

江南造山带北缘鄣公山地区新元古代地层构造 变形特征及其动力学机制

张彦杰 廖圣兵 周效华 王存智 蒋 仁 朱意萍

(中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016)

摘要: 鄣公山地区地处皖赣交界地带, 区内广泛分布一套浅变质的陆缘细碎屑岩为主含少量火山物质的复理石建造体, 大量高精度同位素测年数据显示, 该浅变质地层形成于 820~840 Ma 新元古代。经系统野外调查, 在该地层中首次解析出 5 期褶皱变形, 其中 F_1 以原始层理(S_0)为形变面形成的紧闭同斜、平卧等形态的露头尺度级片内无根褶皱; F_2 以早期构造面理($S_1//S_0$)为形变面的轴向近东西向开阔斜歪及同斜褶皱; F_3 属与大规模逆冲推覆构造相关的紧闭同斜或斜歪褶皱; F_4 为与燕山期花岗质岩浆热隆升有关的轴面北倾的透入性不对称紧闭下滑褶皱群; F_5 为分布于区域脆性平移走滑断裂带附近的倾竖褶皱, 上述褶皱分别对应不同的构造变形旋回。本文重点阐述褶皱变形的几何学、叠加样式、变形序次、运动学特征, 并对变形机制及大陆动力学等进行分析。

关键词: 江南造山带北缘; 新元古代浅变质地层; 构造变形; 大陆动力学

中图分类号: P534.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2010)04-0978-17

在中国扬子板块和华夏板块之间有一条明显带状分布的元古宙浅变质的沉积地层和一系列岩浆岩单元, 被称之为“江南造山带”^[1]。皖赣相邻区位于该造山带的东段北缘, 是研究华南前震旦纪地质的重要地区之一, 本文的鄣公山地区泛指休宁—祁门以南至皖赣交界地带, 区内广泛分布前震旦纪以陆缘细碎屑岩为主夹少量火山物质的强变形浅变质岩系, 长期以来, 由于缺少面上较大尺度系统的野外调查, 对其构造变形样式、叠加改造、变形期次等的剖析不够准确或全面, 在一定程度上影响和制约了区域构造格架的建立。笔者刚刚完成在本区域布施的 4 幅联测区调项目, 经系统野外调查, 在该套浅变质岩系中首次解析出 5 期褶皱构造, 本文对其构造几何学、叠加样式和变形期次及其大陆动力学等进行了分析, 以期对进一步完善江南造山带北缘构造演化格局提供资料。

1 地质概况

研究区处于古板块碰撞和中生代陆内焊合叠覆形成的极为复杂的强变形构造带中, 历经多期不同层次伸展、压缩、剪切机制下构造变形, 形成复杂构造图象。区内以褶皱叠加、构造推覆、岩片叠置为特点, 北东东向区域构造面理及北东、北北东向褶、断构造最为醒目, 其强烈改造、叠加、复合先期近东西向为主的构造。区内广布的一套浅变质的陆缘细碎屑岩为主含少量火山物质的复理石建造体, 为对应于古华南洋演化期间的被动陆缘沉积或弧后盆地沉积^[2-9]。长期以来, 众多学者根据早期的同位素年代数据和时限分布较广的微古植物, 将其形成时代置于中元古代。然而, 近些年包括我们在内的不少地质同行在研究区一带应用 SHRIMP U-Pb 及 LA-ICP MS U-Pb 等测年方法在原“中元古代”地层中

收稿日期: 2009-11-25; 改回日期: 2010-03-16

基金项目: 中国地质调查局“安徽 1:5 万平里、江潭、瑶里、虹关幅区调”项目(1212010610609)资助。

作者简介: 张彦杰, 男, 1971 年生, 高级工程师, 长期从事区域地质调查工作; E-mail: njzyj@126.com。

① 中国地质调查局南京地质调查中心. 安徽 1:5 万平里、江潭、瑶里、虹关幅区调报告, 2009。

② 江西地质调查院. 1:25 万景德镇幅区调报告, 2002。

无一例外地获得了一大批集中在 821~840 Ma 的锆石 U-Pb 年龄数据,显示皖赣相邻区广为发育的该套浅变质岩系原岩形成时限应为新元古代早期^①¹⁰⁻¹²。区域上,以景德镇—瑶里—江潭断裂带为界,南部称溪口岩群,进一步划分为板桥岩组和木坑岩组;以北属双桥山群,自下而上可分为横涌组、计林组和安乐林组^②¹³⁻¹⁶(图 1)。通过系统分析研究^①,认为溪口岩群属于拉张构造背景下的活动大陆边缘构造沉积环境;双桥山群主体显示火山弧构造沉积环境下的岩石组合特征,上覆地层为南华纪—早古生代滨浅海相为主沉积,属板内伸展机制下形成的稳定盖层沉积,二者之间局部地段可见角度不整合接触关系,大部分均被断裂构造所分割¹⁷⁻¹⁹,区域上主要分布于休宁—祁门县毗邻的北部一带。

2 构造几何学特征

研究区内新元古代地层以发育透入性区域构造面理、褶皱叠加为显著特征,呈现出复杂的构造图像(图 2~3)。经调查分析,主要经历了 5 期(D1-D5)构造变形,并以第一期构造变形(D1)为最强。

2.1 第一期构造变形(D1)

本区早期褶皱(F_1)以原始层理(S_0)为形变面形成的紧闭同斜(图 4)、平卧(图版 I-1)等形态最常见,多为相似褶皱和顶厚褶皱,褶皱连续性差,多见露头尺度级片内无根褶皱,翼部常具多级褶皱组合特征,两翼近于平行或翼间角小于 30° 。转折端形态严格受岩性和层厚制约,以厚层变砂岩为主组成的褶皱多具开阔圆滑的转折端;变泥质岩类及薄层变砂岩组成的褶皱则通常为紧闭尖棱型,转折端明显增厚,往往可见寄生褶皱,翼部明显减薄,弱岩层褶皱的波长比强岩层褶皱的波长要小。由于 S_0 受到 S_1 的较强构造置换及后期构造的强烈改造,通常情况下,本期褶皱尚较难系统恢复,但从赋存的残留无根褶皱变形轴迹和相应的线理分析,早期褶皱轴总体近东西向展布,轴面基本北倾。伴随强烈挤压构造变形,原岩组分发生分解、迁移和重新聚集形成同构造分泌结晶脉,区内主要为顺面理产出的同构造分泌石英脉体,在递进变形过程中卷入构造变形(图版 I-2)。

伴随 F_1 褶皱,形成首次区域透入性构造面理(S_1),为千枚理及板劈理,其构造面光滑,主要由绢云母为主的片状矿物定向排列及石英为主的粒状矿物定向拉长构成。 S_1 均匀密集分布,强烈置换 S_0 ,在翼部两者基本一致,在少部分弱变形域及小褶皱转折端处可见到保存较好的层片交切关系(图版 I-3)。

此次构造变形配套的线理(L_1)主要表现为绢云母、绿泥石等矿物集合体优选定向形成的生长线理;石英、长石等粒状矿物及部分暗色斑点变形拉长形成的拉伸线理;同构造分泌石英脉体递进变形被透视镜体及石香肠化表现出的线状构造等,线理构造与 F_1 褶皱轴平行。

2.2 第二期构造变形(D2)

表现为近南北向强烈挤压构造变形特征,形成一系列近东西—北东东向展布的以早期构造面理($S_1//S_0$)为形变面的褶皱构造(F_2),其规模从露头尺度级至数十千米不等。依 S_1 面理产状的变化较易恢复其形态,有开阔斜歪及同斜褶皱,褶皱轴面总体北倾,倾角一般为 $50^\circ\sim 60^\circ$,靠近核部位置,倾角 $70^\circ\sim 80^\circ$ 。褶皱枢纽倾伏方向总体向东—北东东,倾伏角 $10^\circ\sim 20^\circ$ 。在褶皱转折端部位,多见不协调褶曲。该褶皱系统由一系列不同级别、且两翼多被不同级别次级褶皱所复杂化的同斜紧闭褶皱所组成,不同级别的褶皱其形态受岩性及其单层厚度的制约。区内以平里—江潭复背斜及鄣公山同斜背形构造最具规模,其中前者以双桥山群 $S_0//S_1$ 及 S_1 为变形面,背斜核部为双桥山群横涌组,翼部地层为计林组及安乐林组,其中以北翼出露较全,南翼受区域断裂影响,仅出露横涌组(图 2)。褶轴近东西向展布,区内出露长约 48 km。褶皱枢纽向东倾伏,复背斜南翼产状为 $160^\circ\sim 170^\circ \angle 60^\circ\sim 80^\circ$,北翼产状为 $340^\circ\sim 350^\circ \angle 50^\circ\sim 70^\circ$ 。复背斜南北两翼发育不同级别的次级褶皱构造,轴面北倾,产状一般 $340^\circ\sim 350^\circ \angle 50^\circ\sim 70^\circ$,在转折端部位可见褶劈理构造(S_2),与 S_1 面理近直角相交。鄣公山同斜背形(图 3)以溪口岩群早期透入性构造面理(S_1)为形变面,近东西向展布,出露长约 40 km,受北东向逆冲—走滑断裂切割改造及燕山期花岗岩体侵吞,其形态不完整,但从残留露头上的褶皱形态及构造—地层体空间展布,仍可较清晰地

①中国地质调查局南京地质调查中心,安徽 1:5 万平里、江潭、瑶里、虹关幅区调报告,2009。

②江西地质调查院,1:25 万景德镇幅区调报告,2002。

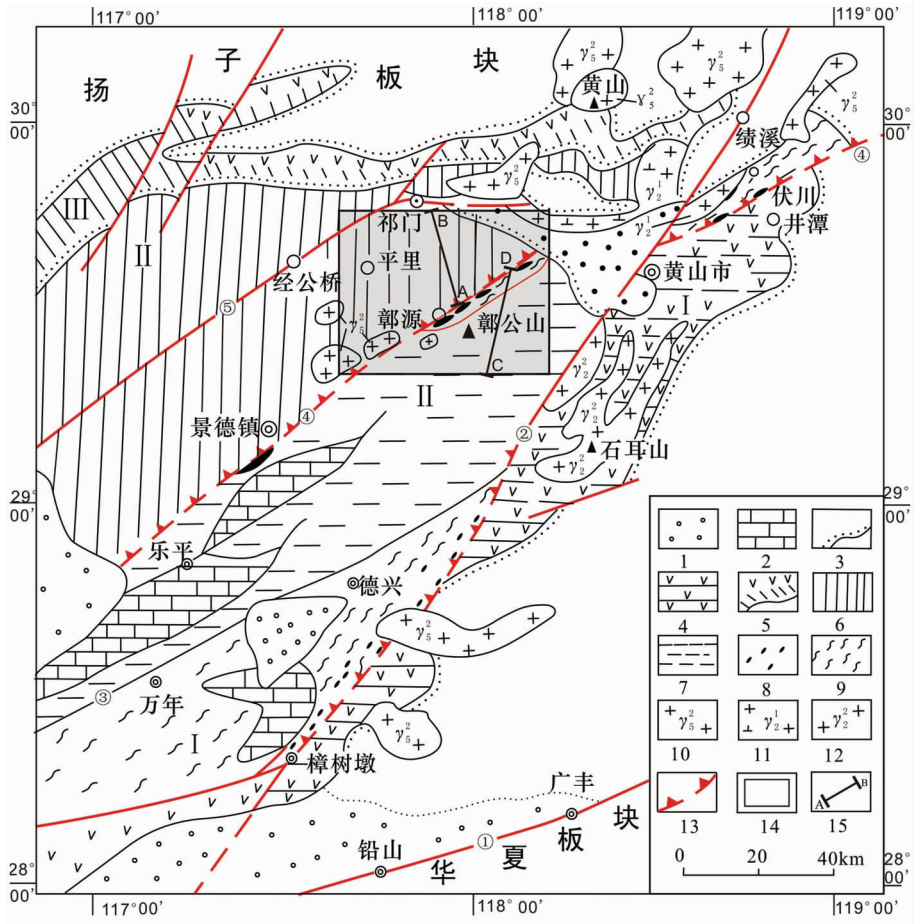


图1 皖赣相邻区地质构造略图(据程光华等,2000;余心起等,2007;略改)

