

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

苏鲁地体南部南岗-高公岛韧性剪切带的 变形记录、组分迁移和体积亏损

戚学祥¹⁾, 许志琴¹⁾, 齐金忠²⁾

1) 中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室, 北京, 100037

2) 武警黄金研究所, 河北廊坊, 065000

内容提要: 南岗-高公岛韧性剪切带是一条自南东向北西斜向逆冲的岩片边界性构造带, 糜棱岩化作用强烈。韧性变形过程中, 岩石中的主要矿物长石、黑云母等发生了不同程度的分解或蚀变并导致组分迁移。其中, 活动组分的迁移是流体渗滤作用引起的, 不活动组分的变异是体积亏损造成的。通过对韧性剪切带内不同变形程度岩石主要地球化学组分的对比分析, 确立等比线斜率, 计算出初糜棱岩的体积亏损率约为17%, 糜棱岩的体积亏损率约为27%; 质量平衡计算结果及等比线图表明韧性剪切作用导致 SiO_2 流失量最大, 其次为 Al_2O_3 、 FeO 、 CaO 、 Na_2O 等都有不同程度的丢失, 表明它们具有较强的活动性, MgO 位于等比线上方, 属于带入组分。糜棱岩中的石英或长英质条带和团块是长石的钠黝帘石化、绢云母化和黑云母的绿泥石化等导致 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2O 、 CaO 、 FeO 等活动组分从岩石中析出迁移形成的。这种岩石体积亏损和组分迁移是部分难溶组分富集的重要机制, 对研究韧性剪切带中长英质条带和部分贵金属矿床的形成机制具有重要的指导作用。

关键词: 苏鲁地体; 韧性剪切带; 成分变异; 体积亏损

韧性剪切带是岩石在一定温压条件下发生连续塑性变形而形成的狭窄高剪切应变带。随着韧性剪切带内大量同构造长英质条带、石英脉和与其有密切成因联系的贵金属矿床, 尤其是 Au、Ag 等矿床的发现, 韧性剪切作用与成矿作用, 即韧性剪切作用与物质组分迁移的关系已逐渐引起学者们的关注, 并逐渐认识到韧性剪切作用不仅促使岩石矿物发生塑性变形、粒度变细的物理过程, 而且还伴随着长石等一些矿物的分解和石英、绢云母等一些次生矿物的生成, 导致岩石矿物组成和化学成分发生改变的化学过程 (Beach, 1976; Grant, 1986; O'Hara, 1988; O'Hara et al., 1989; Glaazner et al., 1991; Ague, 1991, 1997; Condie et al., 1996)。前期研究结果表明韧性剪切作用过程中常伴随有组分的变异和体积亏损, 导致组分变异的主要因素是变形前后体积的变化和变形过程中流体的渗滤作用 (Beach, 1976; Grant, 1986; O'Hara, 1988; O'Hara et al., 1989; Glaazner et al., 1991; 钟增球等, 1995; 刘德良等, 1996; 周建波等, 1999; 戚学祥等, 2005b), 体积亏损程度与剪切应变强度和流体相的性质有关 (O'Hara, 1988; O'Hara et al., 1989; Glaazner et al., 1991)。到目前为

止, 已报道的韧性剪切带体积的最高亏损率为60% (Kerrick et al., 1980; Bailey et al., 1994), 但也有一些韧性剪切带并未发生成分变异和体积亏损 (Bialek, 1999)。由此可见, 综合研究韧性剪切作用过程中岩石变形与变质、成分变异与体积变化、流体作用与组分迁移之间的关系, 对正确分析韧性剪切带形成的动力学过程及其与成矿作用的关系都有非常重要的意义。为此, 本文以苏鲁地体南部南岗-高公岛韧性剪切带为例, 探讨糜棱岩化过程中韧性剪切作用与岩石组分迁移和体积亏损之间的关系。

1 地质背景

苏鲁高压-超高压变质地体是扬子板块向华北板块下俯冲形成的大别-苏鲁高压-超高压变质带的重要组成部分 (Cong, 1996; Liou et al., 1996)。近年来, 随着中国大陆科学钻探工程 (CCSD) 的论证、实施和完成, 对苏鲁高压-超高压变质带内的榴辉岩、超基性岩、花岗片麻岩等的变质作用、同位素年代学及构造地质学等方面的研究也取得一系列进展 (刘福来等, 2003; Liu et al., 2004; 赵子福等, 2005; 张泽明等, 2005; 许志琴等, 2006), 特别是1:5万^①、1

注: 本文为国家“973”项目 (编号 2003CB716504) 和国家自然科学基金重大项目 (编号 NSFC40399140) 资助成果。

收稿日期: 2006-10-27; 改回日期: 2006-11-10; 责任编辑: 周健。

作者简介: 戚学祥, 男, 1963年生, 博士, 研究员, 构造地质学专业, 主要从事变质变形构造等方面的研究。

25万^②地质填图工作的完成为该构造格架的确立奠定了基础。许志琴等(2003)根据折返构造面理、变质岩石单元的分带特征及其与韧性剪切带的空间分布关系将苏鲁高压—超高压变质带自南东到北西依次划分出4个岩片:南苏鲁高压低温变质岩剪切叠覆岩片、南苏鲁高压中温变质岩剪切叠覆岩片、北苏鲁超高压变质表壳岩剪切叠覆岩片和北苏鲁超高压花岗质变质岩剪切叠覆岩片,各岩片之间由于后碰撞作用形成一系列自南东向北西方向的逆冲构造带(Xu et al., 2006),从而确立了该区的构造格局(图1)。其中,低温高压变质岩片展布于北东向的嘉山—响水断裂带和猴嘴—韩山韧性剪切带之间,北东端进入黄海。南岗—高公岛和墟沟—陡沟两条北东向韧性剪切带将其分为灌南、连云港和云台山3个构造岩片(图1)。低温高压变质岩片主要由变质火山岩构成(樊金涛,1995;戚学祥等,2005a),主要岩石类型有二云钠长石英片岩、二长石英片岩、绿帘钠长角闪片岩、白云绿帘阳起石片岩和蓝透闪石石榴钠长阳起石片岩等,并以出现蓝透闪石、冻兰闪石、文石和多硅白云母等高压低温矿物为特征,形成温压条件为360~400℃,0.7~0.85 GPa(邱海峻等,2002,2003;齐金忠等,2005)。

