	0.00156	1.26920	0.02834	0.13831	0.00137	0.04112	0.00109	824.0 ± 48.3	832.0 ± 12.7	835.1 ± 7.7	814.5 ± 21.2
WN327-09	41.44	278.2	41.98	0.15	0.06642	0.00151	1.23114	0.02656	0.13444	0.00130	0.04147	0.00118	819.7 ± 46.7	814.9 ± 12.1	813.2 ± 7.4	821.4 ± 22.8
WN327-10	62.99	231.65	38.32	0.27	0.06745	0.00151	1.32877	0.02819	0.14288	0.00136	0.04112	0.00104	851.7 ± 45.7	858.3 ± 12.3	861.0 ± 7.7	814.5 ± 20.3
WN327-11	35.16	47.47	9.20	0.74	0.06829	0.00250	1.37224	0.04796	0.14575	0.00202	0.04720	0.00156	877.3 ± 73.9	877.1 ± 20.5	877.1 ± 11.4	932.2 ± 30.0
WN327-12	97.56	277.35	45.13	0.35	0.06729	0.00155	1.28204	0.02816	0.13819	0.00134	0.03821	0.00098	846.8 ± 47.3	837.8 ± 12.5	834.4 ± 7.6	758.0 ± 19.0
WN327-13	108.93	280.68	47.03	0.39	0.06704	0.00159	1.29009	0.02905	0.13958	0.00138	0.04276	0.00110	838.9 ± 48.5	841.3 ± 12.9	842.3 ± 7.8	846.3 ± 21.4
WN327-14	29.73	176.91	28.02	0.17	0.06746	0.00172	1.30853	0.03176	0.14068	0.00146	0.04044	0.00136	852.0 ± 52.1	849.5 ± 14.0	848.5 ± 8.3	801.3 ± 26.4
WN327-15	144.55	313.25	54.88	0.46	0.06776	0.00157	1.33538	0.02950	0.14293	0.00139	0.04406	0.00110	861.3 ± 47.4	861.2 ± 12.8	861.2 ± 7.8	871.6 ± 21.3
WN327-16	27.61	108.7	18.01	0.25	0.06780	0.00192	1.33664	0.03604	0.14298	0.00160	0.04435	0.00152	862.6 ± 57.5	861.8 ± 15.7	861.5 ± 9.0	877.2 ± 29.5
WN327-17	261.84	233.72	48.08	1.12	0.08208	0.00206	1.59354	0.03805	0.14081	0.00146	0.04402	0.00111	1247.4 ± 48.27	967.7 ± 14.9	849.2 ± 8.3	870.8 ± 21.6
WN327-18	40.76	273.59	43.15	0.15	0.06747	0.00164	1.30015	0.03005	0.13976	0.00139	0.04761	0.00139	852.3 ± 49.6	845.8 ± 13.3	843.3 ± 7.9	940.1 ± 26.8
WN327-19	20.87	112.01	17.93	0.19	0.06785	0.00179	1.32019	0.03330	0.14113	0.00150	0.04243	0.00143	863.9 ± 53.9	854.6 ± 14.6	851.0 ± 8.5	839.9 ± 27.6
WN327-20	458.33	593.94	110.20	0.77	0.06809	0.00163	1.31913	0.03012	0.14052	0.00139	0.04206	0.00106	871.2 ± 48.9	854.1 ± 13.2	847.6 ± 7.8	832.7 ± 20.5
WN327-21	55.83	132.69	22.83	0.42	0.06703	0.00177	1.32017	0.03330	0.14285	0.00150	0.04164	0.00118	838.6 ± 54.1	854.6 ± 14.6	860.7 ± 8.5	824.5 ± 23.0
WN327-22	803.84	1732.98	219.60	0.46	0.07347	0.00177	1.02752	0.02357	0.10144	0.00100	0.03474	0.00089	1026.8 ± 47.9	717.7 ± 11.8	622.8 ± 5.8	690.2 ± 17.4
WN327-23	37.67	108.84	18.57	0.35	0.06751	0.00206	1.33765	0.03895	0.14370	0.00169	0.04407	0.00150	853.6 ± 62.0	862.2 ± 16.9	865.5 ± 9.5	871.7 ± 29.1
WN327-24	245.41	440.38	77.55	0.56	0.07098	0.00177	1.37889	0.03274	0.14089	0.00142	0.04092	0.00108	956.8 ± 50.0	880.0 ± 14.0	849.7 ± 8.0	810.7 ± 21.0
WN327-25	39.03	456.47	64.99	0.09	0.06795	0.00172	1.20644	0.02917	0.12877	0.00131	0.04341	0.00140	867.0 ± 51.6	803.6 ± 13.4	780.8 ± 7.5	859.0 ± 27.1
歙县岩体																
WN321-01	93.18	298.42	48.78	0.31	0.06591	0.00134	1.26315	0.02426	0.13900	0.00129	0.03921	0.00097	803.5 ± 42.0	839 ± 7.3	829.3 ± 10.9	777.3 ± 19.0
WN321-02	61.53	177.61	28.91	0.35	0.06613	0.00146	1.20440	0.02519	0.13209	0.00129	0.04003	0.00104	810.5 ± 45.5	799.8 ± 7.3	802.6 ± 11.6	793.4 ± 20.2
WN321-03	83.28	337.97	52.30	0.25	0.06706	0.00132	1.24490	0.02315	0.13465	0.00123	0.03875	0.00097	839.5 ± 40.5	814.3 ± 7.0	821.1 ± 10.5	768.4 ± 18.9
WN321-04	50.44	64.29	12.42	0.78	0.06832	0.00206	1.37122	0.03947	0.14557	0.00176	0.04537	0.00129	878.2 ± 61.3	876.1 ± 9.9	876.7 ± 16.9	896.8 ± 24.9
WN321-05	107.09	304.46	50.13	0.35	0.06695	0.00127	1.26920	0.02275	0.13750	0.00123	0.03804	0.00086	836.2 ± 39.1	830.5 ± 7.0	832.0 ± 10.2	754.6 ± 16.7
WN321-07	34.27	252.72	42.88	0.14	0.07555	0.00183	1.42838	0.03271	0.13713	0.00144	0.03937	0.00156	1083.1 ± 47.7	828.4 ± 8.2	900.9 ± 13.7	780.4 ± 30.3
WN321-08	69.71	388.61	130.69	0.18	0.10655	0.00202	4.18588	0.07499	0.28494	0.00257	0.08397	0.00203	1741.3 ± 34.2	1616.2 ± 12.9	1671.3 ± 14.7	1629.7 ± 37.8

续表 2

Continued Table 2

	含量($\times 10^{-6}$)				比值						年龄(Ma)								
	Th	U	Pb	Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$
	WN321-10	68.72	293.94	40.11	0.23	0.07180	0.00158	1.12001	0.02341	0.11315	0.00110	0.04867	0.00136	980.2 ± 44.3	691.0 ± 6.4	763.0 ± 11.2	960.6 ± 26.1		
WN321-11	13.32	304.96	44.10	0.04	0.06614	0.00141	1.23332	0.02489	0.13526	0.00128	0.04643	0.00168	810.7 ± 43.8	817.8 ± 7.2	815.9 ± 11.3	917.3 ± 32.4			
WN321-12	114.12	191.21	62.25	0.60	0.09152	0.00209	3.19068	0.06938	0.25286	0.00262	0.07218	0.00189	1457.4 ± 43.1	1453.2 ± 13.5	1454.9 ± 16.8	1408.6 ± 35.7			
WN321-13	57.06	121.15	20.96	0.47	0.06817	0.00168	1.35394	0.03187	0.14405	0.00150	0.04330	0.00119	873.8 ± 50.4	867.5 ± 8.5	869.3 ± 13.8	856.8 ± 23.1			
WN321-14	66.31	107.38	19.14	0.62	0.06826	0.00199	1.36662	0.03808	0.14522	0.00171	0.04709	0.00142	876.5 ± 59.3	874.1 ± 9.6	874.7 ± 16.3	930.1 ± 27.4			
WN321-16	56.97	96.34	17.02	0.59	0.06655	0.00211	1.27590	0.03865	0.13907	0.00173	0.04235	0.00137	823.6 ± 64.8	839.4 ± 9.8	835.0 ± 17.2	838.4 ± 26.6			
WN321-17	81.19	177.59	30.82	0.46	0.06809	0.00183	1.31252	0.03362	0.13983	0.00154	0.04682	0.00138	871.2 ± 54.6	843.7 ± 8.7	851.2 ± 14.8	924.9 ± 26.7			
WN321-18	48.34	212.51	34.44	3.00	0.06755	0.00155	1.30497	0.02863	0.14014	0.00138	0.04401	0.00123	854.7 ± 47.0	845.4 ± 7.8	847.9 ± 12.6	870.6 ± 23.9			
WN321-19	98.2	169.15	36.49	0.58	0.07471	0.00207	1.42757	0.03779	0.13860	0.00158	0.04873	0.00145	1060.8 ± 54.8	836.7 ± 9.0	900.5 ± 15.8	961.6 ± 27.9			
WN321-20	266.9	309.56	59.61	0.86	0.06743	0.00153	1.31992	0.02855	0.14199	0.00138	0.04310	0.00109	851.1 ± 46.4	855.9 ± 7.8	854.5 ± 12.5	853.0 ± 21.1			
WN321-21	74.17	225.24	37.58	0.33	0.06667	0.00164	1.28084	0.03011	0.13936	0.00143	0.04748	0.00135	827.5 ± 50.4	841.0 ± 8.1	837.2 ± 13.4	937.5 ± 26.0			
WN321-23	57.00	404.03	75.99	0.14	0.08066	0.0019	1.79695	0.04062	0.16161	0.00162	0.07674	0.00220	1213.2 ± 45.7	965.7 ± 9.0	1044.4 ± 14.8	1494.5 ± 41.3			
WN321-24	17.42	191.32	33.01	0.09	0.07145	0.00191	1.51620	0.03874	0.15395	0.00168	0.05954	0.00242	970.2 ± 53.5	923.0 ± 9.4	936.9 ± 15.6	1169.0 ± 46.1			
WN321-25	163.74	209.22	72.79	0.78	0.09252	0.00229	3.28816	0.07815	0.25781	0.00272	0.07657	0.00213	1478 ± 46.4	1478.6 ± 13.9	1478.3 ± 18.5	1491.3 ± 40.0			
休宁岩体																			
WN350-01	34.00	222.8	31.48	0.15	0.06722	0.00180	1.19774	0.02894	0.12916	0.00192	0.04036	0.00186	845 ± 27	800 ± 13	783 ± 11	800 ± 36			
WN350-02	23.96	133.09	20.43	0.18	0.06707	0.00190	1.27820	0.03308	0.13815	0.00208	0.04981	0.00224	840 ± 30	836 ± 15	834 ± 12	983 ± 43			
WN350-03	40.08	151.54	22.97	0.26	0.06705	0.00182	1.24473	0.03094	0.13458	0.00200	0.04064	0.00158	839 ± 28	821 ± 14	814 ± 11	805 ± 31			
WN350-04	28.00	189.37	27.85	0.15	0.06614	0.00170	1.22730	0.02852	0.13451	0.00198	0.04187	0.00186	811 ± 25	813 ± 13	814 ± 11	829 ± 36			
WN350-05	51.72	187.87	29.04	0.28	0.06899	0.00178	1.27926	0.02970	0.13442	0.00198	0.04921	0.00164	898 ± 25	837 ± 13	813 ± 11	971 ± 32			
WN350-06	84.63	177.71	28.40	0.48	0.06617	0.00176	1.22632	0.02964	0.13435	0.00200	0.04021	0.00126	812 ± 27	813 ± 14	813 ± 11	797 ± 24			
WN350-07	22.03	103.92	16.02	0.21	0.06905	0.00208	1.30747	0.03616	0.13727	0.00214	0.04556	0.00218	900 ± 32	849 ± 16	829 ± 12	901 ± 42			
WN350-08	27.94	69.33	11.28	0.40	0.06740	0.00238	1.28960	0.04258	0.13872	0.00228	0.04248	0.00184	850 ± 42	841 ± 19	837 ± 13	841 ± 36			
WN350-09	54.29	197.88	29.54	0.27	0.06790	0.00174	1.24684	0.02882	0.13312	0.00196	0.03351	0.00124	866 ± 25	822 ± 13	806 ± 11	666 ± 24			
WN350-10	27.81	123.68	19.08	0.22	0.06796	0.00196	1.28826	0.03410	0.13742	0.00212	0.04300	0.00190	867 ± 30	841 ± 15	830 ± 12	851 ± 37			
WN350-11	28.98	148.72	22.65	0.19	0.06504	0.00204	1.23150	0.03580	0.13727	0.00218	0.04098	0.00204	776 ± 35	815 ± 16	829 ± 12	812 ± 40			
WN350-12	33.30	213.81	31.99	0.16	0.06622	0.00174	1.23908	0.02970	0.13565	0.00202	0.04340	0.00186	813 ± 27	818 ± 13	820 ± 11	859 ± 36			
WN350-13	39.21	209.50	30.94	0.19	0.06694	0.00172	1.22255	0.02862	0.13242	0.00196	0.04355	0.00166	836 ± 26	811 ± 13	802 ± 11	862 ± 32			
WN350-14	22.70	141.02	21.42	0.16	0.06635	0.00190	1.25645	0.03302	0.13728	0.00210	0.04487	0.00218	817 ± 30	826 ± 15	829 ± 12	887 ± 42			
WN350-15	65.33	181.84	29.52	0.36	0.06800	0.00206	1.30693	0.03662	0.13934	0.00222	0.04314	0.00164	869 ± 33	849 ± 16	841 ± 13	854 ± 32			