1—中、新生界;2—石炭—三叠系;3—震旦系—早古生界;4—怀玉岛弧新元古代火山岩;5—九岭陆缘青白口纪晚期火山—沉积建造;6—新元古代双桥山群火山—沉积复理石;7—新元古代溪口岩群浅变质复理石;8—新元古代基性—超基性岩碎块;9—混杂岩带剪切基质;10—燕山期花岗岩;11—晋宁期花岗闪长岩;12—晋宁期花岗岩;13—推测俯冲断裂带;14—研究区位置;15—图2及图3剖面位置。江南造山带北缘: I—皖浙赣岛弧褶皱带; II—祁公山陆缘弧后盆地冲褶带; III—九岭陆缘褶皱带。①—江—绍复合断裂带;②—皖浙赣复合断裂带;③—乐安江断裂;④—景德镇—伏川复合断裂带;⑤—祁门复合断裂带

Fig.1 Sketch map showing geological structures in adjacent areas between Anhui Province and Jiangxi Province (modified after Chen Guanghua et al. 2000; Yu Xinqi et al. 2007)

1—Meso—Cenozoic; 2—Carboniferous—Triassic; 3—Sinian—early Palaeozoic; 4—Neoproterozoic volcanic rock of Huaiyu island arc; 5—Late Qingbaikou volcanic—sedimentary formation of Jiuling continental margin; 6—Neoproterozoic volcanic—sedimentary flysch of Shuangqiaoshan Group; 7—Neoproterozoic epimetamorphic flysch of Xikou Group Complex; 8—Neoproterozoic basic—ultrabasic rock fragments; 9—Shearing matrix of the melange zone; 10—Yanshanian granite; 11—Jinningian granodiorite; 12—Jinningian granite; 13—Inferred subduction fault belt; 14—Location of the study area; 15—Location of sections in Fig. 2 and Fig. 3; northern margin of Jiangnan orogen: I—Anhui—Zhejiang—Jiangxi island arc fold belt; II—Thrust—fold belt of the back arc basin along Zhanggongshan continental margin; III—Jiuling continental margin fold belt. ①—Jiangshan—Shaoxing fault belt; ②—Anhui—Zhejiang—Jiangxi fault belt; ③—Le’anjiang fault; ④—Jingdezhen—Fuchuan fault belt; ⑤—Qimen fault belt

看出其轮廓,背形核部为溪口岩群板桥岩组一岩段,南北两翼由板桥岩组二、三岩段及木坑岩组构成,背形南北两翼均倾向北或北北西,其中北翼倾角较南翼缓,两翼发育不同级别次级褶皱,总体显示复式背形几何形态,轴面产状为 $340^{\circ}\sim 350^{\circ}\angle 60^{\circ}\sim 70^{\circ}$,褶皱转折

端部位,常见与轴面产状一致的褶劈理(S_2)构造。与 F_2 相伴的新生轴面面理不发育或较难识别,大部分地段表现为早期面理的位态变化,局部转折端可见透入性褶劈理(S_2)构造(图版 I-4),显微镜下可见新生矿物绿泥石沿 S_2 分布。

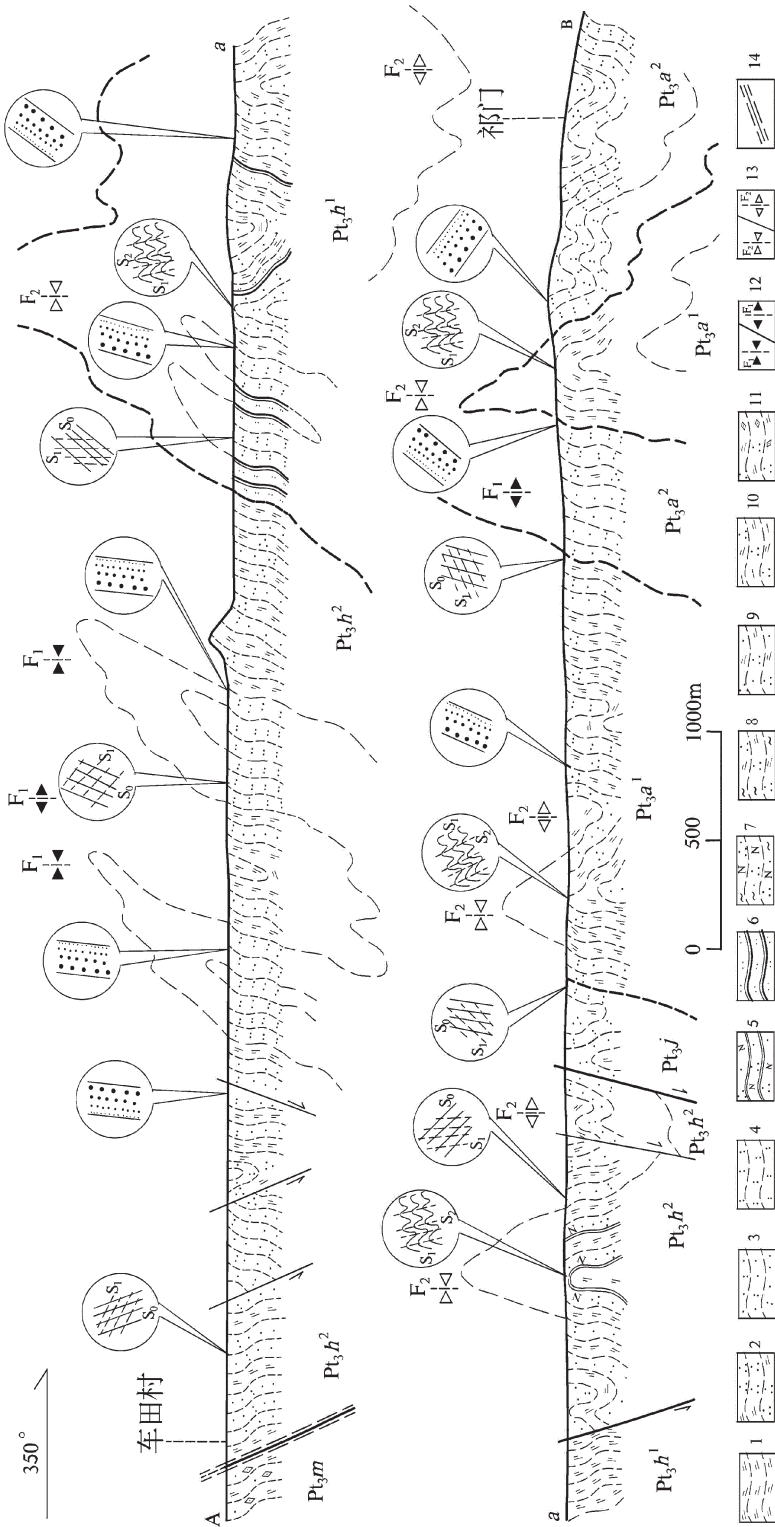


图 2 双桥山群构造-地层剖面图 (A-B)

1—绢云千枚岩; 2—绢云石英千枚岩; 3—千枚状凝灰质砂岩; 4—千枚状凝灰质砂岩; 5—变长石英砂岩; 6—粉砂质板岩; 7—含绿泥石长石英千枚岩; 8—绿泥绢云石英千枚岩; 9—砂质绢云石英千枚岩; 10—含菱铁矿绢云石英千枚岩; 11—含菱铁矿绢云石英千枚岩; 12—早期向斜/背斜; 13—晚期向斜/背斜; 14—韧性断层; 地质代号说明: Pt₃h¹—板桥岩组一岩段; Pt₃h²—板桥岩组二岩段; Pt₃h¹—板桥岩组三岩段; Pt₃m—木坑岩组; Pt₃j—横涌组下段; Pt₃a¹—安乐林组下段; Pt₃a²—安乐林组上段

Fig.2 Structural stratigraphic section of Shuangqiaoshan Group (A-B)

1— Sericite phyllite; 2— Sericite quartz phyllite; 3— Phyllitic tuffaceous sandstone; 4— Phyllitic tuff; 5— Metamorphic feldspathic quartz sandstone; 6— Chlorite sericite quartz phyllite; 7— Sandy sericite quartz phyllite; 8— Biotite sericite quartz phyllite; 9— Siderite sericite quartz phyllite; 10— Early syncline/anticline; 11— Late syncline/anticline; 12— Ductile fault; Pt₃h¹—1st Formation of Banqiao Rock Group; Pt₃h²—2nd Formation of Banqiao Rock Group; Pt₃h¹—3rd Formation of Banqiao Rock Group; Pt₃m—Mukeng Rock Group; Pt₃j—Lower Member of Heyong Formation; Pt₃a¹—Lower Member of Anlelin Formation; Pt₃a²—Upper Member of Anlelin Formation