2 南岗—高公岛韧性剪切带变形记录

南岗—高公岛韧性剪切带从灌云向南西出图幅,向北东延伸至高公岛后倾没于黄海,宽约500 m,呈北东—南西走向,倾向南东。韧性剪切带分布于云台群变质火山岩中(图版 I-1),上、下盘岩石类型和岩石学特征一致,剪切带内的岩石除变形作用明显外,其地质特征与上下盘地层相同。剪切带内糜棱面理(图版 I-5)和拉伸线理发育(图版 I-4)。糜棱面理走向55°~83°(SE),倾角25°~45°,拉伸线理倾伏向集中在105°~120°,倾伏角:20°~35°。变形岩石中不对称旋转碎斑(图版 I-2)、S-C 组构及不对称褶皱等构造(图版 I-3)指示韧性剪切带上盘自南东向北西斜向逆冲的运动性质。

韧性剪切带在高公岛一带完全展布于云台群低温高压变质石英角闪岩(戚学祥等,2005a)中,其主要岩石类型为二长石英片岩及呈团块状或条带状包裹于其中的绿帘阳起石片岩和蓝透闪石石榴钠长阳起石片岩(图版 I-2、3)。根据岩石变形程度将构造岩分为二长石英片岩(图版 I-1、6)、糜棱岩化二长石英片岩(初糜棱岩)(图版-2、3、7)和二长石英质糜棱岩(糜棱岩)(图版 I-4、5、8)。从南东往北西,即从

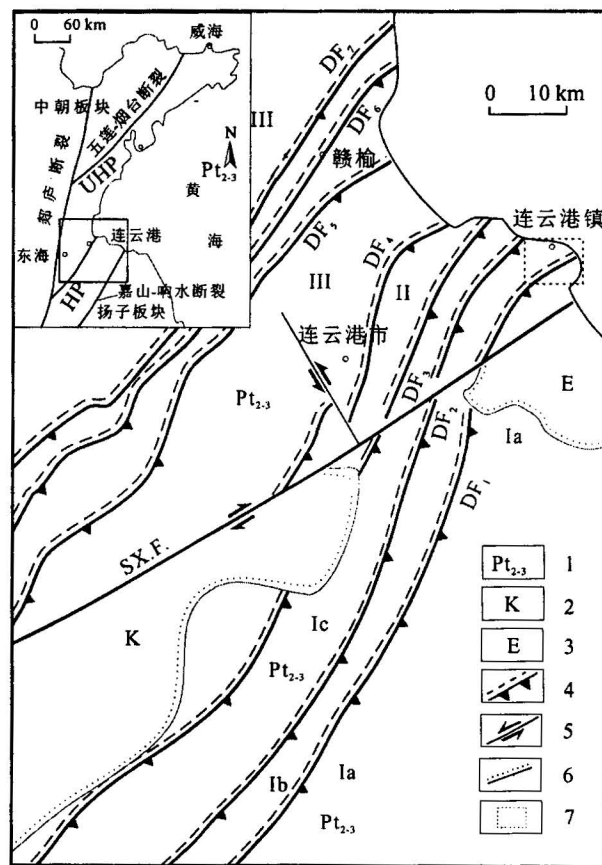


图1 南岗—高公岛韧性剪切带区域地质略图

(据许志琴等,2003;齐金忠等,2005修编)

Fig. 1 Geological sketch map of Nangang—Gaogongdao ductile shear zone(modified from Xu et al., 2003 and Qi Jinzhong et al., 2005)

1—中、新元古代变质岩;2—白垩纪陆相碎屑岩;3—古近纪陆相沉积物;4—逆冲型韧性剪切带;5—走滑断层;6—地层不整合面;7—研究区; I—南苏鲁高压低温变质岩剪切叠覆岩片; I a—灌南剪切构造岩片; I b—连云港剪切构造岩片; I c—云台山剪切构造岩片; II—南苏鲁高压中温变质岩剪切叠覆岩片; III—北苏鲁超高压变质表壳岩剪切叠覆岩片
1—Meso—Neoproterozoic metamorphic rocks; 2—Cretaceous terrestrial facies clasticite; 3—Paleogene terrestrial sedimentary; 4—thrusting ductile shear zone; 5—slip fault; 6—unconformity; 7—studied area; I—tectonic imbricate shear slice of high pressure—low temperature metamorphic rocks in the south Sulu; I a—Guannan tectonic shear slice; I b—Lianyungang tectonic shear slice; I c—Yuntaishan tectonic shear slice; II—tectonic imbricate shear slice of high pressure—middle temperature metamorphic rocks in the south Sulu; III—tectonic imbricate shear slice of ultrahigh pressure metamorphic supracrustal rocks in the north Sulu