续表 2

Continued Table 2

	含量($\times 10^{-6}$)			比值						年龄(Ma)						
	Th	U	Pb	Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$					
					$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$	$\pm 1\sigma$					
WN350-16	65.14	140.14	23.39	0.46	0.66673	0.00192	1.28625	0.03416	0.13974	0.00216	0.04263	0.00144	829 ± 31	840 ± 15	843 ± 12	844 ± 28
WN350-17	41.36	140.59	23.43	0.29	0.66649	0.00190	1.31720	0.03464	0.14363	0.00220	0.05221	0.00188	822 ± 30	853 ± 15	865 ± 12	1029 ± 36
WN350-18	58.19	165.57	26.37	0.35	0.66828	0.00202	1.28148	0.03516	0.13607	0.00214	0.04459	0.00164	877 ± 32	838 ± 16	822 ± 12	882 ± 32
WN350-19	113.88	210.05	34.64	0.54	0.66719	0.00178	1.25155	0.03034	0.13504	0.00202	0.04198	0.00130	844 ± 27	824 ± 14	817 ± 11	831 ± 25
WN350-20	25.32	154.25	22.88	0.16	0.66712	0.00192	1.23753	0.03274	0.13368	0.00206	0.04327	0.00200	841 ± 30	818 ± 15	809 ± 12	856 ± 39
WN350-21	24.58	212.35	32.23	0.12	0.66946	0.00214	1.31447	0.03734	0.13721	0.00220	0.05526	0.00282	912 ± 33	852 ± 16	829 ± 12	1087 ± 54
WN350-22	38.75	190.41	29.63	0.20	0.66715	0.00186	1.28365	0.03288	0.13860	0.00212	0.04523	0.00178	842 ± 29	838 ± 15	837 ± 12	894 ± 34
WN350-23	30.34	145.34	22.95	0.21	0.66636	0.00196	1.28608	0.03536	0.14052	0.00220	0.04576	0.00198	818 ± 32	840 ± 16	848 ± 12	904 ± 38
WN350-24	46.33	292.15	49.23	0.16	0.67051	0.00180	1.47269	0.03456	0.15143	0.00226	0.04979	0.00182	943 ± 25	919 ± 14	909 ± 13	982 ± 35
WN350-25	196.2	285.83	48.25	0.69	0.66727	0.00178	1.24393	0.03026	0.13408	0.00202	0.04033	0.00124	846 ± 27	821 ± 14	811 ± 11	799 ± 24
WN350-26	30.08	163.37	26.29	0.18	0.68036	0.00256	1.53966	0.04564	0.13892	0.00230	0.06735	0.00296	1206 ± 33	946 ± 18	839 ± 13	1317 ± 56
WN350-27	25.60	150.74	22.82	0.17	0.66727	0.00206	1.26101	0.03580	0.13591	0.00216	0.04545	0.00214	846 ± 33	828 ± 16	821 ± 12	898 ± 41
WN350-28	59.34	259.93	36.18	0.23	0.66986	0.00196	1.20385	0.03126	0.12494	0.00192	0.02961	0.00120	924 ± 29	802 ± 14	759 ± 11	590 ± 24
WN350-29	27.52	158.38	24.98	0.17	0.66528	0.00198	1.27626	0.03628	0.14176	0.00224	0.04709	0.00210	783 ± 34	835 ± 16	855 ± 13	930 ± 41
WN350-30	28.44	261.79	39.84	0.11	0.66752	0.00192	1.29483	0.03426	0.13904	0.00216	0.04657	0.00216	854 ± 30	843 ± 15	839 ± 12	920 ± 42
灵山岩体																
WN304-01	776.47	1399.23	206.58	0.55	0.66846	0.00071	1.12180	0.02060	0.11887	0.00180	0.03809	0.00098	883 ± 17	764 ± 10	724 ± 10	756 ± 19
WN304-02	693.16	1540.39	205.73	0.45	0.67043	0.00075	1.04561	0.01980	0.10770	0.00164	0.04155	0.00110	941 ± 18	727 ± 10	659 ± 10	823 ± 21
WN304-04	292.23	378.65	64.30	0.77	0.66617	0.00084	1.18550	0.02736	0.12997	0.00206	0.04114	0.00112	812 ± 24	794 ± 13	788 ± 12	815 ± 22
WN304-05	607.60	1306.71	201.77	0.46	0.66553	0.00063	1.14572	0.01936	0.12684	0.00188	0.04210	0.00104	791 ± 16	775 ± 9	770 ± 11	834 ± 20
WN304-08	324.51	651.86	95.76	0.50	0.66691	0.00087	1.11086	0.02620	0.12045	0.00192	0.03739	0.00114	835 ± 25	759 ± 13	733 ± 11	742 ± 22
WN304-09	149.20	351.63	49.32	0.42	0.66925	0.00140	1.12395	0.04256	0.11774	0.00228	0.03409	0.00164	906 ± 47	765 ± 20	718 ± 13	678 ± 32
WN304-10	603.44	1630.79	250.29	0.37	0.66891	0.00068	1.20596	0.02096	0.12696	0.00190	0.04826	0.00124	896 ± 16	803 ± 10	770 ± 11	953 ± 24
WN304-11	269.63	602.65	99.79	0.45	0.66693	0.00074	1.26477	0.02504	0.13708	0.00210	0.04337	0.00120	836 ± 19	830 ± 11	828 ± 12	858 ± 23
WN304-12	583.54	1007.70	142.54	0.58	0.66858	0.00076	1.05681	0.02082	0.11179	0.00170	0.03814	0.00100	886 ± 19	732 ± 10	683 ± 10	757 ± 19
WN304-14	260.07	560.16	90.03	0.46	0.66802	0.00078	1.23032	0.02544	0.13121	0.00202	0.04421	0.00124	869 ± 20	814 ± 12	795 ± 12	874 ± 24
WN304-15	908.9	1270.57	173.18	0.72	0.66816	0.00073	0.98956	0.01886	0.10532	0.00160	0.03327	0.00084	873 ± 18	698 ± 10	646 ± 9	662 ± 16
WN304-16	1049.85	1731.50	230.74	0.61	0.66908	0.00071	0.99633	0.01798	0.10463	0.00158	0.03523	0.00088	901 ± 17	702 ± 9	641 ± 9	700 ± 17
WN304-18	526.80	1093.6	171.83	0.48	0.66734	0.00067	1.18025	0.02054	0.12715	0.00190	0.04400	0.00110	848 ± 16	791 ± 10	772 ± 11	870 ± 21
WN304-19	684.35	599.68	109.31	1.14	0.66748	0.00072	1.18891	0.02242	0.12781	0.00194	0.04020	0.00098	853 ± 18	795 ± 10	775 ± 11	797 ± 19

续表 2

Continued Table 2

	含量 ($\times 10^{-6}$)			比值					年龄 (Ma)						
	Th	U	Pb	Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$		
WN304-20	276.02	388.87	60.79	0.71	0.06845	0.00087	1.14352	0.02650	0.12120	0.00192	0.03754	0.00106	774 ± 13	737 ± 11	745 ± 21
WN304-21	186.77	612.92	90.63	0.30	0.06597	0.00074	1.13789	0.02282	0.12513	0.00192	0.04112	0.00122	772 ± 11	760 ± 11	814 ± 24
WN304-22	766.36	1515.56	235.56	0.51	0.06666	0.00070	1.15601	0.02152	0.12581	0.00190	0.04182	0.00110	780 ± 10	764 ± 11	828 ± 21
WN304-23	343.26	807.36	123.78	0.43	0.06544	0.00066	1.15401	0.02050	0.12793	0.00192	0.04024	0.00104	779 ± 10	776 ± 11	797 ± 20
WN304-24	764.03	1719.29	245.18	0.44	0.06663	0.00069	1.12493	0.02060	0.12247	0.00184	0.04230	0.00110	765 ± 10	745 ± 11	837 ± 21
WN304-25	518.59	1273.4	179.92	0.41	0.06918	0.00073	1.10669	0.02066	0.11605	0.00176	0.03997	0.00106	757 ± 10	708 ± 10	792 ± 21
WN304-26	385.43	814.49	130.92	0.47	0.06613	0.00078	1.20419	0.02546	0.13211	0.00206	0.04323	0.00122	803 ± 12	800 ± 12	855 ± 24
WN304-27	57.09	194.77	26.86	0.29	0.06735	0.00126	1.08662	0.03800	0.11705	0.00216	0.04013	0.00194	747 ± 18	714 ± 12	795 ± 38
WN304-28	482.37	1817.46	239.58	0.27	0.06713	0.00065	1.04868	0.01776	0.11332	0.00168	0.03913	0.00104	728 ± 9	692 ± 10	776 ± 20
WN304-3	152.68	278.21	41.90	0.55	0.07008	0.00115	1.17742	0.03568	0.12189	0.00214	0.04027	0.00144	790 ± 17	741 ± 12	798 ± 28
WN304-6	1024.01	1903.77	277.40	0.54	0.06891	0.00087	1.28798	0.02952	0.13559	0.00216	0.03940	0.00112	840 ± 13	820 ± 12	781 ± 22
WN304-7	496.71	479.01	79.70	1.04	0.07025	0.00083	1.24045	0.02624	0.12810	0.00200	0.03988	0.00108	819 ± 12	777 ± 11	790 ± 21
WN304-13	246.31	474.72	79.30	0.52	0.06970	0.00106	1.24592	0.03504	0.12967	0.00220	0.03975	0.00128	822 ± 16	786 ± 13	788 ± 25
WN304-17	804.53	2602.03	293.00	0.31	0.07815	0.00076	0.99831	0.01702	0.09267	0.00138	0.03908	0.00100	571.3 ± 4.1	703 ± 4.3	774.8 ± 9.8
WN304-29	432.44	559.57	90.70	0.77	0.06972	0.00090	1.23305	0.02888	0.12830	0.00206	0.03741	0.00110	816 ± 13	778 ± 12	742 ± 21
WN304-30	611.87	1220.41	190.30	0.50	0.06965	0.00075	1.19115	0.02268	0.12407	0.00188	0.04270	0.00112	796 ± 11	754 ± 11	845 ± 22
莲花山岩体															
WN312-01	298.93	863.54	119.54	0.35	0.07173	0.00153	1.15210	0.04668	0.11651	0.00208	0.04143	0.00176	778.2 ± 22.0	710.4 ± 12.0	820.6 ± 34.1
WN312-02	190.18	599.33	87.77	0.32	0.07947	0.00168	1.33131	0.05350	0.12152	0.00218	0.05001	0.00210	859.5 ± 11.7	739.3 ± 6.2	986.4 ± 20.3
WN312-03	122.86	394.84	50.80	0.31	0.07424	0.00189	1.11863	0.05408	0.10930	0.00224	0.03749	0.00208	762.3 ± 26.0	668.7 ± 13.0	743.9 ± 40.5
WN312-04	161.40	631.17	99.65	0.26	0.06637	0.00141	1.25861	0.05060	0.13757	0.00244	0.04510	0.00194	827.3 ± 22.8	830.9 ± 13.9	891.7 ± 37.8
WN312-05	127.12	337.47	50.19	0.38	0.07172	0.00266	1.22054	0.08642	0.12346	0.00346	0.04367	0.00348	810.0 ± 39.5	750.5 ± 19.8	864.0 ± 67.7
WN312-06	140.2	1043.88	159.02	0.13	0.06807	0.00160	1.27345	0.05664	0.13571	0.00258	0.04949	0.00282	833.9 ± 24.7	820.3 ± 14.6	976.3 ± 54.2
WN312-07	200.17	654.91	87.14	0.31	0.06956	0.00173	1.07331	0.05052	0.11193	0.00222	0.04063	0.00210	740.4 ± 24.7	683.9 ± 12.8	805.0 ± 40.8
WN312-08	157.64	263.16	45.55	0.60	0.06667	0.00155	1.25066	0.05528	0.13608	0.00256	0.04403	0.00194	823.7 ± 24.9	822.5 ± 14.7	870.8 ± 37.8
WN312-09	133.60	549.09	75.95	0.24	0.06964	0.00177	1.13693	0.05470	0.11844	0.00238	0.04265	0.00238	771.1 ± 26.0	721.6 ± 13.7	844.1 ± 46.1
WN312-10	321.51	738.33	82.61	0.44	0.06584	0.00166	0.81080	0.03868	0.08934	0.00176	0.03539	0.00170	602.9 ± 21.7	551.6 ± 10.4	703.0 ± 32.7
WN312-11	188.93	548.93	82.41	0.34	0.06602	0.00158	1.14610	0.05200	0.12594	0.00238	0.03995	0.00192	775.4 ± 24.6	764.7 ± 13.7	791.8 ± 36.7
WN312-12	202.09	488.33	81.21	0.41	0.06613	0.00156	1.24852	0.05570	0.13697	0.00256	0.04277	0.00196	822.7 ± 25.1	827.5 ± 14.5	846.4 ± 38.2
WN312-13	128.90	493.31	66.66	0.26	0.06572	0.00180	1.04461	0.05446	0.11531	0.00242	0.03840	0.00232	726.2 ± 27.0	703.5 ± 14.0	761.6 ± 45.1

续表 2

Continued Table 2

	含量($\times 10^{-6}$)		比值						年龄(Ma)					
	Th	U	Th/U	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	$\pm 1\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$
WN312-14	73.93	388.43	57.24	0.19	0.06570	0.00161	1.16238	0.05392	0.12834	0.00246	0.044225	783.1 ± 25.1	778.4 ± 14.0	836.4 ± 43.7
WN312-15	274.65	270.8	47.10	1.01	0.06692	0.00196	1.13243	0.06310	0.12277	0.00272	0.03881	768.9 ± 30.0	746.5 ± 15.6	769.6 ± 37.9
WN312-16	104.81	138.02	23.77	0.76	0.06605	0.00191	1.17396	0.06472	0.12895	0.00278	0.04050	788.5 ± 30.2	781.9 ± 15.9	802.4 ± 40.9
WN312-17	116.57	943.33	133.07	0.12	0.06632	0.00166	1.13985	0.05404	0.12470	0.00240	0.03946	772.4 ± 25.6	757.5 ± 13.8	782.2 ± 44.2
WN312-18	160.47	425.04	65.08	0.38	0.06935	0.00187	1.19004	0.06092	0.12449	0.00256	0.04288	796.0 ± 28.2	756.4 ± 14.6	848.6 ± 44.6
WN312-19	65.70	240.57	40.17	0.27	0.06747	0.00213	1.30946	0.07888	0.14079	0.00330	0.04539	849.9 ± 34.7	849.1 ± 18.7	897.2 ± 62.7
WN312-20	117.40	439.6	66.40	0.27	0.07936	0.00222	1.31352	0.03482	0.12007	0.00128	0.06474	851.7 ± 15.3	731.0 ± 7.4	1267.9 ± 34.6
WN312-21	366.07	1788.35	230.7	0.20	0.09136	0.00233	1.28371	0.03091	0.10194	0.00100	0.06875	838.5 ± 13.7	625.8 ± 5.8	1344.0 ± 32.5
石耳山斑岩体														
WN311-01	131.57	211.20	35.83	0.62	0.06534	0.00199	1.17328	0.03388	0.13026	0.00144	0.04026	788.2 ± 15.8	789.4 ± 8.2	797.7 ± 22.2
WN311-02	237.92	364.55	62.18	0.65	0.06429	0.00185	1.16203	0.03166	0.13114	0.00138	0.03832	782.9 ± 14.9	794.4 ± 7.9	760.0 ± 20.1
WN311-03	103.48	176.59	28.02	0.59	0.07248	0.00276	1.20027	0.04338	0.12015	0.00166	0.04107	800.7 ± 20.0	731.4 ± 9.5	813.6 ± 28.3
WN311-04	100.18	163.55	28.29	0.61	0.06540	0.00202	1.18595	0.03476	0.13155	0.00146	0.04308	794.1 ± 16.2	796.7 ± 8.3	852.5 ± 23.8
WN311-05	126.95	192.98	33.49	0.66	0.06532	0.00224	1.17355	0.03835	0.13034	0.00159	0.04255	788.3 ± 17.9	789.8 ± 9.1	842.3 ± 25.7
WN311-06	163.94	250.05	43.48	0.66	0.06546	0.00205	1.18036	0.03502	0.13081	0.00146	0.04163	791.5 ± 16.3	792.5 ± 8.3	824.3 ± 23.4
WN311-07	198.14	364.07	61.39	0.54	0.06494	0.00202	1.16404	0.03425	0.13004	0.00144	0.04225	783.9 ± 16.1	788.1 ± 8.2	836.5 ± 24.0
WN311-08	336.65	498.7	82.76	0.68	0.06621	0.00202	1.13744	0.03290	0.12464	0.00135	0.03825	771.3 ± 15.6	757.2 ± 7.8	758.8 ± 21.2
WN311-09	140.91	255.39	43.37	0.55	0.06482	0.00207	1.16885	0.03544	0.13082	0.00148	0.04169	786.1 ± 16.6	792.5 ± 8.4	825.6 ± 24.3
WN311-10	267.93	395.58	67.83	0.68	0.06606	0.00215	1.16318	0.03584	0.12775	0.00146	0.04051	783.5 ± 16.8	775.0 ± 8.4	802.7 ± 23.7
WN311-11	104.43	167.67	28.94	0.62	0.06542	0.00215	1.17807	0.03677	0.13064	0.00150	0.04023	790.4 ± 17.1	791.5 ± 8.5	797.1 ± 24.0
WN311-12	169.49	244.93	40.04	0.69	0.06392	0.00265	1.06680	0.04214	0.12108	0.00173	0.03835	737.2 ± 20.7	736.8 ± 9.9	760.6 ± 27.6
WN311-13	162.92	256.16	46.72	0.64	0.06625	0.00234	1.24917	0.04179	0.13680	0.00167	0.04294	823.0 ± 18.9	826.5 ± 9.5	849.8 ± 27.2
WN311-14	64.98	128.76	20.67	0.50	0.06620	0.00236	1.13670	0.03840	0.12457	0.00153	0.03859	770.9 ± 18.3	756.8 ± 8.8	765.3 ± 25.6
WN311-15	284.02	287.56	49.82	0.99	0.06852	0.00229	1.12681	0.03566	0.11930	0.00137	0.03706	766.2 ± 17.0	726.6 ± 7.9	735.4 ± 22.1
WN311-16	182.98	274.61	45.38	0.67	0.06401	0.00230	1.07984	0.03672	0.12239	0.00149	0.03877	743.6 ± 17.9	744.3 ± 8.6	768.9 ± 25.0
WN311-17	281.04	420.13	74.73	0.67	0.06575	0.00226	1.19293	0.03882	0.13161	0.00154	0.04120	797.3 ± 18.0	797.1 ± 8.8	816.0 ± 25.6
WN311-18	43.12	92.35	14.51	0.47	0.06818	0.00318	1.14857	0.05098	0.12220	0.00195	0.03756	776.6 ± 24.1	743.2 ± 11.2	745.2 ± 34.2
WN311-19	53.85	82.67	14.32	0.65	0.06528	0.00276	1.15426	0.04638	0.12827	0.00183	0.04048	783.3 ± 86.5	778.0 ± 10.5	802.0 ± 30.3
WN311-20	146.00	213.26	37.61	0.68	0.06534	0.00241	1.16386	0.04053	0.12921	0.00160	0.04123	783.8 ± 19.0	783.4 ± 9.1	816.6 ± 27.2
WN311-21	274.35	352.67	62.53	0.78	0.06492	0.00232	1.14168	0.03852	0.12757	0.00153	0.03952	773.3 ± 18.3	774.0 ± 8.7	783.4 ± 25.4

