

doi:10.3799/dqkx.2016.504

海南岛小妹韧性剪切带的纳米尺度

沈宝云^{1,2,3}, 刘兵⁴, 刘海龄^{1,2*}, 周洋^{1,3}, 刘成东², 张雪芬²

1. 中国科学院南海海洋研究所边缘海地质重点实验室, 广东广州 510301
2. 东华理工大学核资源与环境省部共建国家重点实验室培育基地, 江西南昌 330013
3. 中国科学院大学, 北京 100049
4. 海南省地质调查院, 海南海口 570206

摘要: 为查明构造性质不明、空间位置不清楚的南海北缘琼南缝合带西段——九所—陵水断裂带, 采集断裂带东段小妹韧性剪切带中花岗岩、石榴石英片岩和花岗质片麻岩 3 类样品, 探讨其纳米尺度特征. 扫描电镜 (scanning electron microscope, SEM) 观测结果表明: 这 3 类岩石存在多种纳米结构和构造, 结合野外实践得到的该剪切带纳米颗粒的发育程度与其所受剪切作用有关. 纳米颗粒的形成机制可能有: (1) 剪切力作用下层状硅酸盐热分解; (2) 颗粒塑性变形后发生脆性破裂, 再经剪切作用研磨而成. 与台湾太鲁阁深大断裂带中的韧性剪切带岩石样品进行 SEM 测试结果对比, 发现其纳米颗粒特征和研究区具可比性, 据此推测小妹韧性剪切带在区域构造归属上可能与九所—陵水深大断裂带密切相关.

关键词: 小妹韧性剪切带; 纳米颗粒; 纳米结构; 纳米构造; 九所—陵水断裂带; 扫描电镜; 构造.

中图分类号: P5 **文章编号:** 1000—2383(2016)09—1489—10 **收稿日期:** 2016—01—20

Xiaomei Ductile Shear Zone on Hainan Island in a Nanoscale Perspective

Shen Baoyun^{1,2,3}, Liu Bing⁴, Liu Hailing^{1,2*}, Zhou Yang^{1,3}, Liu Chengdong², Zhang Xuefen²

1. Key Laboratory of Marginal Sea Geology of South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China
2. State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
4. Hainan Institute of Geological Survey, Haikou 570206, China

Abstract: The western Qiongnan suture zone, i.e., Jiusuo-Lingshui fault belt, at the northern margin of the South China Sea, is important in tectonics. To better understand the tectonic evidences and ductile shear belts, a study is done in this area. Three types of rocks are sampled from the Xiaomei ductile shear zone on Hainan island, including granite, garnet quartz schist and granitic gneiss. Their shear surfaces were observed and analyzed through scanning electron microscope (SEM) at nanoscale. The results show multiple nano-textures and nanostructures in all three kinds of rocks and a positive relationship between the development degree of nanoparticles and the stress of the rocks. The authors propose several possible formation mechanism of nanoparticles on the shear surfaces in this area, which may be thermal decomposition of sheet silicates under shear stress, or brittle deformation of minerals (especially feldspar with mechanical twins) after ductile deformation, then followed by crushing and grinding of the particles to nanoscale under shear force. Samples from the Taroko ductile shear belt, a part of the Taroko fault zone in Taiwan show similar nano characteristics to the Xiaomei ductile shear zone, implying both may have been in the same tectonic setting of a deep fracture as the Jiusuo-Lingshui fault belt. This study can therefore provide important observational facts for determining the structural properties and spatial positions of the Jiusuo-Lingshui fault belt.

基金项目: 东华理工大学核资源与环境省部共建国家重点实验室培育基地开放基金计划项目 (No. NRE1302); 国家自然科学基金项目 (Nos. 41276048, 91328205, 41476039, 41206035); 中国海及邻域地质地球物理及地球化学系列图项目 (No. GZH200900504-WX02).

作者简介: 沈宝云 (1990—), 女, 硕士研究生, 主要研究纳米地质学和大地构造学. E-mail: bbyio1225@163.com.

*** 通讯作者:** 刘海龄, E-mail: liuh82@126.com.

引用格式: 沈宝云, 刘兵, 刘海龄, 等, 2016. 海南岛小妹韧性剪切带的纳米尺度. 地球科学, 41(9): 1489—1498.

Key words: Xiaomei ductile shear zone; nanoparticles; nano-textures; nanostructures; Jiusuo-Lingshui fault zone; scanning electron microscope; tectonics.

0 引言

在物理学中,三维空间上只要有一维颗粒粒径小于 100 nm,即可称为纳米材料.而纳米材料学定义的纳米结构则是指以纳米尺度的物质单元为单元,按一定规律排列,形成零维(纳米颗粒与粉体)、一维(纳米棒、纳米线与纳米管)和二维(纳米带与纳米薄膜)的结构.本文依照岩石学的构造、结构定名并以从扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)下观测到的现象将其分两类:颗粒本身的形态、大小等特征称为结构,而颗粒与颗粒之间的充填关系、排列方式等则称之为构造,且构造常为受力作用后的结果,一般呈定向性排列.

纳米科技正在引起地球科学的一场深刻革命,纳米地球科学使得地学成为了新世纪纳米科技、生命科学、信息技术和认知科学四大科技的交汇领域(Hochella, 2006),是 21 世纪纳米科技高速发展的必然趋势.纳米地质学中,纳米颗粒的发现为解释断层和地震的发生提供了新的思路:高速的断层走滑速率伴随着迅速增温的同时产生了微米—纳米级颗粒,这些颗粒起到了润滑作用,使得断层的摩擦系数大大降低(Han *et al.*, 2007, 2010);由纳米颗粒形成的高密度的纳米涂层很可能是断层弱化的原因(Collettini *et al.*, 2009; Schleicher *et al.*, 2010);而利用断层表面的纳米颗粒进行断裂表面能计算,可以估算地震释放的能量(Keulen *et al.*, 2007)等等.国外的纳米地质研究主要针对断层中的纳米颗粒;在国内,大量的实验观测表明,韧性和脆性断裂剪切带中三大岩类的剪切表层除了存在纳米颗粒,还有纳米结构,其代表了高应变的摩擦—粘性转换带(F-V 带)(Sun *et al.*, 2008).这些成果对国内研究地震相关课题将有新的启示.

由于韧性剪切带是缝合带的标志之一,且韧性剪切带为可提供地震能量的孕震构造(李德威等, 2014),结合纳米科技,本文从纳米尺度研究海南岛东南部小妹韧性剪切带内 3 种岩石的特征以及宏观构造和变形之间的关系,并探讨该区纳米颗粒的可能形成机制及其和区域上的九所—陵水断裂带的关系,这些研究结果可为确定琼南缝合带(刘海龄等, 2006)西段九所—陵水带的构造属性和空间位置提供重要依据.