上盘往剪切带中部,岩石的韧性变形强度逐渐增强,岩石类型由二长石英片岩到糜棱岩化二长石英片岩(初糜棱岩)过渡到二长石英质糜棱岩甚至超糜棱岩

(图版 I)。

二长石英片岩呈灰白色,块状构造,似斑状结构。主要矿物成分为钠长石(28%±)、微斜长石(18%±)、条纹长石(15%±)、石英(30%±),次要矿物为多硅白云母(3%±)和黑云母(5%±),副矿物有磁铁矿、黄铁矿、磷灰石等,偶见石榴子石、绿帘石、褐帘石、蓝透闪石、冻蓝闪石、阳起石及榍石、文石、金红石等(2%±),变质程度达绿片岩相。部分钠长石、微斜长石粒度较粗,形态各异,边部呈港湾状、不规则状、长条状,具有火山晶屑的特征,并具有一定程度的绢云母化;长英质塑性岩屑多已发生脱玻化,具球粒结构,呈透镜状、团块状、大小不等的集合体存在;黑云母有一定程度的绿泥石化,部分黄铁矿、磁铁矿发生赤铁矿化。在该类岩石中常见很多定向排列、形态多样、轮廓分明、边界清晰、大小约2 cm×10 cm的浅色长英质团块或黑灰色绿泥石阳起石质团块,其长轴与岩石面理一致(图版 I-1),展示出明显的火山岩特征,反映其原岩的火山成因性质,是新元古代中酸性火山活动的产物(樊金涛,1995;戚学祥等,2005a)。

糜棱岩化二长石英片岩(初糜棱岩)呈灰白色,糜棱结构,面理构造发育。主要矿物有钠长石、微斜长石、条纹长石和石英,次要矿物为白云母和黑云母,副矿物主要有磁铁矿、赤铁矿、磷灰石和锆石等。长石一部分构成旋转碎斑,少量细粒化构成基质,且都有一定程度的钠黝帘石化和绢云母化,石英呈细粒状或微粒状围绕长石分布或构成长石碎斑的尾部,少量呈条带状或团块状分布(图版 I-2、3、7)。除岩石发生一定程度的变形外,其岩石学特征和矿物组成与二长石英片岩基本一致,展示其原岩的一致性。

二长石英质糜棱岩(糜棱岩)灰白色,糜棱结构,糜棱面理和拉伸线理发育。主要矿物有钠长石、微斜长石、条纹长石和石英,次要矿物为白云母和黑云母,副矿物主要有磁铁矿、赤铁矿、磷灰石和锆石等。长石少量构成旋转碎斑,大部分细粒化,与石英等一起组成基质,或构成长石碎斑的尾部,或构成长石核幔结构的幔部,钠黝帘石化和绢云母化作用明显。石英一部分呈细粒状或隐晶质分布,与云母等鳞片状矿物相间分布,构成糜棱面理和拉伸线理,一部分呈条带状或斑点状顺面理产出(图版 I-4、5、8)。其岩石学特征和矿物组成与二长石英片岩相似,只是矿物的变形强度较大,它们可能都是新元古代中酸性火山岩变质后的产物。

总体来看,韧性剪切带内构造岩的矿物组成与上下盘岩石相同,其差别仅在于变形程度不同,说明剪切带内的构造岩是云台群变质火山岩经韧性剪切作用而发生变形变质的产物,其原岩与上下盘岩石是相同的。

3 岩石地球化学组成

在野外和镜下鉴定工作的基础上,选择具有代表性的初糜棱岩和糜棱岩样品进行地球化学分析。测试工作在中国地质科学院岩矿测试中心完成,常量元素用X-射线荧光光谱仪测定,并用等离子光谱法进行验证,总量误差<1%,测试结果见表1。

二长石英片岩岩石成分相对稳定,SiO₂含量变化于72.94%~78.00%,平均75.45%;TFeO为1.13%~2.95%,平均1.84%;Al₂O₃在10.71%~13.78%区间内波动,平均12.33%;TiO₂为0.12%~0.27%,平均0.19%;A/NK在1.01~1.64之间,平均1.21,A/CNK值一般在1.0~1.34之间,个别达到1.64;平均1.19,显示出过铝质特性,Na₂O+K₂O值较高,从8.07%到9.28%,平均8.46%,Na₂O/K₂O值都小于1.0,可能与岩石中多硅白云母有关。A·R变化于3.73~6.64,与SiO₂呈正相关关系,在A·R-SiO₂图解上位于碱性岩区,说明该类岩石原岩为过铝质碱性流纹质火山岩-石英角斑岩(戚学祥等,2005a)。CIPW标准矿物计算结果,钾长石含量为24.88%~28.84%,平均26.25%;钠长石含量为30.68%~37.90%,平均34.04%;石英含量为26.78%~37.78%,平均33.34%。特点是钠长石含量远高于钾长石含量,钙长石含量很低(表1)。

初糜棱岩和糜棱岩中SiO₂含量变化于76.76%~79.37%,TFeO为0.72%~2.43%,Al₂O₃在9.79%~12.27%区间内波动,A/NK和A/CNK值在1.0附近,Na₂O+K₂O值较高,从7.52%到8.83%,Na₂O/K₂O值都小于1.0,TiO₂含量为0.16%~0.34%,A·R变化于4.9~18.31(表1),与SiO₂呈正相关关系,在A·R-SiO₂图解上位于碱性岩区。