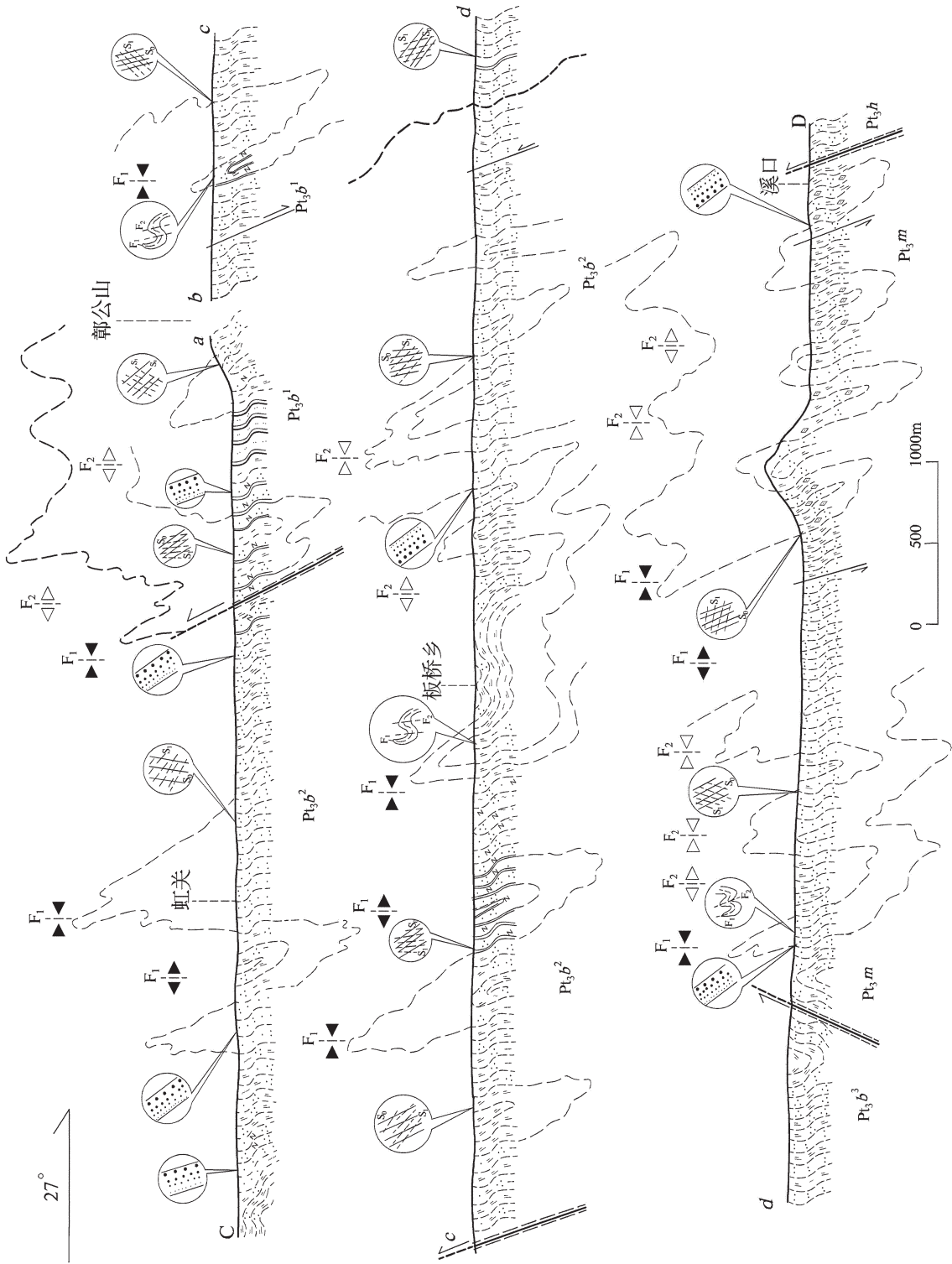


图3 溪口岩群构造—地层剖面图 (C-D)
 (图中 a-b 段剖面见图 6; 地质代号及图例说明见图 2)
 Fig.3 Structural-stratigraphic section of Xikou Rock Group (C-D)
 (Location of section A-B as for Fig. 6; code names and legends as for Fig.2)

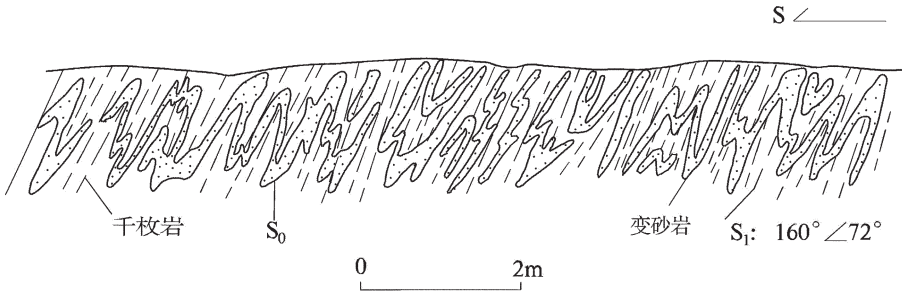


图 4 溪口岩群紧闭同斜褶皱构造(F₁)(段莘乡官坑村北)

Fig.4 Tight congruous folds (F₁) of Xikou Rock Group in northern Guankeng Village, Duanxin Town

平行 F₂ 褶皱的线理(L₂)有 S₁ 和 S₂ 交切形成的线理, S₁ 的皱纹、矿物线理, 以及沿 S₂ 轴面的脉石英缩紧-膨胀构造。

2.3 第三期构造变形(D3)

主要表现为浅层次脆性机制下的逆冲推覆褶皱、断构造, 使新元古代浅变质岩系强烈的构造叠置、上冲, 区内总体构成近东西-北东东向展布的以自北而南多层次中高角度叠瓦式逆冲推覆构造系, 主要由本区中部的以瑶里-鄞源-江潭为主逆冲推覆断层的北部平里-鳧峰逆冲推覆构造系和以北东向途经研究区西南的皖浙赣断裂为主逆冲推覆断层的南部鄞公山-漳前逆冲推覆构造系(图 1), 及其内部的次级叠瓦状逆冲断层组合而成。推覆构造卷入新元古代浅变质岩系及石炭-二叠纪、早侏罗世地层,

在剖面上表现为明显的地层缩短(图 5)。本期褶皱与逆冲断层紧密相伴, 基本被同时或近于同时发生的逆冲断裂及后期平移剪切断层切割, 其形态完整性遭到破坏。褶皱以 S₀//S₁ 或 S₁ 为形变面, 多为短轴褶皱, 轴向北东东向, 褶皱形态多为紧闭同斜或斜歪褶皱, 呈背、向斜相间的褶皱群出现, 可见轴面破裂理构造。由于后期强烈的走滑剪切断裂构造的影响, 该期褶皱原始位态多发生北东向偏转, 其构造痕迹愈加复杂。强烈的挤压逆冲使早期平里-江潭复背斜(F₂)在瑶里-鄞源主逆冲断裂带北侧叠加一系列轴面北倾的紧闭同斜褶皱构造, 其中在复背斜转折部位的江潭一带形成三组轴面近平行的背向斜构造(F₃), 平面上早期复背斜转折端被改造分叉成指状北东东向展布; 复背斜以西的平里一带叠加的另

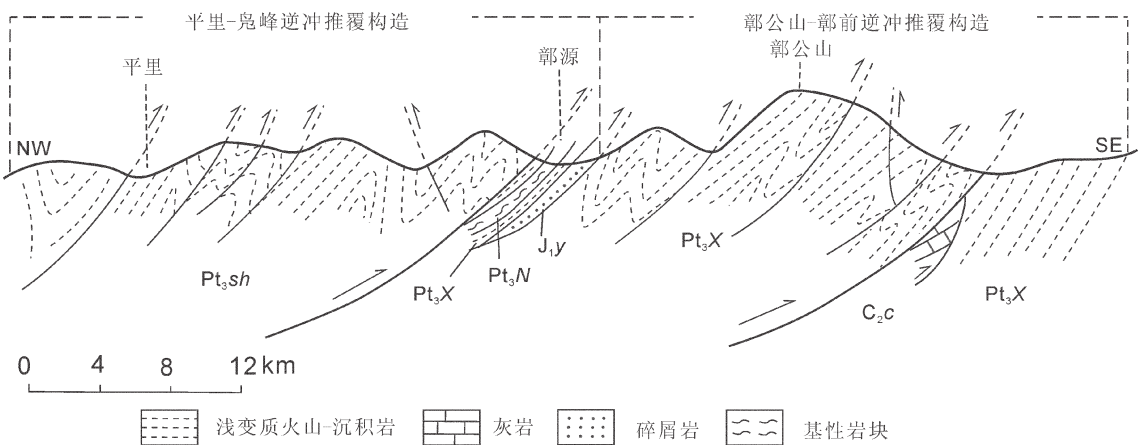


图 5 逆冲推覆构造示意图

Pt₃X-溪口岩群; Pt₃sh-双桥山群; Pt₃N-新元古代基性岩块; C₂c-船山组; J₁y-月潭组

Fig.5 Sketch map of thrust nappe structure

Pt₃X-Xikou Rock Group; Pt₃sh-Shuangqiaoshan Group; Pt₃N-Neoproterozoic basic-rock block; C₂c-Chuanshan Formation; J₁y-Yuetan Formation

一组褶皱(F₃)在平面上自西向东呈轴向东北-北东东展布的斜列式排列,上述叠加褶皱(F₃)均属短轴褶皱,长一般数千米。

2.4 第四期构造变形(D4)

本期构造变形由鄣公山一带燕山期花岗质岩浆热侵位致上地壳隆起引发的脆韧性变形为特征,构造变形围绕岩体近东西或北西西向带状展布,呈网结状配置格局,岩体附近变形较强,该韧性变形构造在鄣公山北坡一带形成一系列向北滑移的以溪口岩群早期构造面理为形变面的构造组合(图6),最为精彩的属轴面北倾的透入性不对称露头尺度级紧闭下滑褶皱群(图6中圆圈内的指向构造图,图版I-6),多分布在韧性变形弱带或原岩带,这些褶皱在溪口岩群板桥岩组(Pt₃b)中分布较普遍,有时在数毫米范围内可见多组背向形构造,轴面面理(滑劈理)发育,产状一般350°~10°∠30°~40°,与S₁面理常呈较小的交角。褶皱转折端一般紧闭尖棱,枢纽近水平,两翼强烈不对称,具明显的自南而北下滑特点。此外,S-C组构(图版I-5)、书斜式构造、条纹条带构造

及石英脉塑性流褶构造(图版I-7)、旋转碎斑系等指向构造在该脆韧性变形带中亦较发育(图6)。伴随韧性变形,发生低绿片岩相动力变质作用,景德镇瑶里一带早侏罗世泥质碎屑岩局部重结晶形成糜棱岩化岩石,泥质成分多变为绢云母雏晶,使岩石在宏观上显示千枚岩或板岩的特征,而泥质岩中的砂岩夹层多表现为碎粒化或劈理化现象,很少有新矿物生成。该脆韧性变形带形成后遭受燕山期平移走滑断裂错移切割。

2.5 第五期构造变形(D5)

表现为强烈走滑剪切机制下的构造变形,以压倒一切的优势对早期构造进行了改造和叠加,隐蔽了前期构造变形形迹,近东西向的构造格局基本被南西-北东向构造所取代,区内以北东向脆性平移走滑断裂系最醒目。断裂带两侧岩层面理(多为S₀//S₁)产状常陡倾,并发育剪切倾竖褶皱群(图7)(图版I-8),褶皱较开阔,枢纽和轴面基本陡倾,两翼不对称,其长翼比短翼薄得多。强烈的走滑推挤,改变了早期逆冲推覆构造的空间位态,早期逆冲叠瓦构造