1 地质背景

小妹韧性剪切带露头位于海南岛陵水县北部的小妹水库下游(图 1),从区域上来看,它靠近由地球物理场资料所确定的九所—陵水断裂带,是该断裂带不可分割的一部分.九所—陵水断裂带是一条线性深大构造带,早在 20 世纪 80 年代就已经通过地球物理场资料(重力异常和航磁异常)发现了位于南海北部陆缘的该构造界线(中国科学院华南富铁科学研究队, 1986).后人又基于海南岛南、北两区的早古生代沉积作用、岩浆岩特征、变质变形特征、古生物面貌和古地磁等方面的差异性将海南岛分为北部的琼中地块和南部的三亚地块(刘海龄等, 2006; Liu *et al.*, 2011).但一直以来,都缺乏此二地块之间碰撞构造形迹的直接证据,系统研究发育其上的韧性剪切带就更少了.目前关于九所—陵水断裂带的东段位置大致如图 1 中的 AA' 和 BB' 线,代表 AA' 线的观点来自 2009 年 1 : 500 000 海南省地质图(海南省地质调查局编制),图中虽未明确标识其为九所—陵水断裂带,但是根据其产出的位置及规模可判断二者有一定的关系.此外,魏昌欣等(2011)和李孙雄等(2013)通过野外调查和镜下鉴定,确定了芒三—长丰韧性变形带(图 1 中的 AA' 线),小妹韧性剪切带从图 1 中可见为其一部分,但并未将其和九所—陵水断裂带联系在一起,而将其认为是海南岛古生代弧状构造带的一部分,和古特提斯闭合有关(李孙雄等, 2006, 2013).图 1 中的 BB' 线则大致为前人最初由地球物理场资料标定的九所—陵水深大断裂带东段经过之处,向东延伸入海.

由图 1 可知,区域上除缺乏侏罗纪地层(整个海南岛都缺失)外,还发育了二叠纪至第四纪地层.此外,在图的西北角还分布有少量长城纪地层.出露较多的为晚白垩世和中三叠世二长花岗岩,其次是晚白垩世的花岗岩和花岗闪长岩,在沿海地区出露广泛的第四纪地层.由图 1 中黑色小方框所在区域可见:研究区分布有中三叠世二长花岗岩和部分中三叠世花岗岩,对沿 AA' 线的新的野外地质调查表明该区域包含更多的二叠纪花岗岩(李孙雄等, 2013).这些岩浆岩应是印支、海西期区域构造运动的产物.这些构造运动使研究区内地层发生强烈褶皱上升,海水退出,进入中生代陆内发展阶段.

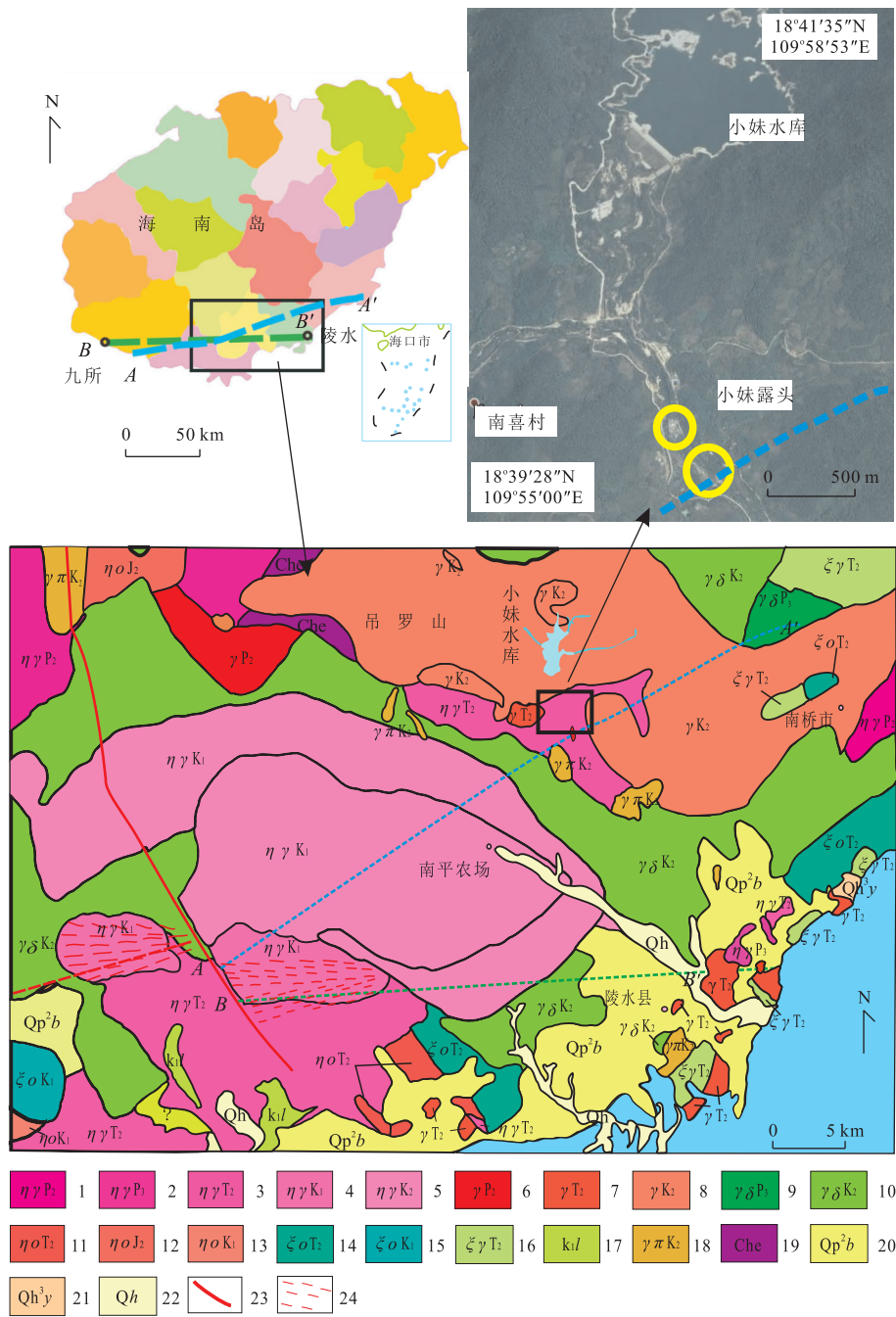


图 1 陵水县小妹研究区区域地质图(改自 1 : 250 000 海南省地质图)和空间位置

Fig.1 The regional geologic map and spatial location of Xiaomei research area, Lingshui County