总体来看,随着糜棱岩化强度的增加,从二长石英片岩到初糜棱岩再到糜棱岩,TiO₂和SiO₂含量逐渐增高,Al₂O₃、FeO、MnO、MgO、CaO和P₂O₅含量逐渐降低,A/NK和A/CNK明显减小,从富铝质向铝含量正常演变,烧失量有所降低,但规律性不明显,这是由岩石中含水矿物(白云母、黑云母、绿泥石等)及黄铁矿和有机质等含量的变化引起的。此外,

岩石中的主量元素 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2O 和 K_2O 与 TiO_2 之比值对 TiO_2 含量的协变图清楚的展示出明显的线性关系。其中, $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 与 TiO_2 的负相关性最强, 这与他们含量的规律性变化有关。CIPW 标准矿物亦有石英和钾长石含量逐渐

增加, 钠长石含量逐渐降低的变化趋势。结合岩石中长石的钠黝帘石化、绢云母化、黑云母的绿泥石化和石英条带的出现等特征分析, 认为糜棱岩化过程中有流体的参与。

表 1 南岗-高公岛韧性剪切带岩石地球化学组成(%)及计算参数

Table 1 Chemical compositions (%) of rocks and their calculatal parameters in Nangang—Gaogongdao ductile shear zone

岩石类型	二长石英片岩(变质石英角斑岩) ^①										初糜棱岩			糜棱岩			
样品	H-2	H-6	H-8	H-16	H-17	H-19	H-21	H-28	H-29	平均	Z-108	Z-122	平均	Z-129	Z-132	Z-133	平均
SiO_2	75.16	75.68	78.00	77.26	74.66	74.56	76.92	72.94	73.87	75.45	77.96	76.76	77.36	74.98	79.37	78.90	77.75
TiO_2	0.20	0.13	0.12	0.19	0.25	0.17	0.15	0.27	0.22	0.19	0.16	0.30	0.23	0.34	0.25	0.18	0.26
Al_2O_3	13.09	12.70	11.31	10.71	12.28	12.53	11.27	13.78	13.27	12.33	10.84	10.78	10.81	12.27	9.79	11.28	11.11
Fe_2O_3	0.98	0.68	1.00	2.54	1.50	0.52	1.98	1.07	0.79	1.23	1.70	1.84	1.77	1.25	0.25	0.76	0.75
FeO	0.74	0.45	0.35	0.41	0.48	1.00	0.42	0.69	0.99	0.61	0.48	0.59	0.54	0.63	0.47	0.32	0.47
MnO	0.03	0.04	0.06	0.08	0.02	0.12	0.63	0.07	0.09	0.13	0.07	0.03	0.05	0.08	0.03	0.05	0.05
MgO	0.03	0.16	0.07	0.04	0.13	0.29	0.08	0.30	0.29	0.15	0.46	0.33	0.40	0.79	0.44	0.57	0.60
CaO	0.07	0.27	0.12	0.22	0.24	0.69	0.21	0.31	0.93	0.34	0.24	0.32	0.28	0.24	0.06	0.10	0.13
Na_2O	3.87	3.84	3.67	3.69	4.23	3.73	3.85	4.48	3.98	3.93	2.98	3.40	3.19	3.54	0.56	3.48	2.53
K_2O	4.54	4.88	4.68	4.38	4.38	4.63	4.28	4.80	4.21	4.53	5.11	4.94	5.03	5.08	8.27	4.04	5.80
P_2O_5	0.09	0.02	0.01	0.01	0.03	0.04	0.03	0.05	0.08	0.04	0.01	0.02	0.02	0.04	0.02	0.01	0.02
烧失量	0.66	0.42	0.25	0.76	0.76	0.92	0.11	0.94	1.23	0.67	0.27	0.07	0.17	0.58	0.21	0.52	0.44
total	99.5	99.3	99.6	100.3	99.0	99.2	99.9	99.7	99.9	99.60	100.3	99.4	99.83	99.5	99.7	100.2	99.82
A/NK	1.64	1.37	1.25	1.12	1.39	1.01	1.01	1.01	1.05	1.21	1.04	0.99	1.01	1.08	0.99	1.12	1.06
A/CNK	1.59	1.34	1.22	1.29	1.30	0.93	0.99	1.01	1.04	1.19	1.00	0.94	0.97	1.04	0.98	1.10	1.04
A•R	4.54	5.10	6.42	6.64	5.40	4.44	5.85	4.86	3.73	5.02	6.41	7.04	6.73	5.43	18.31	4.90	9.55
比重(g/cm^3)	2.60	2.62	2.64	2.66	2.65	2.65	2.67	2.63	2.64	2.64	2.66	2.66	2.66	2.66	2.63	2.65	2.65

注:① 数据来源于江苏省地质矿产调查研究院^②,其他为本文。

4 体积亏损和组分迁移

4.1 体积亏损

O'Hara(1988)在研究韧性剪切带糜棱岩化过程中岩石体积的亏损程度时提出等比分析法,即以糜棱岩化岩石组分为横坐标,以糜棱岩原岩组分为纵坐标作图绘制出等比线图,确定糜棱岩化过程中各组分的迁移量。绘制等比线图的基本条件是确定糜棱岩的原岩和不活动组分。

南岗-高公岛韧性剪切带东北部展布于连云港云台山一带,其寄主岩石为云台群变质石英角斑岩,是在900~700 Ma 期间扬子地块内部陆内裂谷形成过程中伴随的火山活动产物(戚学祥等,2005a)。野外实地观察和室内镜下鉴定结果表明,分布在云台山地区的变质石英角斑岩岩性相对稳定,成分相对均一;从地球化学分析结果来看,糜棱岩中的主要岩石组分与变质石英角斑岩组分相近,CIPW 标准矿物计算结果展示出其主要矿物含量虽存在一定差异,但总体上是一致的(表1),及韧性剪切带上、下盘