西澳大学的 Glitter 软件获得微量元素含量及 U-Pb 同位素比值, 微量元素的含量以 Si 元素为内标, 以 NIST 610 为外标; U-Pb 同位素比值的确定采用 TEMORA 锆石标样(417Ma) 进行元素间的分馏校正, 由于锆石中²⁰⁴Pb 的含量极低, 因此未进行普通铅的校正。U-Pb 谐和年龄是根据同位素比值应用 Ludwig (2001) 的 Isoplot 程序得到的。分析结果见表 2。

3 分析结果

3.1 元素地球化学特征

区内新元古代花岗岩类侵入体代表性样品的全岩主量和微量元素分析结果列于表 1。其中许村、歙县和休宁三个岩体, 除休宁岩体部分样品的 SiO₂ 含量大于 70.0% 外, 其余的均小于 70.0% (介于 65.21% ~ 69.83%)。在 TAS 分类图解上, 这三个岩体除少数样品进入到石英二长岩和花岗岩区域外, 绝大多数样品落在花岗闪长岩范围(图 2a)。它们的 A/CNK 值均大于 1.1, 最高达 1.9(图 2b), 显示铝强过饱和的特点, 这与这三个岩体中普遍出现富铝矿物堇青石是吻合的。这三个岩体也被普遍认为是皖南地区新元古代 S 花岗岩的典型代表(邢凤鸣, 1990; 李献华等, 2002; 吴荣新等, 2005a)。在构造环境判别图上, 这三个岩体除个别样品外, 其它分析点都落在火山弧(或同造山)花岗岩范围内(图 2c), 属于同碰撞过程中形成的花岗岩类(图 2d)。与此相对的是灵山和莲花山两个岩体, 以高 SiO₂ (除个别样品外, 其余均大于 77.0%)、富碱(8.15% ~ 9.68%)、高 K₂O(4.46% ~ 5.21%) 和高的 FeO^{*}/MgO 比值(表 1) 为特征, 大多数样品的 A/CNK 小于 1.0(图 2b), 显示其总体过碱的特点。在构造环境判别图上, 除灵山岩体的部分样品(WN-306) 外, 其它分析点都落在板内环境(图 2c) 和 A-型花岗岩区域(图 2e), 属于晚造山或后造山的花岗岩类(图 2d)。在 Nb-Ce-Y 图解上, 灵山岩体和莲花山岩体属于 A2 型花岗岩, 也指示其形成于后造山的构造环境下。

两类岩体的稀土元素配分模式差异悬殊(图 3), 其中三个 S 型花岗闪长岩类侵入体(许村、歙县和休宁岩体) 均表现为亏损重稀土元素, 轻、重稀土元素的分馏程度中等(除个别样品外, 绝大多数的 (La/Yb)_N 值介于 5.24 ~ 9.87 之间), 中等程度的负 Eu 异常 (Eu/Eu^{*} 介于 0.47 ~ 0.72 之间), 稀土元素球粒隕石标准化曲线呈较平滑的右倾型。在不相容元素原始地幔标准化蛛网图上, 该类岩体表现为富集 U、Th, 亏损高场强元素 Nb 和 Ta (相对于 La), 尤以强烈亏损 Sr 为特征, 除个别样品外同时还亏损 Ba。而两个 A 型花岗岩体(灵山和莲花山岩体) 均表现出强烈的负 Eu 异常 (Eu/Eu^{*} 介于 0.06 ~ 0.40 之间), 轻、重稀土元素之间的分馏程度弱 ((La/Yb)_N 介于 1.49 ~ 3.55 之间), 稀土元素球粒隕石标准化曲线呈两侧平坦、中间深谷型。在不相容元素原始地幔标准化蛛网图上, 该类岩体以强烈亏损 Sr 和 Ba 为特征, 富集 U 和 Th, 但高场强元素 Nb 和 Ta 相对于 La 无明显的亏损。

石耳山钾长花岗斑岩的岩石化学特征部分与灵山和莲花山两个岩体类似, 如也表现出高 SiO₂ (77.44%)、富碱(8.06%) 的特征, 但其 K₂O 的含量更高(达 6.00%), 它们的 A/CNK 总体大于 1.0, 属铝过饱和。在构造环境判别图上, 它们落在火山弧花岗岩范围内(图 2c) 和 I-或 S-型花岗岩区域(图 2e)。该斑岩体与两个 A 型花岗岩体一样, 也表现出强烈的负 Eu 异常 (Eu/Eu^{*} 值为 0.08), 但富集重稀土元素 ((La/Yb)_N = 0.92), 意味着部分熔融过程中石榴石进入到熔体相。在不相容元素原始地幔标准化蛛网图上, 该斑岩体强烈亏损 Sr 和 Ba, 富集 U 和 Th, 高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf 相对于旁边的元素也显示出一定程度的富集。

Watson and Harrison (1983) 曾通过实验得出 Zr 的饱和度与岩浆温度之间的函数关系为: $T_{Zr} = 12900 / [2.95 + 0.85M + \ln(496000/Zr_{melt})]$, 式中 M = (Na + K + 2Ca) / (Al × Si), 单位为摩尔百分数, Zr_{melt} 为熔体中的 Zr 含量。区内 S 型花岗闪长岩类侵入体中普遍含有继承锆石, 说明锆石结晶时熔体中的 Zr 是饱和的。根据 Zr 和主量元素含量, 计算得到它们的 Zr 饱和温度许村岩体为 749 ~ 808℃ (平均 776℃), 歙县岩体为 764 ~ 817℃ (平均 751℃), 休宁岩体为 834℃。属于 A 型花岗岩的灵山岩体和莲花山岩体中由于未见残留锆石, 说明锆石结晶时熔体中的 Zr 可能未达到饱和, 因而表 1 中没有计算这两个岩体的 Zr 饱和温度。

3.2 锆石 U-Pb 定年

各岩体锆石 CL 照片见图 4、图 5, ²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁷Pb/²³⁵U 谐和图见图 6。

3.2.1 许村岩体

该岩体中的锆石多为无色透明, 少数带浅黄色色调。晶形以自形短柱状为主, 部分颗粒的柱极不发育而呈近双锥状(参见图 4b, h 中部分颗粒), 少数呈长柱状。长宽比一般 1:1 ~ 2:1, 少数达到 3:1。CL 照片显示大多数锆石晶体内部发育有密集的震荡生长环带, 部分锆石颗粒核心与外环的环带发育程度差异悬殊(参见图 4a, d, f, g 中部分颗粒), 少数锆石晶体的内部还见有继承锆石的残留(图 4c 最下部的颗粒)。一些长柱状的锆石晶体内部的环带不发育, 仅见有稀疏的直纹条带(图 4d)。本次研究共对该样品的 25 个锆石颗粒进行了年龄测定(表 2), 其中分析点 04 为继承锆石核, 它的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄达 1202 ± 12Ma。分析点 17 和 24 的年龄明显不谐和, 其余 22 个分析点在 ²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁷Pb/²³⁵U 谐和图上的上交点年龄为 850 ± 10Ma (图 6), 其中没有明显 Pb 丢失的 19 个分析点(分析点 9、22 和 25 除外), 虽然晶体的内部结构差别很大, 但它们的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄差别不大(介于 834 ~ 877Ma 之间), 其加权平均年龄为 852 ± 6Ma, 与谐和图上的上交点年龄近于一致, 应代表许村岩体的侵位年龄。

3.2.2 歙县岩体

该岩体中锆石晶体形态与许村岩体中的锆石类似, 也主

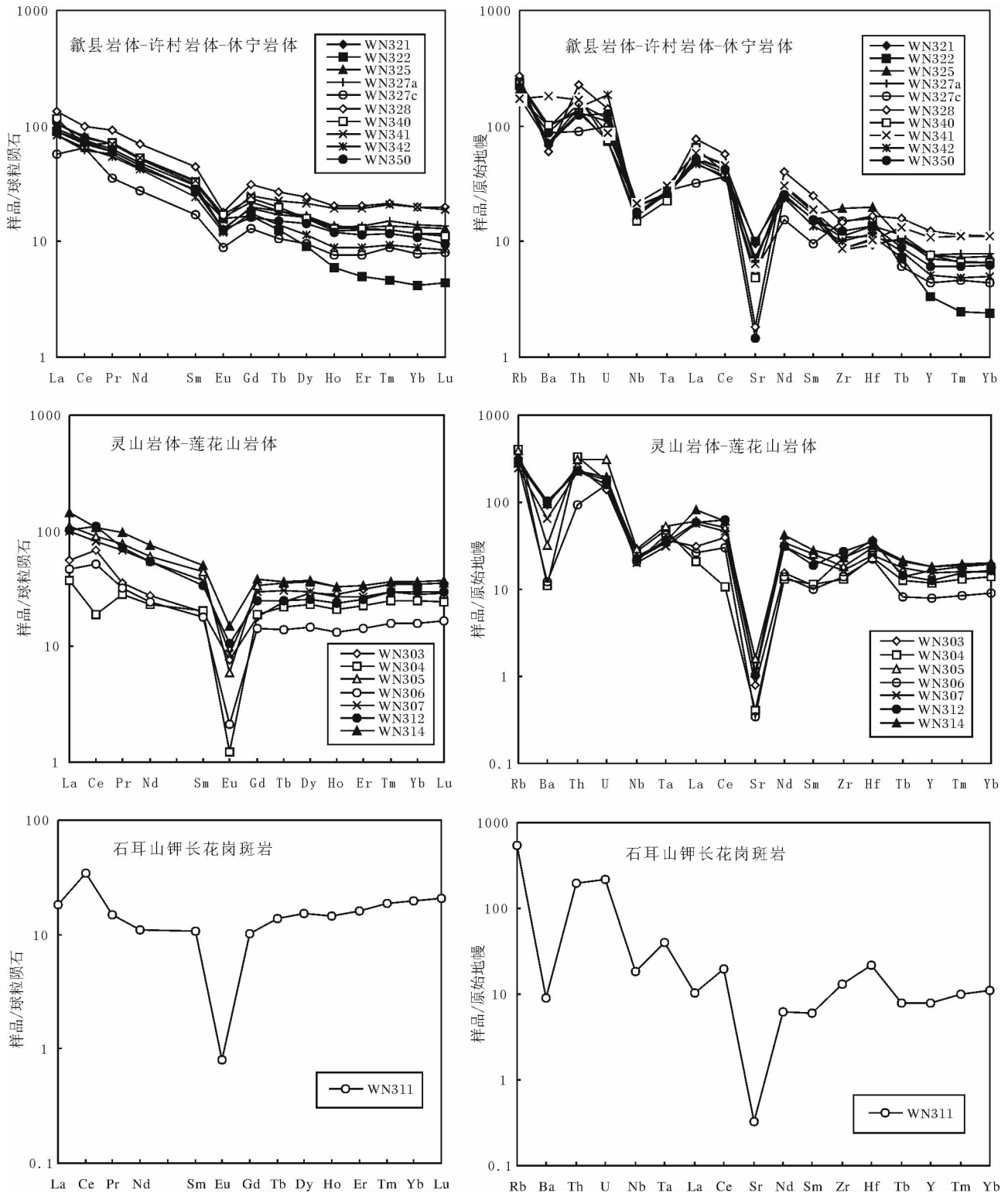


图3 江南造山带东段新元古代花岗岩类的稀土元素球粒陨石标准化曲线和不相容元素原始地幔标准化蛛网图(球粒陨石数值据 Boynton, 1984;原始地幔数值据 McDonough and Sun, 1995)

Fig.3 Chondrite-normalized REE-patterns and primitive mantle normalized incompatible element patterns for Neoproterozoic granitoids from the eastern segment of Jiangnan orogen (Chondrite data from Boynton, 1984; Primitive mantle data from McDonough and Sun, 1995)

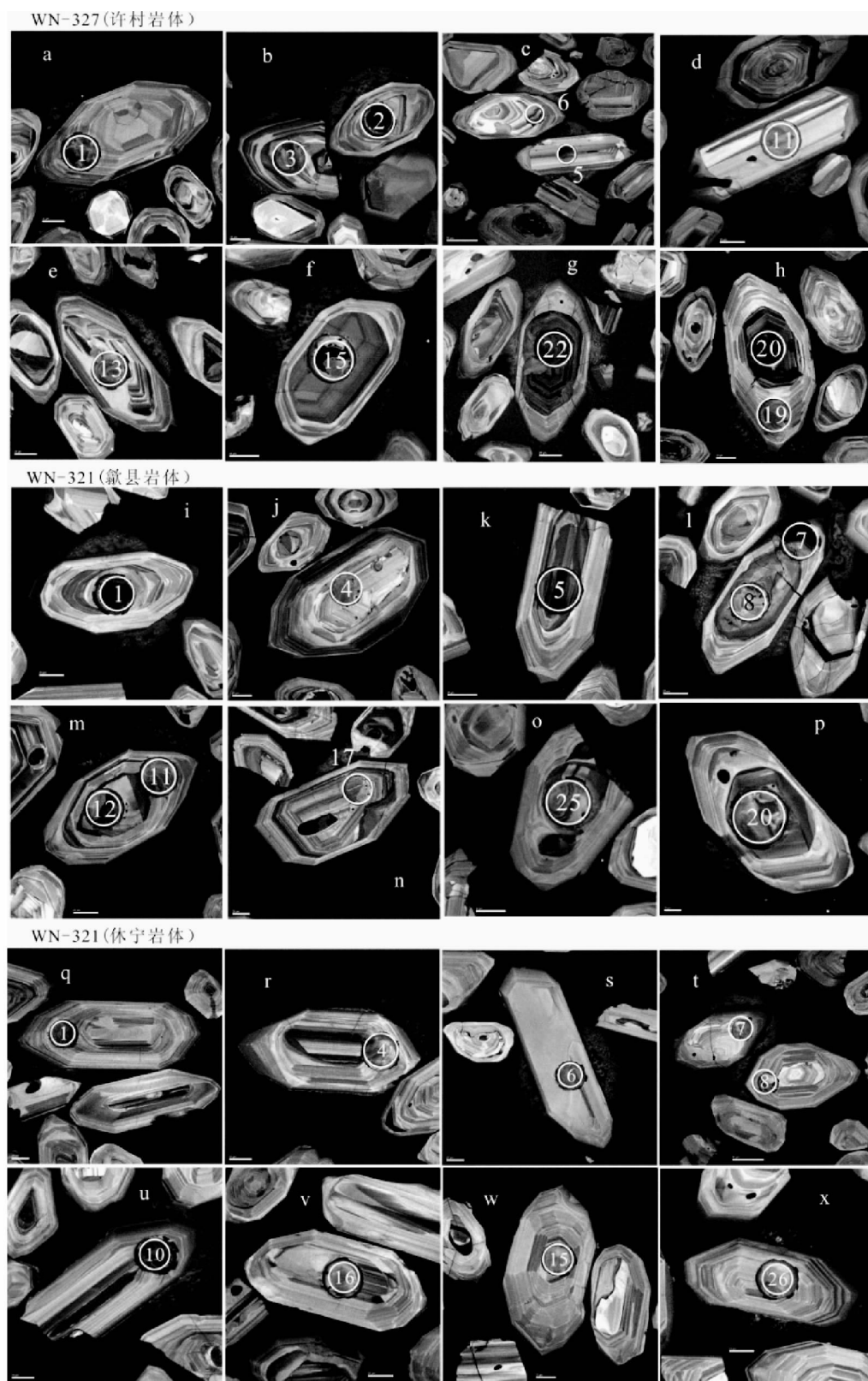


图4 江南造山带东段S型花岗闪长岩体中部分锆石的阴极发光照片

Fig. 4 CL images of dated zircon crystals from the S-type granodiorite in eastern segment of Jiangnan orogen

