

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.245



江南东段地区 NE-SW 向断裂带断层滑移 矢量反演及其大地构造意义

梁承华¹, 徐先兵^{1*}, 李启铭¹, 桂林¹, 汤帅²

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 江西省核工业地质局二六六大队, 江西南昌 330013

摘要: 华南中-新生代构造演化受太平洋构造域和特提斯洋构造域的联合控制. 以江南东段 NE-SW 向景德镇-歙县剪切带和球川-萧山断裂中发育的脆性断层为研究对象, 利用野外交切关系和断层滑移矢量反演方法厘定了 7 期构造变形序列并反演了各期古构造应力场, 讨论了断层活动的时代及其动力学. 白垩纪至新生代研究区 7 期古构造应力场分别为: (1) 早白垩世早期 (136~125 Ma) NW-SE 向伸展; (2) 早白垩世晚期 (125~107 Ma) N-S 向挤压和 E-W 向伸展; (3) 早白垩世末期至晚白垩世早期 (105~86 Ma) NW-SE 向伸展; (4) 白垩世中期 (86~80 Ma) NW-SE 向挤压和 NE-SW 向伸展; (5) 晚白垩世晚期至始新世末期 (80~36 Ma) N-S 向伸展; (6) 始新世末期至渐新世早期 (36~30 Ma) NE-SW 向挤压和 NW-SE 向伸展; (7) 渐新世早期至中新世中期 (30~17 Ma) NE-SW 向伸展. 结合区域地质研究表明, 第 1 期至第 4 期古构造应力场与古太平洋构造域的板片后撤、俯冲以及微块体 (菲律宾地块) 间的碰撞作用有关; 第 5 期伸展作用受控于新特提斯构造域俯冲板片后撤, 而第 6 期和 7 期古构造应力场主要与印-亚碰撞的远程效应有关. 白垩纪至新生代, 华南东部受伸展构造体制和走滑构造体制的交替控制. 先存断裂的发育可能是导致华南晚中生代走滑构造体制的主要控制因素.

关键词: 断层滑移矢量; 古构造应力场; 景德镇-歙县剪切带; 球川-萧山断裂; 华南中-新生代构造演化; 构造地质.

中图分类号: P548

文章编号: 1000-2383(2019)05-1761-12

收稿日期: 2018-07-20

Inversion and Tectonic Implications of Fault-Slip Data of NE-SW-Striking Fault Zones in Eastern Jiangnan Area

Liang Chenghua¹, Xu Xianbing^{1*}, Li Qiming¹, Gui Lin¹, Tang Shuai²

1. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. No. 266 Geological Party, Nuclear Industry Geological Bureau of Jiangxi Province, Nanchang 330013, China

Abstract: Mesozoic to Cenozoic tectonic evolution of the South China Block was dominated jointly by the Pacific tectonic domain and the Tethys tectonic domain. Brittle faulting of the NE-SW-striking Jingdezhen-Shexian shear zone and the Qiuchuan-Xiaoshan fault was studied in the eastern Jiangnan area. Based on cross-cutting relations and inversion of fault-slip data, seven stages of structural deformation were identified and their paleostress fields were inverted. Their formation ages and geodynamics are also discussed. Cretaceous to Cenozoic paleostress fields that occurred in the eastern Jiangnan area are: (1) NW-SE extension during early stage of Early Cretaceous (136–125 Ma); (2) N-S compression and E-W extension during late stage of Early Cretaceous (125–107 Ma); (3) latest Early Cretaceous to early stage of Early Cretaceous (105–86 Ma) NW-SE extension; (4) middle Late Cretaceous (86–80 Ma) NW-SE compression and NE-SW extension; (5) N-S extension during late stage of Late Cretaceous to latest Eocene (80–36 Ma); (6) NE-SW compression and NW-SE extension during latest Eocene to

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (No.41402174); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No.G1323531799).

作者简介: 梁承华 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事构造解析的研究. ORCID: 0000-0003-2055-4492. E-mail: 736700329@qq.com

* **通讯作者:** 徐先兵, ORCID: 0000-0002-5341-9492. E-mail: xbxu2011@cug.edu.cn

引用格式: 梁承华, 徐先兵, 李启铭, 等, 2019. 江南东段地区 NE-SW 向断裂带断层滑移矢量反演及其大地构造意义. 地球科学, 44(5): 1761–1772.

early stage of Oligocene (36–30 Ma); (7) early stage of Oligocene to medium stage of Miocene (30–17 Ma) NE-SW extension. Combining these with regional geological evidences, the first to fourth paleostress fields were related to roll-back, subduction of the Pacific Plate and collision between micro-terrane (Philippine Sea plate) and the South China Block. The fifth paleostress field was attributed to the roll-back of Neo-Tethys oceanic plate whereas the sixth and seventh paleostress fields to the far-field effect of the India-Asia collision. Extensional regimes and strike-slip regimes alternately dominated Cretaceous to Cenozoic structural deformation in the South China Block. The predominated factor for the strike-slip regimes in the South China Block is re-existed faults occurred before Late Mesozoic.

Key words: fault-slip data; paleostress field; Jingdezhen-Shexian shear zone; Qiuchuan-Xiaoshan fault; Mesozoic to Cenozoic tectonic evolution of South China; tectonics.

0 引言

大型断裂带一般经历了长期构造演化和多期构造活动,但由于缺乏用于同位素定年的新生矿物,脆性断层的活动时代往往难以被精确厘定.断层滑移矢量反演被广泛用于脆性断层的研究,可以有效厘定断层的变形序列并反演不同构造事件的古构造应力场(Delvaux and Sperner, 2003; Zhang *et al.*, 2003).结合区域构造变形、岩浆活动以及大地构造背景,古构造应力场还可以用来制约脆性断层的活动时代并探讨其动力学(Zhang *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2016a).

江南东段地区广泛发育 NE-SW 向大型断裂,其活动时代可能为新元古代(Wang *et al.*, 2013a)、早古生代(Xu *et al.*, 2015, 2018)、早中生代(Xiao and He, 2005; 张彦杰等, 2012)以及晚中生代(王鹏程等, 2015; 霍海龙等, 2018). NE-SW 向景德镇—歙县剪切带和球川—萧山断裂作为新元古代弧后盆地缝合线(Wang *et al.*, 2013a)和早古生代重要的岩相分界线(马永生等, 2009),其代表了地壳尺度的先存边界断裂带和应变集中带,并控制了江南东段地区晚中生代盆地的形成和演化(Xu *et al.*, 2016a, 2016b),其研究对华南中—新生代构造演化具有重要意义.

本文以 NE-SW 向景德镇—歙县剪切带和球川—萧山断裂为研究对象,通过对断裂带中脆性断层滑移矢量的研究,厘定了 2 条断裂白垩纪以来的构造变形序列,反演了其古构造应力场并进行了年代学和动力学分析.

1 地质背景

江南东段位于扬子克拉通东南缘(图 1),经历了新元古代至中新生代多期构造活动(舒良树,

2012; Wang *et al.*, 2013b; 徐先兵等, 2015).新元古代洋—陆俯冲作用导致扬子与华夏地块之间洋盆关闭并在扬子板块东南缘形成江南造山带(Wang *et al.*, 2013a; Xu *et al.*, 2014; 谭清立等, 2017).华南东部早古生代造山作用导致江南造山带重新活化并在扬子东南缘发育浙西北前陆盆地(Charvet *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2013b; Xu *et al.*, 2015, 2018).早中三叠世造山作用使江南东段地区再次活化并形成浙西北褶皱冲断带(Xiao and He, 2005)和近东西向山脉和分水岭(Xu *et al.*, 2016b).中晚侏罗世的造山作用在江南东段主要表现为早中侏罗世及其下伏层位的褶皱和逆冲作用(王鹏程等, 2015; Xu *et al.*, 2016a; 霍海龙等, 2018).白垩纪地壳伸展诱发了江南东段地区强烈的岩浆活动(Li *et al.*, 2013a; 汤帅等, 2016; Gu *et al.*, 2017; Hu *et al.*, 2017),并形成断陷盆地和穹隆等伸展构造(Li *et al.*, 2014a, 2014b, 2016a; Xu *et al.*, 2016a).