图中黑框为研究区位置,位于小妹水库坝址下游河床中.AA'代表九所—陵水断裂带的可能实际露头(蓝色线),BB'代表地球物理场资料给出的九所—陵水断裂带位置(绿色线).1.中二叠二长花岗岩;2.晚二叠二长花岗岩;3.中三叠二长花岗岩;4.早白垩二长花岗岩;5.晚白垩二长花岗岩;6.中二叠花岗岩;7.中三叠花岗岩;8.晚白垩花岗岩;9.晚二叠闪长花岗岩;10.晚白垩闪长花岗岩;11.中三叠石英二长岩;12.中侏罗石英二长岩;13.早白垩石英二长岩;14.中三叠石英正长岩;15.早白垩石英正长岩;16.中三叠钾长花岗岩;17.早白垩细晶斑岩;18.晚白垩花岗斑岩;19.长城系;20.第四系北海组;21.第四系烟墩组;22.第四系全新统;23.断层;24.糜棱岩带

在小妹研究区内,主要发育的是受动力作用的花岗岩和构造定向明显的花岗质片麻岩和石英片岩.时间顺序上,由接触关系可知(图 2),石英片岩原岩最先形成,有可能是该处的结晶基底,然后在其上

沉积了新的地层;之后地壳抬升,使新地层全部剥蚀;大约二叠纪时期,区内南侧和东侧侵入一期花岗岩,随后发生近北东向剪切作用,并在近南东方向发生挤压作用使基底发生变质变形而形成了石英片

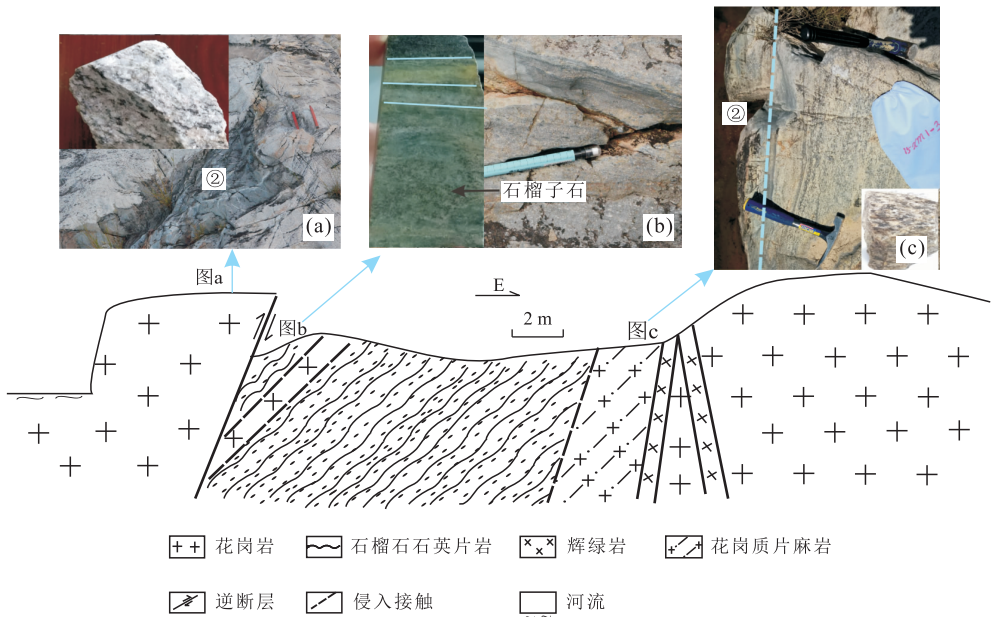


图 2 样品采集位置剖面

Fig.2 The cross-section with sample collection spots

a. 花岗岩; b. 石榴石石英片岩; c. 花岗质片麻岩; 蓝色实线为条带界限, 蓝色虚线表示岩石间的接触关系

岩;其后,该区域上的琼南海盆(刘海龄等,2006;Liu *et al.*,2011)向北俯冲引起的剪切并伴随幔源岩浆底侵、下地壳部分熔融,熔融后的中酸性岩浆沿着剪切裂隙上升,同时受到近北东向强应力作用而形成了走向和石英片岩相同的花岗质片麻岩;在剪切作用中后期,石英片岩带西侧附近的花岗岩携带同构造期的结晶基底(图 2a 中的②)被推覆上来而与之形成了高角度逆断层.在剪切作用之后,石英片岩带靠西侧侵入一期花岗岩,北北东走向,往西消失在断层中;靠东侧侵入两期辉绿岩脉,从围岩中侵入贯穿到石英片岩中,分别为北西和北北西走向.此外,还发育指示剪切带左旋的揉皱、雁列状节理和石香肠等.

2 样品采集与扫描电镜观测

2.1 样品采集与分类

根据野外观察,岩石经历了或多或少的变质变形作用,出现细粒化、定向排列、条带分异等现象.如图 2,将样品分为花岗岩、石榴石石英片岩和花岗质片麻岩 3 类采集,据此对比两种条带状岩石和两种花岗质岩石样品特征如表 1.

2.2 扫描电镜实验

扫描电镜实验在东华理工大学核资源与环境省部共建国家重点实验室培育基地完成,型号为 NO-

VA NANOSEM 450.实验开始前,将岩石样品(主要为 *ab* 和 *ac* 方向)刻凿成边长 1 cm 左右的立方体或圆柱体(且力求使用摩擦面或面理表层),用导电胶缠绕样品并将其粘在样品台上,表面裸露且平行于样品台,否则应在样品底部垫上导电胶直至平行.随后用型号为 Q150RS 的喷金仪器对样品观测面进行喷金 100 s 或 150 s,得到的金膜金粒大小分别为 10 nm 和 20 nm,以此增强样品观测面的导电性,提高电镜观测效果.实验时使用的探针(det)型号为 TLD;加速电压(HV)一般设置为 15.00 kV,偶尔因拍照需要再重新调整 HV 和工作距离等参数;工作距离为 5.0 mm 最佳,不超过 ± 0.5 mm,一般为 4.9~5.2 mm.在使用扫描电镜的同时,针对兴趣点用配套的能谱仪(仪器型号 OXFORD Inca Energy X-Max20)进行打点分析,实质是化学分析,纳米颗粒不单是应力作用的产物,还有化学耦合的产物(孙岩等,2003).