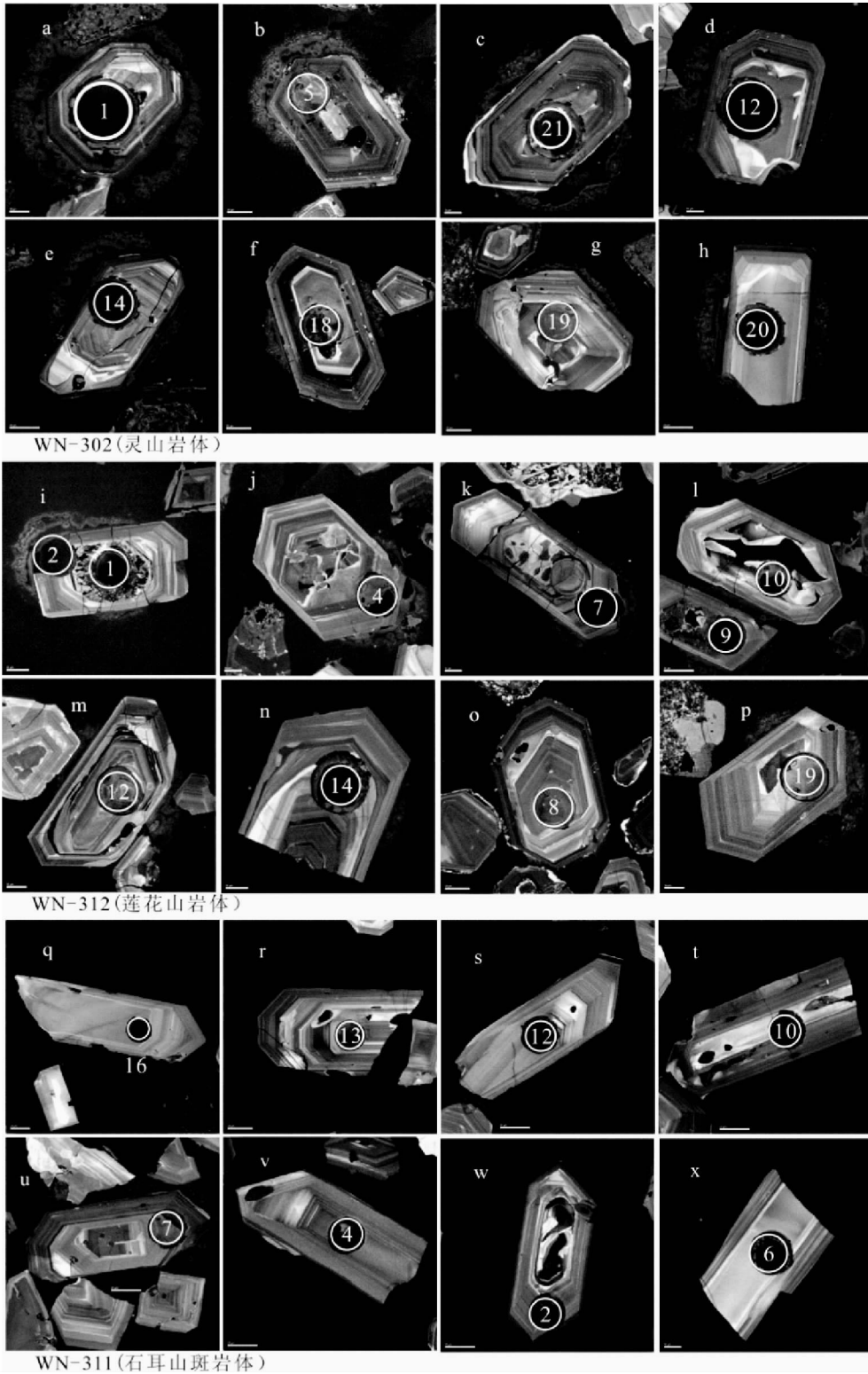


图5 江南造山带东段A型花岗岩及花岗斑岩中部分锆石的阴极发光照片

Fig. 5 CL images of dated zircon crystals from the A-type granite and granitic porphyrite

要为短柱状自形晶,长宽比一般1:1~2:1。CL照片显示大多数锆石晶体内部发育有密集的震荡生长环带,少数锆石晶体的内部还见有继承锆石的残留(图4k, l, m, o)。本次

研究共对其中19个锆石颗粒的21个点进行了年龄测定,其中分析点8、12、25为继承锆石核,它们的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄分别达到 $1741 \pm 34\text{Ma}$ 、 $1457 \pm 43\text{Ma}$ 和 $1478 \pm 46\text{Ma}$

($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄分别为 $1671 \pm 15\text{Ma}$ 、 $1455 \pm 17\text{Ma}$ 和 $1478 \pm 19\text{Ma}$)。分析点 7 虽然分析的是岩浆成因的环边, 但可能激光剥蚀到了少量核部, 因而所获得的年龄可能是混合年龄($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 $901 \pm 14\text{Ma}$)。分析点 19、23 和 24 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄分别为 $901 \pm 16\text{Ma}$ 、 $1044 \pm 15\text{Ma}$ 和 $937 \pm 16\text{Ma}$, 也明显高于其他分析点, 推测为继承锆石或捕获锆石的年龄。其余 14 个分析点在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上的上交点年龄为 $838 \pm 11\text{Ma}$ (图 6), 其中没有明显 Pb 丢失的 13 个分析点(分析点 11 除外)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $837 \pm 14\text{Ma}$, 与谐和图上的上交点年龄近于一致, 该年龄值可代表歙县岩体的侵位时间。

3.2.3 休宁岩体

该岩体中锆石的晶体形态与许村岩体和歙县岩体中的锆石类似, 也主要为短柱状自形晶, 少数呈长柱状。CL 照片显示大多数锆石晶体内部发育有密集的震荡生长环带, 部分锆石颗粒核心与外围的环带发育程度差异悬殊(参见图 4q, r), 少数锆石晶体的内部还见有继承锆石的残留(如图 4w 左侧颗粒)。本次研究共对 30 个锆石颗粒进行了年龄测定, 其中分析点 24 为继承锆石核, 它的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 $909 \pm 13\text{Ma}$, 明显高于其他分析点。分析点 26 的年龄明显不谐和, 其余 28 个分析点在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上的上交点年龄为 $832 \pm 8\text{Ma}$ (图 6), 其中没有明显 Pb 丢失的 26 个分析点(分析点 1 和 28 除外)的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $826 \pm 6\text{Ma}$, 该年龄值可代表休宁岩体的侵位时间。

3.2.4 灵山岩体

该岩体中锆石的晶体形态主要为短柱状自形晶, 长宽比介于 $1:1 \sim 2:1$ 之间。这些锆石中的 U 含量普遍较高, 由于高放射性, 许多锆石颗粒受到较强的放射性损伤, 主要表现为裂隙普遍发育, 部分颗粒表面因放射性轰击而呈筛孔状构造, 少数锆石颗粒甚至因放射性蜕变而发生非晶质化。CL 照片显示大多数锆石晶体内部普遍发育有密集的震荡生长环带(图 5a, g), 少数长柱状锆石的内部环带不发育(参见图 5h)。由于晶体结构因放射性损伤而遭到了一定程度的破坏, Pb 丢失现象比较普遍, 各分析点之间的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄差别较大(表 2)。本次研究共对 30 个锆石颗粒的 30 个分析点进行了年龄测定, 其中分析点 WN304-3、6、7、13、17、29、30 明显偏离主要分析点所构成的不一致线。其余 24 个分析点在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上的上交点年龄为 $823 \pm 18\text{Ma}$ (图 6), 该年龄可大致代表区内新元古代 A 型花岗岩的侵位时间。

3.2.5 莲花山岩体

该岩体中的锆石形貌总体与灵山岩体中的锆石类似, 主要为短柱状自形晶, 长宽比一般 $1:1 \sim 2:1$ 。这些锆石也具较高的 U 含量, 部分锆石颗粒因受到较强的放射性损伤而呈筛孔状构造。大多数锆石内部含有细小的矿物包裹体, 其成分与岩石中的主要矿物一致, 主要为黑云母和钾长石等, 表明锆石的结晶时间与岩石中主要矿物的结晶几乎同时甚至

稍晚。CL 照片显示锆石晶体内部普遍发育有密集的震荡生长环带(图 5i-p), 且核部未见有明显的残留锆石。由于晶体结构因放射性损伤而遭到了一定程度的破坏, Pb 丢失现象比较普遍, 各分析点之间的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄差别较大。本次研究共对 20 颗锆石的 21 个点进行了年龄测定, 其中分析点 02、10、20、21 明显偏离主要分析点所构成的不一致线。其余 17 个分析点在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上的上交点年龄为 $814 \pm 26\text{Ma}$ (图 6), 该年龄在误差范围内与灵山岩体的侵位时间类似。

3.2.6 石耳山钾长花岗岩斑岩体

该斑岩体中的锆石明显分两类, 一类为高 U 型, 表面多因放射性轰击而呈筛孔状构造, 部分颗粒甚至因放射性蜕变而发生非晶质化。另一类锆石呈柱状, 长宽比一般大于 $2:1$ 。CL 照片显示这些锆石晶体的内部岩浆生长环带不发育(图 5q~z), 大多数颗粒内部仅见有稀疏的直纹条带, 少数短柱状锆石晶体的内部见有稀疏的环带。少数锆石晶体的内部还见有继承锆石的残留(如图 5w)。本次研究对 21 个锆石颗粒进行了年龄测定, 他们在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上的上交点年龄为 $785 \pm 11\text{Ma}$ (图 6), 其中没有明显 Pb 丢失的 17 个颗粒的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 加权平均年龄为 $783 \pm 8\text{Ma}$, 与谐和图上的上交点年龄在误差范围内一致, 可代表石耳山钾长花岗岩斑岩的侵位时间。

4 讨论

4.1 区内晚元古代岩浆岩的时空分布

江南造山带东段晚元古代的岩浆活动较发育, 所形成的岩石类型繁多, 对于这些岩浆岩的形成时代, 早期的同位素年龄资料多为 K-Ar 法、Rb-Sr 和 Sm-Nd 等时线法, 也有少数单颗粒锆石 Pb-Pb 法, 数据的质量普遍不高, 甚至存在着相互矛盾之处。近年来, 随着一些 SHRIMP 和 LA-ICP-MS 法锆石 U-Pb 年龄资料的陆续发表, 加上本次定年研究的成果, 为我们初步勾画江南造山带东段岩浆活动的时空演化规律提供了可能。区内的岩浆岩按岩浆作用的方式大致可归为三类: 蛇绿混杂岩、火山岩和花岗岩类, 其中火山岩又包括了早期岛弧环境下形成的火山岩和晚期裂谷环境下形成的火山岩两种, 花岗岩类则可分为同碰撞(同造山)阶段形成的 S 型花岗闪长岩类和晚-后造山阶段形成的 A 型花岗岩类。这些岩浆岩及其性质的时空演化规律为我们再现造山作用的过程提供了可能。

4.1.1 蛇绿岩套

区内出露的代表着洋壳残留的蛇绿岩套主要有三条, 分别是赣东北蛇绿岩套、皖南歙县(伏川)蛇绿岩套和江绍断裂带东端的蛇绿岩套。

对于赣东北的蛇绿岩套, 早先的 Sm-Nd 等时线年龄一般介于 $930 \sim 1030\text{Ma}$, 如周国庆和赵建新(1991)测得其中超基性岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 $929.7 \pm 33.8\text{Ma}$, 邢凤鸣等

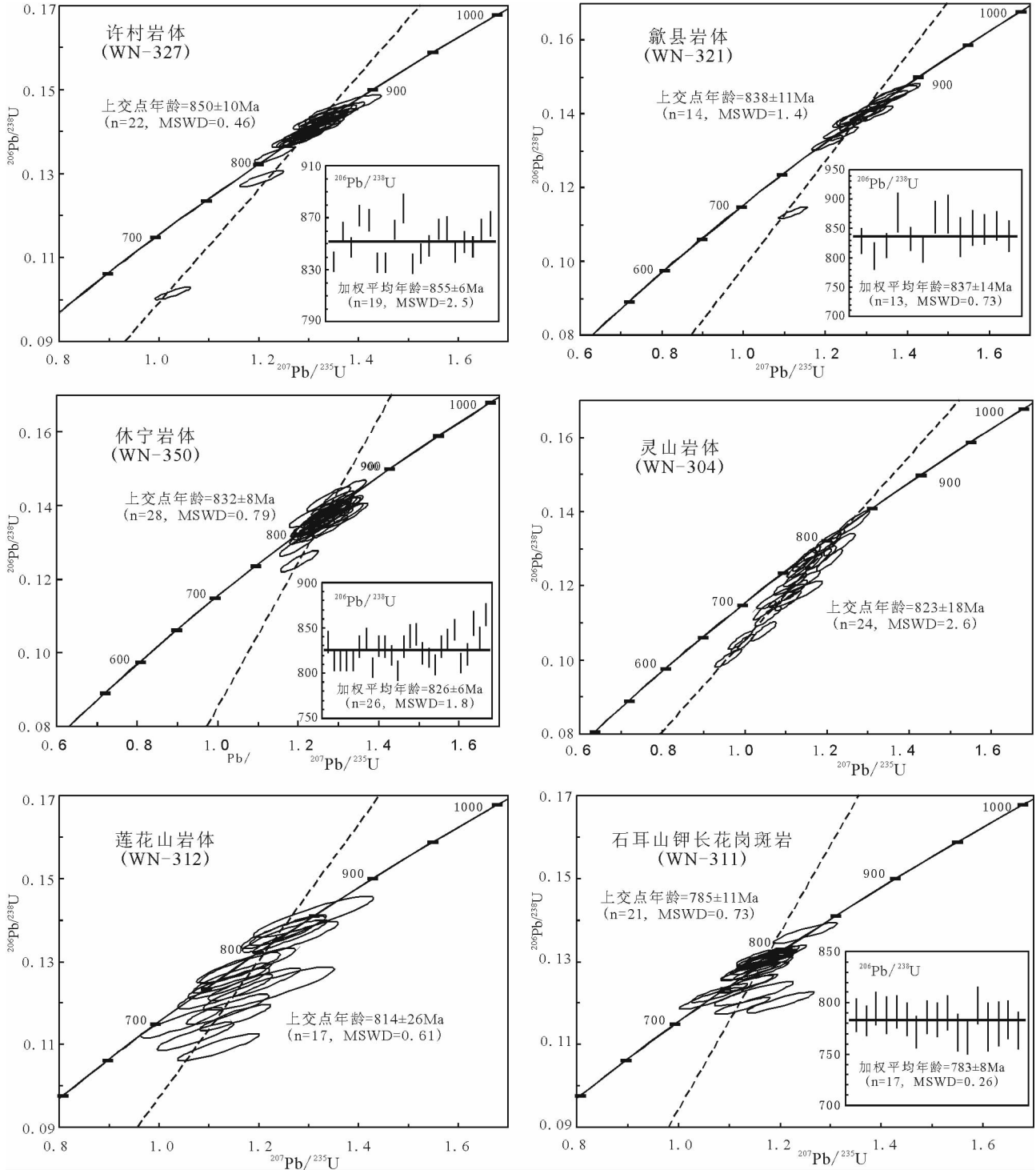


图6 江南造山带东段新元古代花岗岩类的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图

Fig.6 Concordia diagrams showing LA-ICP-MS analytical points for zircons from Neoproterozoic granitoids cropped in the eastern segment of Jiangnan orogen

(1992)则获得了 $1034 \pm 16 \text{ Ma}$ 的 Sm-Nd 等时线年龄值。李献华等(1994)用 SHRIMP 法测得侵位在蛇绿混杂岩带中埃达克质岩脉的锆石 U-Pb 年龄为 $968 \pm 23 \text{ Ma}$ 。至于这套蛇绿岩的属性,由地球化学特征可排除大洋中脊成因并表明出岛

弧的亲缘特征,似属岛弧环境产物(徐备,1990)。

对于皖南的歙县(伏川)蛇绿岩套,周新民等(1989)曾测得该蛇绿岩套上部辉长岩的全岩 Sm-Nd 等时线年龄为 $1024 \pm 9 \text{ Ma}$ 。吴荣新等(2005c)在上部辉长岩中获得了 3 组

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 $891 \pm 13\text{Ma}$ 、 $826 \pm 4\text{Ma}$ 和 $764 \pm 10\text{Ma}$, 并认为 $891 \pm 13\text{Ma}$ 代表皖南蛇绿岩构造侵位时间, 其它两组年龄是受到后期热液蚀变影响的结果。近来, 丁炳华等(2008)用 SHRIMP 法分别测得方辉橄橄榄岩堆晶岩的锆石 U-Pb 年龄为 $827 \pm 9\text{Ma}$, 侵入到其中的辉长岩脉的锆石 U-Pb 年龄为 $848 \pm 12\text{Ma}$, 认为皖南蛇绿岩的形成时间至少为 $848 \pm 12\text{Ma}$ 。该蛇绿岩带向西可能断续延伸到赣北地区, 我们最近在赣西北的庐山地区发现了一套 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $840 \pm 7\text{Ma}$ 枕状熔岩(成分为细碧岩-角斑岩)。由于枕状熔岩的年龄代表着削减前洋壳环境下岩浆作用的时间, 说明该缝合带所在位置洋壳的最终闭合时间该不早于 840Ma 。至于这套蛇绿岩的属性, 周新民等(1989)认为形成于陆壳上的具有弧后盆地或陆内裂谷性质的小洋盆, 邢凤鸣(1990)认为形成于古岛弧环境, 而丁炳华等(2008)则认为形成于俯冲带上的构造环境。

