

·综述与进展·

华南东段早古生代造山带研究

舒良树, 于津海, 贾 东, 王 博, 沈渭洲, 张岳桥

SHU Liang-shu, YU Jin-hai, JIA Dong, WANG Bo, SHEN Wei-zhou, ZHANG Yue-qiao

南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210093

School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China

摘要:对华南东段早古生代的沉积环境、火山岩、超镁铁岩—镁铁岩年代、韧性变形运动学、早古生代造山带特色等方面进行了研究。研究表明,震旦纪—奥陶纪期间(680~440 Ma)的沉积岩以泥砂质碎屑岩为主体,岩层中浅海相沉积构造发育;缺乏鲍玛层序,不含火山熔岩和爆发火山碎屑岩;原定的一些玄武岩实为杂砂岩。结合沉积岩地球化学成果,认为本区早古生代为被动大陆边缘浅海—半深海沉积环境。对区内部分镁铁岩和火山岩作 SHRIMP 岩浆锆石 U—Pb 定年,年龄集中在 860~800 Ma 之间。韧性变形运动学研究表明,武夷山南东麓从北西向南东逆冲推覆,北麓从南向北逆冲推覆,剖面上呈花状构造样式。之后发生了韧性走滑剪切作用。对糜棱岩的云母矿物作 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 定年,年龄集中在 430~390 Ma 之间。与国内外典型加里东期造山带相比,华南早古生代造山带具有鲜明的地域特色,造山机制大致可与西欧比利牛斯造山带相比。

关键词:早古生代造山带;沉积环境;构造运动学;年代学;构造属性;华南东段

中图分类号: P534.4; P542⁺.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2008)10-1581-13

Shu L S, Yu J H, Jia D, Wang B, Shen W Z, Zhang Y Q. Early Paleozoic orogenic belt in the eastern segment of South China. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(10):1581-1593

Abstract: The authors performed a systematic study of the Early Paleozoic belt in the eastern segment of South China, including its sedimentary environment, volcanic rocks, ages of mafic-ultramafic rocks, kinematic analysis of ductile deformation and orogenic mechanism. Results suggest that the Sinian-Ordovician sequence (680-440 Ma) consists chiefly of sandstone and mudstones. In the strata neritic sedimentary structure is well developed, without the Bouma sequence, volcanic lavas or explosive pyroclastic rocks. Some originally defined basalt is actually graywacke. Based on the aforesaid study, combined with the geochemical features of graywacke, the study area was a neritic-bathyal environment on the passive continental margins during the Early Paleozoic. SHRIMP U-Pb zircon dating of some mafic rocks and volcanic rocks show that their ages cluster at 860-800 Ma. The kinematic pattern of ductile deformation indicates that the southeastern foot of the Wuyi Mountains was overthrust from northwest to southeast, while the northern foot was thrust from south to north, displaying a flower-shaped structural style in section. Slightly later, strike-slip shearing occurred. The $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ dating of muscovite and biotite from mylonitic yielded ages in the range from 430 to 390 Ma. By comparing with the typical Caledonian orogens in the world, the Early Paleozoic South China orogenic belt shows distinct local features and the orogenic mechanism is similar to that of the Pyrenean orogenic belt of Western Europe.

Key words: Early Paleozoic orogenic belt; sedimentary environment; structural kinematics; geochronology; tectonic attribute; eastern South China

华南早古生代褶皱造山带占据了华南近 1/3 的空间,前泥盆纪变质变形岩石广泛出露,志留纪—泥盆纪 S 型花岗岩和韧性剪切带发育,其特有的构造

形迹—岩石组合是反映显生宙早期地球演化历史的珍贵记录,是理解与检验华南地质的关键地区。中生代期间,该区又被印支期褶皱与断裂以及燕山期花

收稿日期:2008-07-28;修订日期:2008-08-04

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:40634022,40221301,40572118)、教育部博士点基金项目(编号:20060284008)资助。

作者简介:舒良树(1951-),男,教授,博士生导师,构造地质学专业。E-mail: Lsshu2003@yahoo.com.cn

岗质岩浆作用强烈叠加与改造,并形成了巨量的钨、锡、铌、钽、铀等矿产,是国家急需战略资源的重要产地。

自 Grabau^[1-2]提出“华夏古陆”命题和黄汲清^[3]命名“华夏复背斜”以来的半个多世纪中,华南地质构造一直是中国地质学界的研究重点之一。20世纪50年代末至60年代初,徐克勤等^[4-5]在赣南上犹陡水、南康龙回等地发现早古生代花岗岩,开创了当时华南加里东期花岗岩研究的新局面。

华南早古生代造山带是华南地质研究的难点、学术界认识分歧的焦点,一直困扰着人们对华南构造演化的认识。20世纪70年代末至80年代初,郭令智等^[6]用板块构造理论阐述华南大地构造演化,成为当时华南地质研究的标志性成果。80—90年代,以华南构造属性、碰撞造山时代与俯冲动向为焦点的国际学术大讨论^[6-12],以及围绕华南地质问题发表的一大批多学科论著,包括加里东期海沟—岛弧系^[7]、中生代碰撞造山带^[13]、早古生代碰撞造山带^[12]、古生代多岛海^[14]的认识、政和岛弧玄武岩的论证^[15]、东南陆壳多期演化^[16-17]、华夏古陆新见^[9,18-21]等,进一步促进了该区显生宙地质研究的进展,凸显了早古生代地质的创新空间。90年代后期以来,中国东南部晚中生代花岗质火山—侵入杂岩成因^[22]、南岭中生代花岗岩成因与岩石圈演化^[23]等项系统性研究成果,都强调前中生代基底构造对花岗岩及其矿产形成与演化的重要贡献,直指早古生代造山带的构造属性问题^[24]。

华南早古生代构造—岩浆作用是华南地质演化链中一个不可缺少的环节,其造山带构造属性是以往华南地质研究遗留的最突出的问题。虽然上述每个认识和观点都有一定的地质资料基础,但因当时条件的限制,无法获得高质量的定时定量数据,加之早古生代韧性变形运动学研究未能开展,对寒武系—奥陶系中的古沉积环境信息提取不足,一些区段特征岩石的描述不实,因而其结论的支撑并不牢靠。

随着定时定量测试技术的完善,近年在该区陆续发表了不少较高质量的测年和成分数据。国家基金委在该区实施的《元古代 Rodinia 超大陆聚合—离散》、《印支期地质》、《燕山期岩浆与地壳演化》等多个重点项目,已经取得一大批重要的研究成果;该区还完成了多幅 1:25 万修编地质图,重点区段填

制了数十幅 1:5 万地质图。所有这些,为我们开展华南早古生代造山带构造属性研究奠定了坚实的基础。

围绕上述核心问题,以华南东段为研究解剖区,笔者等近年开展了系统的野外地质调查和室内测试分析,获得了一批重要的第一手资料,在早古生代沉积环境、震旦纪—奥陶纪(680~440 Ma^[25])火山岩甄别、超镁铁岩—镁铁岩年代、韧性变形运动学、早古生代造山带特色 5 个方面取得了新认识,为厘定早古生代的构造背景与造山机制、甄别早古生代是俯冲洋盆还是被动陆缘、明确早古生代造山带构造属性等基础问题提供了依据。本文重点介绍目前掌握的第一手新资料,并略谈初步认识,供业内同行参考。

1 地质概况

华南东段,位于绍兴—江山—萍乡断裂带以南、政和—大埔断裂带以北、南岭以东。区内前泥盆系地层广泛发育,集中分布在浙南—闽北的武夷山和赣中—赣南的武功山—诸广山地区,平面上呈 NE 走向、东窄西宽的喇叭形(图 1)。区内存在 3 套岩石地层单元,即前震旦纪结晶基底单元、震旦纪(原陡山沱期+灯影期)—奥陶纪浅海—半深海碎屑岩单元和中泥盆世开始的稳定沉积单元。

前震旦纪结晶基底单元由中元古代麻源群、龙泉群和新元古代神山群、南华系(原下震旦统)组成。中元古代麻源群和龙泉群由混合岩、片麻岩、花岗片麻岩、片岩、变粒岩等组成,主要出露在浙江陈蔡、遂昌、龙泉、闽北武夷山等地。新元古代神山群原岩是一套碎屑岩—火山碎屑岩系,由千枚岩、石英片岩、云母片岩、变粒岩、片麻岩组成,夹数层变质玄武岩、流纹岩和杂砂岩;南华系是一套遭受低级变质的碎屑岩系,原岩清晰可辨,可分为下坊组和老虎塘组,前者由底部砾岩、石英砂岩、含铁硅质岩、页岩组成,后者则为冰水相的砾岩、含砾泥岩组合。神山群和南华系主要出露在赣中的南城、新余、崇义、宜黄、会昌和南岭区块的永丰、南丰、五华、兴宁、韶关等地。