景德镇—歙县剪切带呈 NE-SW 向展布于江南造山带东段的核部,中部被侏罗—白垩纪黄山盆地所覆盖.剪切带内发育新元古代 SSZ 型蛇绿混杂岩和枕状玄武岩,指示其为新元古代弧后盆地关闭的缝合线(Wang *et al.*, 2013a).该剪切带经历了新元古代和早古生代韧性走滑剪切(徐先兵等, 2016; Xu *et al.*, 2018)和中生代脆性变形的叠加(张彦杰等, 2012; 霍海龙等, 2018),并控制了黄山盆地和景德镇盆地的形成和演化(Xu *et al.*, 2016a, 2016b).

球川—萧山断裂呈 NE-SW 向展布于浙西北盆地古生代—中生代地层中.地表由一系列平行的断层组成宽约 1 km 的断裂带,沿断裂带有基性和酸性岩脉侵入.球川—萧山断裂基本控制了浙西北地区古生代以来地层的展布(马永生等, 2009).大地电磁剖面指示其在中生代表现为倾向南东的逆冲断层(王鹏程等, 2015).

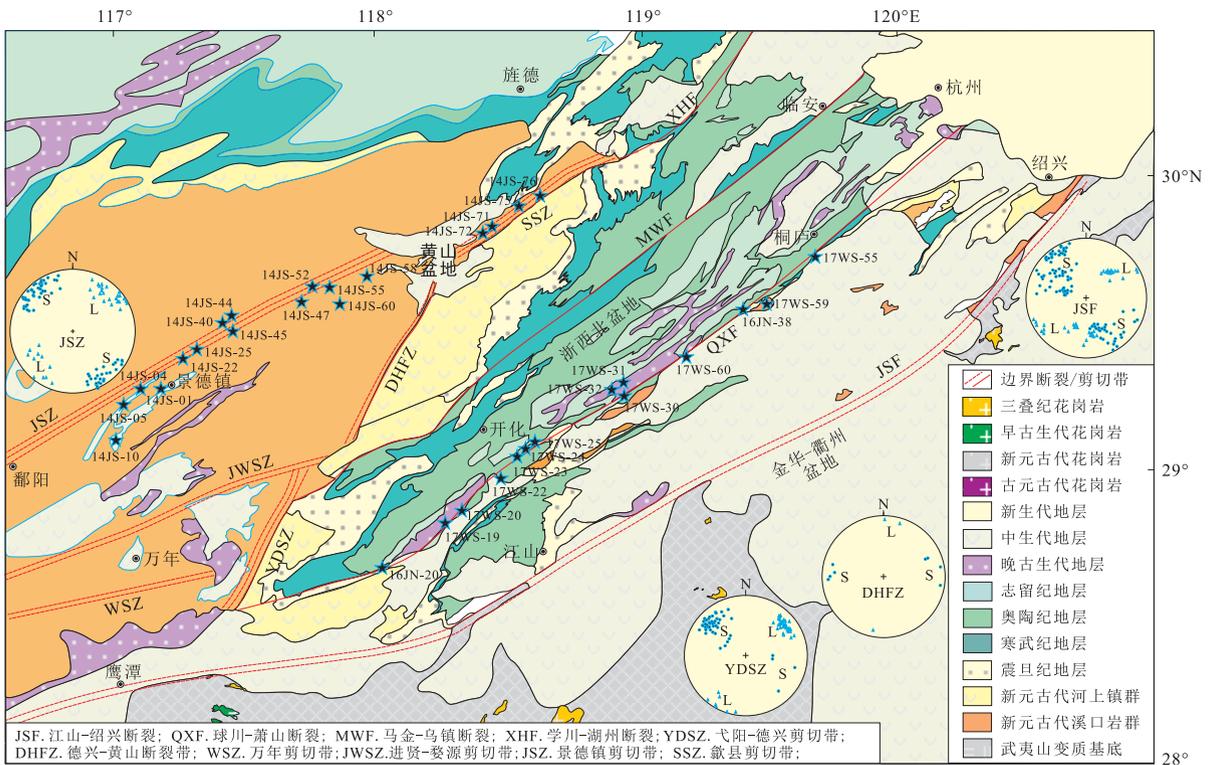


图 1 江南东段地区地质简图

Fig.1 Sketch geological map of the eastern Jiangnan area

2 研究方法

利用断层滑移数据反演构造应力场的主要目的是模拟特定岩石的应力状态,并重建简化的应力张量.选取的研究对象包括张破裂(无边缘带的羽状节理、张裂隙、矿脉和岩墙)、剪破裂(共轭剪节理、错开标志层的滑移面)以及压破裂(劈理)(Delvaux and Sperner, 2003).除了测量断面与擦痕的产状和运动方向以外,在野外还要确定断层类型和滑移方向的准确度、权重因子、断层面形成时代、擦痕的类型和强度、断面的形态和组成,以及利用交切关系和断层类型判断断层形成的先后关系.将野外测量的数据输入 Win-Tensor 软件并进行人机交互式分组,然后进行应力张量反演,最后利用右二面体法和旋转优化法以及世界应力地图对反演的应力场进行优化和评估(Delvaux and Sperner, 2003).4 个简化的应力张量分别为 3 个轴向互相垂直的主应力($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$)以及表示 σ_2 相对于 σ_1 和 σ_3 大小关系的应力比 (R),其中: $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3, R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$.

3 断层滑移矢量反演和古应力场重建

3.1 景德镇—歙县剪切带

景德镇—歙县剪切带中脆性变形发育在新元古代双桥山群、新元古代基性岩(包括歙县蛇绿岩带)、中下侏罗统林山组—洪琴组、下白垩统石溪组以及早白垩世花岗岩之中.根据断层的野外交切关系和所在地质体的形成时代,在景德镇—歙县剪切带中识别出了 7 期构造变形序列.

第 1 期 NW-SE 向伸展作用记录在景德镇盆地边缘边界正断层之上(图 2a),主要发育于中下侏罗统林山组之中(图 3a).边界正断层以高角度倾向南东,阶步排列形式和擦痕由粗到细的变化指示正断层的运动学特征,其古构造应力场为 NW-SE 向伸展.

第 2 期走滑构造体制记录在新元古代双桥山群(图 2b)和中下侏罗统林山组之中.断层主要表现为高角度倾向 NW 或 SE 的左旋走滑断层,零星发育 NW-SE 走向的高角度右旋走滑断层.两组共轭走滑断层指示 N-S 向挤压和 E-W 向伸展,与断层滑移矢量反演的古构造应力场一致(图 3b).