岩石都为变质石英角斑岩—二长石英片岩,说明糜棱岩的原岩就是变质的石英角斑岩—二长石英片岩。对于等比线的确立,通常是选定一种或两种惰性组分或元素作为参照要素,以该组分投在等比线图上的点和坐标轴交点连线作为等比线。在常量元素中 Ti、Al 是相对稳定的组分(Ague,1991;Condie et al.,1996;Klammer,1997),但 Al 在变形变质作用过程中仍有一定的活动性(Ague,1991;唐红峰等,2000),尤其是长石绢云母化过程中有部分析出(O'Hara,1988;O'Hara et al.,1989)。Ti 在岩石中的含量虽低,但其活动性最小,在天然热液体系中的溶解度仅为5~50 $\mu\text{g}/\text{g}$,其总分配系数值小于0.0015,在流体渗滤过程中是相对稳定的(刘德良等,1996),在岩石变形变质过程中的活动性相当有限,是一个理想的参照元素(O'Hara,1988;Ague,1991,1997;钟增球等,1995;Condie et al.,1996;刘德良等,1996;Klammer,1997;唐红峰等,2000)。P 是高离子位、小离子场的高场强元素,在流体活动过程中是稳定的非活动性元素(李昌年,1992),通常可以作为参照元

素之一。为此,本文选择 TiO_2 和 P_2O_5 作为参照组分。在以 TiO_2 和 P_2O_5 为参照系确定的等比线图(图2)可以看出,在初糜棱岩等比线图(图2a)中, MgO 、 TFeO 和 Fe_2O_3 位于等比线上方,其含量相对增加; SiO_2 、 Al_2O_3 、 Na_2O 和 K_2O 落在等比线之下,反映它们有所迁出; TiO_2 、 CaO 、 MnO 、 P_2O_5 和 FeO 位于等比线附近,在韧性剪切变形初期相对稳定;等比线斜率为 1.27。在糜棱岩等比线图(图2b)中, MgO 和 K_2O 位于等比线上方,反映它们在糜棱岩化过程中含量相对增加,与糜棱岩或超糜棱岩中强绢云母化作用相对应,展示出韧性剪切变形过程中有流体组分的带入; Al_2O_3 、 SiO_2 、 CaO 、 Fe_2O_3 、 FeO 和 Na_2O 位

于等比线下方,展示出它们在糜棱岩化过程中属于迁出类组分, MnO 、 TiO_2 、 CaO 、 P_2O_5 位于等比线附近,等比线斜率为 1.38。

不活动组分在韧性变形过程中不发生迁移,其组分的变化是原岩在糜棱岩化过程中体积亏损所致,活动组分的变异是由流体渗滤引起的(Grant, 1986; O' Hara, 1988; Condie et al., 1996; Baalen, 1993)。根据体积亏损公式: $C_i/C_0 = 1/(1-V)$, 其中 C_i/C_0 为等比线斜率, V 为体积亏损率,以等比线斜率为 1.27, 计算出初糜棱岩的体积亏损率约为 21%; 以等比线斜率为 1.38, 计算出糜棱岩的体积亏损率约为 28%。

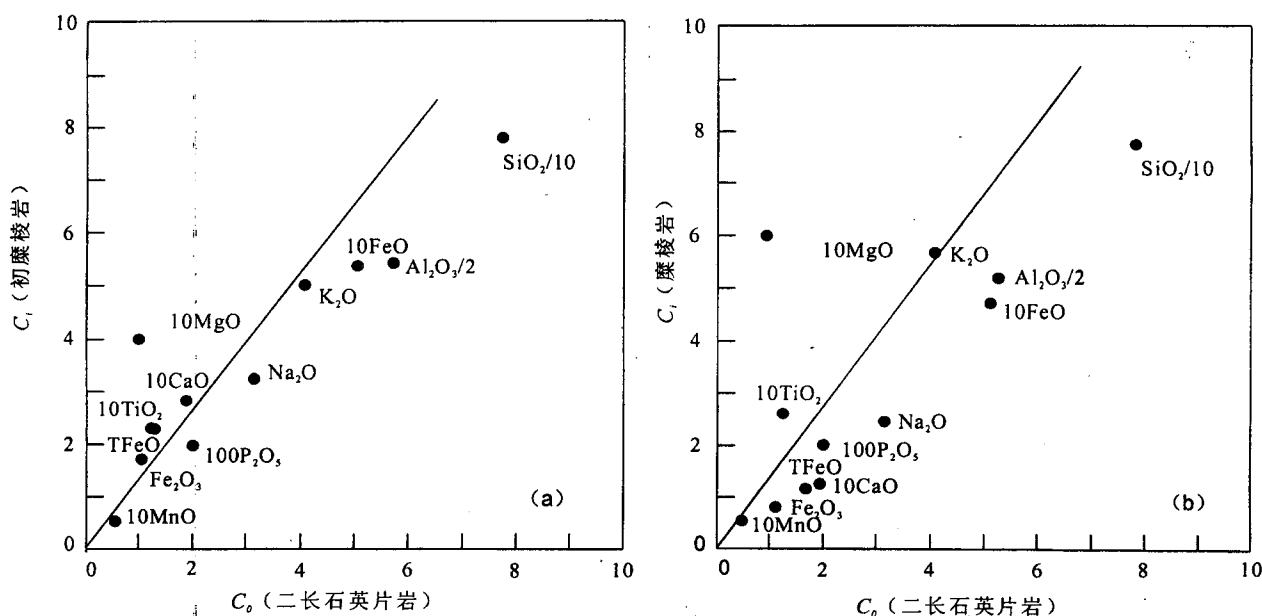


图 2 初糜棱岩(a)和糜棱岩(b)对应二长石英片岩的等比线图

Fig. 2 Isocon diagram of promylonite (a) and mylonite (b) verse feldspar quartz schist