至于江绍断裂带东端的蛇绿岩套目前还有不同的认识, 但作为一条扬子板块与华夏板块之间的碰撞混杂岩带几乎没有什么异议。该混杂岩带所在地同时也是一条长期活动的深大断裂带, 断裂带内的构造变形十分强烈, 形成了一条长达数十公里、宽数百米至数公里的韧性剪切带, 并有十多个超镁铁质和镁铁质岩块混杂其中及西裘、璜山等石英闪长岩侵入。舒良树等(1993)曾在江西的德兴-弋阳一带的蓝闪石片岩中获得 $866 \pm 14\text{Ma}$ 的 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄值, 并据此估计扬子板块与华夏两板块的初时碰撞可能发生在 850Ma 以后(舒良树等, 1995)。Zhao and Cawood (1999)认为这个年龄可视作江南造山带的峰期变质年龄, 并据此估计扬子板块与华夏板块的拼合时间发生在 $870 \sim 820\text{Ma}$ 之间。但周金城等(2008)认为蓝闪石片岩实际上可能是洋壳俯冲的产物, 并不指示碰撞拼合的时间。从近年来对该断裂北侧具有岛弧性质的双溪坞群及侵入其中的桃红和西裘英云闪长岩-花岗闪长岩的锆石 U-Pb 定年结果(Ye *et al.*, 2007; 陈志洪等, 2009), 可以认定该带上岛弧岩浆作用的时间介于 $935 \sim 900\text{Ma}$ 。因此, 该缝合带所在位置洋壳的最终闭合时间应不早于 900Ma , 但也不会晚很多。

由此可见, 区内主要的三条缝合线最终闭合的时间存在着明显的差异, 从现有的资料看, 最早闭合的可能是赣东北缝合线, 时间应略晚于 $968 \pm 23\text{Ma}$; 江绍缝合线的闭合时间应略晚于 900Ma ; 最晚的是皖南歙县缝合线, 其最终闭合时间不早于 840Ma 。

4.1.2 岛弧型火山岩

与区内三条缝合线相对应的是发育了三套岛弧型的火山岩, 一套是分布于赣东北缝合线东南侧的漆工群-登山群岛弧型火山岩, 第二套是分布于江山-绍兴缝合线北侧的以双溪坞群为代表的岛弧型火山岩, 第三套是分布于皖南歙县缝合线北侧的以溪口群为代表的岛弧型火山岩。现有的资料表明, 三套岛弧型火山岩在形成时间上似乎存在着明显的差异, 其中赣东北缝合线东南侧的岛弧型火山岩, 目前还没

有可靠的同位素年龄资料, 但根据侵入其中的埃达克质岩脉的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $968 \pm 23\text{Ma}$ (李献华等, 1994), 可以推测其形成时代应与其相当或略早些。对于江山-绍兴缝合线北侧的岛弧型火山岩, 根据双溪坞群的同位素年龄(陈志洪等, 2009; Ye *et al.*, 2007), 可以限定在约 $935 \sim 900\text{Ma}$ 范围内。至于皖南歙县缝合线北侧的岛弧型火山岩, 根据其上段 $866 \pm 9\text{Ma}$ 的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄(高林志等, 2009)可以较好的限定其形成时代。另外, 从 $848 \pm 12\text{Ma}$ 的蛇绿岩年龄(丁炳华等, 2008)、庐山地区 $840 \pm 7\text{Ma}$ 与枕状熔岩(细碧-角斑岩系)密切共生的英安岩年龄(董树文等, 待刊)以及同构造的歙县岩体 $838 \pm 11\text{Ma}$ 的侵位年龄值, 可以推测该岛弧型火山岩的形成时代应在 840Ma 前。

需要说明的是, 虽然这三套岛弧型火山岩在岩石建造上十分类似, 既有早期的复理石杂砂岩和细碧角斑岩组合, 又有晚期的陆相安山质-英安质火山岩组合。但它们在形成环境和地球化学特征上有明显的差异, 其中与江山-绍兴缝合线和与赣东北缝合线有关的岛弧型火山岩是在洋壳基础上发育起来的, 而与皖南缝合线有关的岛弧型火山岩是在陆壳基础上的。

4.1.3 同造山-晚造山的花岗岩类侵入体

区内新元古代花岗岩类的时空分布具有明显的规律性。空间上, S型花岗闪长岩体都分布在靠近扬子克拉通的皖南歙县缝合线的北侧(或缝合带内), 而A型花岗岩则都分布在缝合线的南侧。时间上, 同造山阶段(包括碰撞前和碰撞过程中)形成的为S型花岗闪长岩体, 而晚造山和后造山阶段形成的花岗岩往往具有A型花岗岩的地球化学特性。不仅如此, 区内新元古代花岗质岩浆的侵入部位随时间由早到晚有明显的向南迁移的趋势。

其中同造山的许村岩体是江南造山带东段新元古代发育的一系列S型花岗闪长岩体中空间位置最北突的一个岩体, 也是本次研究获得的侵位年龄最大的一个岩体($850 \pm 10\text{Ma}$), 仅略小于区内 $866 \pm 9\text{Ma}$ 的岛弧型火山岩, 推测其虽然属于同造山岩浆作用的产物, 但具体的侵位时间要略早于缝合线闭合和陆-弧碰撞作用。对于该岩体, 李献华等(2002)曾测得 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $823 \pm 12\text{Ma}$, 与本次研究所获得的年龄值相比偏年轻。另外, 吴荣新等(2005a)曾用 LA-ICP-MS 法对该岩体的两个样品进行了锆石 U-Pb 定年, 但数据处理时将 U、Th、Pb 含量及 CL 图像无明显差别的锆石根据表面年龄分为两组, 分别计算它们与一致线的交点, 两个样品分别获得 $877 \pm 9\text{Ma}$ 和 $823 \pm 12\text{Ma}$ 以及 $878 \pm 14\text{Ma}$ 和 $820 \pm 10\text{Ma}$ 的数据值。并认为前者代表继承锆石年龄, 后者代表岩浆结晶年龄。我们认为, 对于部分颗粒有明显 Pb 丢失的锆石, 根据 $^{206}\text{Pb}-^{238}\text{U}$ 表面年龄分两组分别计算它们在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}-^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上的交点年龄是不合适的, 所获得的年龄并没有太多的实际意义。

至于歙县岩体, 从其产状和构造特征都可认定属于同构造的侵入体, 本次研究测得其侵位年龄为 $838 \pm 11\text{Ma}$, 该年

龄值也可看作是皖南歙县缝合线最终闭合的时间,这与我们在赣西北的庐山地区与枕状熔岩(细碧-角斑岩系)密切共生的英安岩中获得的 $840 \pm 7\text{Ma}$ 的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄(代表闭合前的年龄)可以很好地相互制约。对于该岩体,吴荣新等(2005a)也曾用 LA-ICP-MS 法对其中的两个样品进行了锆石 U-Pb 定年,但与对许村岩体所获得的数据处理方法一样,也是根据表面年龄分为两组,分别计算它们与一致线的交点,获得 $882 \pm 8\text{Ma}$ 和 $815 \pm 17\text{Ma}$ 以及 $1049 \pm 66\text{Ma}$ 和 $823 \pm 10\text{Ma}$ 的数据值。并认为前者代表继承锆石年龄,后者代表岩浆结晶年龄。我们同样认为这种处理方式是不合适的,所获得的年龄没有实际意义。

对于休宁岩体,虽然其空间位置紧靠皖南歙县缝合线(偏北侧),但它是区内新元古代发育的多达 11 个 S 型花岗闪长岩体中唯一没有发育片麻状构造的岩体,推测其侵位时间应略晚于该缝合线的闭合和陆-弧碰撞作用。本次研究测得该岩体的侵位时间为 $826 \pm 6\text{Ma}$,该年龄值与吴荣新等(2005a)所获得的 $824 \pm 6\text{Ma}$ 年龄值在误差范围内一致。

灵山岩体和莲花山岩体是区内晚造山阶段发育的两个主要的 A 型花岗岩体,本次研究测得灵山岩体的侵位年龄为 $823 \pm 18\text{Ma}$,莲花山岩体的侵位年龄为 $814 \pm 26\text{Ma}$,两者的侵位时间在误差范围内一致。另外,吴荣新等(2005b)曾用 LA-ICP-MS 法莲花山岩体进行了锆石 U-Pb 定年,也是根据表面年龄分为两组,分别计算它们与一致线的交点,获得了 $776 \pm 6\text{Ma}$ 和 $825 \pm 21\text{Ma}$ 两组数据,并认为前者代表岩浆结晶年龄,后者代表继承锆石年龄。但两个岩体中锆石的 U 含量普遍较高,由于高放射性,许多锆石颗粒受到较强的放射性损伤,裂隙普遍发育,部分颗粒表面因放射性轰击而呈筛孔状构造,容易造成 Pb 丢失,这从测试结果也可以清楚地看出。另外,从锆石的 CL 照片也看不出这两个岩体中有继承锆石存在。因而,我们认为对于部分颗粒有明显 Pb 丢失的锆石,根据 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄分两组分别计算它们在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} - ^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谱和图上的交点年龄是不合适的。

4.1.4 后造山裂谷型火山-侵入杂岩

区内南华裂谷系形成的火山岩主要包括浙北河上镇群的上墅组双峰式火山岩,皖南历口群井潭组的火山岩也是这个时期形成的(如 Wang and Li, 2003)。分布在皖浙赣交界的石耳山钾长花岗斑岩也可看作是井潭组火山岩同源异相的产物。对于这个时期的岩浆事件,目前已有了精确的年龄限定。如高林志等(2008)测得上墅组斑脱岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $767 \pm 5\text{Ma}$,吴荣新等(2007)测得井潭组火山岩中锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 $776 \pm 10\text{Ma}$ 。本次研究测得石耳山钾长花岗斑岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $785 \pm 11\text{Ma}$,吴荣新等(2005b)也曾在该斑岩体中获得过 $776 \pm 6\text{Ma}$ 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄, Li *et al.* (2003) 测得该斑岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $779 \pm 11\text{Ma}$ 。另外, Wang *et al.* (2010) 测得浙江东北部道林山钾长花岗岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $780 \pm 5\text{Ma}$ 。这些不同地区

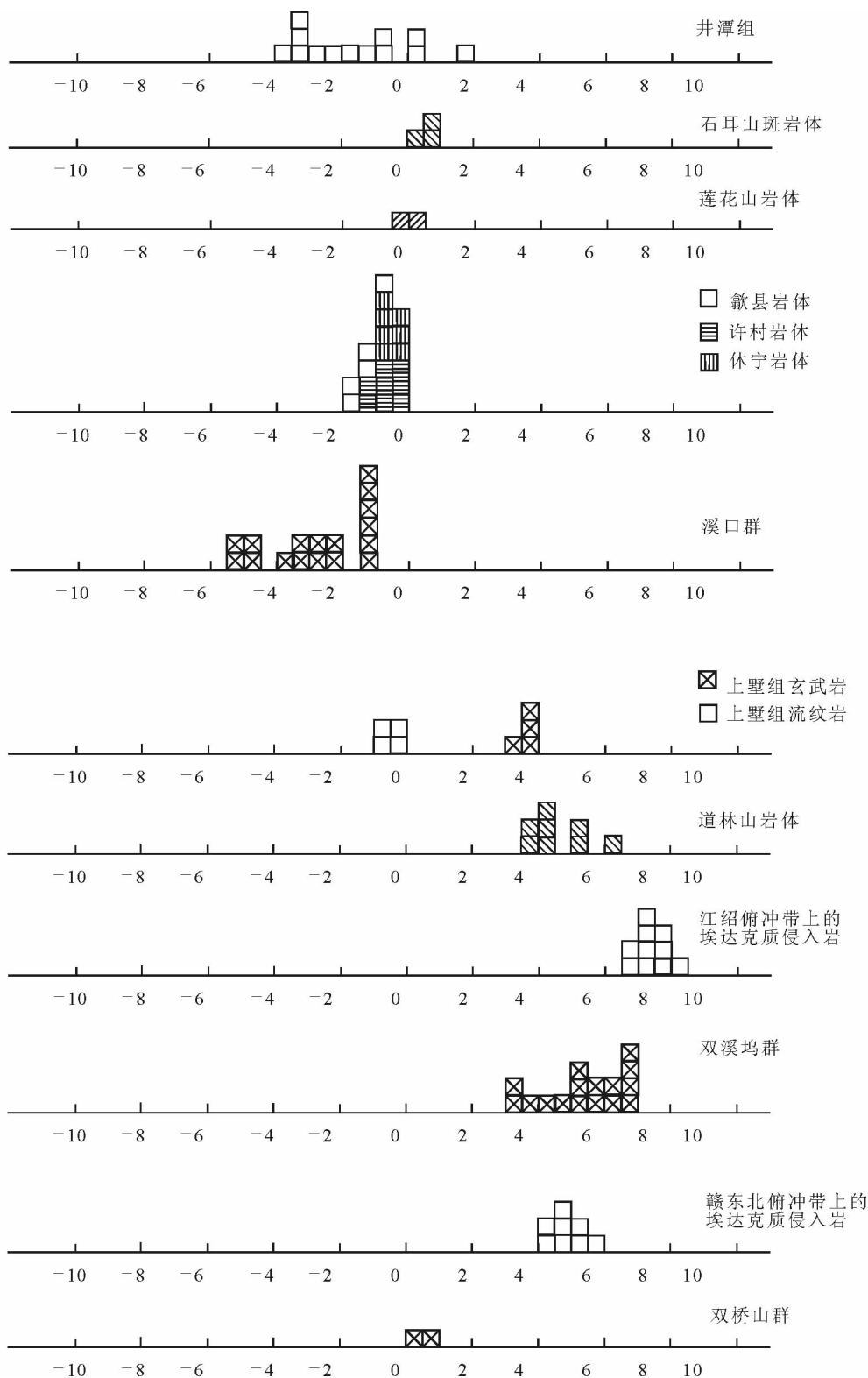
不同产状的岩浆岩的同位素年龄资料在误差范围内一致,说明区内裂谷系岩浆活动持续的时间很短。我们认为,它们的形成与造山作用没有直接的关系,属于后造山的产物。

4.2 造山带内花岗岩类的性质与时空演化

对于江南造山带东段新元古代岩浆岩的成因,目前主要有三种模型:(1)地幔柱岩浆活动产物(如 Li *et al.*, 1999, 2003);(2)岛弧岩浆作用产物(如 Zhou *et al.*, 2002a, b, 2004, 2006; Wang *et al.*, 2004a, b, 2006);(3)板块-裂谷岩浆活动产物,进一步分为早期弧-陆碰撞造山带拉张跨塌再造产物(Wu *et al.*, 2006; Zheng *et al.*, 2007)和晚期大陆裂谷再造产物(Zheng *et al.*, 2003, 2007)。江南造山作用的不同阶段都有岩浆岩发育,包括前造山、同造山、晚造山和后造山等多个阶段的岩浆岩,试图用单一的成因模式解释造山带形成与演化的不同阶段所形成的岩浆岩本身就不合适。将这些岩浆岩置于特定的时空和大地构造背景下,有利于全面把握它们的成因机制的时空演化。

区内同造山花岗闪长岩(包括许村、歙县和休宁三个岩体)的 A/ANK 参数普遍大于 1.1,岩石中普遍出现富铝矿物-堇青石,表现为典型的过铝花岗岩。它们的 $\delta^{18}\text{O}$ 值高达 $11.1\text{‰} \sim 13.6\text{‰}$ (周新民和王德滋,1988;吴荣新等,2005a),也显示了突出的壳源 S 型花岗岩的特点,意味着其源岩经历过沉积循环。但这些岩体的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值介于 $-2.06 \sim 0.02$ 之间,峰值接近 0(图 7),类似于地球平均的 Nd 同位素组成,说明这些花岗闪长岩体的岩浆源区以初生地壳组为主。这些岩体中普遍存在继承锆石的残留,时代从中元古代到新元古代初期,以新元古代初期的继承锆石为主,也表明这些岩体的岩浆源区主要为初生地壳组分。吴荣新等(2005a)认为这些新生地壳是江南弧-陆碰撞造山带的组成部分,在 Rodinia 超大陆裂解时发生拉张跨塌熔融,既不是地幔柱岩浆活动产物,也不是岛弧岩浆作用的直接产物,而是板块-裂谷岩浆活动产物。我们推测这些 S 型花岗闪长质岩浆是在碰撞、地壳加厚后发生构造折返、由不成熟的变质沉积-火山岩系经减压熔融形成的。从图上还可看出,这些 S 型花岗岩类侵入体与其侵入的围岩-溪口群牛屋组的千枚岩具有相似的 Nd 同位素组成(部分变沉积岩的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值偏低),它们之间的微量元素含量及稀土元素模式也类似(邢凤鸣等,1989),表明牛屋组的火山岩与这些 S 型花岗岩类侵入体之间具有一定的成因联系,也许后者是由前者在深变质条件下部分熔融形成的(邢凤鸣等,1989;陈冠宝等,1998b)。更可能是两者具相同的岩浆源区。