大量资料表明,在扬子大陆东南侧的元古代大洋对岸,曾经存在一个规模较大的古陆块(暂称华夏陆块)似乎是比较合理的^[26]。否则人们很难理解江南新元古代造山带的形成^[6,27]以及大规模的前南华纪逆冲型韧性剪切带^[28],无法解释线状展布、测年值在

9 亿年左右的赣东北蛇绿混杂岩带、8 亿年左右的江南 S 型花岗岩带。但是,华夏陆块不是铁板一块。研究表明,在 8 亿年左右的龙北溪期,区内曾发生过较强烈的大陆拉张解体事件,伴有高钛低钾碱性玄武岩的喷发^[20];在政和县附近,变流纹岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $818\text{Ma} \pm 9\text{Ma}$ ^[29],政和城边的辉绿岩墙锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 $797\text{Ma} \pm 5\text{Ma}$ ^[30],对应 Rodinia 超大陆的裂解^[31],致使早先的华夏陆

块被裂解为数个走向各异的块体,分别称武夷地体、武功-诸广(赣中-赣南)地体和云开大山。古生代时,这些古陆地体散布在被动陆缘型的华南海盆地中,被称为“华南多岛海”格局^[14]。古陆块体上基本缺失寒武系和奥陶系,地体之间被震旦纪—晚奥陶世浅海—半深海相的碎屑岩夹灰岩所充填。志留纪—泥盆纪发生的构造事件,使这些浅海、半深海盆地关闭,古陆块地体发生拼贴和增生。因此,人们现

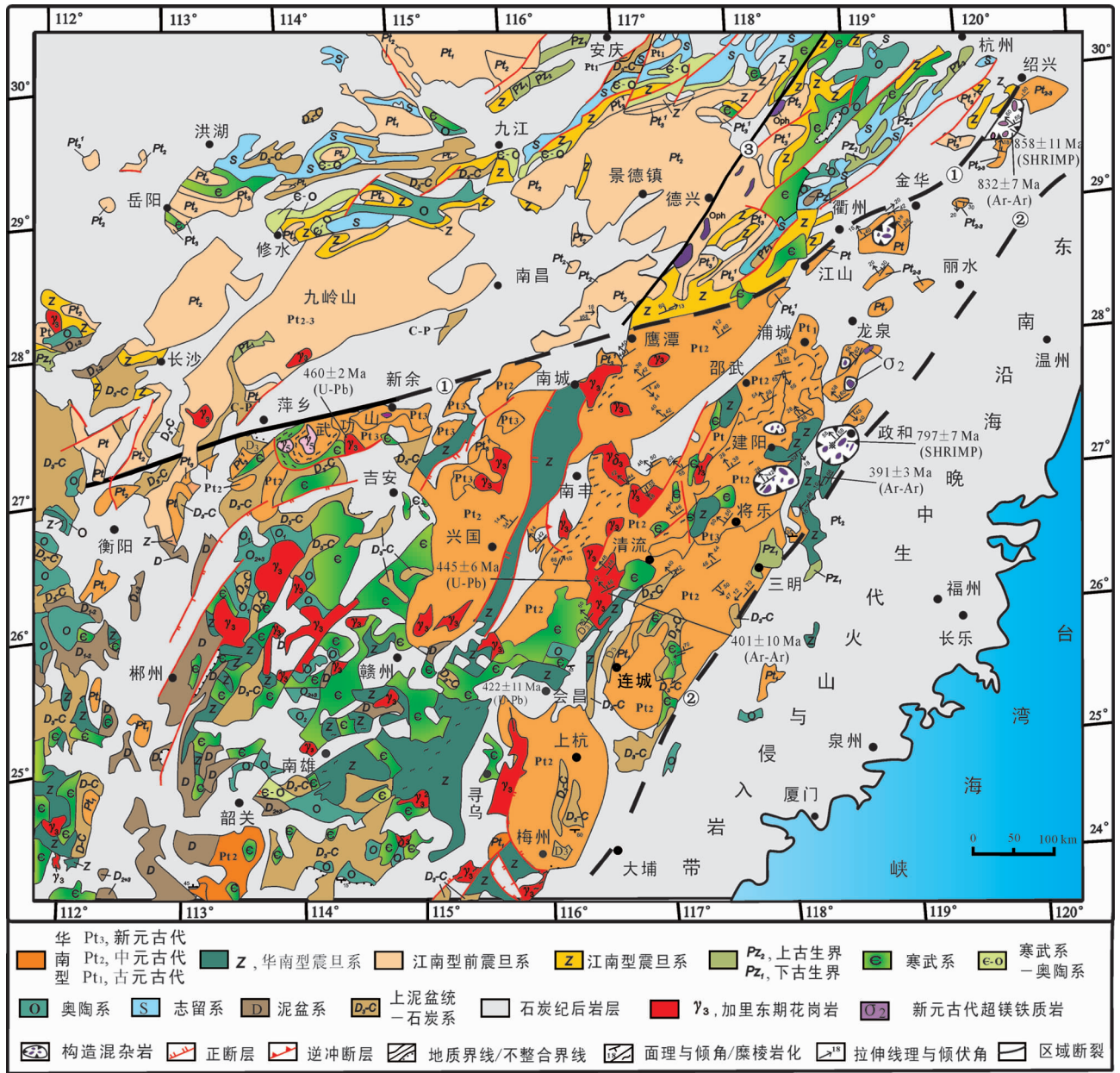


图 1 华南东段早古生代造山带地质简图(据舒良树,2006,略作修改)

Fig. 1 Simplified geological map of the eastern segment of the South China Early Paleozoic orogen

①绍兴-江山-萍乡断裂带;②上虞-政和-大埔断裂;③东乡-德兴-歙县断裂带

在见到的前泥盆盆地地貌景观是“多阶段地壳活动”的产物^[11-12,16-17],早就不是早期地质演化过程中的那个“华夏陆块”了。

震旦纪—奥陶纪浅变质单元则由连续沉积的泥砂质韵律岩层、炭质页岩和少量灰岩、生物碎屑灰岩、硅质岩组成,多已变质成板岩和板状千枚岩,未见火山熔岩和火山碎屑岩,最新的1:5万井冈山图组填图结果表明其厚度约4500m。构造变形强烈,紧闭褶皱、同斜褶皱广泛(图2)。大面积出露在赣南的井冈山、遂川、崇义、于都、大余、南岭等地,在闽北清流、邵武、泰宁、将乐也见出露。

其中,震旦系原岩为一套泥砂质岩系夹灰岩、钙质砂岩;寒武系为一套韵律状泥砂质岩系,底部为厚30~40m的炭质泥岩,局部见石煤层,中部为近等厚的泥砂质韵律岩层夹灰岩,有波痕构造,产大量笔石类化石及少量腕足类、腹足类化石。奥陶系也是一套韵律状泥砂质岩系,砂层厚泥层薄,比例10:1,夹数层炭质泥岩和灰岩。在崇义县古亭一带,灰岩厚度较大,产腕足类、珊瑚类。岩石中可见“泥包砂”透镜状层理、印模、冲刷痕等沉积构造。

志留系在华南东段区域缺失。中泥盆世跳马涧组砾岩、砂砾岩和粗砂岩层呈区域角度不整合覆盖在奥陶纪板岩之上。

研究区存在2期前泥盆纪构造—岩浆事件,分别发生在新元古代(900~800Ma)和早古生代晚期

(430~390 Ma),前者形成江山—萍乡和赣东北2条新元古代超镁铁—镁铁岩带,后者形成加里东褶皱造山带。所有岩石均被强烈褶皱,普遍遭受中、深地壳层次的区域变质和韧性变形,糜棱岩化普遍,并发育后造山期花岗岩浆活动。

2 早古生代沉积环境

对早古生代沉积环境的甄别,是华南早古生代造山带构造属性研究的一项重要内容。近年,笔者等连同江西、福建、浙江地质调查院的同行,在闽、浙、赣、湘、粤开展了系统的路线调查,累积了800多个GPS定位点的观察记录,发现大量浅海相沉积标志,结合杂砂岩地球化学特征的分析,提出被动大陆边缘构造背景的认识。