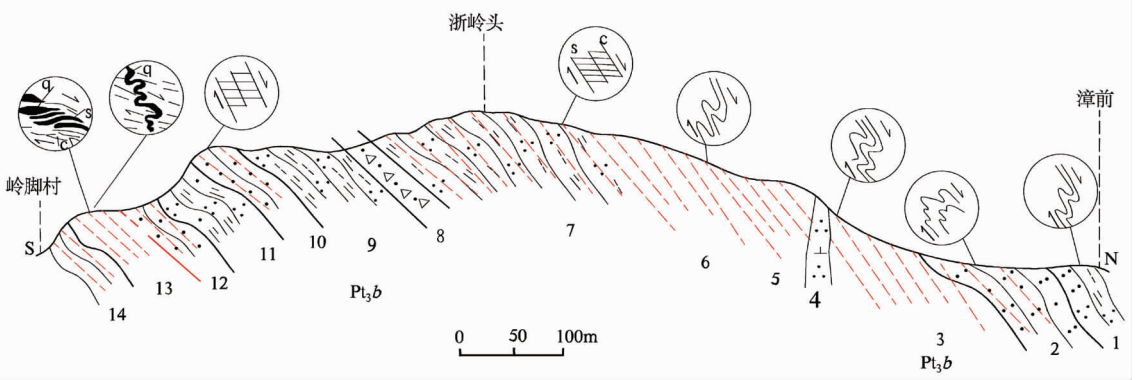


图6 鄣公山脆韧性变形带构造剖面

1—千枚状变凝灰二云石英千枚岩,发育不对称下滑褶皱;2—糜棱岩化变凝灰质砂岩,发育不对称下滑褶皱;3—糜棱岩,发育不对称下滑褶皱,受岩体热蚀变影响,具角岩化现象;4—石英闪长岩脉;5—糜棱岩,不对称褶皱构造发育,受岩体热蚀变影响,具红柱石角岩化热变质;6—糜棱岩,发育条纹条带构造及不对称下滑褶皱;7—糜棱岩化二云石英千枚岩,云母为绢云母及黑云母,其中黑云母属岩体热蚀变产生,显微镜下可见压力影、S-C组构及石英具压扁拉长现象;8—断裂破碎带;9—石英二云千枚岩;10—糜棱岩化细砂质千枚岩,见S-C组构;11—千枚状变砂岩与石英绢云千枚岩互层;12—糜棱岩化千枚状变质岩,发育条纹条带构造,显微镜下可见压力影构造;13—糜棱岩,发育条纹条带构造及旋转碎斑、S-C组构、书斜式构造及石英脉塑性流变构造;14—糜棱岩化千枚状变砂岩、发育条纹条带构造

Fig.6 Structural section of the Zhanggongshan brittle-ductile deformation zone

1—Phyllitic metamorphic sedimentary tuff two-mica quartz phyllite, in which asymmetrical shear folds are developed; 2—Mylonitize metamorphic tuffaceous sandstone, in which asymmetrical shear folds are developed; 3—Mylonite, in which asymmetrical shear folds and hornfels resulting from magmatic hydrothermal alteration are developed; 4—Quartz diorite vein; 5—Mylonite, in which asymmetrical folds and andalusite hornfels resulting from magmatic hydrothermal alteration are developed; 6—Mylonite, in which streaky structure and asymmetrical shear folds are developed; 7—Mylonitize two-mica quartz phyllite, pressure shadow, S-C fabrics and elongated and flattened quartz under microscope; 8—Fault fracture zone; 9—Quartz two-mica phyllite; 10—Mylonitize fine sandstone phyllite, in which S-C fabrics are developed; 11—Interbed phyllitic metamorphic sandstone and quartz sericite phyllite; 12—Mylonitize phyllitic metamorphic rock, in which streaky structure are developed and pressure shadow can be seen under microscope; 13—Mylonite with streaky structure and rotational mortar, S-C fabrics, bookshelf structure and plastic rheological structure of quartz; 14—Mylonitize phyllitic metamorphic sandstone, in which streaky structure are developed

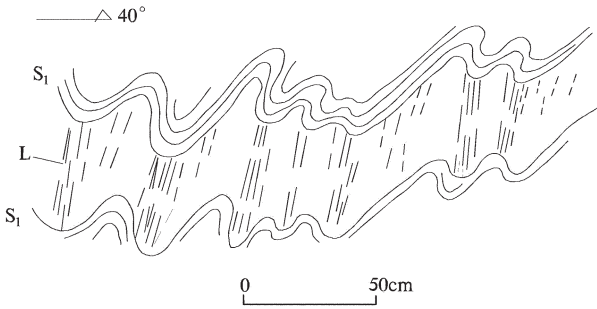


图 7 千枚理(S₁)为形变面倾竖褶皱构造(F₃)(祁门县汪村)
Fig.7 Plunging vertical folds (S₁) of phyllitic foliation in Wang Village, Qimen County

带向西南逃逸,使区内断裂构造线呈现出向西南散开、北东向收敛的格局。

3 褶皱叠加关系及变形时代分析

3.1 褶皱叠加关系

F₁ 与 F₂ 褶皱轴迹近于平行, F₁ 轴面向北缓倾, F₂ 轴面向北大角度倾斜或直立, 两者相互叠加, 使 F₁ 沿 F₂ 轴发生紧闭的重新褶皱, 在区内局部地段可见 F₁ 褶皱沿向北陡倾的 F₂ 轴面再度重褶为紧密褶皱现象(图 2~3, 图 8), 而 F₁ 褶皱枢纽和线理则未受影响。在 F₂ 褶皱强烈的地方, 可以见到 F₁ 转折带受到过剪切作用, 并呈横切面为椭圆形的滚筒出现, 因而它们是平行于 F₂ 被压扁的。

F₃ 褶轴原位态近平行或北东东向小角度叠加在 F₂ 近东西向褶皱之上, 最常见的是 F₂ 区域性褶皱倾

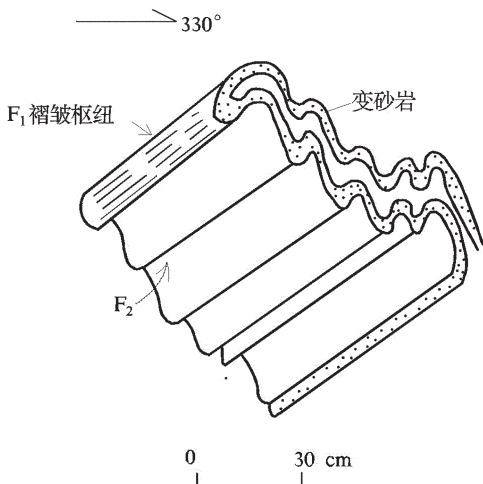


图 8 双桥山群同斜-平卧褶皱(F₁)叠加斜歪褶皱(F₂)样式
Fig.8 The pattern of congruous-recumbent folds (F₁) and superposed inclined folds (F₂) of Shuangqiaoshan Group

伏端被叠加改造使其平面形态分叉成指状。野外露头多见 F₂ 褶劈理明显被一组小角度相交的破劈理所切割, 在逆冲断裂带附近可见 F₂ 重褶现象(图 9)。

F₄ 褶皱是以 S₁ 面理为形变面的一组轴面北北东缓倾的两翼不对称紧闭下滑褶皱, 分布于郭公山下滑型脆韧性变形带弱变形域, 具鲜明的成群带状展布特征, 仅有限地局部影响或改造先期褶皱剖面形态, 对其平面位态的改变甚微。

F₅ 属倾竖褶皱, 与区域北东向脆性平移走滑断层的成生紧密相关, 研究区西北走滑断裂带两侧较多见, 多为成群分布的露头尺度级别。该期褶皱仅局部改变先期褶皱轴面方向和翼部形态, 图 10 为叠加在 F₃ 褶皱之上的“Z”型不对称褶皱。

3.2 变形时代分析

笔者在该套浅变质岩系中发现部分较强变形的中性、中基性岩脉及大量同构造分泌石英脉体, 其中前者发育与区域面理协调一致的透入性劈理 (S₁) 构造, 同构造分泌石英细脉体沿早期区域面理 (S₁) 分布, 部分地段成群产出, 多呈团块状或细脉状 (图版 I-2), 在递进变形过程中卷入构造变形。从其产出特征分析认为, 这些脉体记录了早期主造山阶段的构造热事件。此次, 在郭公山南坡沱川乡北的一片理化 (S₁) 闪长岩脉及同构造分泌石英脉组合样品中分别获得 (788±6.8)Ma (位置: E117°50'28", N29°31'58") 及 (804.1±6.6)Ma 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和年龄 (表 1, 图 11)。综合分析认为, 该年龄值反映了 D1 期构造变形时代, 与区域上主造山期对应的晋宁

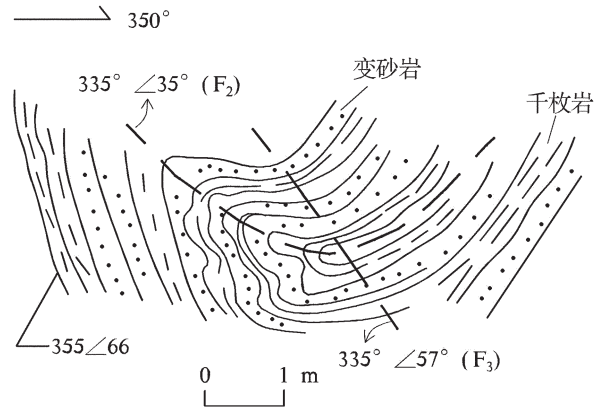


图 9 溪口岩群同斜-斜歪褶皱(F₂)叠加开阔斜歪褶皱(F₃)素描图
Fig.9 Sketch showing open inclined folds (F₃) superposed on congruous folds (F₂) of Xikou Rock Group

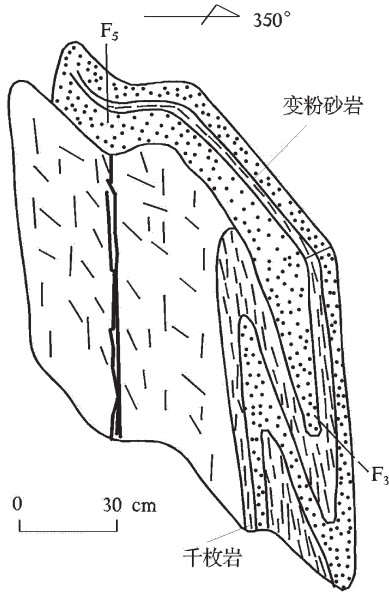


图 10 叠加在 F_3 褶皱之上的“Z”型不对称褶皱
Fig.10 Z-shape asymmetrical folds superposed upon F_3 folds

运动时限相当。D2期褶皱构造变形以 $S_1//S_0$ 或 S_1 为形变面,区域上,震旦纪—早古生代地层早期构造变形样式^[20-21]与本区新元古代浅变质地层中保留的D2期构造变形是协调一致的,分析认为,D2变形期可能与加里东构造运动相当。D3期构造变形表现为大规模的逆冲推覆褶、断构造,前人大量资料研究认为^[14,20-26],江南造山带北缘强烈的逆冲叠覆造山作用发生于印支晚期—早燕山期。笔者在皖赣交界的瑶里—江潭区域性主逆冲推覆断裂带之鄣源新元古代基性岩岩块 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试中,发现有 6 粒锆石测试点年龄值为 167~184 Ma,反映了早燕山期的构造热事件,是否可以说明该主逆冲推覆断裂在早燕山期有强烈活动,据上可认为 D3 期构造变形与早燕山构造事件有关。D4 期构造变形以伸展型脆韧性构造变形为特征,其形成与鄣公山一带早白垩世花岗岩质浆侵位致上地壳隆升有关,卷入鄣公山韧性变形带最年轻地层为早侏罗世月潭