第 3 期 NW-SE 向伸展作用主要发育在新元古代双桥山群和早白垩世鹅湖花岗岩之中(图 2c).断

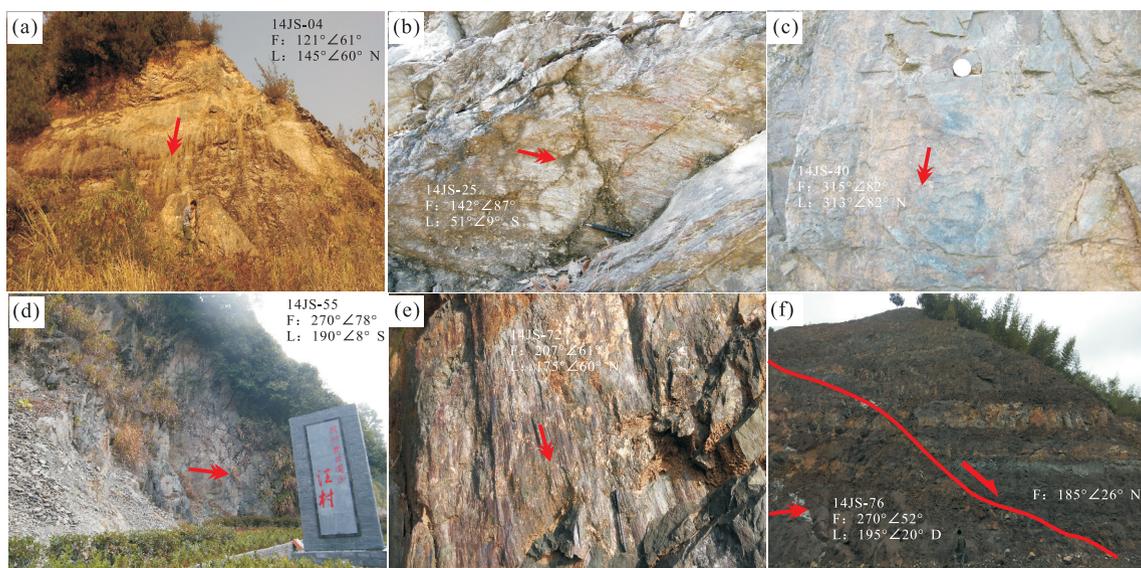


图 2 景德镇—歙县剪切带典型断层野外图片

Fig.2 Typical field photos of brittle faulting in the Jingdezhen-Shexian shear zone

a. 中下侏罗统林山组中 NE-SW 向脆性断层的正断作用; b. 新元古代双桥山群中 NE-SW 向脆性断层的左旋走滑; c. 早白垩世鹅湖花岗岩中 NE-SW 向脆性断层的正断作用; d. 新元古代双桥山群中 N-S 向脆性断层的左旋走滑; e. 新元古代基性岩中 NW-SE 向脆性断层的正断作用; f. 中侏罗统洪琴组中 N-S 向脆性断层的右旋走滑

层主要表现为白垩纪花岗岩中新生的倾向为 NW 的中等角度正断层和新元古代双桥山群中向东倾低角度断层的活化。断层滑移矢量反演指示 NW-SE 向古构造应力场(图 3c)。

第 4 期走滑构造体制主要发育在新元古代岩层(图 2d)和中侏罗世洪琴组之中。优势断层主要表现为高角度倾向东或西的左旋走滑断层,零星发育走向 NW-SEE 的右旋走滑断层。两组共轭走滑断层指示 NW-SE 向挤压和 NE-SW 向伸展,与断层滑移矢量反演的古构造应力场一致(图 3d)。

第 5 期 N-S 向伸展作用记录在新元古代基性岩(图 2e)、中侏罗世洪琴组(图 2f)以及早白垩世花岗岩之中。在地层中表现为近东西向高角度正断层并发育高角度擦痕,而在早白垩世花岗岩中表现为使早期南北向断层发生右旋走滑。近东西向正断层和近南北向右旋走滑断层均指示 N-S 伸展(图 3e)。

第 6 期走滑构造体制主要记录在新元古代岩层之中,表现为北东向和北西向断层的构造活化。沿北西向断层的左旋走滑和沿北东向断层的右旋走滑组成共轭走滑断层,其古构造应力场为 NE-SW 向挤压和 NW-SE 向伸展(图 3f)。

第 7 期 NE-SW 向伸展作用发育在新元古代双桥山群和下白垩统石溪组之中。构造变形主要表现为北西向断层的正断作用和北东向断层的构造活化。北西向正断层与高角度擦痕指示 NE-SW 向伸

展,与 NE 向断层活化所指示的古构造应力场相一致(图 3g)。

3.2 球川—萧山断裂

球川—萧山断裂中脆性变形发育在新元古代平水群砂岩和西峰寺组白云岩、寒武系荷塘组页岩、奥陶系长坞组泥岩和文昌组砂岩、石炭—二叠系叶家塘组石英砾岩、黄龙组与茅口组灰岩以及下白垩统寿昌组火山岩之中。

第 1 期走滑构造体制记录在石炭至二叠系灰岩之中,表现为沿东西向高角度断层的逆冲作用(图 4a)、北东向断层的左旋走滑和北西向断层的右旋走滑。其中,北东向左旋走滑断层和北西向右旋走滑断层组成共轭走滑断层,指示 N-S 向挤压和 E-W 向伸展(图 5b)。

第 2 期 NW-SE 向伸展作用发育在奥陶系砂岩和石炭系灰岩之中。构造变形表现为沿北西向断层的伸展作用(图 4b),断层倾角中等,倾向北西或南东,擦痕与断面高角度相交,其古构造应力场为 NW-SE 向伸展(图 5c)。

第 3 期走滑构造体制主要发育在新元古代砂岩、奥陶系砂岩以及石炭系灰岩之中。构造变形主要表现为沿北西向高角度断层的右旋走滑(图 4c)和沿近南北向高角度断层的左旋走滑。两组断层组成共轭走滑断层,其古构造应力场为 NW-SE 挤压与 NE-SW 向伸展(图 5d)。