2.2.1 花岗岩 颗粒形态上,该类岩石在扫描电镜下主要有两种,一种为纳米单体,另一种是异化后的颗粒,分别对应岩石剪切面上的纳米粒子发育的前两个阶段——粒化阶段和变异阶段(Sun *et al.*, 2008).单体是指球度和圆度都较好的颗粒,一般 40~80 nm,是粒化阶段的产物(图 3a 左箭头,3b);异化对应变异阶段,即受应力等作用纳米颗粒发生变形,如压扁(图 3a 右箭头)或拉长(图 3c),其排列

表 1 样品野外和光学显微镜下特征

Table 1 Sample characteristics observed through field and the optical microscope

	花岗岩	石榴石石英片岩	花岗质片麻岩
手标本现象	风化严重,新鲜面浅灰色,不显示条带	暗蓝色,致密坚硬;表面 NNE 向线理密集,侧面见层理;肉眼几乎识别不出矿物,抛光后可见颜色深浅不一的条带,远离表层的条带中石榴子石多	浅灰白色,花岗质条带,片麻状构造,NNE 向排列
矿物种类	斜长石、石英为主,其次为黑云母、白云母	斜长石,石英,角闪石为主;长石大都绢云母化,角闪石多绿帘石化和绿泥石化,黑云母基本蚀变成绿泥石;且含较多石榴子石、锆石、榍石等副矿物	长石、石英、黑云母为主,部分长石绢云母化,少量黑云母绿泥石化
镜下矿物特征	颗粒粗大,长石多白云母化,一些为绢云母化,较多黑云母蚀变成绿泥石	颗粒极为细小,辉石的绿泥石化明显,而呈碎斑,直径 0.2 mm,碎基 0.05 mm;锆石和榍石也被绿泥石包围,细粒变晶结构;定向构造	颗粒粗大,结晶程度高;粒状变晶结构;云母等定向分布构成片麻理
变质变形	无定向性;镜下可见黑云母和斜长石受力弯曲,少量石英有波状消光	ac 面上半定向一定向,片理发育,变质相主要为绿片岩相—低角闪岩相	ac 面颗粒细小并呈定向排列,少量石英波状消光;ab 面颗粒更细且石英波状消光更强烈普遍

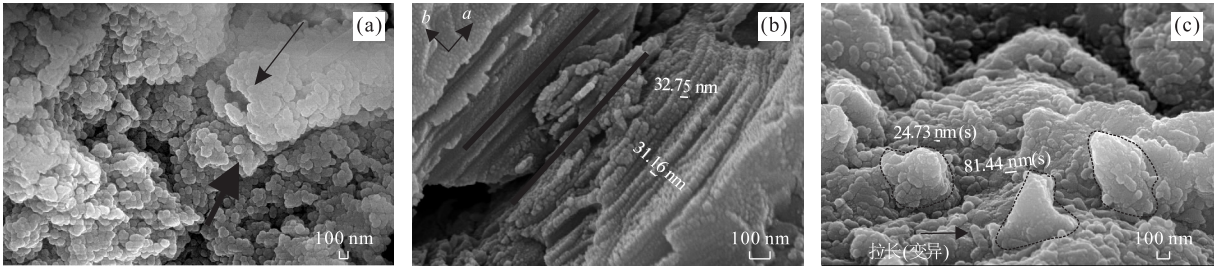


图 3 花岗岩的 SEM 照片

Fig.3 The SEM photos of granite

a.纳米颗粒圆度较好,靠近表层呈压扁状(右上箭头),球度较差,里层(中部箭头)则球度发育好,虽然各团块颗粒紧密镶嵌,但团块之间却有空隙,这种构造为堆积构造;b.源自运动面 *ab* 面的纳米颗粒粒径 32 nm 左右,发育均一,紧密镶嵌成层状,并呈线性排列(如线段所示),沿着运动方向 *a* 轴定向性明显;c.箭头所指为拉长的纳米颗粒,圈起来的部分为土堆状的集合体.图 3a 和 3c 的喷金时间为 100 s,金粒直径小于 10 nm;图 3b 则为 150 s,金粒直径小于 20 nm

紧密,彼此镶嵌,该阶段颗粒一般沿着拉长方向显示定向排列(Sun *et al.*, 2008),但在图 3c 中,拉长的纳米颗粒稀疏也没有显示定向性,反而在图 3b 中,未异化的颗粒呈现了明显的优选方位,说明粒化阶段和变异阶段都有可能产生定向性结构或不形成定向性;另外,在图 3a 中,表层的压扁并未波及到里层,说明压应力小,导致变异范围具有局限性。

在颗粒聚集上,仅在中部有一点空隙外,大量的纳米颗粒几乎紧密镶嵌,从底部往上形成三维的堆积结构(图 3a);图 3c 中,拉长的异化颗粒聚集成土堆状构造,“土堆”之间彼此独立,无优选方位(图 3c);纳米颗粒则发育均一,紧密镶嵌成层状,层层之间呈线性排列(图 3b 线段所示)。

2.2.2 石榴石石英片岩 该类岩石中纳米颗粒的成形最典型,纳米化现象最普遍,主要的结构中除了上述讲到的对应 Sun *et al.*(2008)提出的粒化阶段

和变异阶段外,还有纳米颗粒发育的后两个阶段(团聚阶段和再生阶段)对应的产物.图 4b 就是描述了团聚阶段下纳米颗粒的结合:在剪切滑动下,单体团聚结成复体,复体直径达 500 nm 以上,复体内部看不到颗粒间的界限,只在表面能够看清纳米颗粒,其主要还是未变异的单体,而复体与复体之间没有呈现规律的排列,彼此可以紧挨抑或相互远离,独立的复体可见其形似圆形,有可能反映滚动成因。

图 4a 为纳米颗粒组成的擦脊擦槽,条带状构造,显示塑性流动(*a* 轴),*a* 轴代表了剪切滑移方向,即擦脊就是滑移线,是压力作用下矿物的物质变化形成的超微粒构造条带(孙岩等,2003),其与宏观上的擦脊擦槽相似,代表了矿物的拉长方向,即拉伸线理的方向.值得注意的是,该图的纳米颗粒似乎并未发生变异,其球度和圆度都保持粒化阶段的状态.通过图中滑脊和滑脊上方叶片打点(谱图 1、2)发