华南东段下古生界主要分布在赣南、闽北清流、将乐、邵武和粤东等区段,尤以赣南地区出露最好。志留系区域缺失。在赣南、闽北等地,在以笔石相碎屑岩为主体的寒武系和奥陶系中,发现丰富的浅海相沉积构造或标志,初步可分为9类,它们是:石煤层或厚的炭质泥岩层、长石砂岩和钙质砂岩、灰岩夹层或透镜体、底栖化石(珊瑚、腕足、腹足)、波痕、冲刷痕、斜层理、泥包砂构造。其中,波痕、印模、冲刷痕多同时出现在同一层位中。

炭质泥岩层(最厚达30m)主要发育在寒武系底部和中部,下、中奥陶统也见发育,野外污手,部分

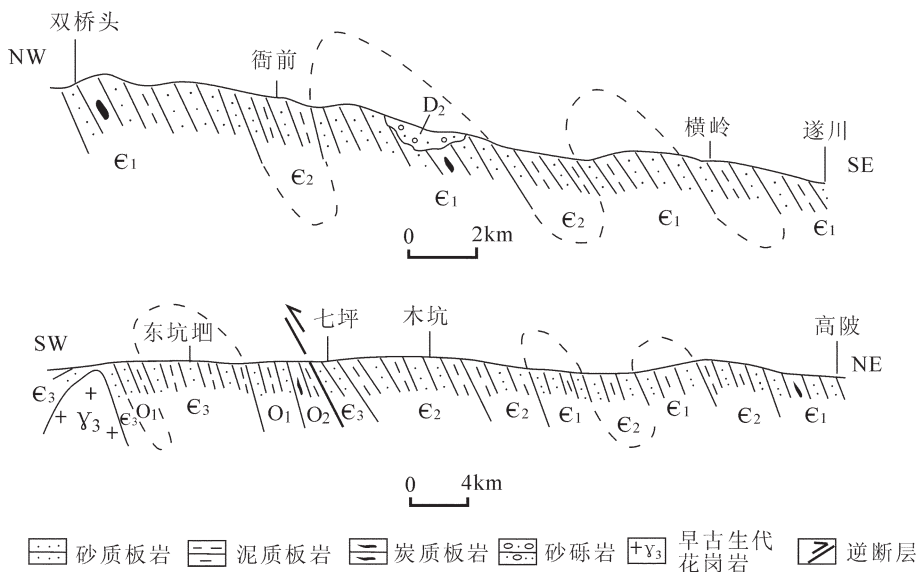


图2 强烈褶皱的寒武系(ε)—奥陶系(O)地质剖面
Fig. 2 Strongly folded Cambrian—Ordovician geological sections
上:遂川—双桥头;下:万安县高陂—遂川县东坑圳

已经变为石煤层。紧接其上为含波痕、冲刷痕构造的砂岩岩层,如上犹县黄埠所见。炭质泥岩多遭受过低级变质和褶皱变形作用,揉皱构造发育(图 3-a)。有时可见“砂质板岩”(原定“硅质板岩”。镜下石英 70%~80%, 杂基大于 20%; SiO_2 73%~88%, Al_2O_3 6%~10%,故定名砂质板岩更妥)与其共存。观察点包括南城徐家、徐家水库、瑞金对坊、永新韩江、泰和桥头、黄陂、井冈山王家坪、下庄、遂川下七、红石、荣洲、新江、段尾、上犹黄埠、新余塘山、岭上等地。岩石中有机碳含量大于 2%, δC_e 为 0.9 左右,有机碳

$\delta^{13}\text{C}$ 值较小(-30.2‰~-25.4‰),揭示主体为浅海相沉积环境,一些地段可能达到半深海环境^[32]。

长石砂岩的层厚较大,单层多为 50~100 cm(图 3-b),颗粒较粗,长石多已高岭土化,主要发育在中寒武统和上奥陶统,它的存在意味着搬运不远,离源区较近。观察点包括泰和桥头小平餐馆屋后、桥头镇 319 国道 702.6 km 处,遂川横石、小龙口,弋阳旭光,宜黄高庄,瑞金对坊等地。钙质砂岩主要见于瑞金大柏地、罗天桥、龙岗、泰和桥头等地。

灰岩夹层或透镜体分布在上寒武统的变质砂岩



图 3 早古生代浅海—半深海沉积环境指相标志

Fig. 3 Facies indicators of the Early Paleozoic neritic-bathyal sedimentary environment

a—强烈揉皱变形的炭质泥岩(下寒武统,上犹县黄埠);b—长石砂岩(中寒武统,泰和县桥头小平餐馆屋后);c—变余砂岩中的灰岩夹层(下奥陶统,井冈山河西陇);d—“砂包泥”透镜状层理(中奥陶统,井冈山黄洋界);e—波痕构造(下寒武统,上犹县黄埠);f—变余砂岩中的印模(下寒武统,上犹县黄埠)

中(图 3-c),厚 20~40 cm,最薄为 5~8 cm,主要见于井冈山山下庄、河西陇和寻乌澄江三桥采石场。在武功山地区,寒武系中灰岩层非常普遍,产珊瑚和腕足;在崇义古亭出露厚达 60 多米的奥陶纪灰岩,化石丰富,前人曾在此鉴定出大量底栖化石(珊瑚、腕足、腹足)^[33],显然属浅海环境无疑。

“泥包砂”或“砂包泥”透镜状层理在寒武系和奥陶系中均很发育(图 3-d),在井冈山黄洋界、遂川县新江—横岭地质路线,遂川下七、闽北清流多处见及。在南康县龙回采石场,见 180 m×60 m×60 m 的巨大砂岩透镜体,其内还见厘米尺度的竹叶状灰岩团块,周围均为震旦纪板岩(原定上震旦统),反映浅海—滨海环境。

波痕在寒武系中较为发育(图 3-e),波长 10 cm 左右者居多,有时附近可见印模构造(图 3-f)与冲刷痕构造,为典型的浅海—滨海环境指相标志,主要见于上犹黄埠,遂川段尾、小龙口等地。

斜层理包括正粒序与反粒序 2 种,是判断古流向、认识褶皱构造、恢复原始沉积厚度的重要标志,主要发育在寒武系。野外观察点包括泰和桥头小平餐馆屋后、黄陂,遂川新江、石子头、横石、段尾、衙前等。

对赣南不同区段的 20 件杂砂岩样品的微量元素数据作判别图解,绝大部分投影在被动大陆边缘范围内,不存在任何大洋盆地的信息^[32]。

在这些下古生界出露区,笔者没有发现任何早古生代火山熔岩或火山碎屑岩,更无爆发相火山碎屑岩。虽然过去确定过一些火山沉积岩,如“粉屑凝灰岩”、“凝灰质砂岩、粉砂岩”等^[33],但因颗粒非常细小,年代久远,且普遍变质成了板岩或千枚岩,镜下的“火山灰”与砂岩中的泥质杂基无异。因此,这种“火山灰”物质并不确定,且即使少量存在也不能证明该地发生过火山活动。1983 年的美国圣海仑斯火山喷发,火山灰柱达数十千米高,火山灰遍布全球,西太平洋的日本岛就有当时火山灰的记录。如果只有火山灰而没有火山爆发岩或熔岩,是不能被认定所在地发生过火山作用的。

在赣南大面积下古生界出露区,泥质岩与砂质岩构成的韵律层非常发育,曾被称为浊积岩,认为是深海环境。但是,笔者在这些岩层中没有见到浊积岩识别标准的鲍玛层序(砾岩—砂岩—粉砂岩—页岩—泥岩层序)。把这些泥砂质韵律层当作深海相复理石或浊积岩是原先某些文献的误区。在胜利油田渐新

世和中新世的湖相地层中,深灰色泥质岩与砂质岩构成的韵律层相当发育,显然不能称为复理石或浊积岩。

另据江西省地质调查院吴富江 2006 年 11 月 19 日面告,井冈山—黄坳—下七寒武纪—奥陶纪地层剖面原厚度为一万多米,后经精细构造剖析,厘定为同斜背斜构造,经重新计算,实际厚度不到 2000 m^[34]。