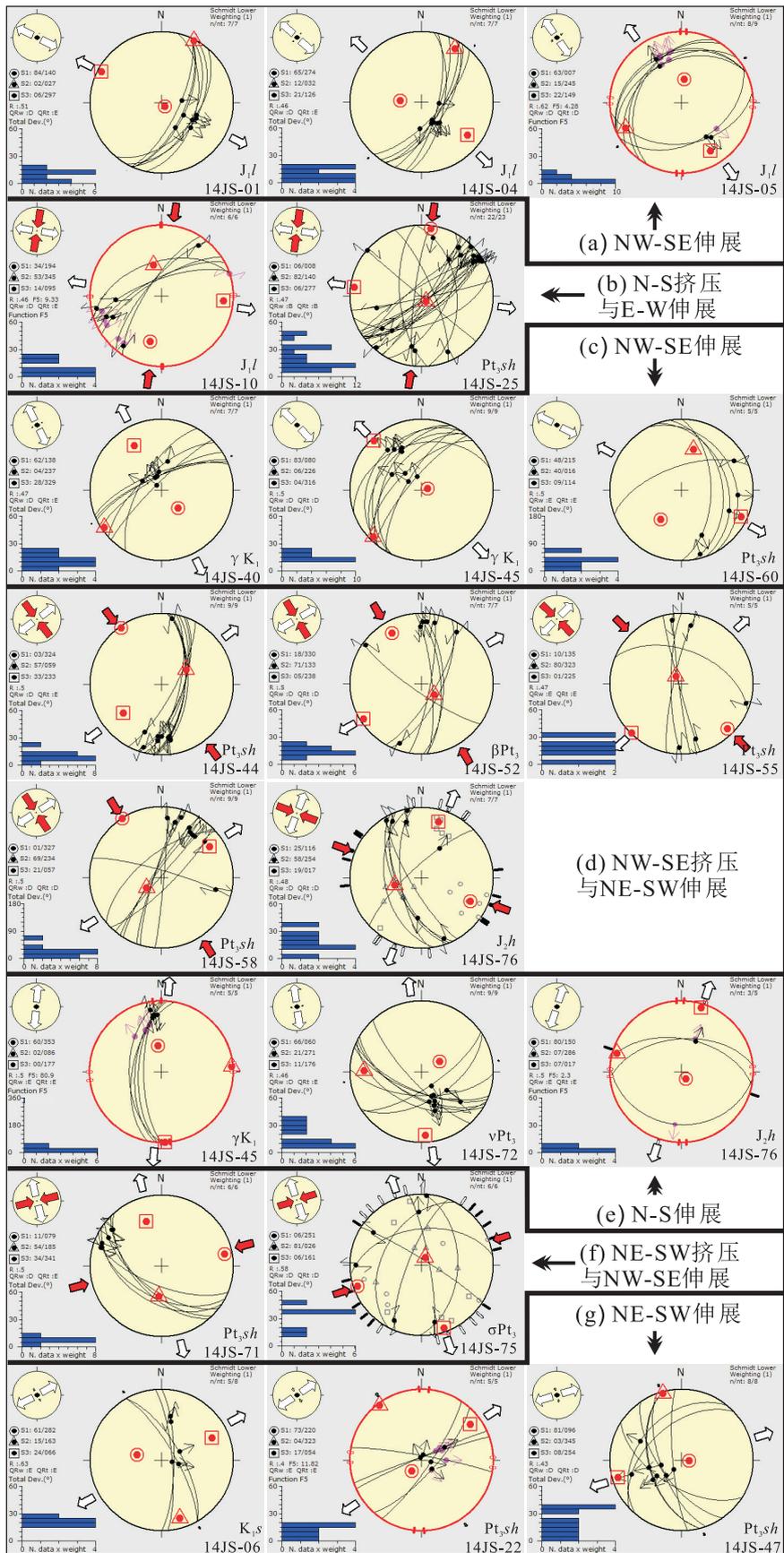


图 3 景德镇—歙县剪切带断层滑移矢量反演的 7 期古构造应力场

Fig.3 Seven stages of paleostress fields inverted by fault-slip data from the Jingdezhen-Shexian shear zone

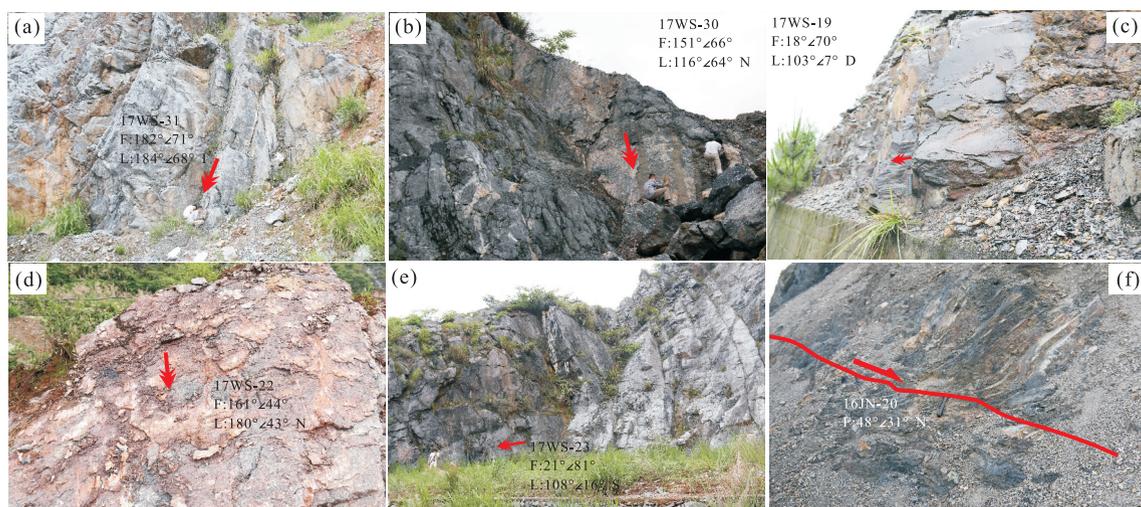


图 4 球川—萧山断裂典型断层野外图片

Fig.4 Typical field photos of brittle fault of the Qiuchuan-Xiaoshan fault

a. 上石炭统黄龙组中 E-W 向脆性断层的逆冲作用; b. 上石炭统黄龙组中 NE-SW 向脆性断层的正断作用; c. 下石炭统叶家塘组中 E-W 向脆性断层的右旋走滑; d. 中奥陶统长坞组中 E-W 向脆性断层的正断作用; e. 中奥陶统长坞组中 E-W 向脆性断层的左旋走滑; f. 下寒武统荷塘组中 NW-SE 向脆性断层的正断作用

第 4 期 N-S 向伸展作用主要发育在新元古代白云岩和奥陶系砂岩之中。断面以近东西走向为主(图 4d), 高角度倾向南或北, 局部呈低角度向北倾。擦痕与断面走向垂直, 倾向一致, 指示 N-S 伸展作用(图 5e)。

第 5 期走滑构造体制主要发育在寒武系页岩、奥陶系砂岩以及下白垩统火山岩之中。构造变形主要表现为近东西向高角度断层的左旋走滑(图 4e)和近南北向高角度断层的右旋走滑。两者组成共轭走滑断层, 其古构造应力场为 NE-SW 挤压和 NW-SE 向伸展(图 5f)。

第 6 期 NE-SW 向伸展作用主要发育在寒武系页岩和奥陶系砂岩之中。构造变形主要表现为沿北西向中低角度断层的正断(图 4f)和沿近南北向断层的构造活化。近南北向断层的构造活化指示 NE-SW 向伸展构造应力场, 与北西向中低角度断层的正断作用相一致(图 5g)。

4 解释与讨论

4.1 构造变形序列及其形成时代

球川—萧山断裂中发育了 6 期古构造应力场, 对应着景德镇—歙县剪切带中发育的第 2 期至第 7 期古构造应力场。在江西鄱阳县古县渡镇中下侏罗统林山组砂岩中可见早期 NE-SW 向低角度正断层被晚期 NE-SW 向左旋走滑断层所切割(图 6a,

14JS-10), 指示第 1 期 NW-SE 向伸展作用早于第 2 期 N-S 挤压与 E-W 向伸展所构成的走滑构造体制。第 1 期 NW-SE 向伸展作用发育在靠近侏罗—白垩纪景德镇盆地的边界断层上盘的中下侏罗统林山组砂岩中, 控制着盆地的早白垩世演化, 指示其形成于早白垩世。区域上, 华南早白垩世发生大规模的 NW-SE 向伸展作用, 形成了北东向断陷盆地(Zhou *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2014a)、北东向拆离断层(Li *et al.*, 2013b, 2016a)以及大量的 A 型花岗岩和基性岩(Jiang *et al.*, 2011; Gu *et al.*, 2017; Hu *et al.*, 2017; 孙洋等, 2017)。A 型花岗岩锆石 U-Pb 年代学和拆离断层⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代学统计(Li *et al.*, 2014a; Xu *et al.*, 2016a)表明早白垩世 NW-SE 向伸展作用形成于 136~125 Ma。

在江西浮梁县王港乡新元古代双桥山群中可见早期 NE-SW 向左旋走滑断层被晚期 NE-SW 向低角度正断层切割(图 6b, 14JS-25), 指示第 3 期 NW-SE 向伸展作用晚于第 2 期 N-S 挤压与 E-W 向伸展所组成的走滑构造体制。第 2 期走滑构造体制还导致东南沿海 NE 向长乐—南澳剪切带中发育的逆冲作用(Wei *et al.*, 2015)、左旋走滑(徐先兵等, 2014)以及局部高级变质作用(Cui *et al.*, 2013)。结合区域上早白垩世伸展盆地的构造反转与早白垩世晚期的岩浆空窗期(118~107 Ma; Xu *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2014a), 第 2 期走滑构造体制形成于 125~107 Ma。