与同造山的 S 型花岗岩类相比,晚造山阶段形成的 A 型花岗岩(如图 7 所示的莲花山岩体)及后造山阶段形成的钾长花岗斑岩具有更高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,反映它们的源区与 S 型花岗闪长岩的源区有明显的差别。基于两类花岗岩时空分布的差异,也许意味着皖南歙县缝合线南、北侧的地壳组成存在着差异,或指示由同造山到后造山阶段,随着地壳应力

图7 江南造山带东段不同部位新元古代岩浆岩的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 对比图

资料来源:章邦桐等,1990;邢凤鸣等,1991;徐步台,1994;谢窠克,1996;陈冠宝等,1998b;李献华等,2002;吴荣新等,2005a, b, 2007;陈志洪等,2009;Ye *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2010

Fig.7 Comparison of $\epsilon_{Nd}(t)$ for Neoproterozoic magmatic rocks from different parts of the eastern segment of the Jiangnan orogen
Date sources: Zhang *et al.*, 1990; Xing *et al.*, 1991; Xu *et al.*, 1994; Xie, 1996; Li *et al.*, 2002; Wu *et al.*, 2005a, b, 2007; Chen *et al.*, 2009; Ye *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2010

由挤压转为拉张,有明显的新生地幔物质的加入。

与皖南歙县缝合线两侧的花岗岩类侵入体(无论是同造山的S型花岗岩还是晚造山的A型花岗岩和后造山的钾长花岗岩斑岩)及岛弧(溪口群)-裂谷(井潭组)型火山岩相比,发育在江山-绍兴缝合线北侧的岩浆岩,无论是前造山阶段形成的双溪坞群岛弧型火山岩和埃达克质侵入岩,还是晚造山-后造山阶段形成的A型花岗岩和双峰式火山岩,其 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值都表现出显著的正值,指示其源岩为大洋地壳,甚至亏损地幔。这也清楚地表明,它们发育的构造环境存在着显著的差异,前者是发育在不成熟的陆壳环境,而后者发育在洋壳基础上。赣东北缝合带内的埃达克质侵入岩也具高的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,类似于江山-绍兴缝合线北侧的岩浆岩,可能指示其也是发育在洋壳环境。

4.3 造山作用过程与后期的构造破坏、叠加复合

江南造山带的主体结构无疑是新元古代形成的,因此完全可以称为新元古代造山带。虽然安徽省地调科院的徐树桐等(1993)和陈冠宝等(1999)报道在皖南休宁岩体的围岩中发现有晚古生代孢粉化石组合以及歙县和许村岩体围岩中发现有早古生代疑源类化石组合。另外,中国地质大学的赵崇贺等(1995,1997)和杨晓松等(1997)先后报道在赣东北的蛇绿岩系中发现古生代放射虫岩和放射虫动物群。但陈旭等(1995)、陈旭和 Mitchell(1996)、陈旭和戎嘉余(1999)从多方面论述这套变质岩系地层是元古代的产物,该区不存在古生代洋壳。王玉净等(2006)在上述报道发现古生代化石的地区开展了系统的研究,均未发现放射虫化石,但在部分硅质岩和板岩样品中发现中-新元古界的疑源类化石。由此看来,赣东北蛇绿岩系和皖南溪口群变质的时代仍然为中-新元古代。

4.3.1 造山作用过程

现有的资料已可充分说明,构成江南造山带的主体物质是(中)-新元古代形成的沉积-火山岩系。不仅如此,整个江南造山带内,原来认为的少数几个加里东期的侵入体,如湖南的桃江、板杉铺、吴集、白马山、甘坊等岩体,江西九岭岩体内的甘坊岩体以及本次研究涉及到的灵山岩体和莲花山岩体,随着近年来精确的定年也被证明是新元古代形成的而不是加里东期的岩体(如钟玉芳等,2005及其所引文献)。江南造山带内,乃至整个扬子克拉通内加里东期岩浆事件的缺失,使我们有理由相信,加里东期构造运动对江南造山带,尤其是其东段即使有影响也是有限的。另外,随着在湖南益阳的冷家溪群(周金城等,2003; Zhou *et al.*, 2004)、桂北的四堡群、贵州的梵净山群(Wang *et al.*, 2004b)及江西的双桥山群中相继发现有枕状熔岩(细碧-角斑岩系),说明江南造山带形成的早期存在着洋壳的俯冲。从前面的讨论,我们可回溯造山作用的过程大致如下:

(1) 前造山阶段

>930Ma,洋壳沿江山-绍兴断裂带(?)俯冲,形成以双溪

坞群为代表的火山岛弧。在此之前或同时,是否还存在着九龄地块(或万年地块)与怀玉地块沿赣东北缝合线俯冲拼合(并形成以登山群为代表的火山岛弧),目前还没有精确的年龄限定。

(2) 早造山阶段

~900Ma,江山-绍兴缝合带闭合,华夏板块连同新形成的火山岛弧向北推挤,导致弧后盆地或陆内裂谷性质的小洋盆沿皖南歙县缝合线向扬子板块俯冲,形成溪口群为代表的陆缘火山弧。这些新生的岩浆岩随后遭受风化剥蚀并沉积成岩,形成低成熟度的沉积岩。

(3) 同造山阶段

~850Ma,在俯冲带的偏大陆侧(上盘),主要由初生地壳物质构成的加厚地壳重熔形成过铝的花岗闪长质岩浆,这种岩浆在O同位素组成上具有典型壳源花岗岩的特征,但Nd、Sr同位素组成却类似于幔源岩浆,它们上侵形成许村岩体。另外,由于华夏板块向北的推挤,在过铝的花岗闪长质岩浆起源深度和位置不变的情况下,上侵到浅部形成的岩体必然表现出向南迁移的趁势;

~838Ma,皖南歙县缝合带逐渐闭合,过铝的花岗闪长质岩浆沿缝合带上升侵位,形成歙县岩体(以及除休宁岩体之外的其他花岗闪长质岩体);

~826Ma,皖南歙县缝合带完全闭合,残余的部分岩浆沿缝合带侵位,形成休宁岩体。

(4) 晚造山阶段

~820Ma,随着挤压应力的松弛,先前发生过熔融的加厚地壳物质再次发生部分熔融,并可能混合了部分来自亏损地幔的岩浆,经高度演化最后形成具有A型花岗岩特征的灵山岩体和莲花山岩体。

由此可见,江南造山带经历过由岛弧形成、弧-弧碰撞、弧-陆碰撞最后到陆-陆拼合的过程,具有多岛弧、多缝合的特点。

4.3.2 后期构造破坏、叠加复合

江南造山带东段形成后不久,~785Ma,即进入后造山阶段,遭受南华系裂谷作用的破坏,表现为广泛的双峰式火山活动(上墅组)及偏碱性的火山-侵入作用(井潭组火山岩及石耳山钾长花岗岩)。由于直到加里东运动后,华南加里东褶皱带才与扬子地台联合组成了一个广阔的地台区,一个真正统一的中国南方古地理格局才开始形成(周金城等,2008及其所引论文),我们认为,江南造山带南侧在后造山阶段发育的裂谷系到早古生代末期才闭合。区内广泛发育早古生代海相沉积地层(图1b)而几乎缺失晚古生代的地层也说明了这一点。

区内印支-早燕山期处在北部华北与扬子板块发生陆-陆碰撞、南部华南板块向北推挤的区域动力学背景下,部分学者将该时期发生在扬子克拉通东部的这种相向挤压作用称为陆内造山作用(朱光和刘国生,2000;董树文等,2005),但它所造成的主要是(震旦纪)之上盖层的强烈褶皱和逆冲推

覆,对克拉通基底(包括江南造山带)的影响不是很大。

致谢 耿元生研究员为文章的修改提出了不少宝贵的意见,在此表示衷心的感谢。

References

- Batchelor RA and Bowder P. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chemical Geology*, 48(1-4): 43-55
- Boynton WV. 1984. Geochemistry of the rare earth elements; Meteorite studies. In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 63-114
- Chen BL, Dong FX, Zhang D and Sheng TY. 2002. Analysis of the depositional environment and deformation history of Shuangqiaoshan Group: An example from Dabeiwu area, Jiangxi Provinc. *Resources Survey & Environment*, 23(3): 157-168 (in Chinese with English abstract)
- Chen GB, Xu ST, Zhang YC, Tao Z and Shi YH. 1998a. Evolution of the South Anhui orogen and its significance for exploration of oil and gas fields. *Petroleum Geology & Experiment*, 20(2): 103-109 (in Chinese with English abstract)
- Chen GB, Xu ST, Tao Z and Shi YH. 1998b. Sm-Nd isotope age of the metamorphic volcanic rocks of the Jingtan Formation in southern Anhui Province and its tectonic implication. *Geoscience*, 12(4): 548-554 (in Chinese with English abstract)
- Chen GB, Xu ST and Shi YH. 1999. Discovery and research of Palaeontological fossils from the metamorphic rocks area in South Anhui. *Advance in Earth Sciences*, 14(2): 140-146 (in Chinese with English abstract)
- Chen GB, Li HS, Xu ST, Liu YC, Hu YC and Zhou L. 2007. Radiolarian and Archaeooides fossils from the Shangxi Group in southern Anhui Province and their Palaeogeographic significance. *Journal of Palaeogeography*, 9(6): 589-596 (in Chinese with English abstract)
- Chen WX, Wang J, Fu XG, Wang ZJ and Xiong GQ. 2007. Sedimentary characteristics of the Jialu Formation and its underlying granite's U-Pb zircon age in Southeast Guizhou, China. *Geological Review*, 53(1): 720-731 (in Chinese with English abstract)
- Chen X, Rong JY, Rowley DB, Zhang J, Zhang YD and Zhan RB. 1995. Is the Early Paleozoic Banxi ocean necessary? *Geological Review*, 41(5): 389-400 (in Chinese with English abstract)
- Chen X and Mitchell CE. 1996. Stratigraphic evidence on Taconian and Guangxian orogeny. *Journal of Stratigraphy*, 20(4): 305-314 (in Chinese with English abstract)
- Chen X and Rong JY. 1999. From biostratigraphy to tectonics: With Ordovician and Silurian as an example. *Geoscience*, 13(4): 385-389 (in Chinese with English abstract)
- Chen ZH, Guo KY, Dong YG, Chen R, Li LM and Liang YH. 2009. Possible Early Neoproterozoic magmatism associated with slab window in the Pingshui segment of the Jiangshan-Shaoxing suture zone: Evidence from zircon LA-ICP-MS U-Pb geochronology and geochemistry. *Science in China (Series D)*, 52(7): 925-939
- Cheng H. 1991. The Late Proterozoic collision orogen in northwestern Zhejiang Province. *China. Geological Review*, 37(3): 203-212, 218 (in Chinese with English abstract)
- Cheng H. 1993. Geochemistry of Proterozoic island-arc volcanic rocks in Northwest Zhejiang. *Geochimica*, (1): 18-27 (in Chinese with

English abstract)

- Deng GH, Liu CG and Feng Y. 2005. Tectonic features and evolution of the Proterozoic orogenic belt between northeastern Jiangxi and southern Anhui. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(1): 9-16 (in Chinese with English abstract)
- Deng JR and Zhang ZP. 1998. The active trace of Late Precambrian in Cathaysia. *Geological Survey and Research*, (2): 46-53 (in Chinese with English abstract)
- Ding BH, Shi RD, Zhi XC, Zheng L and Chen L. 2008. Neoproterozoic ((850Ma) subduction in the Jiangnan orogen: Evidence from the SHRIMP U-Pb dating of the SSZ-type ophiolite in southern Anhui Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(5): 375-388 (in Chinese with English abstract)
- Dong SW, Hu JM, Li SZ, Shi W, Gao R, Liu XC and Xue HM. 2005. The Jurassic deformation in the Dabie Mountains and its tectonic significances. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 1189-1194 (in Chinese with English abstract)
- Dong SW, Xue HM, Xiang XK and Ma LC. 2010. Discover of Neoproterozoic spilite-keratophyre series pillow type lava in the Lushan area, northern Jiangxi and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica* (in press)
- Eby GN. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrologic and tectonic implications. *Geology*, 20: 641-644
- Gao LZ, Yang MG, Ding XZ, Liu YX, Liu X, Ling LH and Zhang CH. 2008. SHRIMP U-Pb zircon dating of tuff in the Shuangqiaoshan and Heshangzhen groups in South China: Constraints on the evolution of the Jiangnan Neoproterozoic orogenic belt. *Geological Bulletin of China*, 27(10): 1744-1751 (in Chinese with English abstract)
- Gao LZ, Zhang CH, Liu PJ, Ding XZ, Wang ZQ and Zhang YJ. 2009. Recognition of Meso- and Neoproterozoic stratigraphic framework in North and South China. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(4): 433-446 (in Chinese with English abstract)
- Guo LZ, Yu JH and Shi YS. 1963. Discuss about several geotectonic problems in Caledonian geosyncline region of south China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, (2): 1-17 (in Chinese with English abstract)
- Guo LZ, Si YS and Ma RS. 1980. *Geotectonic Framework and Crust Evolution of South China*. Beijing: Geological Publishing House, 109-116 (in Chinese)
- Guo LZ, Shi YS, Ma RS, Ye SF and Lu HF. 1984. Tectonostratigraphic terranes of southeast China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 20(4): 732-739 (in Chinese with English abstract)
- Guo LZ, Lu HF, Shi YS, Ma RS, Sun Y, Shu LS, Jia D, Zhang QL, Charvet J and Faure M. 1996. On the Meso-Neoprozoic Jiangnan island arc: Its kinematics and dynamics. *Geological Journal of China Universities*, 2(1): 1-13 (in Chinese with English abstract)
- Ge WC, Li XH, Li ZX, Zhou HW and Lee CY. 2001. Geochemical studies on two types of Neoproterozoic peraluminous granitoids in northern Guangxi. *Geochimica*, 30(1): 24-34 (in Chinese with English abstract)
- Huang JQ. 1945. *Main Geotectonic Units of China*. Geological Special of China Geological Survey, 20 (in Chinese)
- Huang JQ. 1954. *Main Tectonic Units of China*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Huang XB, Yu ZZ and Zhou GQ. 2002. Sedimentary features of the Mesoproterozoic Shuangqiaoshan Group in northwestern Jiangxi. *Geological Bulletin of China*, 22(1): 43-49 (in Chinese with English abstract)
- Lan Y and Ye Y. 1991. An isoland arc volcanic belt of Late Proterozoic along the southeastern margin of Jiangnan geanticline and its metallogenetic prospect. *Contributions to Geology and Mineral*