区域地层分析结果表明,上述现象在浙南、闽北、粤东、湘南的南岭地区具有普遍性,但延至湘西、广西、云南一带,沉积厚度逐渐变大,浅海相标志明显减少,反映水体逐渐变深,推测早古生代是一种从北东向南西方向逐渐变深的古地理环境^[10]。

3 震旦纪—早古生代火山岩、超镁铁岩—镁铁质岩问题

3.1 火山岩甄别

早先文献曾介绍赣南多处出露震旦纪—早古生代超镁铁岩、镁铁质岩和火山岩,笔者等会同江西省地质调查院的同事近年数次的野外实地调查和室内切片观察,证实青白口系神山群中确实存在古火山熔岩,呈夹层状分布在千枚岩中,如武功山、吉安、峡江、南城、会昌、于都、寻坞、宜黄等地所见。笔者在宜黄县潭坊村东侧南华系底部曾见有可疑基性“火山岩”。然而,化学分析数据并不理想,薄片鉴定为辉绿岩。在野外笔者没有见到证据确凿的震旦纪(相当于灯影组+陡山沱组)—早古生代火山熔岩和火山碎屑岩。

填制在 1:20 万地质图、描述在《江西省区域地质志》^[33]中的安远县鹤子乡南华系中的“超基性岩”,经 2006 年 2 月 20 日舒良树、法国 Charvet Jacques 会同江西省地质调查院张芳荣在 2 处进行实地考察(N24°56.82'、E115°11.76',N24°56.65'、E115°11.92'),均为黑绿色致密坚硬的细粒基性侵入岩脉,野外粗定既非超镁铁岩,也非火山岩,经室内薄片鉴定,为细粒辉长辉绿岩(图 4-a)。

笔者等对原定为玄武岩的多处新鲜露头点进行了认真的野外观察和镜下鉴定。

出露在寻乌县澄江镇北 1 km 公路边采石坑中的寒武纪黑绿色“玄武岩”(N25°05.55'、E115°43.89'),经薄片鉴定实为变质杂砂岩(图 4-b)。

出露在寻乌吉潭乡北侧寒武纪深绿色“玄武质

片岩”(N24°57.71'、E115°41.86'), 为绿泥绢云母千枚岩。

出露在瑞金县龙岗乡南3 km 公路边采石坑中的寒武纪黑绿色“块状玄武岩”(N26°05.40'、E116°15.17'), 为变质杂砂岩(图 4-c)。

出露在宜黄县草鞋岗南华系千枚岩中的深绿色“玄武岩”夹层(N27°10.09'、E116°07.53'), 实为绢云母石英千枚岩(图 4-d)。

出露在广东兴宁市径南镇原震旦系中的黑绿色“玄武岩”(N24°10.25'、E115°52.10'), 为变质杂砂岩^[36]。

出露在兴宁市径南镇原震旦系中的浅变质流纹岩-杂砂岩系, 其流纹岩经 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年, 时代为新元古代(见下)。出露在兴宁市罗岗镇前泥盆系中的“超基性岩”, 经薄片鉴定, 实为绿泥石化粗晶辉长岩夹薄层蛇纹石化辉石岩, 辉长岩的全岩 Rb-Sr 测年值为 $179 \text{ Ma} \pm 4 \text{ Ma}$ ^[35]。

因此, 笔者得出初步结论, 赣南地区没有早古生代的“超基性岩”和早古生代火山熔岩、火山爆发碎屑岩, 火山熔岩主要出现在前南华纪岩层中。

3.2 超镁铁岩、镁铁岩的年代

出露在浙南、闽北等地的超镁铁—镁铁岩, 曾是早先华南活动陆缘沟—弧体系建立的重要支撑, 限于当时缺乏有效的测年条件, 将其时代定为加里东期。对原定蛇绿岩、火山岩的重新厘定和年代学的再研究表明, 研究区前泥盆纪超镁铁、镁铁岩和玄武岩都形成于新元古代, 不是原先的“早古生代蛇绿岩套”和“早古生代火山岩”。

笔者等近年对武夷山南东麓和北麓出露较佳的 16 处超镁铁岩、镁铁岩、玄武岩露头点进行了详细调查, 包括武夷山南东麓 8 处(顺昌里黄源, 政和蝴蝶街、马面山, 龙泉汤源, 建瓯小康, 建阳北坊、长城、吴忠)、武夷山北麓 8 处(诸暨陈蔡、石角、化泉、傅村、溪北, 龙游白石山头、六连岗, 新余岭上)。结果表明, 所有的超镁铁岩、镁铁岩均呈无根构造团块出现, 构造团块成分包括变橄榄岩、辉石橄榄岩、辉长岩、辉绿岩、片岩、片麻岩等, 产在前震旦纪变质岩中。

包绕构造团块的基质主要是片岩、片麻岩; 受后期花岗岩浆作用的影响, 一些地段如龙泉、建阳等地

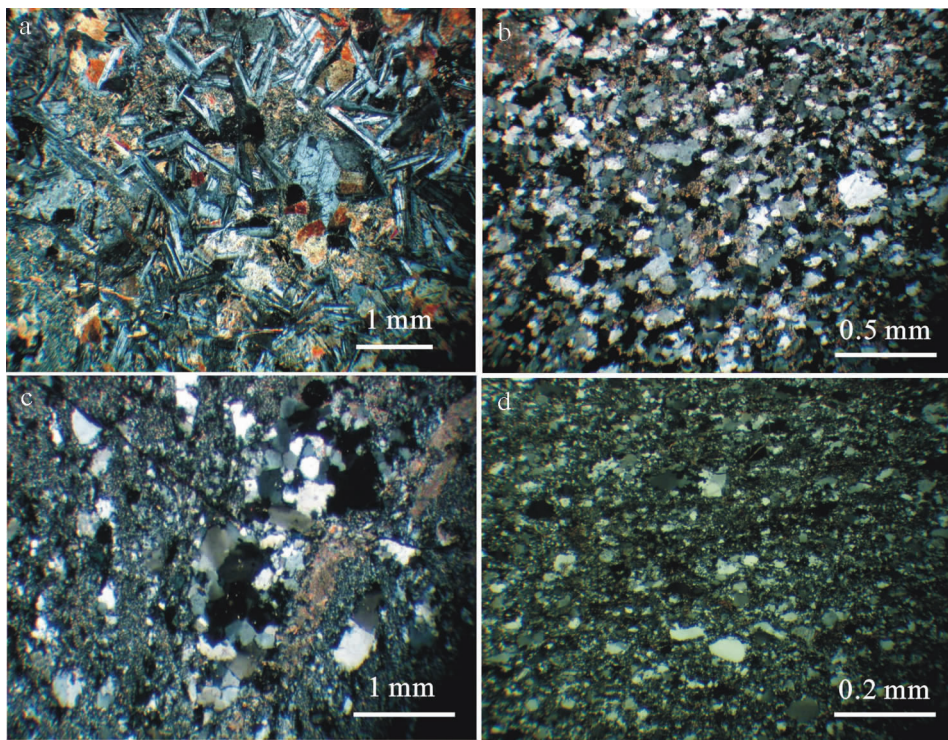


图 4 部分非火山熔岩显微照片

Fig. 4 Photomicrograph of some non-volcanic lavas

a—辉长辉绿岩(安远县鹤子乡); b—变质杂砂岩(寻乌县澄江镇北); c—变质杂砂岩(瑞金县龙岗乡南); d—变质杂砂岩(宜黄县草鞋岗)

的基质已经变成混合岩。发生这种变质作用的基质和团块,或与前震旦纪陈蔡群(浙东)、或与龙泉群(浙西南)、或与麻源群(闽北)、或与神山群(赣中)混杂,从未见它们与震旦系或寒武系—奥陶系混杂。揭示构造混杂作用在震旦纪之前就已完成,从一个侧面反映该区可能存在2期前泥盆纪构造事件。

2004年本文第一作者对诸暨化泉辉长岩、政和城西桥边辉绿岩的岩浆锆石作 SHRIMP U-Pb 测年,获得年龄值为新元古代,不同于先前认为的加里东期蛇绿岩套。为此,于当年10月会同法国 Charvet 对政和—大埔断裂带超镁铁岩、镁铁岩及其构造变形进行了专门考察,并于2005年对诸暨化泉辉长岩、政和铁山辉长岩、政和辉绿岩、建瓯城西玄武岩再度调查采样,精挑岩浆锆石作 SHRIMP U-Pb 测年,获 860~800 Ma 的年龄值。从严谨和谨慎2点出发,于2006年对部分采样点再次采样,送往外地精挑岩浆锆石,再次作锆石 SHRIMP U-Pb 测年,其结果差别不大。