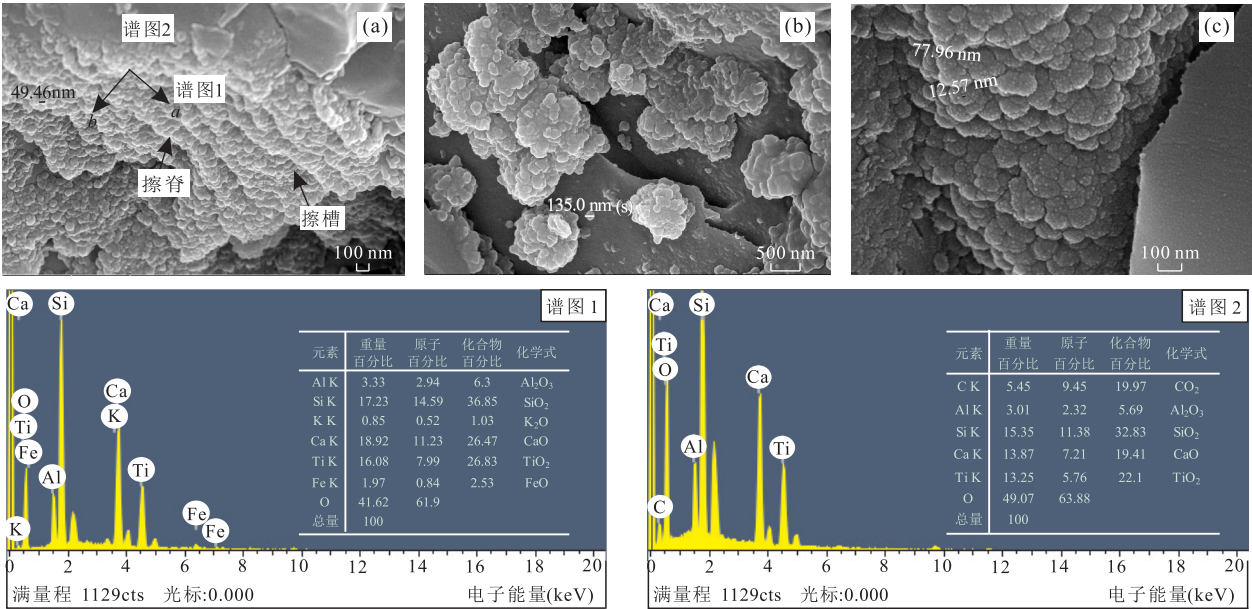


图 4 石榴石英片岩 SEM 和能谱照片

Fig.4 The SEM and EDS photos of garnet quartz schist

a.纳米颗粒约 50 nm,紧密镶嵌成条带状,条带之间有脊槽(粗箭头所示),小箭头代表纳米颗粒突出聚集形成的滑脊,谱图 1 和 2 显示信号强度大的 Ti;b.纳米单体经过韧性变形,即异化团聚形成复体,大小达到 600 nm 以上,单体基本都融入到复体中,其直径大于 100 nm,复体间呈松散堆积状;c.单体经过轻微异化,紧密镶嵌似葡萄状,层层压实,球度差,但圆度较佳,约 80 nm,其上喷洒的金颗粒为 13 nm.注:喷金均为 100 s,金颗粒直径约小于 10 nm.重量百分比、原子百分比和化合物百分比的单位均为“%”

现,Ca、Si、O、Ti 信号强度大,其所占百分比都在前 4 位.其中,Ti 元素由于性质特殊,常在主量元素和微量元素检测中都会出现,在主微量分析(中国科学院广州地球化学研究所同位素国家重点实验室测试,未附图)中其质量占主量元素的 0.6%,占微量总重的 45.5%,与能谱结果 13%~16%相吻合.

在图 4c 中,这种总体形似一串葡萄的结构,其颗粒彼此镶嵌形成层状,并层层压扁,即纳米颗粒发生了变异,这种压扁显示颗粒受到了垂向上的挤压力.位于葡萄结构的右侧,片状矿物保持完好无损.事实上,葡萄结构所处的位置是一个微裂隙,而这种在电镜下观察到的裂隙是一个很适宜纳米结构生长发育的场所,凡是见到微裂隙几乎就能看到各种有规则或无规则排列的纳米结构.微裂隙的本身也发育,并也有规则和不规则之分,但平直的裂缝也会产生随机分布的纳米结构,弯曲破裂的裂隙也能产生定向结构的纳米颗粒,比如此处的层状葡萄结构,该裂隙发展规模较大,形成的葡萄结构层研磨宽度(垂直壁的宽度)达到 1 200 nm.

2.2.3 花岗质片麻岩 与花岗岩和石榴石英片岩相比,该岩石在表面具有明显的片麻理,矿物粒度较粗,矿物显示花岗质.扫描电镜下观察发现和前两种岩石的纳米构造有很大的区别——鲜少发育球状的

纳米颗粒,而多发育 500 nm 以上的微粒:在 *ac* 面,可见到各种短柱状纳米颗粒的组合形式,如花球状(图 5a)和松果状(图 5b);在 *ab* 面,则见到在宽度上达到纳米级别的棒状物质(图 5c).如图 5a,黏附生长在壁上的花球状微粒,大小较为均一,直径约 700 nm,在其表面还能见到短柱状的颗粒,这些小颗粒像之前提及的单体,团聚后彼此融合成大的颗粒.对其进行能谱分析(谱图 3),显示该球状结构具有丰富的 Fe 含量(达 37%).图 5b 里各个松果状的微粒又团聚在破裂的洞中堆积,形成更大的团块,微粒间也倾向于融合一体,但还可以见到短柱状的颗粒,从壁上的“小松果”可以看出其黏性相当好,说明该颗粒也是原地生长,而非搬运滚动而来.而图 5c 和图 5b 有一个共同点,即都存在剥落现象,图 5b 中的松果状结构,其短柱状的纳米颗粒在洞的左侧也有,且呈现被碾磨压扁的痕迹,同样在图 5c 中,除了平直整齐排列的棒状堆积体,还见到剥落或即将要剥落的棒状体.这种剥落,可能反映其是应力作用的产物.

而对该样品 15 个兴趣点进行能谱成分分析发现,样品含有丰富的元素,最显著的就是 Fe 含量明显增多,甚至能达到 30% 以上,而前两者岩石很少有 Fe 元素;此外,数据结果还显示样品还含有多种微量元素,如 Mn、Ti、F、La、Nd 等.