以未发生构造变形的片岩为横坐标,分别以糜棱岩化片岩(a)和糜棱岩(b)为纵坐标,以 TiO_2 和 P_2O_5 两种稳定组分为参照系确定等比线,在等比线上方的组分反映其含量相对增加,落在等比线之下的说明它们在糜棱岩化过程中属于迁出类组分,位于等比线附近的为相对稳定组分

The isocon lines are determined in the isocon diagram of promylonite (a) and mylonite (b) verse feldspar quartz schist by TiO_2 and P_2O_5 content, respectively. The components above the isocon lines show that are imported from fluid, the components under the isocon lines show they are exported from schist, and the components near isocon line are stable during mylonitization

4.2 岩石质量平衡

糜棱岩化后岩石中各组分的变异可根据公式: $X_n = 100[F_v(\rho_i/\rho_0)C_n^i - C_n^0]$ (Gresens, 1967), 其中 X_n 为组分(n)的得失率; F_v 为体积因子,即亏损后的体积与亏损前的体积之比; ρ_i 和 ρ_0 分别为糜棱岩化前后岩石的密度; C_n^i 和 C_n^0 分别为 n 组分糜棱岩化前后的质量分数(%)。

设原岩重为 100 g, 则可得下列质量平衡方

程:

初糜棱岩: 100g 二长石英片岩 - 15.44g SiO_2 - 2.75g Al_2O_3 - 0.08g FeO - 0.01g MnO - 0.56g Na_2O - 0.03g K_2O - 0.01g P_2O_5 = 0.30g Fe_2O_3 + 0.23g MgO + 0.06g TiO_2 + 0.03g CaO + 81.75g 初糜棱岩。

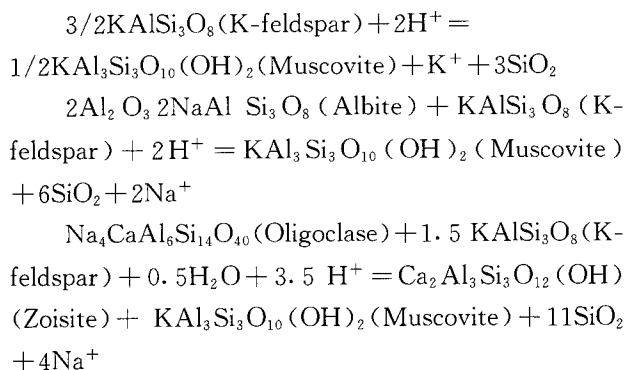
糜棱岩: 100g 二长石英片岩 - 20.71g SiO_2 - 3.30g Al_2O_3 - 0.58g Fe_2O_3 - 0.16g FeO - 0.01g

$\text{MnO} - 0.09\text{g CaO} - 1.27\text{g Na}_2\text{O} - 0.00\text{g P}_2\text{O}_5 = 0.35\text{g MgO} + 0.18\text{g K}_2\text{O} + 0.06\text{TiO}_2 + 74.46\text{g 糜棱岩}$ 。

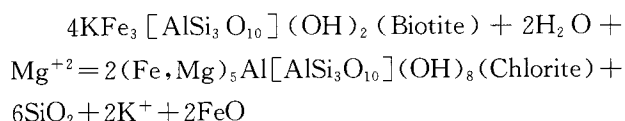
上述两个方程表明,在初糜棱岩中 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Na_2O 也有不同程度的丢失,其中 SiO_2 大量迁移,其迁移量占总迁移量的 70%,其次为 Al_2O_3 ,其迁移量约占总迁移量的 20%, MgO 、 Fe_2O_3 含量有所增加, FeO 、 MnO 、 TiO_2 、 P_2O_5 和 CaO 含量变化很小;在糜棱岩中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 FeO 和 Na_2O 有明显的亏损, MnO 、 TiO_2 、 CaO 、 P_2O_5 含量没有明显的变化, MgO 和 K_2O 相对增加,与等比线图所标示的结果一致。

5 讨论与结论

南岗-高公岛韧性剪切带糜棱岩中经常发育一些规模不等、顺糜棱面理分布的同构造长英质条带,在显微镜下常常可以看到糜棱岩中的长石存在程度不同的钠黝帘石化、绢云母化及围绕碎斑分布或构成碎斑结晶尾的长英质条带。此外,岩石中的黑云母大多蚀变为绿泥石(图版 1-2,3)。这些现象说明岩石在糜棱岩化条件下,部分矿物发生了分解或蚀变。反应式(O'Hara,1988;O'Hara et al.,1989):



此外,黑云母绿泥石化过程的反应式为:



从这些反应式中不难看出,韧性剪切作用不仅导致矿物发生塑性变形和细粒化,而且还有新的矿物生成,尤其是 SiO_2 的析出和 Al_2O_3 及 Na^+ 等从矿物中分解出来,为糜棱岩中石英或长英质条带的形成提供了物质来源,同时也说明糜棱岩化过程中有流体的参与。流体的渗滤作用一方面使长石、云母等矿物蚀变分解而形成新矿物,另一方面又使岩石中的活动组分发生活化迁移,导致岩石体积亏损。