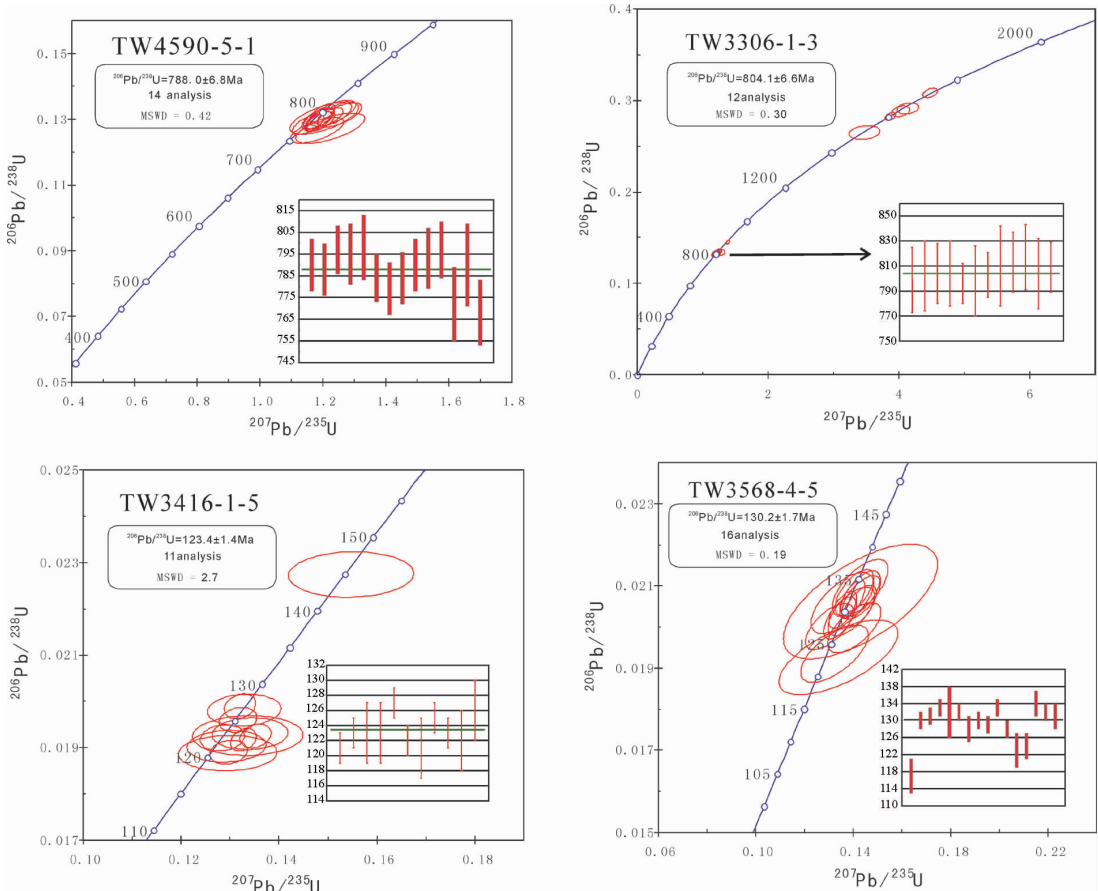


图 11 锆石 U-Pb 协和图
Fig.11 U-Pb concordia diagram of zircons

表 1 岩石 La-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果
Table 1 La-ICP-MS zircon U-Pb data for the rocks

测点	$^{232}\text{Th}/10^{-6}$	$^{238}\text{U}/10^{-6}$	Th/U	同位素比值				年龄/Ma									
				$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 σ	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 σ				
TW3306-1-3(同构造分泌石英脉体)																	
4590-01	1956	1554	1.26	0.06608	0.00172	1.18623	0.0313	0.1303	0.00209	0.04269	0.00673	809	30	794	15	790	12
4590-02	3359	1077	3.12	0.06610	0.0019	1.18458	0.03388	0.13009	0.00214	0.05482	0.01207	810	33	793	16	788	12
4590-03	3819	2397	1.59	0.06598	0.00140	1.19741	0.02658	0.13169	0.00196	0.04732	0.00723	806	23	799	12	797	11
4590-04	5274	1958	2.69	0.06922	0.00262	1.2532	0.0467	0.1313	0.00244	0.04224	0.01022	905	47	825	21	795	14
4590-05	3713	1227	3.03	0.06777	0.00267	1.23135	0.04824	0.13185	0.0026	0.03268	0.00647	862	49	815	22	798	15
4590-06	3466	1706	2.26	0.06653	0.00147	1.18617	0.02747	0.1294	0.00196	0.04562	0.00754	823	25	794	13	784	11
4590-07	3860	1520	2.28	0.06515	0.00183	1.15303	0.03296	0.12847	0.00209	0.05033	0.01158	779	34	779	16	779	12
4590-08	2443	1665	1.47	0.06682	0.00171	1.18994	0.03134	0.12924	0.00202	0.04726	0.01007	832	30	796	15	784	12
4590-9	1720	1155	1.49	0.06705	0.00214	1.20448	0.03896	0.1303	0.00217	0.03877	0.00873	839	40	803	18	790	12
4590-10	2026	827	2.45	0.07997	0.00317	1.44225	0.05742	0.13082	0.00247	0.03526	0.01005	1196	49	907	24	793	14
4590-11	6283	2514	2.50	0.06825	0.00194	1.23740	0.03605	0.13152	0.00226	0.04553	0.00804	876	33	818	16	797	13
4590-12	1309	853	1.54	0.06987	0.00429	1.22330	0.07265	0.12727	0.00305	0.03141	0.01331	925	83	811	33	772	17
4590-13	4180	1865	2.24	0.06711	0.00420	1.20435	0.07228	0.13038	0.00327	0.06193	0.02731	841	83	803	33	790	19
4590-14	3255	1472	2.03	0.06777	0.00329	1.18131	0.05609	0.1266	0.00257	0.05085	0.02571	862	65	792	26	768	15
TW4590-5-1(片理化冈长岩脉,江西婺源县沱川乡北)																	
3306-1	155	81	1.92	0.06611	0.00284	1.20134	0.04917	0.13195	0.00235	0.03215	0.00431	810	92	801	23	799	13
3306-2	384	192	2.00	0.06582	0.00272	1.20248	0.04816	0.13252	0.00246	0.01846	0.00261	801	89	802	22	802	14
3306-3	201	131	1.53	0.06609	0.0022	1.20967	0.0389	0.13278	0.00204	0.03373	0.00394	809	71	805	18	804	12
3306-4	108	103	1.05	0.06605	0.00228	1.20986	0.04074	0.13282	0.00223	0.01907	0.00176	808	74	805	19	804	13
3306-5	383	298	1.28	0.06761	0.00102	1.22601	0.01865	0.13148	0.00149	0.0305	0.00177	857	32	813	9	796	8
3306-6	88	188	0.47	0.06593	0.00271	1.19829	0.04873	0.1317	0.00248	0.01804	0.00254	804	88	800	23	798	14
3306-7	1163	582	2.00	0.06832	0.00083	1.24964	0.01635	0.13267	0.00155	0.01954	0.00067	878	26	823	7	803	9
3306-8	62	64	0.97	0.10134	0.00283	4.02611	0.11255	0.28801	0.00484	0.01937	0.00125	1649	53	1639	23	1632	24
3306-9	5274	1958	2.69	0.06861	0.0032	1.26673	0.0569	0.13394	0.00278	0.03504	0.00669	887	99	831	25	810	16
3306-10	3713	1227	3.03	0.06719	0.00162	1.24459	0.03033	0.1344	0.00221	0.00659	0.00039	844	51	821	14	813	12
3306-11	3860	1706	2.26	0.06687	0.00187	1.25450	0.03474	0.1351	0.00222	0.00709	0.00042	834	60	821	16	817	13
3306-12	3466	1520	2.28	0.10298	0.00341	4.13315	0.13556	0.29117	0.00509	0.06142	0.01202	1679	63	1661	27	1647	25
3306-13	2443	1665	1.47	0.10545	0.00203	4.47813	0.09039	0.30811	0.00437	0.04585	0.00398	1722	36	1727	17	1731	22
3306-14	1720	1155	1.49	0.06689	0.00212	1.2247	0.03819	0.13276	0.00241	0.00457	0.00037	834	68	812	17	804	14
3306-15	2026	827	2.45	0.06543	0.00189	1.20554	0.03314	0.1337	0.00184	0.04223	0.00648	788	62	803	15	809	10
3306-16	6283	2514	2.50	0.12104	0.0022	5.1206	0.08906	0.30689	0.0035	0.0957	0.01057	1972	33	1840	15	1725	17
3306-17	1309	853	1.54	0.06924	0.00098	1.38328	0.02055	0.14493	0.00176	0.04012	0.00296	906	30	882	9	872	10