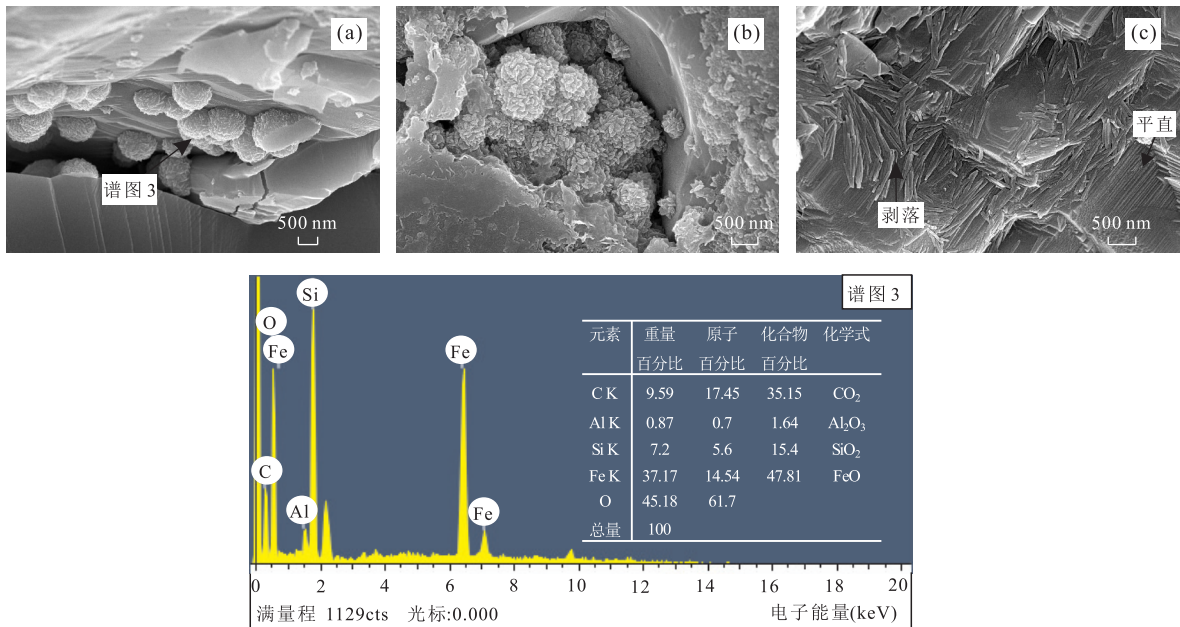


图 5 花岗质片麻岩 SEM 和能谱图像

Fig.5 The SEM and EDS photos of granitic gneiss

a.花球一样的复体颗粒粘在边缘上,横向上具有优选排列,能谱 3 显示 Fe 含量高;b.似松果一样的复体,在破裂的洞中生长,从壁上的小松果,可以看出其黏性相当好,说明这是原地生长,而非搬运滚动;c.平直的纳米棒定向性非常明显,长度也较剥落后的更长,最先应该是平直的,摩擦作用增强后矿物剥落.样品喷金时间为 100 s,金颗粒直径小于 10 nm.重量百分比、原子百分比和化合物百分比的单位均为“%”

3 讨论

3.1 岩石剪切表面纳米颗粒发育的差异性及其原因

通过以上观察,总结 3 种岩石剪切表面纳米特征(表 2),从野外观察到的矿物颗粒的细粒化、定向性、塑性流动等现象来比较岩石的变形程度,两种花岗质岩很明显都没有石榴石石英片岩变形程度高,花岗岩 SEM 图像显示的基本是单体且没有成层成带,主要处于纳米颗粒生长的粒化阶段(Sun *et al.*, 2008);花岗质片麻岩则可能处于团聚阶段,这是借由纳米材料学的观点,纳米棒或短柱状纳米符合一维尺度上小于 100 nm 的定义,因此,将图 5a、5b 中的短柱状体当做特殊的“单体”,则 SEM 下观测到的便是纳米“单体”(图 5c)、纳米“复体”(图 5a)以及“复体”组成的团块;相比之下,石榴石石英片岩发育的纳米构造都很典型地对应了纳米颗粒生长的各个阶段,说明变形程度高的岩石剪切表面发育的纳米结构和构造更丰富.

单从野外的线理产出比较岩石剪切表面纳米颗粒发育的程度,花岗岩没有条带状构造,后两者都有,石榴石石英片岩发育的纳米颗粒程度高于花岗岩,花岗质片麻岩则发育程度最低.其发育的短柱状或棒状结构的成因,在不考虑生物作用和地表作用

的影响下,一种可能是和原岩受到的力很小有关系,因远离应变集中带,变形程度降低,对应的纳米结构就不典型,如果石香肠结构在应力足够大时就会拉断,那么可推测这种结构反映了力的强度较低,因此不能拉断形成圆形的纳米结构;另一种可能成因是从岩石本身矿物颗粒大来看,这种非典型的纳米结构也许反映了岩体遭受了较强的岩浆热.Sammis and Ben-Zion(2008)的石英纳米颗粒的热稳定性实验得到,10 nm 的石英颗粒在 400 ℃ 时只需 10 a 就可膨胀成 100 nm;温度越高时间越短,1 000 ℃ 这个过程只需 0.1 s.由此推测,以温度为主因导致花岗质片麻岩纳米结构失稳而变大形成了图 5a 和 5b 的结构,伴随应力产生的岩浆热则形成了只在非应力方向增大的图 5c 的结构.所以,纳米颗粒的发育和产量与岩石剪切表面发育的线理没有必然联系,相似矿物成分的岩石其发育的纳米颗粒也会不一样.综上所述,岩石剪切面上的纳米颗粒发育同岩石本身所受应力正相关,应力越大,岩石剪切面上纳米颗粒和纳米结构、构造及其产量也越高,表现为靠近断层的花岗岩和石榴石石英片岩的剪切面纳米颗粒的高度发育,而后者比前者发育更好;花岗质片麻岩纳米颗粒的缺乏表明其可能是低应力和岩浆热共同作用的结果.

表 2 3 种岩石剪切表面纳米颗粒特征对比

Table 2 Comparison of nanoparticles from three kinds of rock surfaces

	花岗岩	石榴石石英片岩	花岗质片麻岩
纳米颗粒产量	中间	最多	最少
纳米颗粒主要发育阶段	粒化、变异	粒化、变异、团聚、再生都有	团聚?
颗粒聚集形态	紧密镶嵌、土堆状	层状、堆积状、条带状	堆积状为主
颗粒结构定向性	几乎不定向	主要显示定向性	几乎无定向
可能反映的受力情况	挤压和剪切	挤压和剪切	少量剪切

3.2 岩石剪切面上纳米颗粒形成机制探讨

目前对野外产出的纳米颗粒的成因观分 4 种：(1)粉末化(Sun *et al.*, 2008);(2)冲击载荷或亚临界裂纹生长(Sammisand Ben-Zion, 2008);(3)脆—韧性变形 (Siman-Tov *et al.*, 2013);(4)热分解 (Han *et al.*, 2007).

前人研究结果表明 1 μm 是研磨极限,此研究符合 Griffith 破裂准则,即任何粉碎过程都将不能产生小于这个极限的颗粒,取而代之的是塑性变形.建立纳米颗粒形成机制的难点就在于受制于研磨极限.剪切作用的粉末化成因是指大的岩石颗粒在剪切滑移作用下发生磨损、摩擦、研磨而使其破碎、粉末化、粒度减小.Sun *et al.* (2008)从电镜下观察到纳米粒子分布具层次性,其反映了纳米粒子的有序结构,据此可知岩石摩擦过程中能量耗散产生自反馈、自催化、自组织功能作用和形成有序结构,从而使得碾碎磨损过程远离平衡态,显示非线性的成因机制.从韧性剪切带这个特殊的环境考虑,剪切作用或者说粉碎碾磨对于纳米颗粒的形成肯定是有影响的,但具体怎么突破或绕开 Griffith 准则的限制还需进一步研究工作.

Sammis and Ben-Zion (2008)认为在挤压状态下由简单剪切产生的颗粒破碎无论多高的应变速率都无法形成纳米颗粒,而冲击载荷或者亚临界裂纹生长(subcritical crack growth)可以使得挤压应力下即使低应变也能产生纳米颗粒.冲击载荷下,流体应力比平常状态高出 50 倍,根据公式:

$$d_{\min} = 16 \left(\frac{CK_{\text{IC}}}{2\hat{\tau}_p} \right)^2,$$

式中:C 常量, K_{IC} 应力强度因子的临界值, $\hat{\tau}_p$ 流体应力, $d_{\min}$ 是最小粒径.最小粒径将降低 2 500 倍,从而可使最小粒径降低 2 500 倍,达到纳米尺寸.亚临界裂纹生长机制下的断层滑移速度比冲击载荷低很多,尽管裂纹的生长速度低于 10^{-9} m/s,但仍可以将 1 μm 的颗粒在 17 min 左右粉碎,通过前人花岗岩旋转剪切实验观察(Yund *et al.*, 1990),实验结

果产生的溶解颗粒的位错密度并不高于原始颗粒,于是排除了粉碎过程中显著的塑性变形,即解决了研磨极限的难题.结合研究区实际,冲击载荷现象似乎没有出现,而亚临界裂纹生长机制下的纳米颗粒通常都是 10 nm 以下,本区电镜下观察到的纳米粒径大多是 30~80 nm,因而不是很贴合.