韧性剪切带形成于中深构造层次。在这种环境

下,岩石内流体可以发生对流渗滤,使岩石中的活动组分活化进入流体,导致岩石体积亏损(O'Hara,1988;O'Hara et al.,1989;Condie et al.,1996)。同时,由于糜棱岩化作用使岩石密度加大(O'Hara,1988;O'Hara et al.,1989;Srivastava et al.,1995),导致体积亏损,促使部分惰性组分(Ti 等)相对富集。此外,糜棱岩化过程中形成的富硅流体具有类似熔体的性质,可以促使贵金属组分(Au、Ag 等)活化迁移(Wilkinson et al.,1996;唐红峰等,2000),实验研究证明 $\text{Au}(\text{H}_3\text{SiO}_4)$ 络合物在碱性富硅条件下相对稳定(樊文苓等,1995),表明韧性剪切作用过程中体积亏损和矿物分解产生的富硅流体等为 Au、Ag 等贵金属组分的富集成矿提供了极为有利的条件。韧性剪切带中的浸染型或石英脉型 Au、Ag 等矿床(湖南紫云山金矿、云南哀老山金矿等)的形成可能与韧性剪切作用有关。由此可见,韧性剪切带体积亏损和组分迁移是部分矿床成矿作用的一个重要组成部分,利用剪切带中组分迁移程度估算金属矿床富集量具有很重要的实际意义。

总体来看,南岗-高公岛韧性剪切带是一条自南东向北西斜向逆冲的岩片边界性构造带,糜棱岩化作用强,构造指向清晰。韧性变形过程中,岩石体积发生了亏损,其中初糜棱岩体积亏损 21%,糜棱岩体积亏损 28%;岩石中的组分发生了变异,长石的钠黝帘石化、绢云母化和黑云母的绿泥石化等导致 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Na_2O 等活动组分从岩石中析出迁移,形成石英或长英质条带和团块。活动组分的迁移是流体渗滤作用引起的,不活动组分的变异是体积亏损造成的。质量平衡计算结果及图 2 表明韧性剪切作用导致 SiO_2 流失量最大,其次为 Al_2O_3 和 Na_2O ,反映它们具有较强的活动性,从二长石英片岩到糜棱岩化二长石英片岩, MgO 、 Fe_2O_3 和 TFeO 位于等比线上方,含量相对增加,属于带入组分, MnO 、 TiO_2 、 CaO 、 P_2O_5 分布于等比线附近,含量变化范围很小,展示其相对稳定性。当二长石英片岩转化为糜棱岩时,岩石中的 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Na_2O 组分都发生不同程度的亏损, MgO 和 K_2O 含量有所增加,而 MnO 、 TiO_2 、 CaO 和 P_2O_5 位于等比线附近,展示出相对的平衡。众所周知, K_2O 是强活动组分,在钾长石绢云母化过程中极易活化进入流体而被带出,而本计算结果却显示其随着糜棱岩化的增强而有所富集,其原因可能是在糜棱岩化初期长石绢云母化过程中释放出的 K^+ 一部分形成绢云母等新矿物,一部分进入流体形成含 K^+ 流体,随着糜棱岩化作用的增强,

这部分 K^+ 与岩石中的其他矿物发生反应形成绢云母等含 K 矿物或使钠长石发生一定程度的钾化造成的, 其富集机理有待于进一步深入研究。总体来看, 韧性剪切过程中岩石体积亏损和组分迁移是部分难溶组分富集的重要机制, 对研究长英质条带和部分金属矿床的形成机理具有重要的借鉴意义。

注 释

- ① 江苏省地质矿产调查研究院. 1994. 墩尚幅、连云港镇幅、连云港幅和东辛农场幅 1:50000 地质图。
- ② 许志琴, 张泽明, 刘福来, 等. 2005. 连云港幅 1:250000 地质图。