测点	$^{232}\text{Th}/10^6$	$^{238}\text{U}/10^6$	Th/U	同位素比值				年龄/Ma									
				$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$						
TW3568-4-5(花岗岩,江西景德镇瑶理)																	
3568-1	212	302	0.70	0.06948	0.00769	0.1755	0.01847	0.01831	0.00068	0.01123	0.00511	913	156	164	16	117	4
3568-2	230	790	0.29	0.04827	0.00131	0.13585	0.00371	0.02042	0.0003	0.00651	0.00072	113	37	129	3	130	2
3568-3	117	823	0.14	0.05039	0.00166	0.1424	0.00468	0.0205	0.00034	0.00611	0.00082	213	46	135	4	131	2
3568-4	283	1198	0.24	0.04891	0.00182	0.14051	0.0052	0.02084	0.00037	0.0066	0.00094	144	54	133	5	133	2
3568-5	117	276	0.43	0.05032	0.00762	0.14304	0.02086	0.02062	0.00092	0.00759	0.00251	210	241	136	19	132	6
3568-6	245	599	0.41	0.05017	0.00184	0.1433	0.0052	0.02072	0.00035	0.00646	0.00083	203	53	136	5	132	2
3568-7	163	467	0.35	0.05101	0.00268	0.1405	0.00719	0.01998	0.0004	0.00555	0.00094	241	81	133	6	128	3
3568-8	169	694	0.24	0.04958	0.00229	0.13928	0.00629	0.02038	0.00039	0.00601	0.00101	175	70	132	6	130	2
3568-9	333	1432	0.23	0.04829	0.00158	0.13462	0.0044	0.02022	0.00034	0.00579	0.00089	114	46	128	4	129	2
3568-10	145	1352	0.11	0.04987	0.00186	0.14306	0.0053	0.02081	0.00037	0.00582	0.00108	189	53	136	5	133	2
3568-11	156	423	0.37	0.04723	0.00242	0.13026	0.00648	0.02001	0.00037	0.00684	0.00117	61	75	124	6	128	2
3568-12	98	99	0.99	0.05046	0.00623	0.13401	0.01613	0.01926	0.0006	0.00575	0.00106	216	213	128	14	123	4
3568-13	187	355	0.53	0.04962	0.00354	0.13236	0.00912	0.01935	0.00046	0.00695	0.00166	177	113	126	8	124	3
3568-14	262	1367	0.19	0.04948	0.00268	0.14293	0.00754	0.02095	0.00046	0.00624	0.00155	171	82	136	7	134	3
3568-15	161	1678	0.10	0.049	0.00117	0.13972	0.00342	0.02068	0.00031	0.00718	0.00111	148	31	133	3	132	2
3568-16	167	674	0.25	0.04778	0.00308	0.13558	0.00847	0.02058	0.00049	0.00704	0.00174	88	95	129	8	131	3
TW3416-1-5(流变石英脉,江西婺源县虹关北)																	
3416-1	87	678	0.13	0.04934	0.0034	0.15469	0.01043	0.02274	0.0004	0.00815	0.00062	164	157	146	9	145	3
3416-2	239	2306	0.10	0.04977	0.00124	0.12969	0.00316	0.0189	0.00021	0.00664	0.00019	184	59	124	3	121	1
3416-3	132	2580	0.05	0.05095	0.001	0.13521	0.0026	0.01925	0.00021	0.01033	0.00024	239	46	129	2	123	1
3416-4	1187	1313	0.90	0.0687	0.00218	1.23445	0.03644	0.13033	0.00152	0.03963	0.00043	890	67	816	17	790	9
3416-5	581	750	0.77	0.05039	0.00244	0.13408	0.00634	0.0193	0.00028	0.00642	0.00015	213	113	128	6	123	2
3416-6	124	1250	0.10	0.05031	0.00355	0.13362	0.00921	0.01926	0.00035	0.0064	0.00059	209	161	127	8	123	2
3416-7	176	3757	0.05	0.04814	0.00097	0.13205	0.00262	0.01989	0.00022	0.00696	0.0002	106	49	126	2	127	1
3416-8	229	21142	0.01	0.05022	0.00082	0.13273	0.00213	0.01917	0.0002	0.0188	0.0004	205	39	127	2	122	1
3416-9	142	415	0.34	0.05195	0.00187	0.33137	0.01127	0.04626	0.00055	0.01453	0.00019	283	84	291	9	292	3
3416-10	210	1076	0.20	0.13067	0.00241	5.61889	0.08521	0.31187	0.00329	0.08863	0.001	2107	33	1919	13	1750	16
3416-11	230	251	0.92	0.04976	0.00322	0.12951	0.00821	0.01888	0.00031	0.00701	0.00019	184	148	124	7	121	2
3416-12	1890	2574	0.73	0.04872	0.00118	0.13163	0.00314	0.0196	0.00022	0.00757	0.00022	134	58	126	3	125	1
3416-13	198	4344	0.05	0.04849	0.00143	0.12843	0.0037	0.01921	0.00023	0.00676	0.00033	123	70	123	3	123	1
3416-14	155	513	0.30	0.04926	0.00256	0.12929	0.00658	0.01903	0.00028	0.00697	0.00025	160	119	123	6	122	2
3416-15	246	627	0.39	0.06846	0.00184	1.32732	0.03476	0.14062	0.00171	0.06071	0.0012	883	57	858	15	848	10
3416-16	177	392	0.45	0.11879	0.00261	5.62493	0.1205	0.34343	0.00417	0.12506	0.00243	1938	40	1920	18	1903	20
3416-17	220	473	0.47	0.04865	0.00228	0.13289	0.00612	0.01981	0.00028	0.00737	0.0002	131	107	127	5	126	2

组,本次,笔者在区内瑶理花岗岩中获得 (130.2 ± 1.7)Ma 的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄 (表 1, 图 11)(位置: $E117^{\circ}31'41''$, $N29^{\circ}30'25''$), 另外, 在该变形带塑性流褶石英脉 (图版 I-7, 位置: $E117^{\circ}54'56''$, $N29^{\circ}33'00''$) 组合样品中获得 (123.4 ± 1.4)Ma 的锆石 LA-ICP-MS 年龄 (表 1, 图 11), 据上认为 D4 构造变形与燕山晚期构造运动有关。区内北东向的脆性剪切走滑褶、断构造组合 (D5) 是强烈叠加、改造早期构造变形形迹而铸就, 与整个华南北东向构造格局协调一致, 受控于燕山晚期滨太平洋构造域^[22,25-27]。

4 构造运动学特征

区内广泛发育近东西向展布的透入性 S_1 面理, 从残留 S_0 无根褶皱分析, S_1 应属早期近南北向挤压机制下形成的透入性轴面面理。 F_2 及 F_3 褶皱轴迹总体近东西或北东东向展布、轴面倾向北或北东, 转折端部位多发育走向近东西向劈理构造, 说明侧向挤压为近南北向, 次级小褶皱的不对称性反映出该期变形为自北而南的逆冲挤压^[20-21,24]。郭公山韧性变形带 (D4) 发育的条纹条带、书斜式构造及 S-C 组构、不对称褶皱、构造碎斑、压力影、云母鱼等韧性变形指向构造, 显示向北伸展滑覆运动学特征。区内北北东-北东向断裂 (D5) 具明显左行走滑特征, 伴随断裂构造, 形成一系列剪切机制下倾竖褶皱构造和擦痕。

5 构造变形机制

为了进一步了解区域新元古代浅变质岩构造变形动力学机制, 笔者在研究区新元古代变质变形地质体的不同构造部位、不同层位碎屑岩中系统采集 41 件定向构造标本, 分别制成 164 个磁组构试样及 36 个 X 射线衍射极图分析样 2。

磁组构特征显示: 95% 样品的形体参数 $T > 0$ 、椭球体扁率 $E > 1$, 表明研究区构造以磁性叶理发育为特征, 磁性椭球体基本为以面型占优势的压扁椭球。磁组构的磁面理方向与岩石的片理面方向平行, 垂直于最大应变缩短方向。而磁线理则平行于可见到的矿物拉伸方向, 与最大应变拉伸方向平行。尽管各样品的磁化率大小不等, 但它们的轴比率却基本相似, 说明岩石变形程度相近, 这也从基本接近的磁各

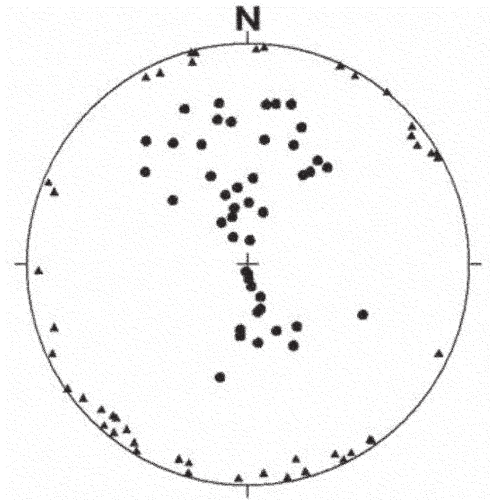


图 12 赤平投影图

▲ 磁化率长轴方向; ● 磁面理方向

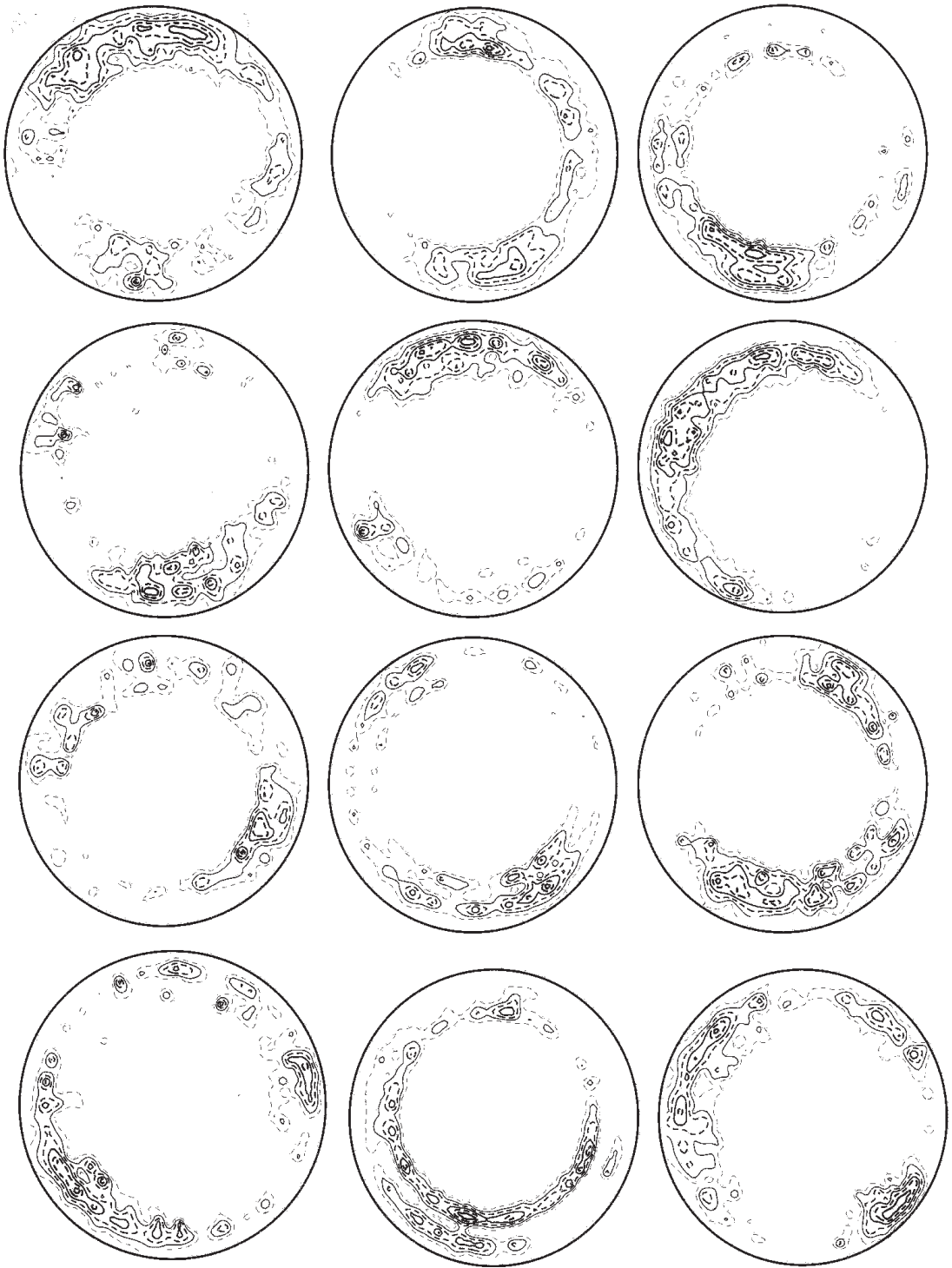
Fig.12 Stereographic projection diagram

▲ Long direction of the magnetic susceptibility; ● Direction of the magnetism foliation