现将6组 SHRIMP 测年结果陈列如下:①诸暨化泉辉长岩,858 Ma±11 Ma(14组数据谐和年龄);②政和铁山辉长岩,847 Ma±8 Ma(9组数据谐和年龄);③政和辉绿岩,795 Ma±5 Ma(14组数据谐和年龄),同期李武显等从政和县城附近流纹岩的锆石中获得相近的 SHRIMP U-Pb 测年值 818 Ma±9 Ma^[29];④建瓯玄武岩,836 Ma±7 Ma(12组数据谐和年龄);⑤诸暨陈蔡玄武岩,857 Ma±7 Ma(17组数据谐和年龄);⑥兴宁径南浅变质流纹岩,972 Ma±8 Ma(8组数据谐和年龄^[30])。对这些测年的基性火成岩中锆石样品的 Hf 同位素测定表明,¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值变化于 0.282234~0.282937,其 830 Ma 时的初始 Hf 同位素组成 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 集中在 +6~+10 之间,玄武岩中部分锆石出现负值, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)=-6\sim-9$,反映绝大部分属地幔岩浆结晶锆石,部分受到地壳物质混染(详细数据拟另撰文)。

在武功山北侧的萍乡盆地南缘,曾钻遇 200 m 厚的细碧岩和硅质岩,含海绵骨针化石^[28];核工业 270 研究所曾对该细碧岩岩心作 Rb-Sr 测年,获 780 Ma 数据(270 研究所内部资料)。沿政和—大埔断裂带分布的玄武岩、辉长岩的地球化学数据表明,玄武岩类可分为 2 类^[37],一类属于钙碱系列,微量元素特征类似于岛弧玄武岩,对应年龄老于 840 Ma,另一类为拉斑玄武系列,具洋岛玄武岩的特征,对应年龄为 830~800 Ma。

据此得出结论,分布在政和—大埔断裂带中的超镁铁岩、镁铁岩、火山熔岩形成时代为新元古代。

4 韧性变形运动学与年代学

4.1 武夷山两麓韧性变形运动学

到目前为止,研究区的构造变形研究大都局限于几何学、区域构造分析等范围,对区内广泛发育的韧性剪切带,以前有过少量关于运动学的工作^[38],但尚未开展系统的构造运动学研究。加之后期构造—热事件的叠加,增大了华南早古生代造山带构造变形时序、性质、运动动向的分辨难度。

2004年以来,笔者等4次野外工作,累计100余天作韧性变形运动学调查,获得大量运动学要素(剪切面理、拉伸线理、非同轴不对称矿物组构)和动向证据,采集了覆盖华南东段的数百件定向样品。调查表明,韧性剪切构造主要发育在前泥盆纪,集中在武夷山两麓地带,其中南东麓比北麓变形更强,构造形迹更发育,保存更好。山体内部韧性剪切构造相对不发育,且因岩体侵入、后期脆性变形的叠加,保留较差。泥盆纪以来区域规模的构造变形,除局部地段如重新活动的大断裂带或变质核杂岩之外,变形活动均发生在上地壳,主体属于脆性变形、薄皮构造。

将武夷山南东麓野外测量到的剪切面理、拉伸线理数据作赤平投影(共81组),获线理的优势方位为 $325^\circ \angle 52^\circ$,糜棱面理的极大值为 $340^\circ \angle 56^\circ$,属于倾滑型构造变形;部分地段存在面理近直立、线理近水平的走滑型产状,动向为左旋走滑。在武夷山北麓剪切面理、拉伸线理测量数据的赤平投影图上(共49组),产状分布较乱,其线理的优势方位为 $170^\circ \angle 44^\circ$,糜棱面理极大值为 $165^\circ \angle 52^\circ$,因为倾滑型韧性剪切变形,部分地段存在面理陡立、线理平缓的产状,属于走滑型产状,动向则为右旋走滑。

在武夷山两麓韧性剪切带的露头或定向薄片上,平行拉伸线理的 XZ 面上观察到大量动向组构,主要包括 σ 型不对称残斑系(花岗片麻岩、糜棱岩化杂砂岩、千枚岩)、旋转的不对称长石眼球构造(花岗片麻岩)、白云母鱼尾构造、绕黄铁矿的条纹状石英压力影(板岩)、石榴子石雪球构造、书斜构造(杂砂质千枚岩)、雁列的不对称岩片或长石残斑、斜交剪切面理的石英亚颗粒定向条带、S-C 复合面理、不对称石香肠(变杂砂岩、板岩)等。这些标志一致给

出了明确的运动学动向:武夷山南东麓从北西向南东逆冲推覆,北麓从南向北逆冲推覆。剖面上则构成花状构造变形样式。同时,运动学组构也显示出武夷山南东麓左旋走滑、北麓右旋走滑的动向。走滑型构造叠加并置换了倾滑型的剪切标志,表明形成时代较晚;相对而言,南东麓的走滑作用比北麓强烈。

4.2 武夷山两麓韧性变形年代学

为了了解韧性变形热事件的发生时间,在武夷山两麓采集了 10 余件糜棱岩样品作 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 测试定年,由中国地质大学(北京)王瑜负责测试。连同先前在法国和中国科学院地质研究所 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 实验室获得的数据,共获得 5 组数据。兹将这些测年结果陈列如下:①(北麓)弋阳县周潭云母片岩的白云母, $421\text{Ma}\pm 8\text{Ma}$;②(北麓)弋阳县慈竹黑云母片岩的黑云母, $428\text{Ma}\pm 2\text{Ma}$;③(南东麓)旧县东町眼球状片麻岩的黑云母, $433\text{Ma}\pm 3\text{Ma}$;④(南东麓)宁化片麻状花岗岩的黑云母, $430\text{Ma}\pm 2\text{Ma}$ (Charvet 在野外认为,宁化岩体东缘具有同构造软变形花岗岩的特征);⑤(南东麓)政和蝴蝶街大理岩的白云母, $393\text{Ma}\pm 5\text{Ma}$ (详细数据拟另撰文)。据此认为,华南东段早古生代韧性变形的时间为 $430\sim 390\text{Ma}$,相当于从早志留世晚期开始,到中泥盆世早期结束。

5 早古生代造山作用的特征

根据大量野外第一手资料,包括褶皱、变质与韧性变形构造、花岗岩、地层缺失与角度不整合、前陆盆地等资料,笔者赞同华南东段在志留纪—泥盆纪曾发生过一次强烈的褶皱造山作用。

在此造山带中,最令人瞩目的地质现象是泥盆纪岩层与下伏地层呈角度不整合,以及前泥盆纪地层强烈的挤压褶皱构造。在粤北,晚志留世复成分砾岩角度不整合于褶皱变形、低绿片岩相变质的寒武纪或奥陶纪变质碎屑岩之上。在赣南和闽北,区域缺失志留系。在上犹县陡水和南康县龙回乡鹅公头,早古生代花岗岩体均被中泥盆世跳马涧组(D_3^j)假花岗岩层、粗碎屑岩层不整合覆盖。在赣南泰和楠木渡假村、井冈山茨坪、遂川黄坳和龙口等地,跳马涧组复成分砾岩、粗砂岩岩层角度不整合覆盖在褶皱变形、低绿片岩相变质的奥陶纪泥砂质板岩之上。在闽北宁化县泉上村采石场,泥盆纪天瓦寨组(D_3^t)砾岩和石英砂岩不整合覆盖于奥陶纪浅变质岩之上。在赣西北、赣东北和浙西北,则是早石炭世粗碎屑岩普

遍角度不整合覆盖在强烈褶皱变形的前泥盆系之上。据此认为,晚奥陶世—中泥盆世之间,发生过一次非常强烈的构造造山事件;区域性的构造隆升—剥蚀活动具有从南向北逐步推移的特点。