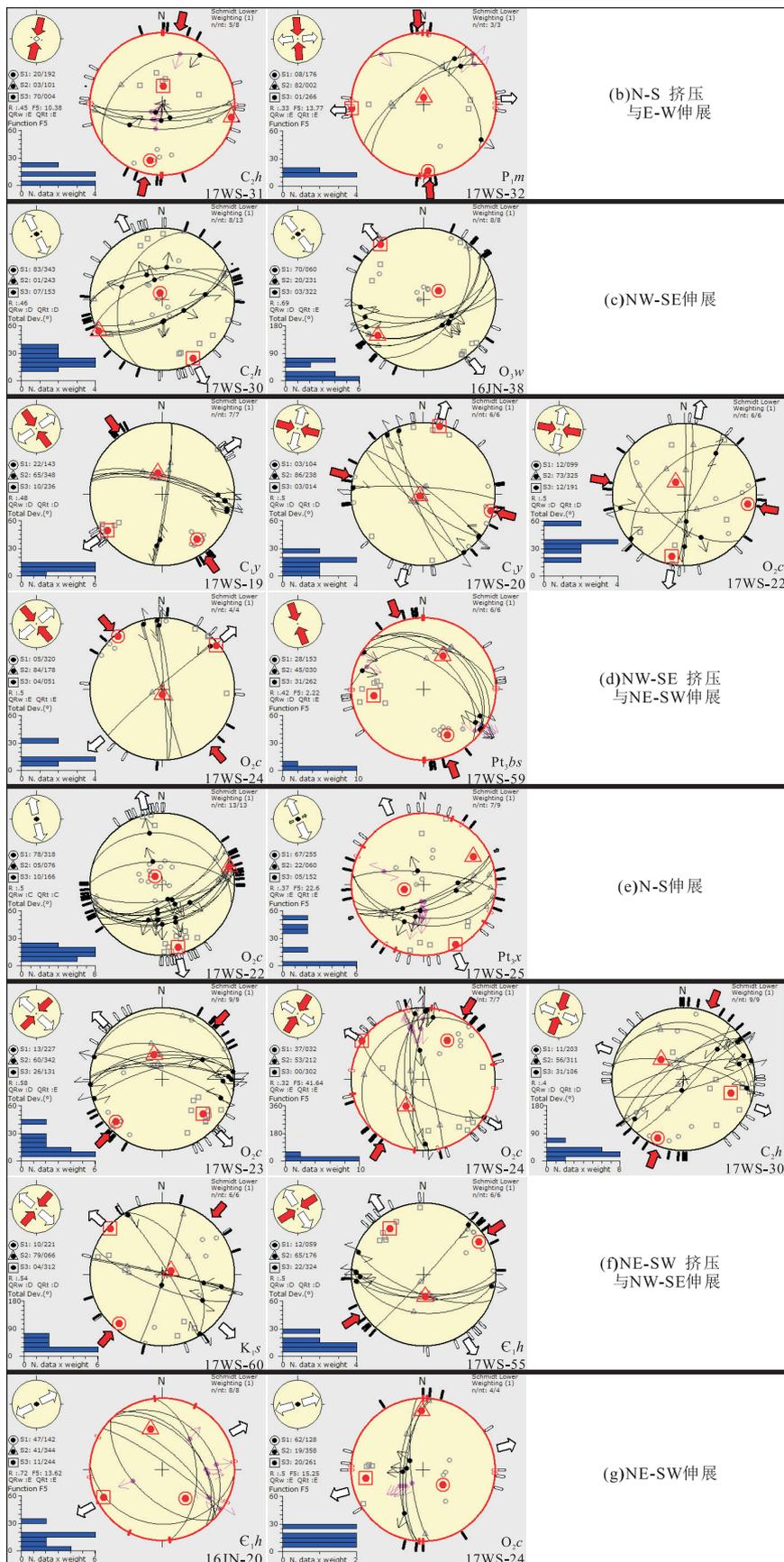


图 5 球川—萧山断裂断层滑移矢量反演的 6 期古构造应力场

Fig.5 Six stages of paleostress fields inverted by fault-slip data from the Qiuchuan-Xiaoshan fault

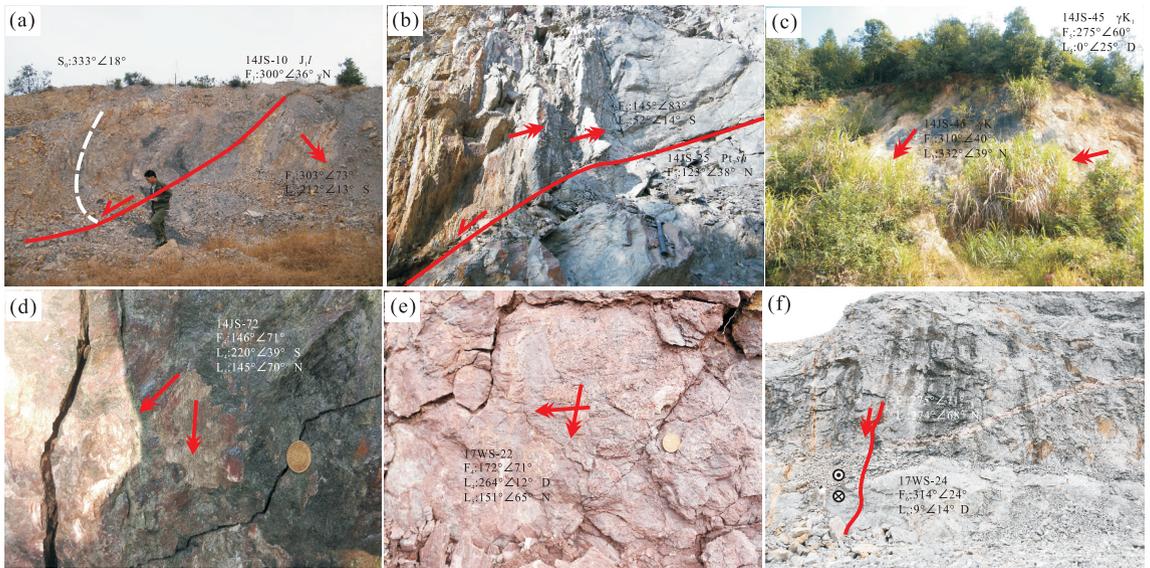


图 6 江南东段地区白垩纪以来不同期次断层的野外交切关系

Fig.6 Cross-cutting relations of Cretaceous to Cenozoic different stages of brittle faulting in the eastern Jiangnan area

a. 交切关系指示早白垩世走滑构造体制晚于早白垩世 NW-SE 向伸展作用; b. 交切关系指示晚白垩世 NW-SE 向伸展作用晚于早白垩世走滑构造体制; c. 交切关系指示晚白垩世 N-S 向伸展作用晚于晚白垩世 NW-SE 向伸展作用; d. 交切关系指示晚白垩世 N-S 向伸展作用晚于早白垩世走滑构造体制; e. 交切关系指示晚白垩世 N-S 向伸展作用晚于晚白垩世走滑构造体制; f. 交切关系指示新生代 NE-SW 向伸展作用晚于新生代走滑构造体制