- Resources Research, 6 (2): 1 - 10 (in Chinese with English abstract)
- Le Bas MJ, Le Maitre RW, Streckeis A and Zanettin B. 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *Journal of Petrology*, 27: 745 - 750
- Li JL, Sun S, Hsu KJ, Chen HH, Peng HP and Wang QC. 1989. New evidences about the evolution of the south Cathay orogenic belt. *Chinese Journal of Geology*, 32 (3): 217 - 225 (in Chinese with English abstract)
- Li JL. 1992. Geotectonic basic problem of southeastern China. In: Li JL (ed.). *Study on Lithospheric Structure and Evolution of Southeastern China*. Beijing: Chinese Science and Technology Press (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Zhou GQ, Zhao JX, Fanning CM and Compston W. 1994. SHRIMP ion microprobe zircon U-Pb age of the NE Jiangxi ophiolite and its tectonic implications. *Geochimica*, 23 (2): 125 - 131 (in Chinese with English abstract)
- Li XH. 1999. U-Pb zircon ages of granites from northern Guangxi and their tectonic significance. *Geochimica*, 28 (1): 1 - 9 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Li ZX, Zhou H, Liu Y and Kinny PD. 2002. U-Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian rift of South China: Implications for the initial rifting of Rodinia. *Precambrian Research*, 113: 135 - 155
- Li XH, Li ZX, Zhou HW and Liu Y. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronological, geochemical and Nd isotopic study of the Neoproterozoic granitoids in southern Anhui. *Geological Review*, 48 (Supp.): 8 - 16 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Li ZX, Ge WC, Zhou HW, Li XW, Liu Y and Michael TD. 2003. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825Ma? *Precambrian Research*, 122: 45 - 83
- Li YY, Xu X and Xing FM. 1989. Genesis of the gneissic structure of the Precambrian granitoids in southern Anhui province. *Scientia Geologica Sinica*, 32 (1): 59 - 66 (in Chinese with English abstract)
- Li ZC and Zhao ZJ. 1991. The characteristics of Nd and Sr isotopes from Late Proterozoic granite masses in Bendong and Sanfang, Guangxi. *Geology of Guangxi*, 4 (1): 53 - 60 (in Chinese with English abstract)
- Li ZX, Li XH, Kinny PD and Wang J. 1999. The breakup of Rodinia: Did it start with a mantle plume beneath South China? *Earth and Planetary Science Letters*, 173: 171 - 181
- Li ZX, Li XH, Kinny PD, Wang J, Zhang S and Zhou H. 2003. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle super-plume that broke up Rodinia. *Precambrian Research*, 122: 85 - 109
- Ling HF, Zhang BT, Shen WZ and Zhang ZH. 1993. Crustal basement evolution of the Zhejiang-Jiangxi portion of the Jiangnan Proterozoic island arc zone. *Geotectonica et Metallogenia*, 17: 147 - 152 (in Chinese with English abstract)
- Liu BG. 1997. Analysis on the evolutionary features and origin of Shiershan superunit granite in western Zhejiang. *Geology of Zhejiang*, 13 (1): 39 - 46 (in Chinese with English abstract)
- Liu JS. 1992. Studies on geology and geochemistry of Jiangshan-Shaoxing Proterozoic terrane collage zone in Zhejiang. *Journal of Guilin College of Geology*, 12 (1): 60 - 66 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2001. *Users Manual for Isoplot/Ex* (rev. 2.49): A Geochronologica Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center. Special Publication, No. 1a, 1 - 55
- Ma CX. 1991. New Sm-Nd isochron age for Paleoproterozoic Zhanggongshan Group in northeastern Jiangxi Province and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, (22): 1518 - 1519 (in Chinese)
- Ma CX, Liu RG and Lu GD. 1992. *Precambrian Geology of Northeastern Jiangxi Province*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Ma RS and Wang AG. 1994. Tectonic outline of the Late Proterozoic collisional orogenic belt in south Anhui. *Geology of Anhui*, 4 (1/2): 14 - 22 (in Chinese with English abstract)
- McDonough WF and Sun SS. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223 - 253
- Pearce JA, Harris NBW and Tindle AG. 1984. Trace element discrimination diagram for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25: 956 - 983
- Qin SX, Zhang ZJ, Zhang Z, Zhao WX, Cai XF and Gu YS. 2002. Study on the behaviour of the low-grade metamorphism and high deformation of the Middle Proterozoic Shuangqiaoshan Group in north Jiangxi and Grenville phase orogeny. *Geological Science and Technology Information*, 21 (2): 8 - 12 (in Chinese with English abstract)
- Qiu JS, Zhou JC, Zhang GH and Ling WL. 2002. Geochemistry and petrogenesis of Precambrian granitoid rocks in northern Guangxi. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 21 (3): 197 - 212 (in Chinese with English abstract)
- Qiu YX, Zhang YC and Ma WP. 1998. Tectonics and geological evolution of Xuefeng intra continental orogene, South China. *Geological Journal of China Universities*, 4 (4): 432 - 443 (in Chinese with English abstract)
- Shen WZ, Zhang BT, Ling HF, Lai MY, Yang JD and Tao XC. 1991. Nd, Sr and O isotopic study on spilite-keratophyre in Xiqiu, Zhejiang Province. *Acta Geologica Sinica*, 65 (4): 337 - 346 (in Chinese with English abstract)
- Shen WZ, Ling HF and Zhang BT. 1993. Sm-Nd isotopic studies on metamorphic basement rocks of the Jiangnan proterozoic paleo-island arc. *Journal of Nanjing University*, 29 (3): 460 - 467 (in Chinese with English abstract)
- Shu LS, Zhou GQ, Shi YS and Yin J. 1994. A study on the high pressure metamorphic bluechist and its Late Proterozoic age in the eastern Jiangnan belt. *Chinese Science Bulletin*, 39 (14): 1200 - 1204 (in Chinese)
- Shu LS, Shi YS, Guo LZ *et al.* 1995. Plate Tectonic Evolution and the Kinematics of Collisional Orogeny in the Middle Jiangnan, Eastern China. Nanjing: Nanjing University Press (in Chinese with English abstract)
- Shui T, Xu BT, Liang RH and Qiu YH. 1986. Paleoland collisional zone of Jiangshan-Shaoxing. *Chinese Science Bulletin*, 31 (6): 444 - 448 (in Chinese)
- Tang HF, Zhang GH, Zhou XM *et al.* 1997. A post-orogenic granite batholith: The age and genesis of Shiershan granite. *J. Nanjing Univ. (Natural Sci.)* 33 (4): 587 - 595 (in Chinese with English abstract)
- Tang HF, Li WX and Zhou XM. 1998. Comparison of Neoproterozoic volcanic-sedimentary rocks from the Zhejiang-Jiangxi-Anhui border area: With a discussion of the problem about synchrono-heteropic facies of volcanism. *Acta Geologica Sinica*, 72: 34 - 41 (in Chinese with English abstract)
- Wang J and Li ZX. 2003. History of Neoproterozoic rift basins in China: Implication for Rodinia break-up. *Precambrian Research*, 122: 141

- 158

- Wang J, Li ZX, Duan TZ *et al.* 2003. Stratigraphic and sedimentological records of the Neoproterozoic rift basins in southern China. In: Li ZX, Wang J, Li X *et al.* (eds.). From Sibao Orogenesis to Nanhua Rifting: Late Precambrian Tectonic History of Eastern South China: An Overview and Field Guide. Beijing: Geological Publishing House, 26 - 39
- Wang K, Wu AG and Zhang YQ. 1993. A brief account of regional geology of Jiangxi Province. Geological Bulletin of China, (3): 200 - 210 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Wymanc DA, Li ZX, Bao ZW, Zhao ZH and Wang YX. 2010. Petrology, geochronology and geochemistry of ca. 780Ma A-type granites in South China: Petrogenesis and implications for crustal growth during the breakup of the supercontinent Rodinia. Precambrian Research, 178: 185 - 208
- Wang XL, Zhou JC, Qiu JS and Gao JF. 2004a. Comment on "Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825Ma?" by XH Li *et al.* Precambrian Research, 132: 401 - 403
- Wang XL, Zhou JC, Qiu JS and Gao JF. 2004b. Geochemistry of the Meso- to Neoproterozoic basic-acid rocks from Hunan Province, South China: Implications for the evolution of the western Jiangnan orogen. Precambrian Research, 135: 79 - 103
- Wang XL, Zhou JC, Qiu JS *et al.* 2006. LA-ICP-MS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from Northern Guangxi, South China: Implications for tectonic evolution. Precambrian Research, 145: 111 - 130
- Wang YJ, Yang Q, Yin LM, Shu LS, Lou FS and Wang B. 2006. The putative "radiolarian cherts" from ophiolitic and metamorphic complexes in northeast Jiangxi: A re-examination. Geological Journal of China Universities, 12(1): 98 - 105 (in Chinese with English abstract)
- Watson EB and Harrison TM. 1983. Zircon saturation revisited: Temperature and composition effects in variety of crustal magma types. Earth and Planetary Science Letters, 64: 295 - 304
- Whalen JB, Currie KL and Chappell BW. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. Contribution to Mineralogy and Petrology, 95: 407 - 419
- Wu RX, Zheng YF and Wu YB. 2005a. Zircon U-Pb age, element and oxygen isotope geochemistry of granodiorite in South Anhui. Acta Petrologica Sinica, 21(3): 587 - 606 (in Chinese with English abstract)
- Wu RX, Zheng YF and Wu YB. 2005b. Zircon U-Pb age, element and oxygen isotope geochemistry of Neoproterozoic granites at Shiershan in south Anhui Province. Geological Journal of China Universities, 11(3): 364 - 382 (in Chinese with English abstract)
- Wu RX, Zheng YF and Wu YB. 2005c. Zircon U-Pb dating and element and oxygen isotope geochemistry of gabbro from ophiolites in South Anhui. Acta Geoscientia Sinica, 26(Supp.): 70 - 73 (in Chinese with English abstract)
- Wu RX, Zheng YF, Wu YB *et al.* 2006. Reworking of juvenile crust: Element and isotope evidence from Neoproterozoic granodiorite in South China. Precambrian Research, 146: 179 - 212
- Wu RX, Zheng YF and Wu YB. 2007. Zircon U-Pb age and isotope geochemistry of Neoproterozoic Jingtian volcanics in South Anhui. Geological Journal of China Universities, 13(2): 282 - 296 (in Chinese with English abstract)
- Wu XH, Lou FS and Liu CG. 2005. The division and the contrast of Middle Proterozoic Xikou rocks group in the boundary of Anhui, Zhejiang, Jiangxi provinces. Resources Survey & Environment, 26(2): 86 - 96 (in Chinese with English abstract)
- Xie DK. 1996. Crust evolution and the character of two greenstone suites in Proterozoic basement south Anhui. Volcanology & Mineral Resources, 17(3/4): 23 - 41 (in Chinese with English abstract)
- Xing FM, Xu X, Li YY and Ren SM. 1989. The determination of a granodiorite zone and its petrologic characteristics at the Early Jinning Period in southern Anhui Province. Acta Petrologica Sinica, 5(3): 34 - 44 (in Chinese with English abstract)
- Xing FM. 1990. Early Jinning Period juvenile continental crust rebuilt type granitoids in southern Anhui Province. Science in China (Series D), (4): 1185 - 1195 (in Chinese)
- Xing FM, Chen JF, Xu X, Zhou TX and Foland KA. 1991. Nd isotopic characteristics of low grade metamorphic and sedimentary rocks from southern Anhui Province and their significance in tectonics. Geoscience, 5(3): 290 - 299 (in Chinese with English abstract)
- Xing FM, Xu X, Chen JF, Zhou TX and Foland KA. 1992. Sm-Nd isotopic age of Proterozoic ophiolites in northeastern Jiangxi and its geological significance. Acta Petrologica Et Mineralogica, 11(2): 120 - 124 (in Chinese with English abstract)
- Xu B and Qiao GS. 1989. Sm-Nd isotopic ages and original setting of the Neoproterozoic ophiolite, northeastern Jiangxi. Journal of Nanjing University (Natural Science), (3): 108 - 114 (in Chinese with English abstract)
- Xu B. 1990. The Late Proterozoic trench-basin arc system in northeastern Jiangxi-southern Anhui provinces. Acta Geologica Sinica, (1): 33 - 42 (in Chinese with English abstract)
- Xu B, Guo LZ and Shi YS. 1992. Proterozoic Terranes and Poly-Stages Collisional Orogeny in Anhui-Zhejiang-Jiangxi Area. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese with English abstract)
- Xu BT and Shui T. 1983. Isotopic dating on migmatite in Shaoxing-Jiangshan fault and metamorphic basement rocks in two sides. Chinese Science Bulletin, 28: 1510 - 1512 (in Chinese)
- Xu BT. 1994. Nd and Sr isotopic geochemistry of Presinian volcanic rocks in northwestern Zhejiang Province. Geology of Zhejiang, 10(2): 45 - 51 (in Chinese with English abstract)
- Xu BT and Qiu YS. 1996. Sm-Nd and ^{40}Ar - ^{39}Ar Ar ages of Shuangxiwu Group and their geological significance. Geology of Zhejiang, 12(1): 48 - 51 (in Chinese with English abstract)
- Xu JH, Sun S and Li JL. 1987. South China orogene other than craton. Science in China (Series B), 101: 1107 - 1115 (in Chinese)
- Xu ST, Chen GS, Tao Z *et al.* 1993. Palaeontological fossils from the metamorphic rocks in south Anhui and geotectonic significance. Science in China (Series B), 23(6): 652 - 658 (in Chinese)
- Xu YT, Zhang BH and Zhou BH. 1998. Studies on the geological characteristics of Jiangshan-Shaoxing Proterozoic terrane collage zone in Zhejiang. Journal of Shandong Normal University (Natural Science), 13(1): 38 - 42 (in Chinese with English abstract)
- Yang MG, Wu AG and Zhong NC. 1988. Late proterozoic stratigraphic division, characteristics of sediment build in south China and its crustal tectonic evolution. Geology of Jiangxi, 2(2): 112 - 121 (in Chinese with English abstract)
- Yang XS, Xue CS, Zhang KX, Zeng ZP, Fan GM, Li CN, Ying LM and Yang Q. 1997. Palaeontological fossils from the low grade metamorphic rocks in northeastern Jiangxi Province and geotectonic significance. Chinese Science Bulletin, 42(4): 409 - 412 (in Chinese)
- Ye MF, Li XH, Li WX, Liu Y and Li ZX. 2007. SHRIMP zircon U-Pb geochronological and whole-rock geochemical evidence for an Early Neoproterozoic Sibaoan magmatic arc along the southeastern margin of the Yangtze Block. Gondwana Research, 12: 144 - 156
- Zeng W, Zhou HW, Zhong ZQ, Zeng ZG and Li HM. 2005. Single zircon U-Pb ages and their tectonic implications of Neoproterozoic