向异性度值得到印证, 与宏观地质观察一致。根据研究区磁面理方向及磁化率长轴方向的赤平投影图 (图 12) 分析: 区内构造运动方向主要以近南北向和北西-南东向挤压为主, 其次为北西西-南东东向拉伸应力, 这与测区宏观地质构造特征相吻合, 测区主期 (D1) 构造变形最典型的构造形迹为近南北向挤压机制下形成的区域构造面理 (S_1); D2 及 D3 期表现为中-上构造层次下的近南北向或北北西-南南东收缩机制下的逆冲褶皱断构造变形; D4 显示花岗质岩浆热隆升机制下的向北伸展滑覆型变形机制; D5 构造变形受控于燕山晚期滨太平洋构造域, 区内主要表现为剪切应力状态下的北东-南西向构造组合。

36 个样品的石英 X 射线衍射分析显示: 其衍射计数率较低, 反映了研究区区域变质作用的温度相对较低, 样品中石英的 (110) 面网的极图强度偏低, 说明岩石中石英择优取向程度较低, 反映出区内构造作用由于温度较低等原因, 引起的岩石石英矿物的塑性变形和重结晶程度不高, 但并不说明构造作用的强度低^①。章泽军^[19]等根据高岭石 X 射线衍射分析测算的变形温度为 $150 \sim 400^{\circ}\text{C}$ 。根据 36 个样品的石英极图 (图 13, 为 36 个样品每 3 个样品测试数

① 中国地质调查局南京地质调查中心, 安徽 1:5 万平里、江潭、瑶里、虹关幅区调报告, 2009。



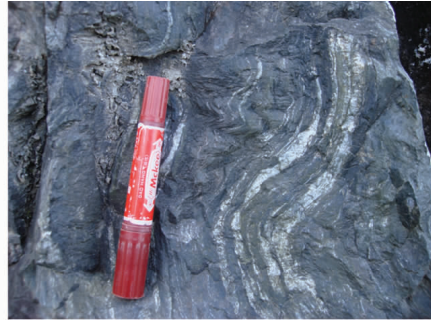
极图强度等级: 9.5 ——— 8.5 - - - - 7.5 ——— 6.5 - - - - 5.5 ——— 4.5 ·····

图 13 新元古代浅变质碎屑岩石英(110)面网极图(正上方指示北)
 Fig.13 Polar diagram showing quartz's (110) crystal face of Neoproterozoic
 epimetamorphic clastic rock (upward direction indicates north)

图版 I Plate I



1. 溪口乡漳前村绢云石英千枚岩中 S0 片内无根平卧褶皱
 1. Rootless intrafolial folds in S0 of sericite quartz phyllite in Zhangqian village, Xikou Town



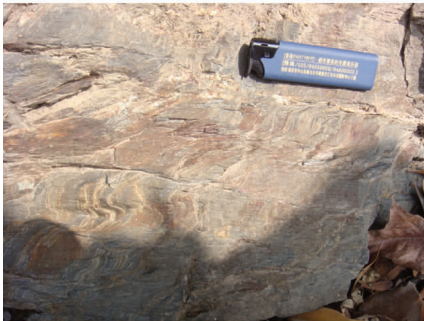
2. 瑶里粉砂质板岩中同构造分泌石英脉体
 2. Syntectonic quartz vein in Yaoli silty slate



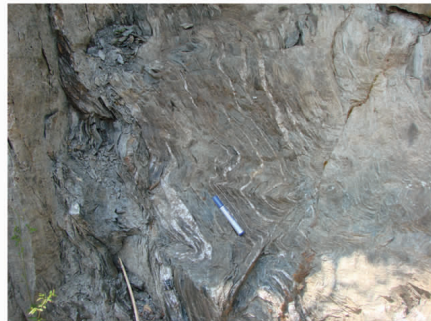
3. 塔坊乡侯潭村变凝灰质砂岩中 S0 与 S1 交切关系
 3. The intersection between S0 and S1 of metamorphic tuffaceous sandstone in Houtan Village, Tafang Town



4. 塔坊乡绢云千枚岩中透入性褶皱理构造 (S2)
 4. Penetrative crenulation cleavage (S2) of sericite phyllite in Tafang Town



5. 溪口乡簧腾村郟公山脆韧性变形带 S-C 组构
 5. S-C fabrics of brittle-ductile deformation zone in Zhanggongshan, Huangteng Village, Xikou Town



6. 溪口乡板桥村绢云石英千枚岩中下滑褶皱
 6. Shear folds in sericite quartz phyllite from Banqiao Village, Xikou Town



7. 郟公山脆韧性变形带条纹条带构造及石英脉塑性流褶
 7. Streaky structure and plastic folds of quartz vein in Zhanggongshan brittle-ductile deformation zone



8. 祁门县芦溪乡千枚状变粉砂岩中倾竖褶皱
 8. Plunging vertical folds of phyllitic metasiltstone in Luxi Town, Qimen County

据合并重新生成的极图)统计分析^①,区内最强的构造作用方向为近南北向(北北东向),大约 68%的样品保留了该方向构造运动特征;次为北西-南东向和北东-南西向应力作用。这与磁组构分析得出的结论相似。

6 大陆动力学分析

近年的研究表明,江南造山带北缘存在新元古代早期的弧后陆缘裂解小洋盆^[27,8,28,29],约 800 Ma,小洋盆俯冲关闭,弧-陆(扬子陆块)碰撞,包括研究区在内的江南造山带北缘一带强烈挤压隆升,形成一系列近南北向挤压机制下的构造组合(D1),使新元古代地层发生近东西向展布的向南倒向的紧闭褶皱及逆冲型脆韧性剪切构造变形,形成首次透入性区域叶理事件,同时造成广泛的区域低温动力变质作用。此后至早古生代中后期,本区总体处于伸展沉积阶段。加里东运动,本区再次发生褶断抬升^[20,21],区内新元古代浅变质地层叠加近东西-北东向展布的以早期构造面理为形变面的褶皱构造(D2),区域上,伴随此次造山作用产生弱低绿片岩相变质作用。

印支期,包括江南造山带在内的整个华南受到印支-南海板块向北聚合的强烈后推力作用,使南部陆壳(钱塘台褶带)发生向北的有限的陆内俯冲^[22,26]。邓晋福等^[20]通过对分布于江南陆内造山带上的印支期白云母、二云母花岗岩成因的研究,指出江南陆内造山带存在印支期陆内俯冲作用。向北的陆内俯冲致包括本区的整个江南造山带北缘向南部腹陆钱塘褶皱带逆冲^[22]而形成逆冲推覆构造系(D3)。

燕山早期,包括研究区在内的整个中国东南部经历了由挤压向拉张的转化,地壳和岩石圈被明显减薄,并伴随有软流圈物质的上涌,发生玄武岩浆底侵作用^[27],郭公山地区由于变质基底厚度较大,此时的拉张作用可能并未将基底拉穿,但由于其北侧的瑶里-郭源-江潭及南侧的赣东北基底断裂的存在,部分幔源流体和热量可沿着这两大断裂以及沿着郭公山变质基底中的断裂朝上涌动,它们在地壳减压处对地壳物质的热软化和流体交代作用最终导致了部分熔融的发生,形成大量花岗质岩浆。陆壳中形成的花岗质岩浆沿壳内拆离断裂向上运移,在地壳减压处迅速扩张,产生热氢气球效应,使周围基底

岩系被软化,由于岩浆向北的底辟式上侵,最终使皖赣相邻区郭公山一带新元古代浅变质基底岩系及石炭-二叠纪、早侏罗世地层发生向北的热隆升伸展滑覆型脆韧性构造变形(D4)。燕山晚期构造变形受控于滨太平洋构造域,近东西向的构造格局被北东向构造所取代,区内形成一系列剪切走滑机制下脆性构造变形(D5)。

致谢:本文是在大量野外调查的基础上完成的,野外工作期间得到郭坤一、邢光福研究员及江来利、马荣生、汤加富教授级高工的指导;成文过程中与江西地勘局原总工程师杨明桂、安徽 332 地质队总工程师汪应庚进行过多次交流,深受启发;南京大学地球科学系王晓磊教授对所有 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试数据进行了整理;程光华、曾勇教授级高工对文稿进行了审阅。在此一并致以衷心的感谢!

参考文献(References):

- [1] 于津海,魏振海,王丽娟,等. 华夏地块:一个有古老物质组成的年轻陆块[J]. 高校地质学报, 2006, 12(4):440-447.
Yu Jinhai, Wei Zhenyang, Wang Lijuan, et al. Cathaysia Block: A young continent composed of ancient materials [J]. Geological Journal of China Universities, 2006, 12 (4):440-447 (in Chinese with English abstract).
- [2] 周新民,邹海波,扬杰东,等. 安徽歙县伏川蛇绿岩套的 Sm-Nd 等时线年龄及其地质意义[J]. 科学通报, 1989, (16):1243-1245.
Zhiou Xinming, Zou Haibo, Yang Jiedong, et al. Sm-Nd isotopic age and geological significance of Fuchuan ophiolites in Shexian county, Anhui Province [J]. Chinese Science Bulletin, 1989, (16): 1243-1245(in Chinese).
- [3] 舒良树,郭令智,施央申. 江南中段板块-地体构造与碰撞造山带运动学[M]. 南京:南京大学出版社, 1995.
Shu Liangshu, Guo Linzhi, Shi Yangshen. The Late Proterozoic Plate Tectonic Evolution and Kinematics of Collisional Orogeny in the Middle Jiangxi, Eastern China [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1995(in Chinese).
- [4] 徐备. 论赣东北-皖南晚元古代沟弧盆体系 [J]. 地质学报, 1990, 1:33-41.
Xu Bei. The late Proterozoic trench-basin-arc system in northeastern Jiangxi-southeastern Anhui Provinces [J]. Acta Geological Sinica, 1990, 1:33-41(in Chinese with English abstract).
- [5] 徐备,郭令智,施央申. 皖浙赣地区元古代地体和多期碰撞造山带[M]. 北京:地质出版社, 1992.
Xu Bei, Guo Linzhi, Shi Yangshen. Proterozoic Terranes and Multiphase Collision Orogens in Anhui-Zhejiang-Jiangxi Area[M].

①上海交通大学材料科学与工程学院安徽 1:5 万平里、江潭、瑶里、虹关幅区调项目岩石样品 X 射线衍射极图分析报告, 2009.