在江西浮梁县鹅湖镇早白垩世花岗岩中可见南北向右旋走滑断层切割早期北西向正断层(图 6c, 14JS-45), 指示第 5 期 N-S 向伸展作用晚于第 3 期 NW-SE 向伸展作用。锆石 U-Pb 年代学指示鹅湖岩体约形成于 122 Ma (Jiang *et al.*, 2011), 因此第 3 期 NW-SE 向伸展作用形成时代晚于 122 Ma。区域上, 早白垩世末期至晚白垩世早期华南东南沿海地区发育大规模伸展作用, 表现为断陷盆地 (Zhou *et al.*, 2006)、拆离断层与脆性正断层 (徐先兵等, 2014)、环形火山活动与基性岩浆侵位 (Zhou *et al.*, 2006)。基性岩浆和火山岩年代学统计 (Li *et al.*, 2014a; Xu *et al.*, 2016a) 表明第 3 期 NW-SE 向伸展作用形成于 105~86 Ma。

在安徽歙县新元古代蛇绿混杂岩中北东向高角度断层面上发育 2 种类型的擦痕 (图 6d, 14JS-72)。早期向 SW 倾伏的近水平擦痕指示左旋走滑, 是第 4 期 NW-SE 向挤压和 NE-SW 向伸展所构成的走滑构造体制的产物; 晚期向 SE 高角度倾伏的擦痕指示正断作用, 是第 5 期 N-S 向伸展作用的产物。在浙江常山县辉埠镇奥陶系灰岩中向南倾的高角度断层面上发育 2 种类型的擦痕 (图 6e, 17WS-22)。早期向西倾伏的近水平擦痕被晚期向南倾伏的高角度擦痕所切割, 指示第 4 期 NW-SE 向挤压和 NE-SW 向伸展所构成的走滑构造体制早于第 5 期 N-S 向伸

展作用。在景德镇一歙县剪切带的中段黄山盆地中, 第 4 期走滑构造体制和第 5 期 N-S 伸展作用均有发育。根据盆地内角度不整合上下地层时代和裂变径迹年代学指示的隆升和山麓夷平作用 (Xu *et al.*, 2016a), 第 4 期和第 5 期古构造应力场分别形成于 86~80 Ma 与 80~36 Ma。

在浙江常山县芳村镇奥陶系灰岩中发育 2 组不同类型的断层 (图 6f, 17WS-24)。早期向 NW 倾的低角度断层面上发育近水平的右旋擦痕, 其古构造应力场为 NE-SW 向挤压和 NW-SE 向伸展; 晚期高角度正断层滑移矢量反演的构造应力场为 NE-SW 向伸展。因此, 第 6 期 NE-SW 向挤压和 NW-SE 向伸展所组成的走滑构造体制早于第 7 期 NE-SW 向伸展作用。第 6 期 NE-SW 向最大主压应力还导致区域上新元古代盆地内 NW 向褶皱和逆冲断层的发育 (Li *et al.*, 2012) 与江南地区在 36~30 Ma 快速隆升 (Xu *et al.*, 2016a)。因此, 第 6 期走滑构造体制形成于 36~30 Ma。

第 7 期 NE-SW 伸展作用广泛发育于华南 (Li *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2016a) 与华北 (Zhang *et al.*, 2003) 等东亚地区。区域上, 东亚洋脊扩张、弧后盆地打开以及局部伸展发生于 32~17 Ma (Yin, 2010)。结合第 6 期走滑构造体制的形成时代, 第 7 期 NE-SW 向伸展作用形成于 30~17 Ma。

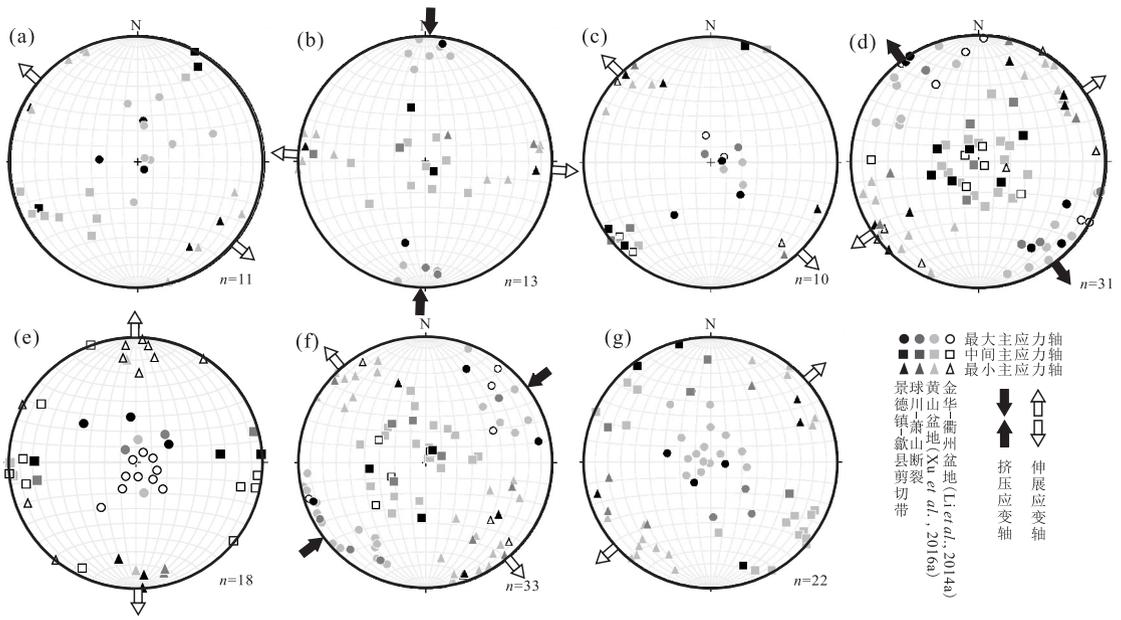


图 7 江南东段地区白垩纪—新生代不同阶段主应力轴方位赤平投影图(下半球等面积投影)

Fig.7 Stereonet of Cretaceous to Cenozoic principal axis of paleostress in the eastern Jiangnan area (lower hemisphere, equal-area projection)

a.早白垩世早期(136~125 Ma)NW-SE 伸展作用;b.早白垩世晚期(125~107 Ma)N-S 向挤压应力和 E-W 向伸展;c.早白垩世末期至晚白垩世早期(105~86 Ma)NW-SE 向伸展作用;d.短暂的(86~80 Ma)NW-SE 向挤压和 NE-SW 向伸展;e.晚白垩世晚期至始新世末期(80~36 Ma)N-S 向伸展作用;f.始新世末期至渐新世早期(36~30 Ma)NE-SW 向挤压和 NW-SE 向伸展;g.渐新世早期至中新世中期(30~17 Ma)NE-SW 伸展作用

4.2 大地构造意义

断层滑移矢量反演表明江南东段地区白垩纪以来古构造应力场表现为伸展构造体制与走滑构造体制交替出现,与华南同期古构造应力场演化一致(Li *et al.*, 2012, 2014a, 2014b, 2016b; Xu *et al.*, 2016a).大范围一致的构造应力场往往反映的是区域构造运动的结果,指示华南白垩纪以来经历了 7 期构造作用.古构造应力场主要表现为 3 个方向的挤压或伸展,分别为 NW-SE 向、N-S 向以及 NE-SW 向(图 7).区域上,白垩纪 NW-SE 向挤压与伸展是与太平洋板块向北西的俯冲和后撤有关,形成 NE-SW 向逆冲断层、走滑断裂、拆离断层、断陷盆地以及火山岩、基性岩与花岗岩带(Zhou *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2013b; Li *et al.*, 2014a; 徐先兵等, 2014);白垩纪至始新世 N-S 向挤压与伸展可能与菲律宾板块向北的俯冲和新特提斯构造域俯冲板片后撤诱发的远程效应有关(Wei *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2014b; Xu *et al.*, 2016a);渐新世至中新世 NE-SW 向挤压与伸展是与印—亚板块碰撞远程效应有关(Yin, 2010; Li *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2016a).