- magmatic rocks in southeastern Guizhou, China. *Geochimica*, 34 (6): 548–556 (in Chinese with English abstract)
- Zeng Y and Yang MG. 1999. Central Jiangxi collision mélange zone. *Geological Bulletin of China*, 18 (1): 17–22 (in Chinese with English abstract)
- Zhang BT, Ling HF, Shen WZ, Liu JS, Yang SD and Tao XC. 1990. Sm-Nd isochron age for spilite-keratophyre in Xiqiu, Zhejiang Province. *Journal of Nanjing University*, (2): 9–14 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZH. 1991. Discuss on several problems about continental crust evolution and U mineralized. *Journal of Nanjing University (Natural Science)*, (2): 70–78 (in Chinese with English abstract)
- Zhao CH, He KZ, Mo XX, Tai DQ, Lin PY, Bi XM, Zheng BR, Ye DR, Feng QL and Ye F. 1995. Discovery of Late Palaeozoic radiolarian-bearing chert in ophiolitic complexes of the rift zone, northeast Jiangxi, and the significance. *Chinese Science Bulletin*, 40(23): 2161–2163 (in Chinese)
- Zhao CH, He KZ, Tai DQ, Le CS and Nie ZT. 1997. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of major igneous in northeastern Jiangxi Province. *Earth Science*, 22 (3): 257–260 (in Chinese with English abstract)
- Zhao GC and Cawood PA. 1999. Tectonothermal evolution of the Mayuan assemblage in the Cathaysia Block: Implications for Neoproterozoic collision-related assembly of south China Craton. *American Journal of Science*, 299: 309–339
- Zheng YF, Fu B, Cong B and Li L. 2003. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China; Implications for geodynamics and fluid regime. *Earth Sci. Rev.*, 62: 105–161
- Zheng YF, Zhang SB, Zhao ZF *et al.* 2007. Contrasting zircon Hf and O isotopes in the two episodes of Neoproterozoic granitoids in South China; Implications for growth and reworking of continental crust. *Lithos*, doi: 10.1016/j.lithos.2006.10.003
- Zhong YF, Ma CQ, She ZB, Lin GC, Xu HJ, Wang RJ, Yang KG and Liu Q. 2005. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Jiuling granitic complex batholith in Jiangxi Province. *Earth Science*, 30 (6): 685–691 (in Chinese with English abstract)
- Zhou GQ and Zhao JX. 1991. Study of Sm-Nd isotopic composition of ophiolites from southeastern margin of Yangzi craton of South China in the Jiangxi Province. *Chinese Science Bulletin*, 36(2): 129–132 (in Chinese)
- Zhou JC, Wang XL, Qiu JS and Gao JF. 2003. The discovery of Nanqiao highly depleted N-MORB and geological significance. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, (3): 2–7 (in Chinese with English abstract)
- Zhou JC, Wang XL and Qiu JS. 2004. Geochemistry of Meso- and Neoproterozoic mafic-ultramafic rocks from northern Guangxi, China: Arc or plume magmatism? *Journal of Geochemistry*, 38: 139–152
- Zhou JC, Wang XL and Qiu JS. 2008. Is the Jiangnan orogenic belt a Grenvillian orogenic belt? Some problems about the Precambrian geology of South China. *Geological Journal of China Universities*, 14 (1): 64–72 (in Chinese with English abstract)
- Zhou MF, Yan DP, Kennedy AK *et al.* 2002a. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China. *Earth and Planetary Science Letters*, 196: 51–67
- Zhou MF, Kennedy AK, Sun M *et al.* 2002b. Neoproterozoic arc-related mafic intrusions along the northern margin of South China: Implications for the accretion of Rodinia. *Journal of Geology*, 110: 611–618
- Zhou MF, Ma YX, Yan DP *et al.* 2006. The Yanbian terrane (southern Sichuan Province, SW China): A Neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze Block. *Precambrian Research*, 144: 19–38
- Zhou XM and Wang DZ. 1988. The peraluminous granodiorites with low initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio and their genesis in southern Anhui Province, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, (3): 37–45 (in Chinese with English abstract)
- Zhou XM, Zou HB, Yang JD and Wang YX. 1989. Sm-Nd isochron age and its geological significance for ophiolite from Fuchuan of the She County of Anhui Province. *Chinese Science Bulletin*, (16): 1243–1245 (in Chinese)
- Zhu G and Liu GS. 2000. Basic characteristics and Mesozoic orogenic process of the Jingnan intracontinental orogenic belt in southern Anhui. *Geotect. Metal.*, 24: 103–111 (in Chinese with English abstract)
- Zhu X. 1980. Geodynamic setting of the Mesozoic-Cenozoic oil-gas basins in China. In: Zhu X (ed.). *Tectonics of Oil-Gas Basins in China*. Beijing: Petroleum Industry Press, 61–70 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈柏林, 董法先, 张达, 沈庭远. 2002. 双桥山群的沉积环境和变形历史再探讨——以大背坞地区为例. *资源调查与环境*, 23(3): 157–168
- 陈冠宝, 徐树桐, 张渝昌, 陶正, 石永红. 1998a. 皖南造山带的演化及其在油气田勘探中的意义. *石油实验地质*, 20(2): 103–109
- 陈冠宝, 徐树桐, 陶正, 石永红. 1998b. 皖南井潭组变质火山岩 Sm-Nd 同位素年龄及其大地构造意义. *现代地质*, 12(4): 548–554
- 陈冠宝, 徐树桐, 石永红. 1999. 皖南变质岩区古生物化石的发现和 研究进展. *地球科学进展*, 14(2): 140–146
- 陈冠宝, 李红生, 徐树桐, 刘贻灿, 胡远超, 周粟. 2007. 皖南上溪群中放射虫化石和古蛋类化石的发现及其古地理意义. *古地理学报*, 9(6): 589–596
- 陈文西, 王剑, 付修根, 汪正江, 熊国庆. 2007. 黔东南新元古界下江群甲路组沉积特征及其下伏岩体的锆石 U-Pb 年龄意义. *地质论评*, 53(1): 720–731
- 陈旭, 戎嘉余, Rowley DB, 张进, 张元动, 詹仁斌. 1995. 对华南早古生代板溪洋的质疑. *地质论评*, 41(5): 389–400
- 陈旭, Mitchell CE. 1996. 塔康运动与广西运动的地层学证据. *地层学杂志*, 20(4): 305–314
- 陈旭, 戎嘉余. 1999. 从生物地层学到大地构造学——以华南奥陶系和志留系为例. *现代地质*, 13(4): 385–389
- 陈志洪, 郭坤一, 董永观, 陈荣, 李龙明, 梁一鸿, 李春海, 俞锡明, 赵玲, 邢光福. 2009. 江山-绍兴拼合带平水段可能存在新元古代早期板片窗岩浆活动: 来自锆石 LA-ICP-MS 年代学和地球化学的证据. *中国科学(D辑)*, 37(7): 994–1008
- 程海. 1991. 浙西北晚元古代早期碰撞造山带的初步研究. *地质论评*, 37(3): 203–212, 218
- 程海. 1993. 浙西北晚元古代岛弧火山岩的地球化学研究. *地球化学*, (1): 18–27
- 邓国辉, 刘春根, 冯晔. 2005. 赣东北-皖南元古代造山带构造格架及演化. *地球学报*, 26(1): 9–16
- 邓家瑞, 张志平. 1998. 华夏古陆晚前寒武纪的活动痕迹. *前寒武纪*

- 研究进展, (2): 46-53
- 丁炳华, 史仁灯, 支霞臣, 郑磊, 陈雷. 2008. 江南造山带存在新元古代(850Ma)俯冲作用——来自皖南SSZ型蛇绿岩锆石SHRIMP U-Pb年龄证据. 岩石矿物学杂志, 27(5): 375-388
- 董树文, 胡健民, 李三忠, 施炜, 高锐, 刘晓春, 薛怀民. 2005. 大别山侏罗纪变形及其构造意义. 岩石学报, 21(4): 1189-1194
- 董树文, 薛怀民, 项新葵, 马立成. 2011. 江南造山带北侧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. 岩石学报(待刊)
- 高林志, 杨明桂, 丁孝忠, 刘燕学, 刘训, 凌骏海, 张传恒. 2008. 华南双桥山群和河上镇群凝灰岩中的锆石SHRIMP U-Pb年龄——对江南新元古代造山带演化的制约. 地质通报, 27(10): 1744-1751
- 高林志, 张传恒, 刘鹏举, 丁孝忠, 王自强, 张彦杰. 2009. 华北-江南地区中、新元古代地层格架的再认识. 地球学报, 30(4): 433-446
- 葛文春, 李献华, 李正祥, 周汉文, 李寄遇. 2001. 桂北新元古代两类过铝花岗岩的地球化学研究. 地球化学, 30(1): 24-34
- 郭令智, 俞剑华, 施央申. 1963. 华南加里东地槽区大地构造的几个问题的探讨. 南京大学学报, (2): 1-17
- 郭令智, 施央申, 马瑞士. 1980. 华南大地构造格架和地壳演化. 国际交流地质学术论文集(一). 北京: 地质出版社, 109-116
- 郭令智, 施央申, 马瑞士, 叶尚夫, 卢华复. 1984. 中国东南部地体的研究. 南京大学学报, 20(4): 732-739
- 郭令智, 卢华复, 施央申, 马瑞士, 孙岩, 舒良树, 贾东, 张庆龙. 1996. 江南中、新元古代岛弧的运动学和动力学. 高校地质学报, 2(1): 1-13
- 黄汲清. 1945. 中国主要地质构造单元. 中央地质调查所地质专报
- 黄汲清. 1954. 中国主要构造单元. 北京: 地质出版社
- 黄修保, 余忠珍, 邹国庆. 2003. 赣西北地区中元古界双桥山群沉积学特征. 地质通报, 22(1): 43-49
- 兰玉琦, 叶瑛. 1991. 江南地背斜东南缘晚元古宙岛弧型火山岩及其成矿远景. 地质找矿论丛, 6(2): 1-10
- 李继亮, 孙枢, 许靖华, 陈海泓, 彭海波, 王清晨. 1989. 南华夏造山带构造演化的新证据. 地质科学, 32(3): 217-225
- 李继亮. 1992. 中国东南大地构造基本问题. 见: 李继亮主编. 中国东南海陆岩石圈结构与演化研究. 北京: 中国科学技术出版社
- 李献华, 周国庆, 赵建新, Fanning CM, Compston W. 1994. 赣东北蛇绿岩的离子探针锆石U-Pb年龄及其构造意义. 地球化学, 23(2): 125-131
- 李献华. 1999. 广西北部新元古代花岗岩锆石U-Pb年代学及其构造意义. 地球化学, 28(1): 1-9
- 李献华, 李正祥, 周汉文, 刘颖. 2002. 皖南新元古代花岗岩的SHRIMP锆石U-Pb年代学、元素地球化学和Nd同位素研究. 地质论评, 48(增刊): 8-16
- 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, 32(1): 59-66
- 李志昌, 赵子杰. 1991. 广西晚元古代本洞和三防花岗岩类岩体Nd、Sr同位素特征. 广西地质, 4(1): 53-60
- 凌洪飞, 章邦桐, 沈渭洲, 张祖还. 1993. 江南古岛弧浙赣段基底地壳演化. 大地构造与成矿学, 17: 147-152
- 刘伯根. 1997. 浙西北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
- 刘继顺. 1992. 浙江江山-绍兴元古代地体拼贴带的特征. 桂林冶金地质学院学报, 12(1): 60-66
- 马长信. 1991. 赣东北古元古宙障公山群的钐-钕同位素年龄新成果及其地质意义. 科学通报, 22: 1518-1519
- 马长信, 刘荣贵, 吕桂德等. 1992. 赣东北前震旦纪地质. 北京: 地质出版社
- 马荣生, 王爱国. 1994. 皖南晚元古代碰撞造山带构造轮廓. 安徽地质, 4(1/2): 14-22
- 秦松贤, 章泽军, 张志, 赵温霞, 蔡雄飞, 顾延生. 2002. 赣北中元古界双桥山群低变质强变形行为与格林威尔期造山作用. 地质科技情报, 21(2): 8-12
- 邱检生, 周金城, 张光辉, 凌文黎. 2002. 桂北前寒武纪花岗岩类岩石的地球化学与成因. 岩石矿物学杂志, 21(3): 197-212
- 丘元禧, 张渝昌, 马文璞. 1998. 雪峰山陆内造山带的构造特征与演化. 高校地质学报, 4(4): 432-443
- 沈渭洲, 章邦桐, 凌洪飞, 赖鸣远, 杨杰东, 陶仙聪. 1991. 浙江西裘细碧-角斑岩的Nd、Sr、O同位素地质研究. 地质学报, 65(4): 337-346
- 沈渭洲, 凌洪飞, 章邦桐. 1993. 江南元古宙古岛弧基底变质岩的Sm-Nd同位素研究. 南京大学学报, 29(3): 460-467
- 舒良树, 周国庆, 施央申, 殷俊. 1993. 江南造山带东段高压变质蓝片岩及其地质时代研究. 科学通报, 38(20): 1879-1882
- 舒良树, 施央申, 郭令智等. 1995. 江南中段板块-地体构造与碰撞造山运动学. 南京: 南京大学出版社, 1-731
- 水涛, 徐步台, 梁如华, 邱郁双. 1986. 绍兴-江山古陆对接带. 科学通报, 31(6): 444-448
- 唐红峰, 张光辉, 周新民等. 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), 33(4): 587-595
- 唐红峰, 李武显, 周新民. 1998. 浙赣皖交界区新元古代火山-沉积岩系的比较——有关火山作用同期异相的探讨. 地质学报, 72: 34-41
- 王昆, 吴安国, 张玉清. 1993. 江西省区域地质概. 中国区域地质, (3): 200-210
- 王玉净, 杨群, 尹磊明, 舒良树, 楼法生, 王博. 2006. 赣东北蛇绿混杂岩带和变质岩系中“放射虫硅质岩”的再研究. 高校地质学报, 12(1): 98-105
- 吴荣新, 郑永飞, 吴元保. 2005a. 皖南新元古代花岗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
- 吴荣新, 郑永飞, 吴元保. 2005b. 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. 2005c. 皖南蛇绿岩套辉长岩锆石U-Pb定年以及元素和氧同位素研究. 地球学报, 26(增刊): 70-73
- 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, 刘春根. 2005. 皖浙赣相邻区中元古代溪口岩群的

- 划分与对比. 资源调查与环境, 26(2): 86-96
- 谢寰克. 1996. 皖南元古宙基底两套绿岩特征及地壳演化. 火山地质与矿产, 17(3/4): 23-41
- 邢凤鸣, 徐祥, 李应运, 任思明. 1989. 皖南晋宁早期花岗岩闪长岩带的确定及其岩石学特征. 岩石学报, (4): 34-44
- 邢凤鸣. 1990. 皖南晋宁早期初生陆壳改造型花岗岩类. 中国科学(D辑), (4): 1185-1195
- 邢凤鸣, 陈江峰, 徐祥, 周泰禧, Foland KA. 1991. 皖南浅变质岩和沉积岩的铀同位素特点及其大地构造意义. 现代地质, 5(3): 290-299
- 邢凤鸣, 徐祥, 陈江峰, 周泰禧, Foland KA. 1992. 赣东北元古代蛇绿岩 Sm-Nd 同位素年龄及地质意义. 岩石矿物学杂志, 11(2): 120-124
- 徐备, 乔广生. 1989. 赣东北晚元古代蛇绿岩的 Sm-Nd 同位素年龄及原始构造环境. 南京大学学报(地球科学), (3): 108-114
- 徐备. 1990. 论赣东北-皖南晚元古代沟弧盆体系. 地质学报, (1): 33-42
- 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, 1-12
- 徐步台, 水涛. 1983. 浙江绍兴-江山断裂带混合岩及其两侧基底变质岩的同位素年龄测定. 科学通报, 1510-1512
- 徐步台. 1994. 浙西北前震旦纪火山岩的 Nd, Sr 同位素地球化学. 浙江地质, 10(2): 45-51
- 徐步台, 邱郁双. 1996. 章村-楼塔一带双溪坞群 Sm-Nd 和 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄及地质年代意义. 浙江地质, 12(1): 48-51
- 许靖华, 孙枢, 李继亮. 1987. 是华南造山带而不是华南地台. 中国科学(B辑), 101: 1107-1115
- 徐树桐, 陈冠宝, 陶正等. 1993. 皖南变质岩中的古生物化石及其大地构造意义. 中国科学(B辑), 23(6): 652-658
- 徐跃通, 张邦花, 周保华. 1998. 浙江元古代地体构造的研究. 山东师大学报(自然科学版), 13(1): 38-42
- 杨明桂, 吴安国, 钟南昌. 1988. 华南中晚元古地层划分、沉积建造特征及其地壳构造演化. 江西地质, 2(2): 112-121
- 杨晓松, 薛重生, 张克信, 曾忠平, 樊光明, 李昌年, 尹磊明, 杨群. 1997. 赣东北浅变质岩系中微古生物化石及其大地构造意义. 科学通报, 42(4): 409-412
- 曾雯, 周汉文, 钟增球, 曾昭光, 李惠民. 2005. 黔东南新元古代岩漿岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. 地球化学, 34(6): 548-556
- 曾勇, 杨明桂. 1999. 赣中碰撞混杂岩带. 中国区域地质, 18(1): 17-22
- 章邦桐, 凌洪飞, 沈渭洲, 刘继顺, 杨述东, 陶仙聪. 1990. 浙江西裘双溪坞群细碧-角斑岩的 Sm-Nd 等时年龄. 南京大学学报(地球科学版), (2): 9-14
- 张祖还. 1991. 华南东部陆壳演化与铀成矿作用的若干问题讨论. 南京大学学报, (2): 70-78
- 赵崇贺, 何科昭, 莫宣学, 郜道乾, 林培英, 毕先梅, 郑伯让, 叶德隆, 冯庆来, 叶枏. 1995. 赣东北深断裂带蛇绿混杂岩中含晚古生代放射虫硅质岩的发现及其意义. 科学通报, 40(23): 2161-2163
- 赵崇贺, 何科昭, 郜道乾, 乐昌硕, 聂泽同. 1997. 赣东北地区重要火成岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄. 地球科学, 22(3): 257-260
- 钟玉芳, 马昌前, 余振兵, 林广春, 续海金, 王人镜, 杨坤光, 刘强. 2005. 江西九岭花岗岩类复式岩基锆石 SHRIMP U-Pb 年代学. 地球科学, 30(6): 685-691
- 周国庆, 赵建新. 1991. 华南扬子克拉通东南缘赣东北蛇绿岩的 Sm-Nd 同位素研究. 科学通报, 36(2): 129-132
- 周汉文, 李献华, 王汉荣, 李江, 李惠民. 2002. 广西鹰扬关基性火山岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质论评, 48(增刊): 22-25
- 周金城, 王孝磊, 邱检生, 高剑锋. 2003. 南桥高度亏损 N-MORB 的发现及其地质意义. 岩石矿物学杂志, (3): 2-7
- 周金城, 王孝磊, 邱检生. 2008. 江南造山带是否格林威尔期造山带? ——关于华南前寒武纪地质的几个问题. 高校地质学报, 14(1): 64-72
- 周新民, 王德滋. 1988. 皖南低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比的过铝花岗岩闪长岩及其成因. 岩石学报, (3): 37-45
- 周新民, 邹海波, 杨杰东, 王银喜. 1989. 安徽歙县伏川蛇绿岩套的 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义. 科学通报, (16): 1243-1245
- 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
- 朱夏. 1980. 试论中国中生代油气盆地的地球动力学背景. 见: 朱夏主编. 论中国含油气盆地构造. 北京: 石油工业出版社, 61-70