所有的早古生代岩层均被卷入褶皱构造,形成一个褶皱轴呈 NE 向展布的复式背斜构造。沿袭至今的“华南加里东褶皱带”术语即出此因。强烈褶皱使前震旦纪的结晶基底隆升出露,遭受叠加与改造。这期褶皱造山作用伴随的区域变质和韧性变形作用是很明显的。研究区所见到的各种变质岩,包括板岩、片岩、片麻岩、花岗片麻岩和一部分混合岩,都已经发生糜棱岩化作用,属于区域动力变质作用性质。前泥盆纪变质岩层中剪切面理发育,面理面上拉伸线理和矿物拉长线理醒目,XZ 面上的剪切动向标志丰富。结合诸暨化泉辉长质糜棱岩和南岭东部高温高压麻粒岩相变质岩等事实,认为本区发生过上、中、下 3 种地壳层次的构造流变作用。最近的测年资料和笔者的工作表明,这些变质变形的岩石,包括在武夷—南岭一带发现的麻粒岩相变质岩^[39-40],相当一部分是在志留纪—泥盆纪强烈的褶皱造山过程中在不同深度层次形成的。当然,不能排除前震旦纪特别是新元古代青白口纪发生的变质与变形作用。前震旦纪岩层的褶皱形态、变质—变形样式与震旦纪—早古生代岩层的褶皱样式并不一致,后者变形样式没有进入或置换前者,两者差别较大,反映前泥盆纪至少发生过 2 期区域构造事件。进一步的研究是必要的。

继徐克勤等在上犹县陡水和南康县龙回乡鹅公头发现加里东期花岗岩以来,大量同期花岗岩被陆续报道。迄今已被厘定的古生代花岗岩超过 100 个^[41],总面积超过 20000km^2 ,大者超过 3000km^2 ,小者超过 10km^2 。时代从晚奥陶世到早泥盆世,岩浆锆石 U-Pb 年龄为 $460\sim 380\text{Ma}$,峰值为 $430\sim 400\text{Ma}$ 。多数属强过铝花岗岩。主要出露在武夷山、赣南、南岭和云开大山地区,面广量大。可分为 2 期,早期属 I 型花岗岩,以含角闪石、强烈面理化、数量少、规模小为特征,赣中的山庄岩体和慈竹岩体^[42]是其代表,形成时代为 $430\sim 460\text{Ma}$;晚期属 S 型花岗岩,以含堇青石、白云母,规模大、数量多、块状构造为特征,主要形成于 $400\sim 430\text{Ma}$,占同期岩体的 90%以上。S 型花岗岩中,既有多期复式岩体(如诸广、武功等岩体),也有岩性单一、均匀块状的花岗岩体,还有岩性复杂的

小岩体。按照特征矿物分类,绝大多数属于板内花岗岩或碰撞型花岗岩^[43]。这期构造-岩浆事件,除了有大规模花岗岩侵入外,还对前寒武纪基底进行化学流体的改造^[44]。

这种缺少板块俯冲作用、却有大量S型花岗岩形成的现象,与华南南岭地区大规模印支期花岗岩带的地质事实可以对比。一般认为,南岭地区的印支期花岗岩带是陆内构造作用的产物。

根据野外调查,早古生代前陆盆地主要残留在武夷山北侧的浙西北—下扬子一带,以厚达千米以上的晚奥陶世—志留纪泥砂质沉积岩和一系列断面南倾、朝北推覆的逆冲构造为特征。最近,戎嘉余等^[45-46]根据浙西、浙西北和赣东北的生物地层、古生物和群落古生态信息,推测在晚奥陶世—志留纪初,江绍断裂带西北侧的古海岸带和动物群发生了重大变化,提出华夏陆块大规模西扩的认识。这是区内存在早古生代前陆盆地的重要依据。

在世界几个著名的加里东造山带中,如挪威—苏格兰、东格陵兰、阿帕拉契、西伯利亚、东澳大利亚、中国秦岭地区等,均保留有明确的早古生代洋壳俯冲—岛弧—碰撞纪录^[47-55],均发育大量块状硫化物矿床^[56-57],有的还伴有同期榴辉岩和高压麻粒岩^[58-60]。碰撞造山后期或之后,还发生过走滑剪切与伸展作用,以及板内陆壳熔离岩浆作用等^[61-67]。与上述国内外板块俯冲—碰撞型的加里东造山带相比,华南早古生代造山带是一例外:①早古生代S型花岗岩发育,但缺少同期蛇绿岩和火山岩,②褶皱变形强烈,构造事件穿时性明显,从志留纪末开始一直延续到晚泥盆世乃至早石炭世,但没有同期、具有填图规模的高压低温变质岩出露,③至今没有发现工业型块状硫化物矿床。华南早古生代造山带具有鲜明的地域特色,反映了其独特的地球动力学背景。

6 早古生代造山带的构造属性探讨

鉴于沿政和—大埔断裂带分布的超镁铁岩、镁铁岩、火山熔岩的时代已被厘定为新元古代青白口纪、该带北侧不存在震旦纪—早古生代火山岩带、北侧早古生代沉积环境为浅海—半深海的3点地质事实,该断裂带不是早古生代洋壳板块的俯冲带。

如果假设早古生代俯冲带位于政和—大埔断裂带东南侧晚中生代火山岩带之下的某个位置,则不仅作为古俯冲带的必要标志——古洋壳碎块(蛇绿

岩)毫无踪迹,而且与之关联密切的配套单元——岛弧型火山岩带也痕迹全无。迄今为止,无论是地表地质、钻孔编录,还是地球物理资料,都没有见及断裂带东南侧地下存在早古生代洋壳碎块或岛弧型火山岩的记载。板块俯冲—碰撞造山模式的假设缺少可靠的证据。

在全球造山带中,既无洋壳板块俯冲又无岛弧型岩浆活动的有2个典型实例:法国—西班牙边境的新生代比利牛斯造山带和新生代天山造山带。前者早期有过一次走滑旋转变形,在造山前是一个轴带为海西期基底陆块、两侧为海盆的构造格局;始新世期间,在北侧欧洲板块、南侧非洲板块的挤压夹击下,两侧海盆地关闭并带动南比利牛斯带的陆壳和北比利牛斯带的陆壳向中央轴带下冲,两侧上盘发生强大推覆(南侧朝南逆冲推覆强于北侧朝北逆冲推覆),并使古生代变质基底卷入其中,导致比利牛斯造山带形成,属于陆内造山作用的产物^[68-69]。鉴于局部地区存在中地壳“低速层”,推测深部可能存在局部熔融的硅铝物质层。后者在造山前后均处于大陆腹地的陆相环境,是由于印度板块沿雅鲁藏布江缝合带深俯冲产生的巨大挤压力的朝北传播造成的,称为“板块碰撞远程效应”^[70]或“滑线场理论”^[71]。

根据上述,武夷山、武功山、南岭诸广山是一个轴向NE的断续相连的古陆残块地体群,其间为震旦纪、寒武纪、奥陶纪的浅海—半深海沉积盆地,构造环境和总体格局与比利牛斯较为相似。从晚奥陶世开始,可能受研究区北侧早古生代构造应力作用(扬子型地体群拼贴^[72])和南东侧海域未知地体群碰撞—拼贴的影响,研究区震旦纪—奥陶纪海盆地被挤压关闭,并带动其陆壳朝武夷山—诸广山古陆块的南北两缘下冲,形成华南早古生代造山带;同时,熔融地壳物质形成花岗岩浆侵入体,并产生一个北麓朝北逆冲、南东麓朝南东逆冲的韧性变形区。造山带形成后,还遭受了后期走滑剪切的破坏。这一认识与前述韧性变形运动学分析及结论是一致的。武夷山两麓强烈的韧性变形作用及其Ar—Ar测年值430~390Ma表明,绍兴—江山—萍乡断裂和政和—大埔断裂是华南早古生代造山带的2条强烈韧性变形剪切带。造山带形成后,还遭受了印支期构造变形和燕山期岩浆作用的破坏与改造^[73]。

值得一提的是,武夷山北麓绍兴—江山一带目前没有华南型早古生代碎屑岩出露。对此存在2种

解释:①先存的早古生代碎屑物质在海盆关闭、陆壳下冲及后期走滑剪切过程中消亡了;②早先的裂解没有引起这一带开裂成为海盆,导致这一地段没有华南型早古生代碎屑物质堆积。因此,这个问题仍需深入研究。

志留系在华南东段区域缺失。中泥盆世跳马涧组砾岩、砂砾岩和粗砂岩层呈区域角度不整合覆盖在奥陶纪板岩之上。此后一直到中三叠世,华南均处于稳定的沉积时期,形成由浅海相碳酸盐岩、碎屑岩组成的盖层,其岩石组合、生物群落与江南地区、扬子地区相似,反映早古生代构造事件后,一个真正统一的中国南方古地理格局才开始出现。