图 7 指示华南白垩纪以来伸展应力场表现为纯剪应力状态,而挤压构造往往表现为走滑构造体制.

走滑构造体制存在 2 种解释:(1)板块俯冲方向与板块边界斜交或呈低角度俯冲,造成水平最大主应力发生分解(DeMets *et al.*, 2010);(2)板块内部存在大量先存断裂,先存断裂在晚期构造事件中往往表现为走滑剪切(Sato *et al.*, 2015).白垩纪古太平洋板块俯冲,经历了俯冲角度从低角度向高角度的转换(Zhou *et al.*, 2006)和大角度的顺时针旋转(Sun *et al.*, 2007).新生代印度板块向欧亚板块之下俯冲也经历了中等角度的逆时针旋转(Sun *et al.*, 2007).但华南板块从中侏罗世以来压缩构造的变形机制始终表现为走滑构造体制(Li *et al.*, 2012, 2014a, 2014b, 2016b; Xu *et al.*, 2016a),说明大洋板块俯冲方向或俯冲角度变化均无法完美解释华南板块晚中生代以来的走滑构造体制.华南板块形成于新元古代扬子与华夏板块的拼贴作用,经历了早古生代(广西运动)、早中生代(印支运动)以及晚中生代(燕山运动)多期造山作用并发育 E-W 向、NE-SW 向、NW-SE 向以及 NNE-SSW 向多组断裂(舒良树,2012;Wang *et al.*, 2013b).因此,华南板块中发育的先存断裂有可能是导致华南晚中生代走滑构造体制的主要控制因素.

5 结论

本文通过对江南东段地区 2 条 NE-SW 向大型断裂(景德镇—歙县剪切带与球川—萧山断裂)的断层滑移矢量系统测量、运动学分析以及古构造应力场反演,厘定了江南东段白垩纪以来断层变形序列并探讨了其形成时代和动力学。

(1)断层滑移矢量反演表明江南东段地区白垩纪以来古构造应力场表现为伸展构造体制与走滑构造体制交替出现。第 1 期至第 4 期古构造应力场与古太平洋构造域的板片俯冲、后撤以及微块体(菲律宾地块)间的碰撞作用有关;第 5 期伸展作用为新特提斯构造域俯冲板片后撤诱发的远程效应,而第 6 期和第 7 期构造体制主要与印—亚碰撞的远程效应有关。

(2)华南白垩纪以来伸展应力场表现为纯剪应力状态,而挤压构造往往表现为走滑构造体制。先存断裂的发育可能是导致华南晚中生代走滑构造体制的主要控制因素。

致谢:特此文纪念马杏垣院士诞辰 100 周年,感谢浙江省地质调查院陈忠大总工程师和汪发祥工程师在野外工作中提供的帮助!

References

Charvet, J., Shu, L. S., Faure, M., et al., 2010. Structural Development of the Lower Paleozoic Belt of South China: Genesis of an Intracontinental Orogen. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(4): 309–330. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.03.006>

Cui, J. J., Zhang, Y. Q., Dong, S. W., et al., 2013. Zircon U-Pb Geochronology of the Mesozoic Metamorphic Rocks and Granitoids in the Coastal Tectonic Zone of SE China: Constraints on the Timing of Late Mesozoic Orogeny. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62: 237–252. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.09.014>

Delvaux, D., Sperner, B., 2003. New Aspects of Tectonic Stress Inversion with Reference to the TENSOR Program. *Geological Society, London, Special Publications*, 212(1): 75–100. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.2003.212.01.06>

DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., 2010. Geologically Current Plate Motions. *Geophysical Journal International*, 181(1): 1–80. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2009.04491.x>

Gu, H. L., Yang, X. Y., Deng, J. H., et al., 2017. Geochemical and Zircon U-Pb Geochronological Study of the Yangs-

han A-Type Granite: Insights into the Geological Evolution in South Anhui, Eastern Jiangnan Orogen. *Lithos*, 284–285: 156–170. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.04.007>

Hu, Q. H., Yu, K. Z., Liu, Y. S., et al., 2017. The 131–134 Ma A-Type Granites from Northern Zhejiang Province, South China: Implications for Partial Melting of the Neoproterozoic Lower Crust. *Lithos*, 294–295: 39–52. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.09.016>

Huo, H. L., Zhang, D., Chen, Z. L., et al., 2016. Deformation Characteristics and Geochronological Constraints of Mesozoic Nappe Structure in Jingdezhen Area, North-eastern Jiangxi. *Journal of Geomechanics*, 24(1): 9–24 (in Chinese with English abstract).

Jiang, Y. H., Zhao, P., Zhou, Q., et al., 2011. Petrogenesis and Tectonic Implications of Early Cretaceous S- and A-Type Granites in the Northwest of the Gan-Hang Rift, SE China. *Lithos*, 121(1–4): 55–73.

Li, J., Dong, S., Zhang, Y., et al., 2016a. New Insights into Phanerozoic Tectonics of South China: Part 1. Polyphase Deformation in the Jiuling and Lianyunshan Domains of the Central Jiangnan Orogen. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 121(4): 3048–3080. <https://doi.org/10.1002/2015jb012778>

Li, Y., Dong, S. W., Zhang, Y. Q., et al., 2016b. Episodic Mesozoic Constructional Events of Central South China: Constraints from Lines of Evidence of Superimposed Folds, Fault Kinematic Analysis, and Magma Geochronology. *International Geology Review*, 58(9): 1076–1107. <https://doi.org/10.1080/00206814.2016.1146999>

Li, J. H., Ma, Z. L., Zhang, Y. Q., et al., 2014a. Tectonic Evolution of Cretaceous Extensional Basins in Zhejiang Province, Eastern South China: Structural and Geochronological Constraints. *International Geology Review*, 56(13): 1602–1629. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.951978>

Li, J. H., Zhang, Y. Q., Dong, S. W., et al., 2014b. Cretaceous Tectonic Evolution of South China: A Preliminary Synthesis. *Earth-Science Reviews*, 134: 98–136. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.03.008>

Li, J. H., Zhang, Y. Q., Dong, S. W., et al., 2012. Late Mesozoic–Early Cenozoic Deformation History of the Yuanma Basin, Central South China. *Tectonophysics*, 570: 163–183. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.08.012>

Li, J. H., Zhang, Y. Q., Dong, S. W., et al., 2013a. The Hengshan Low-Angle Normal Fault Zone: Structural and Geochronological Constraints on the Late Mesozoic Crustal Extension in South China. *Tectonophysics*, 606: 97–

115. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.05.013>
- Li, Z. L., Zhou, J., Mao, J. R., et al., 2013b. Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry of Two Episodes of Granitoids from the Northwestern Zhejiang Province, SE China: Implication for Magmatic Evolution and Tectonic Transition. *Lithos*, 179: 334 – 352. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2013.07.014>
- Ma, Y. S., Chen, H. D., Wang, G. L., 2009. Sequence Stratigraphy and Paleogeography of South China. Science Press, Beijing, 148 (in Chinese).
- Sato, H., Kato, N., Abe, S., et al., 2015. Reactivation of an Old Plate Interface as a Strike-Slip Fault in a Slip-Partitioned System: Median Tectonic Line, SW Japan. *Tectonophysics*, 644: 58 – 67.
- Shu, L. S., 2012. An Analysis of Principal Features of Tectonic Evolution in South China Block. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1035 – 1053 (in Chinese with English abstract).
- Sun, W. D., Ding, X., Hu, Y. H., et al., 2007. The Golden Transformation of the Cretaceous Plate Subduction in the West Pacific. *Earth and Planetary Science Letters*, 262(3–4): 533 – 542.
- Sun, Y., Ma, C., Liu, B., 2017. Record of Late Yanshanian Mafic Magmatic Activity in the Middle-Lower Yangtze River Metallogenic Belt. *Earth Science*, 42(6): 891 – 908 (in Chinese with English abstract).
- Tan, Q. L., Wang, Y. J., Zhang, Y. Z., et al., 2017. Taohong Diorite from Pingshui Region in Eastern Jiangnan Orogen: Evidence for Early Neoproterozoic Oceanic Crust Subduction. *Earth Science*, 42(2): 173 – 190 (in Chinese with English abstract).
- Tang, S., Xu, X. B., Yuan, Y. M., 2016. Geochemistry and Geochronology of the Volcanic Rocks from Tunxi Basin in Southern Anhui and Their Tectonic Significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(2): 177 – 194 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P. C., Zhao, S. J., Li, S. Z., et al., 2015. The Styles and Dynamics of Thrust in the South of the Middle-Lower Yangtze River Area. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 230 – 244 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. J., Fan, W. M., Zhang, G. W., et al., 2013a. Phanerozoic Tectonics of the South China Block: Key Observations and Controversies. *Gondwana Research*, 23(4): 1273 – 1305. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.02.019>
- Wang, Y. J., Zhang, A. M., Cawood, P. A., et al., 2013b. Geochronological, Geochemical and Nd-Hf-Os Isotopic Fingerprinting of an Early Neoproterozoic Arc-Back-Arc System in South China and Its Accretionary Assembly along the Margin of Rodinia. *Precambrian Research*, 231: 343 – 371. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.03.020>
- Wei, W., Faure, M., Chen, Y., et al., 2015. Back-Thrusting Response of Continental Collision: Early Cretaceous NW-Directed Thrusting in the Changle-Nan'ao Belt (Southeast China). *Journal of Asian Earth Sciences*, 100: 98 – 114. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.01.005>
- Xiao, W. J., He, H. Q., 2005. Early Mesozoic Thrust Tectonics of the Northwest Zhejiang Region (Southeast China). *Geological Society of America Bulletin*, 117(7–8): 945 – 961.
- Xu, X. B., Li, Y., Tang, S., et al., 2015. Neoproterozoic to Early Paleozoic Polyorogenic Deformation in the Southeastern Margin of the Yangtze Block: Constraints from Structural Analysis and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology. *Journal of Asian Earth Sciences*, 98: 141 – 151. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.11.015>
- Xu, X. B., Li, Y., Xue, D. J., et al., 2014. Deformation Characteristics and Geochronological Constraints of Late Mesozoic Extensional Structures in Quanzhou, Fujian Province. *Earth Science*, 39(1): 45 – 63 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. B., Lin, S. F., Tang, S., et al., 2018. Transformation from Neoproterozoic Sinistral to Early Paleozoic Dextral Shearing for the Jingdezhen Ductile Shear Zone in the Jiangnan Orogen, South China. *Journal of Earth Science*, 29(2): 376 – 390. <https://doi.org/10.1007/s12583-017-0965-8>
- Xu, X. B., Tang, S., Li, Y., et al., 2015. Characteristics of Neoproterozoic-Early Mesozoic Multiphase Orogenic Activities of Eastern Jiangnan Orogen. *Geology in China*, 42(1): 33 – 50 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. B., Tang, S., Lin, S. F., 2016a. Detrital Provenance of Early Mesozoic Basins in the Jiangnan Domain, South China: Paleogeographic and Geodynamic Implications. *Tectonophysics*, 675: 141 – 158. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.02.047>
- Xu, X. B., Tang, S., Lin, S. F., 2016b. Paleostress Inversion of Fault-Slip Data from the Jurassic to Cretaceous Huangshan Basin and Implications for the Tectonic Evolution of Southeastern China. *Journal of Geodynamics*, 98: 31 – 52. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.03.013>
- Xu, X. B., Tang, S., Lin, S. F., 2016. Two Kinds of Shear Senses and Tectonic Implication of the Jingdezhen Ductile Shear Zone, Northern Jiangxi Province. *Geological Journal of China Universities*, 22(2): 308 – 316 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. B., Xue, D. J., Li, Y., et al., 2014. Neoproterozoic Sequences along the Dexing-Huangshan Fault Zone in the Eastern

- Jiangnan Orogen, South China: Geochronological and Geochemical Constrains. *Gondwana Research*, 25 (1): 368 — 382. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.03.020>
- Xu, X. B., Zhang, Y. Q., Jia, D., et al., 2011. U-Pb Dating of Volcanic Rocks and Granites along the Wuyishan Belt: Constraints on Tuning of Late Mesozoic Tectonic Events in Southeast China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 85 (1): 130 — 144. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2011.00385.x>
- Yin, A., 2010. Cenozoic Tectonic Evolution of Asia: A Preliminary Synthesis. *Tectonophysics*, 488(1-4): 293 — 325.
- Zhang, Y. J., Liao, S. B., Zhou, X. H., et al., 2012. Characteristics of Zhangyuan Structure Belt in the Northern Margin of Jiangnan Orogen. *Acta Geologica Sinica*, 86(12): 1905 — 1916 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. Q., Ma, Y. S., Yang, N., et al., 2003. Cenozoic Extensional Stress Evolution in North China. *Journal of Geodynamics*, 36 (5): 591 — 613. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2003.08.001>
- Zhou, X. M., Sun, T., Shen, W. Z., et al., 2006. Petrogenesis of Mesozoic Granitoids and Volcanic Rocks in South China: A Response to Tectonic Evolution. *Episodes*, 29(1): 26 — 33.
- 构造变形特征与年代学约束. *地质力学学报*, 24(1): 9 — 24.
- 马永生, 陈洪德, 王国力, 2009. 中国南方层序地层与古地理. 北京: 科学出版社, 148.
- 舒良树, 2012. 华南构造演化的基本特征. *地质通报*, 31(7): 1035 — 1053.
- 孙洋, 马昌前, 刘彬, 2017. 长江中下游地区燕山晚期基性岩浆活动的记录. *地球科学*, 42(6): 891 — 908.
- 谭清立, 王岳军, 张玉芝, 等, 2017. 江南东段平水地区桃红闪长岩: 早新元古代洋壳消减的证据. *地球科学*, 42(2): 173 — 190.
- 汤帅, 徐先兵, 袁晏明, 2016. 皖南屯溪盆地火山岩的地球化学, 年代学及其构造意义. *岩石矿物学杂志*, 35(2): 177 — 194.
- 王鹏程, 赵淑娟, 李三忠, 等, 2015. 长江中下游南部逆冲变形样式及其机制. *岩石学报*, 31(1): 230 — 244.
- 徐先兵, 李源, 薛德杰, 等, 2014. 福建泉州晚中生代伸展构造变形特征与年代学制约. *地球科学*, 39(1): 45 — 63.
- 徐先兵, 汤帅, 李源, 等, 2015. 江南造山带东段新元古代至早中生代多期造山作用特征. *中国地质*, 42(1): 33 — 50.
- 徐先兵, 汤帅, 林寿发, 2016. 赣北景德镇韧性剪切带两类剪切指向及其构造意义. *高校地质学报*, 22(2): 308 — 316.
- 张彦杰, 廖圣兵, 周效华, 等, 2012. 江南造山带北缘郭源构造带主要地质特征. *地质学报*, 86(12): 1905 — 1916.

附中文参考文献

霍海龙, 张达, 陈正乐, 等, 2018. 江西景德镇地区中生代推覆