对本区所有能谱分析显示, C 含量为 0~17.81%,而 Ca 含量为 0~18.92%,另外,对岩石滴定稀盐酸显示,在岩石剪切面滴定不起反应,仅在岩石的一些横截面方向有气泡产生.通过前人对碳酸盐断层的研究(Han *et al.*, 2007; Siman-Tov *et al.*, 2013)可知只有剪切面才符合这种特殊的横截面:通过剪切作用使得岩石之间的元素发生分异,碳酸盐或者碳酸盐的分解物向着剪切面发生富集,而远离剪切面或与之有交角的方向, Ca 和 C 的含量减少甚至为零.至此,似乎热分解说在物质上是可以成立的,但是,由于碳酸盐的含量在研究区并不丰富,将其称为碳酸盐断层尚为牵强.而本区硅含量相当高,由于层状硅酸盐比方解石分解的温度还低,纳米颗粒的产生可能和摩擦热引起的层状硅酸盐热分解有关(Han *et al.*, 2007).

Siman-Tov *et al.* (2013)对断层镜面(厚度 1 cm 左右、坚硬、光滑、有光泽的糜棱岩断层面)的研究认为纳米颗粒的形成分两步:(1)应变引起的晶内塑性变形产生机械双晶;(2)双晶由脆性变形破碎.由于双晶的形成导致其产生各向异性,Griffith 准则在此不适用,则在剪切作用下颗粒可进一步研磨形成纳米颗粒.在图 2 剖面图中的东侧花岗岩中,笔者发现了大小不一的构造透镜体、普遍的长石眼球状排列,和糜棱岩带中的透镜体、线理同一个方向,很明显是同一期的产物,说明此处也发生韧性剪切作用,但在花岗质片麻岩处并未发现典型的纳米颗粒(图 5);相比之下,在断层上盘的花岗岩中,其表面虽未发育矿物的定向性排列,显微镜下也并没有矿物的定向排列,只有石英的波状消光、长石的双晶显示其受到应力作用,但其 SEM 下可见典型的纳米颗粒(图 3),这进一

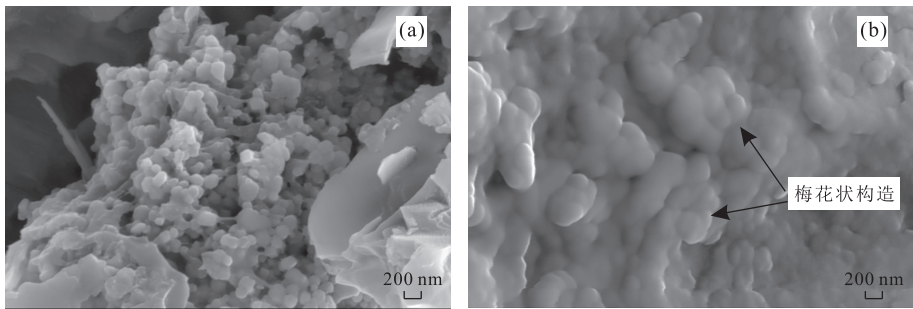


图 6 台湾太鲁阁地区岩石剪切表面 SEM 照片

Fig.6 The nano texture photos of rocks' shear surfaces from Taroko ductile shear zones under the SEM

a.副片麻岩表面 SEM 下观测到的纳米颗粒可能为粒化阶段产物;b.片麻岩表面 SEM 下观测到梅花状构造,对应纳米颗粒异化阶段

步说明纳米颗粒的发育和表层矿物的线理无关,而和断层的发育有关,而断层是脆性断裂,借用 Siman-Tov *et al.* (2013) 的脆—韧性成因来解释纳米颗粒形成:该区先在韧性剪切的作用下发育了宏观上的各种定向结构,同时产生显微镜下的机械双晶等塑性变形,接着断层形成,在脆性变形下矿物(尤其是形成双晶的长石)拉断,在剪切作用下进一步研磨靠近断层的岩石矿物形成典型的纳米颗粒,纳米颗粒远离断层,尽管发生了塑性变形但不能拉断、粉碎,因而形成了诸如图 3 中的各种结构构造。

综上所述,本区岩石剪切面上的纳米颗粒成因可能是在剪切作用下摩擦热引起层状硅酸盐的分解,但也有可能是断层控制下的脆—韧性变形机制。然而,每种机制都需要更多的观测和模拟实验来进一步验证。可以确定的是,剪切作用对天然产出的纳米颗粒的形成作用不容忽视。

3.3 大地构造意义

由前人研究(Sun *et al.*, 2008),在三大岩类的剪切表面都可以观察到纳米结构,而笔者对未变形的或只经历区域变质的岩石样品做 SEM 观测,都未发现纳米结构,因此,可以从纳米尺度来证明小妹露头就是一条剪切带。为了进行更大区域上的比对分析,笔者还对采自典型深大断裂带——台湾太鲁阁韧性剪切带里各类岩石样品进行了 SEM 观测(图 6),岩石样品分别来自受到构造变动的副片麻岩和片麻岩,实验在中山大学南校区地球科学与地质工程学院扫描电镜实验室完成,各项参数如图 6。图 6a 显示的颗粒细小,球度和圆度都较好,很有可能是对应了粒化阶段的的粒化颗粒;而图 6b 的梅花状构造,是典型的纳米构造,对应异化阶段,这些和小妹韧性剪切带都具有可比性。由于韧性剪切带本身具有多种形成环境,相似的纳米结构构造可能意味着其形成环境相似,这

对琼南缝合带向东进入台湾的走向有所启发,两者可能存在贯通性,即动力上的同源性,运动上的同时性,空间上的连接性(刘海龄等, 2015)。由于太鲁阁地区为深大断裂,对比本区,小妹韧性剪切带应当归属九所—陵水断裂带,因此,九所—陵水其东段可能并非完全东西走向,而是偏北东向延伸,比地球物理场资料给出的界限略往北移。

4 结论

(1)岩石剪切面上的纳米颗粒发育同岩石本身受到构造应力成正相关,所受应力程度越高,发育的纳米结构、构造越多;纳米颗粒的发育和宏观构造的定向性条带无因果关系,花岗质片麻岩表面纳米颗粒的缺乏表明其可能是低应力和岩浆热共同作用的产物。