- Beijing: Geological Publishing House, 1992(in Chinese).
- [6] 马荣生, 王爱国. 皖南晚元古代碰撞造山带构造轮廓 [J]. 安徽地质, 1994, 4(2): 14-22.
Ma Rongsheng, Wang Aiguo. Tectonic outline of the late Proterozoic collisional orogenic belt in south Anhui [J]. *Geology of Anhui*, 1994, 4(2): 14-22(in Chinese with English abstract).
- [7] 赵建新, 李献华, McCulloch M T, 等. 皖南和赣东北蛇绿岩成因及其构造意义: 元素和 Sm-Nd 同位素制约 [J]. 地球化学, 1995, 24(4): 311-324.
Zhao Jianxin, Li Xianhua, McCulloch M T, et al. Petrogenesis of ophiolites from south Anhui and northeast Jiangxi, and their tectonic implications: chemical and Sm-Nd isotopic constraints [J]. *Geochimica*, 1995, 24 (4): 311-324 (in Chinese with English abstract).
- [8] 李献华, McCulloch M T. 扬子南缘沉积岩的 Nd 同位素演化及其大地构造意义 [J]. 岩石学报, 1996, 12(3): 361-368.
Li Xianhua, McCulloch M T. Nd isotopic evolution of sediments from the Southern Margin of the Yangtze Block and its tectonic significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1996, 12 (3): 361-368 (in Chinese with English abstract).
- [9] 程光华, 汪应庚. 江南东段构造格架 [J]. 安徽地质, 2000, 10(1): 1-8.
Cheng Guanghua, Wang Yinggen. The structural framework of the eastern section of the Jiangnan orogen [J]. *Geology of Anhui*, 2000, 10(1): 1-8(in Chinese with English abstract).
- [10] 高林志, 杨明桂, 丁孝忠, 等. 华南双桥山群和河上镇群凝灰岩中的锆石 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄——江南新元古代造山带演化的制约 [J]. 地质通报, 2008, 27(10): 1744-1751.
Gao Linzhi, Yang Minggui, Ding Xiaozhong, et al. 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 [J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(10): 1744-1751(in Chinese with English abstract).
- [11] Wang Xiaolei, Zhao Guochun, Qi J S, et al. LA-ICPMS U-Pb zircon geochronology of the Neoproterozoic igneous rocks from Northern Guangxi, South China: implications for petrogenesis and tectonic evolution [J]. *Precambrian Research*, 2006, 145: 111-130.
- [12] Wang Xiaolei, Zhao Guochun, Zhou Jincheng, et al. Geochronology and Hf isotopes of zircon from volcanic rocks of the Shuangqiaoshan Group, South China: Implications for the Neoproterozoic tectonic evolution of the eastern Jiangnan orogen [J]. *Gondwana Research*, 2008, 14: 355-367.
- [13] 蔡雄飞, 章泽军, 王德辉, 等. 赣北双桥山群浅变质岩沉积学研究的新进展 [J]. 地质调查与研究, 2003, 26(3): 151-159.
Cai Xiongfei, Zhang Zejun, Wang Dehui, et al. Progress in Sedimentology of the light metamorphic rock in Shuangqiaoshan Group, North Jiangxi Province [J]. *Geological Survey and Research*, 2003, 26(3): 151-159(in Chinese with English abstract).
- [14] 邓国辉, 刘春根, 冯晔. 赣东北-皖南元古代造山带构造格架及演化 [J]. 地球学报, 2005, 26(1): 9-16.
Deng Guohui, Liu Chungen, Feng Ye. Tectonic features and evolution of the Proterozoic orogenic belt between northeastern Jiangxi and Southern Anhui [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2005, 26 (1): 9-16(in Chinese with English abstract).
- [15] 吴新华, 楼法生, 刘春根. 皖赣相邻区中元古代溪口岩群的划分与对比 [J]. 资源调查与环境, 2005, (2): 86-96.
Wu Xinhua, Lou Fasheng, Liu Chungen. The division and the contrast of middle Proterozoic Xikou rocks group in the boundary of Anhui, Zhejiang, Jiangxi Provinces [J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 2005, (2): 86-96(in Chinese with English abstract).
- [16] 徐有华, 吴新华, 楼法生. 江南古陆中元古代地层的划分与对比 [J]. 资源调查与环境, 2008, 29(1): 1-11.
Xu Youhua, Wu Xinhua, Lou Fasheng, et al. Division and correlation of the middle Proterozoic strata in Jiangnan old Land [J]. *Resources Survey & Environment*, 2008, 29(1): 1-11(in Chinese).
- [17] 马荣生. 皖南前南华纪岩石地层 [J]. 资源调查与环境, 2002, 23(2): 94-106.
Ma Rongsheng. The stratigraphy of Pre-Nanhua system in South Anhui [J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 2002, 23(2): 94-106 (in Chinese with English abstract).
- [18] 杜建国, 孙乘云, 许卫, 等. 皖南地区葛公镇组砾岩性质及其构造含义 [J]. 资源调查与环境, 2002, 23(2): 106-112.
Du Jianguo, Sun Chenyun, Xu Wei, et al. Characters and its tectonic implication of basal conglomerate from Gegongzhen Formation in southern area of Anhui Province [J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 2002, 23(2): 106-112(in Chinese with English abstract).
- [19] 章泽军, 张雄华, 易顺华. 赣西北幕阜山-九岭山一带前震旦纪构造变形 [J]. 高校地质学报, 2003, 3(1): 81-88.
Zhang Zejun, Zhang Xionghua, Yi Shunhua. Intraplate tectonic deformation of the Precambrian in the Mufu and Jiuling mountains area, North-west Jiangxi [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2003, 3(1): 81-88(in Chinese with English abstract).
- [20] 余心起, 张达, 汪隆武, 等. 浙赣皖相邻区加里东构造变形特征分析 [J]. 地质通报, 2006, 25(6): 676-684.
Yu Xinqi, Zhang Da, Wang Longwu, et al. Features of Caledonian tectonic deformation in the Zhejiang-Anhui-Jiangxi border region, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(6): 676-684(in Chinese with English abstract).
- [21] 余心起, 江来利, 许卫, 等. 皖浙赣断裂带的界定及其基本特征 [J]. 地学前缘, 2007, 14(3): 102-113.
Yu Xinqi, Jiang Laili, Xu Wei, et al. Identification and basic characteristics of the Anhui-Zhejiang-Jiangxi fault zone [J]. *Earth Science Frontiers*, 2007, 14 (3): 102-113 (in Chinese with English abstract).
- [22] 任纪舜. 论中国南部的大地构造 [J]. 地质学报, 1990, 64: 275-288.
Ren Jishun. On the geotectonics of southern China [J]. *Acta Geological Sinica*, 1990, 64: 275-288 (in Chinese with English abstract).
- [23] 邓晋福, 赵海岭, 莫宣学, 等. 扬子大陆的陆内俯冲与大陆的缩小——由白云母(二云母)花岗岩推导 [J]. 高校地质学报, 1995,

- 1:50-57.
- Deng Jinfu, Zhao Hailing, Mo Xuanxue, et al. Intracontinental subduction of the Yangtze continent and continent reducing - inferred from muscovite(two mica) granites[J]. Geological Journal of Universities, 1995, 1:50-57(in Chinese with English abstract).
- [24] 范光明, 薛重生, 李昌年, 等. 赣东北双层复合逆冲推覆构造研究[J]. 地质科技情报, 1999, 18(2):27-31
- Fan Guangming, Xue Chongsheng, Li Changnian, et al. Analysis of geochronology and kinematics of two layer complex thrust nappe tectonic in the northeastern Jiangxi Province [J]. Geological science and Technology Information, 1999, 18(2):27-31(in Chinese with English abstract).
- [25] 朱光, 刘国生. 皖南江南陆内造山带的基本特征与中生代造山过程[J]. 大地构造与成矿学. 2000, 24(2):103-111.
- Zhu Guang, Liu Guosheng. Basic characteristics and Mesozoic orogenic process of the Jiangnan intracontinental orogenic belt in southern Anhui [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2000, 24 (2): 103-111(in Chinese with English abstract).
- [26] 徐先兵, 张岳桥, 贾东, 等. 华南早中生代大地构造过程[J]. 中国地质, 2009, 36(3):574-592.
- Xu Xianbing, Zhang Yueqiao, Jia Dong, et al. Early Mesozoic geotectonic processes in South China [J]. Geology in China, 2009, 36(3):574-592(in Chinese with English abstract).
- [27] 杨明桂, 黄水保, 楼法生, 等. 中国东南陆区岩石圈结构与大规模成矿作用[J]. 中国地质, 2009, 36(3):528-542.
- Yang Minggui, Huang Shuibao, Lou Fasheng, et al. Lithospheric structure and large-scale metallogenic process in Southeast China continental area [J]. Geology in China, 2009, 36 (3):528-542(in Chinese with English abstract).
- [28] 曾勇, 杨明桂. 赣中碰撞带[J]. 中国区域地质, 1999, 18(1):17-22.
- Zeng Yong, Yang Minggui. Central Jiangxi. Collision Melange zone [J]. Regional Geology of China, 1999, 18 (1):17-22 (in Chinese with English abstract).
- [29] 曾勇, 杨明桂, 赖新平, 等. 赣东北地区中晚元古代的岩浆作用与构造环境[J]. 华南地质与矿产, 2002, 3:37-43.
- Zeng Yong, Yang Minggui, Lai Xinping, et al. Middle-Late Proterozoic magmatism and its tectonic settings in northeastern Jiangxi Province [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2002, 3:37-43(in Chinese with English abstract).

Structural deformation features and dynamic mechanism of Neoproterozoic strata in Zhanggongshan area, northern margin of the Jiangnan Orogen

ZHANG Yan-jie, LIAO Sheng-bing, ZHOU Xiao-hua,
WANG Cun-zhi, JIANG Ren, ZHU Yi-ping

(Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: Zhanggongshan area is located in the junction zone between Anhui Province and Jiangxi Province. The flysch formation, consisting mainly of continental margin epimetamorphic fine clastic rocks and subordinately of volcanic rocks, is widely distributed in the area. A mass of high precise isotopic dating shows that the epimetamorphic strata might have been formed in Neoproterozoic between 820 Ma and 840 Ma. On the basis of a systematic field investigation, 5 stages of fold deformation were recognized through the analysis of the strata. F_1 is the outcrop scale rootless intrafolial fold shaped in tight congruous fold and recumbent fold with original bedding (S_0) as the deformation face; F_2 is nearly EW-trending open inclined fold and congruous fold with early structural foliation as the deformation face; F_3 is the tight congruous fold or inclined fold related to large scale thrust nappe; F_4 belongs to penetrative asymmetrical tight shear fold group related to heat uplift of Yanshanian granitic magmas; F_5 is a plunging vertical fold distributed near the regional brittle shear strike-slip faults zone. These folds correspond to different tectonic cycles respectively. This paper emphatically describes the geometry, superposition pattern, deformation order and kinematic characteristics of fold deformation, and analyzes the deformation mechanism and geotectonic dynamics.

Key words: northern margin of Jiangnan Orogen; Neoproterozoic epimetamorphic strata structural deformation; geotectonic dynamics

About the first author: ZHANG Yan-jie, male, born in 1971, senior engineer, long engaged in regional geological survey; E-mail: njzyj@126.com.