7 简短的结论

(1)根据近年在野外调查和测试分析中取得的第一手资料,围绕华南东段早古生代造山带的构造属性问题,在早古生代沉积环境、震旦纪(灯影组+陡山沱组)—奥陶纪火山岩甄别、超镁铁岩—镁铁岩年代、韧性变形运动学、早古生代造山带特色等方面取得了新认识。

(2)研究区缺失志留纪沉积。在地层柱上,震旦系—奥陶系(680~440 Ma)以泥砂质碎屑岩为主体,夹炭质泥岩、灰岩及硅质岩。韵律构造发育,缺乏鲍玛层序,不含火山熔岩和爆发火山碎屑岩。岩层中发育大量浅海相沉积标志,包括石煤层或厚的炭质泥岩层、长石石英砂岩和钙质砂岩、灰岩夹层或透镜体、底栖化石(珊瑚、腕足、腹足)、波痕、荷重模、冲刷痕、斜层理、泥包砂构造。结合有机碳同位素和杂砂岩地球化学成果的分析,提出早古生代本区为被动大陆边缘型浅海—半深海沉积环境的认识。

(3)对原定早古生代的火山岩进行了野外和室内的认真甄别,发现原被定为玄武岩的岩石实为变质杂砂岩。区内不存在早古生代火山熔岩。

(4)分布在政和—大埔断裂带的超镁铁岩、镁铁岩和火山岩,经精挑锆石作 SHRIMP U—Pb 测定,获得一批高质量的年龄数据,年龄集中在860~800 Ma之间,属新元古代青白口纪。被测年的玄武岩和基性岩中的锆石 Hf 同位素测定数据表明,锆石绝大部分形成于地幔岩浆环境,部分受到地壳物质的混染。

(5)在武夷山两麓,韧性变形构造比山体轴部更为发育。通过系统的运动学研究,获得了明确的运动学动向:武夷山南东麓从北西向南东逆冲推覆,北麓

从南向北逆冲推覆,剖面上呈花状构造样式。稍后发生了韧性走滑作用,叠加并置换了早期的逆冲变形构造。对糜棱岩中的云母矿物作 ^{40}Ar — ^{39}Ar 法定年,结果表明,韧性变形的时间为 430~390 Ma,相当于从早志留世晚期开始,到中泥盆世早期结束。

(6)与国内外典型的加里东期造山带相比,华南早古生代造山带是一例外:①早古生代 S 型花岗岩发育,但缺少同期的蛇绿岩和火山岩,②褶皱变形强烈,构造事件穿时性明显,但没有同期、具有填图规模的高压低温变质岩出露,③至今没有发现工业型块状硫化物矿床。华南早古生代造山带具有鲜明的地域特色,反映其独特的地球动力学背景。综合研究表明,华南早古生代构造环境和总体格局与西欧比利牛斯地区相似。

致谢:王德滋教授、张国伟教授、周新民教授对本研究给予支持和指导,卢华复教授就文中部分问题与作者进行过有益的讨论,江西地调局杨明桂、陈祥云、楼法生、凌联海、张芳荣,福建地调局马金清、李进堂,浙江地调局郑光财、汪庆华等同事给予大力帮助,提供了诸多宝贵建议和野外考察的便利,在此一并致谢!

谨以此文献给第四届全国构造会议。

参考文献:

- [1]Grabau A W. Stratigraphy of China, Part I, Paleozoic and older[J]. The Geological Survey of Agriculture and Commerce, Peking, 1924,528: 1-6.
- [2]Grabau A W. Migration of geosyncline[J]. Bulletin of the Geological Society of China, 1924,3(3/4):207-249.
- [3]黄汲清.中国主要地质构造单元[M].北京:地质出版社,1945:1-87.
- [4]徐克勤,刘英俊,俞受均,等.江西南部加里东花岗岩的发现[J].地质论评,20(3): 112-114.
- [5]徐克勤,孙鼎,王德滋,等.华南多旋回花岗岩类的侵入时代、岩性特征、分布规律及其成矿专属性的探讨[J].地质学报,1963,43(1/2): 141-155.
- [6]郭令智,施央申,马瑞士.华南大地构造格架和地壳演化[C]//国际交流地质学术论文集(1).北京:地质出版社,1980:109-116.
- [7]Guo Lingzhi, Shi Yangshen, Lu Huafu, et al.. The pre-Devonian tectonic patterns and evolution of South China [J]. J. SE Asian Earth Sci., 1989, 3(1/4): 87-93
- [8]Hsu K J, Sun S, Li J L, et al. Tectonics of South China: Key to understanding West Pacific geology[J]. Tectonophysics, 1990, 183:9-39.
- [9]Shui Tao, Xu Butai, Liang Ruhua, et al. Shaoxing-Jiangshan deep-seated fault zone, Zhejiang Province[J]. Chinese Science Bulletin, 1986, 31(18):1250-1255.
- [10]Ren J S, Chen T. Tectonic evolution of the continental lithosphere