(2)在突破 Griffith 准则下,认为本区韧性剪切带中纳米颗粒的形成机制可能是层状硅酸盐在剪切摩擦热下分解形成;也可能是塑性变形后发生的脆性破裂、粉碎并在剪切作用下进一步研磨形成。

(3)在小妹韧性剪切带分析基础上,与台湾太鲁阁深大断裂带中的韧性剪切带岩石样品 SEM 测试结果进行对比,发现其纳米颗粒的特征和小妹韧性剪切带具可比性,结合后者与区域深大断裂的关系,据此推测小妹韧性剪切带与九所—陵水深大断裂带密切相关,在区域构造归属上可能属于九所—陵水断裂带的一部分,因而得出九所—陵水断裂带界限可能比地球物理场给出的偏北。

致谢:此次实验在核资源与环境省部共建国家重点实验室培育基地(东华理工大学)完成,感谢刘成东主任的指导,还要感谢张雪芬博士在 SEM 实验操作过程中具体细致的指教。

References

- Collettini, C., Niemeijer, A., Viti, C., et al., 2009. Fault Zone Fabric and Fault Weakness. *Nature*, 462(7275): 907—910. doi:10.1038/nature08585
- Han, R., Hirose, T., Shimamoto, T., 2010. Strong Velocity Weakening and Powder Lubrication of Simulated Carbonate Faults at Seismic Slip Rates. *Journal of Geophysical Research*, 115 (B3): 181—192. doi: 10.1029/2008jb006136
- Han, R., Shimamoto, T., Hirose, T., et al., 2007. Ultralow Friction of Carbonate Faults Caused by Thermal Decomposition. *Science*, 316 (5826): 878—881. doi: 10.1126/science.1139763
- Hochella, M. F., 2006. The Case for Nanogeoscience. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1093(1): 108—122. doi:10.1196/annals.1382.008
- Keulen, N., Heilbronner, R., Stünitz, H., et al., 2007. Grain Size Distributions of Fault Rocks: A Comparison between Experimentally and Naturally Deformed Granitoids. *Journal of Structural Geology*, 29 (8): 1282—1300. doi:10.1016/j.jsg.2007.04.003
- Li, D. W., Chen, J. L., Chen, G. F., et al., 2014. Continental Seismotectonic System: Example from Qinghai-Tibet Plateau and Its Adjacent Areas. *Earth Science*, 39(12): 1763—1775 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. X., Fan, Y., Mo, W. M., et al., 2006. Characteristics of Arc Structure Zones in the Paleozoic Era of Hainan Island, and Its Geological Implications. *Mineral Resources and Geology*, 20(3): 232—236 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. X., Wei, C. X., Wang, Y. H., et al., 2013. Acorite U-Pb Chronology Characteristics and Its Geological Significance of Ductile Shear Deformable Belt in Southeastern Hainan Island, China. *Journal of Geomechanics*, 19(3): 267—274 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. L., Yan, P., Liu, Y. C., et al., 2006. The Existence and Significance of the Suture Zone in the North Margin of the South China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 51 (Suppl. II): 92—101 (in Chinese).
- Liu, H. L., Yao, Y. J., Shen, B. Y., et al., 2015. On Linkage of Western Boundary Faults of the South China Sea. *Earth Science*, 40(4): 615—632 (in Chinese with English abstract).
- Liu, H. L., Zheng, H. B., Wang, Y. L., et al., 2011. Basement of the South China Sea Area: Tracing the Tethyan Realm. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 85 (3): 637—655. doi:10.1111/j.1755—6724.2011.00457.x
- Sammis, C. G., Ben-Zion, Y., 2008. Mechanics of Grain-Size Reduction in Fault Zones. *Journal of Geophysical Research*, 113(B2): 115—124. doi:10.1029/2006jb004892
- Schleicher, A. M., van der Pluijm, B. A., Warr, L. N., 2010. Nanocoatings of Clay and Creep of the San Andreas Fault at Parkfield, California. *Geology*, 38(7): 667—670. doi:10.1130/g31091.1
- Siman-Tov, S., Aharonov, E., Sagy, A., et al., 2013. Nanograins Form Carbonate Fault Mirrors. *Geology*, 41 (6): 703—706. doi:10.1130/g34087.1
- South China Fe-Rich Scientific Research Team, Chinese Academy of Sciences, 1986. *Geology in Hainan and Geochemistry of Iron Ore in Shilu*. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Sun, Y., Ge, H. P., Lu, X. C., et al., 2003. Discovery and Analysis of the Ultra-Micro Nano Texture in the Ductile-Brittle Shear Zone. *Science in China (Series D)*, 33(7): 619—625 (in Chinese).
- Sun, Y., Shu, L. S., Lu, X. C., et al., 2008. Recent Progress in Studies on the Nano-Sized Particle Layer in Rock Shear Planes. *Progress in Natural Science*, 18(4): 367—373. doi:10.1016/j.pnsc.2007.12.001
- Wei, C. X., Li, S. X., Yun, P., et al., 2011. New Progresses in 1: 50 000 Regional Geological Survey of Diaoluoshan Area, Southeastern Hainan Island. *Geology and Mineral Resources of South China*, 27(4): 335—341 (in Chinese with English abstract).
- Yund, R. A., Blanpied, L., Weeks, D., et al., 1990. Observation and Interpretation of Microstructures in Experimental Fault Gouges. *Journal of Geophysical Research*, 95 (15): 589—602.

附中文参考文献

- 李德威, 陈继乐, 陈桂凡, 等, 2014. 大陆地震构造系统: 以青藏高原及邻区为例. *地球科学*, 39(12): 1763—1775.
- 李孙雄, 范渊, 莫位明, 等, 2006. 海南岛古生代弧状构造带的特征及其地质意义. *矿产与地质*, 20(3): 232—236.
- 李孙雄, 魏昌欣, 汪焰华, 等, 2013. 海南东南部韧性剪切变形带锆石 U-Pb 年代学特征及其地质意义. *地质力学学报*, 19(3): 267—274.
- 刘海龄, 阎贫, 刘迎春, 等, 2006. 南海北缘琼南缝合带的存在. *科学通报*, 51(增刊 2): 92—101.
- 刘海龄, 姚永坚, 沈宝云, 等, 2015. 南海西缘结合带的贯通性. *地球科学*, 40(4): 615—632.
- 孙岩, 葛和平, 陆现彩, 等, 2003. 韧性剪切带滑移叶片中超微磨粒结构的发现和分析. *中国科学(D辑)*, 33 (7): 619—625.
- 魏昌欣, 李孙雄, 云平, 等, 2011. 海南吊罗山一带 1: 5 万区调主要成果与进展. *华南地质与矿产*, 27(4): 335—341.
- 中国科学院华南富铁科学研究队, 1986. *海南岛地质与石碌铁矿地球化学*. 北京: 科学出版社.