- in eastern China and adjacent areas[J]. *J. SE Asian Earth Sci.*, 1989, 3: 17-27.
- [11]李继亮.中国东南海陆岩石圈结构与演化研究[M].北京:中国科学技术出版社,1992:1-315.
- [12]李继亮.东南大陆岩石圈结构与地质演化[M].北京:冶金工业出版社,1993:1-264.
- [13]Hsu K J, Sun S, Li J L, et al. Mesozoic overthrust tectonics in South China[J]. *Geology*, 1988,16: 418-421.
- [14]殷鸿福,吴顺宝,杜远生,等.华南是特提斯多岛洋体系的一部分[J]. *地球科学*,1999,24(1):1-12.
- [15]杨树峰,陈汉林,武光海,等.闽北早古生代岛弧火山岩的发现及其大地构造意义[J]. *地质科学*,1995,30(2):105-116.
- [16]周新华,胡世玲,任胜利,等.东南陆壳超多阶段构造演化同位素年代学制约[M]//李继亮.东南大陆岩石圈结构与地质演化.北京:冶金工业出版社,1993:69-77.
- [17]周新民,朱云鹤.中国东南部晚元古代碰撞造山带与地缝合带的岩石学证据[M]//李继亮.东南大陆岩石圈结构与地质演化.北京:冶金工业出版社,1993:87-97.
- [18]胡雄健,许金坤,童朝旭.浙西南前寒武纪地质[M].北京:地质出版社,1991:1-277.
- [19]李献华.闽浙古元古代斜长角闪岩的离子探针锆石 U-Pb 年代学[J]. *地球化学*,1998,27(4):327-334.
- [20]邓平,舒良树.中国东南部晚中生代火成岩的基底探讨[J]. *高校地质学报*,2002,8(2):169-179.
- [21]卢华复.关于华夏古陆[J]. *高校地质学报*, 2006,12(4):413-417.
- [22]王德滋,周新民.中国东南部晚中生代花岗岩质火山-侵入杂岩成因与地壳演化[M].北京:科学出版社,2002:1-295.
- [23]周新民.南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化[M].北京:科学出版社,2007:1-580.
- [24]周新民.对华南花岗岩研究的思考[J]. *高校地质学报*,2003,9(4): 556-565.
- [25]章森桂,严惠君.国际地层表与 GSSP[J]. *地层学杂志*,2005,29(2): 188-203.
- [26]舒良树.华南前泥盆纪构造演化:从华夏地块到加里东期造山带[J]. *高校地质学报*, 2006,12(4): 418- 431.
- [27]Charvet Jacques, Shu Liangshu, Shi Yangshen, et al. The building of South China: collision of Yangzi and Cathaysia blocks, problems and tentative answers [J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 1996,13(3/5): 223-235.
- [28]舒良树,施央申,郭令智.江南中段板块-地体构造与碰撞造山运动学[M].南京:南京大学出版社, 1995:1-174.
- [29]Li W X, Li X H, Li Z X. Neoproterozoic bimodal magmatism in the Cathaysia Block of South China and its tectonic significance[J]. *Precam. Res.*, 2005,136: 51-66.
- [30]Shu Liangshu, Faure Michel, Wang Bo, et al. Late Paleozoic-Early Mesozoic Geological Features of South China: Response to the Indosinian Collision Event in Southeast Asia[J]. *C. R. Geosci.*, 2008,340 (2/3):151-165.Académie des sciences, doi:10.1016/j.crte.2007.10.010.
- [31]Li Zhenxiang, Li Xianhua, Kinny P D, et al. The breakup of Rodinia: did it start with a mantle plume beneath South China [J]? *Earth and Planetary Science Letters*, 1999,173: 171-181.
- [32]沈渭洲,舒良树,向磊,等.江西井冈山地区早古生代沉积岩的地球化学特征及其对沉积环境的制约[J]. *岩石学报*,2008,待刊.
- [33]江西省地质矿产局.江西省区域地质志[M].北京:地质出版社, 1984:1-921.
- [34]张芳荣,舒良树,王德滋,等.华南东段加里东期花岗岩类形成构造背景探讨[J]. *地质前缘*,2008,待刊.
- [35]邢光福,杨祝良,孙强辉,等.广东梅州早侏罗世层状基性-超基性岩体研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*,2001,20(3):172-175.
- [36]Shu Liangshu, Deng Ping, Yu Jinhai, et al. The age and tectonic environment of the rhyolitic rocks on the western side of Wuyi Mountain, South China[J]. *Science in China (D)*, 2008, 51(8):1053-1063.
- [37]王森,舒良树.武夷山新元古代蛇绿混杂岩岩石地球化学特征[J]. *中国地质*,2007,34(4):572-583.
- [38]舒良树,卢华复, J Charvet, 等.武夷山北缘断裂带运动学研究[J]. *高校地质学报*,1997,3(3):282-292.
- [39]Yu Jinhai, Zhou X M, O'Reilly YS, et al. Formation history and protolith characteristics of granulite facies metamorphic rock in Central Cathaysia deduced from U-Pb and Lu-Hf isotopic studies of single zircon grains[J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2005, 50(18): 2080-2089.
- [40]Yu Jinhai, O'Reilly SY, Zhao Lei, et al. Origin and evolution of topaz-bearing granites from the Nanling Range, South China: a geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic study [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2007, 90: 271-300DOI 10.1007/s00710-006-0180-2
- [41]孙涛.新编华南花岗岩分布图及其说明[J]. *地质通报*,2006,25(3): 332-335.
- [42]王德滋,林承毅,周新民.江西慈竹英云闪长岩体及其周围区域变质岩的成因[J]. *南京大学学报(自然科学版)*,1978,(1):81-99.
- [43]Condie K C. Plate tectonics and crustal evolution[M]. Oxford: Pergamon Press, 1997:1-476.
- [44]陈正宏,李奇禹,谢佩珊,等.利用 EMP 独居石定年法探讨浙闽武夷山地区变质基底岩石与花岗岩的年龄[J]. *高校地质学报*,2008,14 (1):1-15.
- [45]Rong Jiayu, Chen Xu, Su Yangzheng, et al. Silurian paleogeography of China[M]//Ed Landing, Markes E Johnson. Paleogeography outside of Laurentia. New York State Museum Bulletin, 2003,493: 243-298.
- [46]戎嘉余.奥陶纪-志留纪之交华夏古陆西扩及其证据[J]. *中国科学(D)*,2008,待刊.
- [47]McBride J H, England R W. Window into the Caledonian orogen: structure of the crust beneath the East Shetland Platform, United Kingdom[J]. *GSA Bulletin*, 1999, 111(7): 1030-104.
- [48]Davis J S, Roeske S M, McClelland W C, et al. Mafic and ultramafic crustal fragments of the southwestern Precordillera terrane and their bearing on tectonic models of the early Paleozoic in western Argentina[J]. *Geology*, 2000,28(2): 171-174.
- [49]Boger S D, Wilson C J L, Fanning C M. Early Paleozoic tectonism within the East Antarctic craton: The final suture between east and west Gondwana[J]. *Geology*, 2001,29(5): 463-466.

- [50] Harry D L, Londono J, Huerta A. Early Paleozoic transform-margin structure beneath the Mississippi coastal plain, SE United States[J]. *Geology*, 2003,31(11): 969 - 972.
- [51] Titus S J, Fossen H, Pedersen R B. Pull-apart formation and strike-slip partitioning in an obliquely divergent setting, Leka Ophiolite, Norway[J]. *Tectonophysics*, 2002,354 (1/2): 101-119.
- [52] Van Roermund H L M, Carswell DA, Drury M R, et al. Microdiamonds in a megacrystic garnet websterite pod from Bardane on the island of Fjortoft, western Norway: Evidence for diamond formation in mantle rocks during deep continental subduction[J]. *Geology*, 2002, 30(11): 959-962.
- [53] Yoshinobu A S, Barnes C G, Nordgulen Q, et al. Ordovician magmatism, deformation, and exhumation in the Caledonides of central Norway: An orphan of the Taconic orogeny[J]? *Geology*, 2002, 30 (10): 883-886.
- [54] 张国伟,孟庆任,于在平,等.秦岭造山带的造山过程及其动力学特征[J].*中国科学(D 辑)*,1996,26(3):193-200.
- [55] 张国伟,张本仁,袁学诚,肖庆辉,等.秦岭造山带与大陆动力学[M].北京:科学出版社,2001:1-855.
- [56] Franklin J M, Lydon J W, Sangster D F. Volcanogenic massive sulphide deposits[J]. *Econ. Geol.*, 1981, 1: 458-627.
- [57] Roberts D, Gee D G. An introduction to the structure of the Scandinavian Caledonides[C]//D.G. Gee and H.A. Sturt. *The Caledonian Orogen—Scandinavia and Related Areas*. John Wiley & Sons Ltd. 1985:55-68.
- [58] Friend C R L, Jones K A, Burns I M. New high-pressure granulite event in the Moine Supergroup, northern Scotland: Implications for taconic (early Caledonian) crustal evolution[J]. *Geology*, 2000,28(6): 543-546.
- [59] Elvevold S, Thrane K, Gilotti J A. Metamorphic history of high-pressure granulites in Payer Land, Greenland Caledonides[J]. *J. metamorphic Geol.*, 2003,21: 49-63.
- [60] Steltenpohl M, Hames W, Andresen A, et al. New Caledonian eclogite province in Norway and potential Laurentian (Taconic) and Baltic links[J]. *Geology*, 2003, 31(11): 985-988.
- [61] Barnes G G, Yoshinobu A S, Prestvik T, et al. Mafic magma intraplating: anatexis and hybridization in arc crust, Bindal batholith, Norway[J]. *Journal of Petrology*, 2002,43(12): 2172-2190.
- [62] Bonin B. Orogenic to Non-Orogenic Magmatic Events: Overview of the Late Variscan Magmatic Evolution of the Alpine Belt[J]. *Tr. J. of Earth Sciences*, 1998, 7: 133-143.
- [63] McClelland W C, Gilotti J A. Late-stage extensional exhumation of high-pressure granulites in the Greenland Caledonides[J]. *Geology*, 2003,31(3): 259-262.
- [64] Mckerrow W S, Niocail C M, Dewey J F. The Caledonian orogeny redefined[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 2000,157: 1149-1154.
- [65] Mizerski W. Holy Cross Mountains in the Caledonian, Variscan and Alpine cycles— major problems, open questions[J]. *Przeglqd Geologiczny*, 2004, 52: 774-779.
- [66] Schmidt -Aursch M C, Jokat W. The crustal structure of central East Greenland-I: From the Caledonian orogen to the Tertiary igneous province[J]. *Geophys. J. Int.*, 2005, 160: 736-752.
- [67] Tanner P W G, Bluck B J. Current controversies in the Caledonides [J]. *Journal of the Geological Society, London*, 1999, 156: 1137-1141.
- [68] Choukroune P, Roure F, Pinet B, et al. Main results of the ECORS Pyrenees profile[J]. *Tectonophysics*, 1990, 173: 411-423.
- [69] Debemas Jacques, Mascle Georges. *Les grandes structures géologiques (4^e édition)*[M]. Paris: Dunod,2004: 1-312
- [70] 郭令智,施央申,卢华复,等.印藏碰撞的两种远距离构造效应[C]//施央申,卢华复,马瑞士,等. *现代地质学研究文集(上)*.南京:南京大学出版社,1992:81-91.
- [71] Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision[J]. *Science*, 1975,189: 419-426.
- [72] 贾承造,施央申,郭令智.东秦岭板块构造[M].南京:南京大学出版社,1988:1-130.
- [73] Shu L S, Zhou X M, Deng P, et al. Mesozoic tectonic evolution of the southeast China block: New insights from basin analysis[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2008, in press.