参 考 文 献

- 樊金涛. 1995. 苏北海州群细碧角闪岩系的成因. 中国区域地质, (2): 118~124.
- 樊文苓, 王声远, 田戈夫. 1995. 金在碱性富硅热液中溶解和迁移的实验研究. 矿物学报, 15(2): 176~184.
- 李昌年. 1992. 火成岩微量元素岩石学. 武汉: 中国地质大学出版社, 9~117.
- 刘德良, 杨晓勇, 杨海涛, 等. 1996. 郯庐断裂带南段榭山韧性剪切带糜棱岩的变形条件和组分迁移系. 岩石学报, 12(4): 573~588.
- 刘福来, 许志琴, 宋彪. 2003. 苏鲁地体超高压和退变质时代的厘定: 来自片麻岩锆石微区 SHRIMP U-Pb 定年的证据. 地质学报, 77: 69~84.
- 戚学祥, 许志琴, 齐金忠. 2005a. 苏鲁地体南部高压变质带岩石地球化学特征及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 24(5): 476~484.
- 戚学祥, 李海兵, 吴才来, 等. 2005b. 韧性剪切变形对岩石地球化学行为的制约——以北阿尔金巴什考供韧性剪切带为例. 地质通报, 24(3): 252~257.
- 齐金忠, 戚学祥, 陈方远. 2005. 南苏鲁高压变质带南岗-高公岛韧性剪切带特征及 EBSD 石英组构分析. 中国地质, 32(2): 287~298.
- 邱海峻, 许志琴, 张泽明, 等. 2002. 苏北高压变质带绿片岩中石榴石内文石包裹体的发现. 地质通报, 21(10): 617~624.
- 邱海峻, 许志琴, 张建新, 等. 2003. 苏北连云港地区蓝闪绿片岩相岩块的发现. 岩石矿物学杂志, 22(1): 34~48.
- 唐红峰, 刘丛强, 谢国刚. 2000. 区域变质作用中岩石的质量迁移和元素活动——以庐山双桥山群变泥质岩系为例. 地质论评, 46(3): 245~254.
- 许志琴, 张泽明, 刘福来, 等. 2003. 苏鲁高压—超高压变质带的折返构造及折返机制. 地质学报, 77(4): 433~450.
- 许志琴, 戚学祥, 杨经绥, 等. 2006. 苏鲁高压—超高压变质体的陆-陆碰撞深俯冲剥蚀模式. 地球科学, 31(4): 427~436.
- 张泽明, 张金凤, 游振东, 等. 2005. 苏鲁造山带超高压变质作用及其 P - T - t 轨迹. 岩石学报, 21(2): 257~270.
- 赵子福, 郑永飞, 陈斌, 等. 2005. 中国大陆科学钻探工程主孔 (734~933 m) 榴辉岩和片麻岩元素及 Sr-Nd 同位素地球化学研究. 岩石学报, 21(2): 325~328.
- 钟增球, 游振东. 1995. 剪切带的成分变异及体积亏损——以河台剪切带为例. 科学通报, 40(10): 913~916.
- 周建波, 胡克, 洪景鹏. 1999. 稀土元素在韧性剪切带体积亏损研究中的应用——以胶南造山带构造岩为例. 地质论评, 45(3): 241~246.
- Ague J J. 1991. Evidence for major mass transfer and volume strain during regional metamorphism of pelites. *Geology*, 19: 855~858.
- Ague J J. 1997. Compositional variations in metamorphosed sediments of the Littleton Formation, New Hampshire. *Am. J. Sci.*, 297: 440~449.
- Bailey C M, Simpson C, De Paor D G. 1994. Volume loss and tectonic flattening strain in granitic mylonites from the Blue Ridge province, central Appalachians. *J. Struct. Geol.*, 16: 1403~1416.
- Beach A. 1976. The interrelations of fluid transport, deformation, geochemistry and heat flow in early Proterozoic shear zones in the Lewisian complex. *Philosophical Transaction of the Royal Society of London*, 280: 569~604.
- Bialek D. 1999. Chemical changes associated with deformation of granites under greenschist facies conditions: the example of the Zawidow Granodiorite (SE Lusatian Granodiorite Complex, Poland). *Tectonophysics*, 303: 251~261.
- Condie K C, Sinha A K. 1996. Rare earth and other trace element mobility during mylonitization: a comparison of the Brevard and Hope Valley shear zones in the Appalachian Mountains, USA. *J. Metamorphic Geol.*, 14: 213~226.
- Cong B L. 1996. Ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabieshan—Sulu region of China. Beijing: Science Press, 220~224.
- Fan Jintao. 1995. The petrogenesis of the spilite-keratophyre sequence of the Haizhou Group in northern Jiangsu. *Geology in China*, (2): 118~124 (in Chinese with English abstract).
- Fan Wenlin, Wang Shengyuan, Tian Gefu. 1995. Study on the experiment of the resolution and migration for gold in Si-riching alkaline hydrothermal solution. *Acta Mineralogica Sinica*, 15(2): 176~184 (in Chinese with English abstract).
- Glaazner A F, Bartley J M. 1991. Volume loss, fluid flow and state of strains in extensional mylonites from the central Mojave Desert, California. *J. Struct. Geol.*, 13(5): 587~594.
- Grant J A. 1986. The isocon diagram—A simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration. *Econ. Geol.*, 81: 1976~1982.
- Gresens R L. 1967. Composition-volume relationships of metasomatism. *Chem. Geol.*, 2: 47~55.
- Kerrick R, Allison I, Barenett R L, Moss S, et al. 1980. Microstructural and chemical transformations accompanying deformation of granite in a shear zone at Mierville, Switzerland; with implications for stress corrosion cracking and superplastic flow. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 73: 221~242.
- Klammer D. 1997. Mass change during extreme acide-sulphate hydrothermal alteration of a Tertiary latite, Styria, Austria. *Chem. Geol.*, 141: 33~48.
- Li Changnian. 1992. Petrology of the trace elements in igneous rocks. Wuhan: Chinese University of Geosciences Publishing House, 9~117.
- Liou J G, Zhang R Y, Eide E A, et al. 1996. Metamorphism and tectonics of high-pressure and ultrahigh-pressure belts in the Dabie—Sulu region, China. In: Harrison M T, Yin A, eds. *The Tectonics of Asia*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 330~344.
- Liu Deliang, Yang Xiaoyong, Yang Haitao, et al. 1996. The deformational condition and component migration of mylonites in Fuchashan ductile shear zones in the southern Tanchen—Lujiang fault belt. *Acta Petrologica Sinica*, 12(4): 573~588 (in Chinese).

- with English abstract).
- Liu Fulai, Xu Zhiqin, Song Biao. 2003. Determination of UHP and retrograde metamorphic ages of the Sulu terrane: evidence from SHRIMP U-Pb dating on zircons of gneissic rocks. *Acta Geologica Sinica*, 77: 69~84 (in Chinese with English abstract).
- Liu Fulai, Xu Zhiqin, Liu Jiongguang. 2004. Tracing the boundary between UHP and HP metamorphic belts in the southwestern Sulu terrane, eastern China: evidence from mineral inclusions in zircons from metamorphic rocks. *International Geology Review*, 46: 409~425.
- O'Hara K. 1988. Fluid flow and volume loss during mylonitization: an origin for phyllonite in an overthrust setting, North Carolina, U. S. A. *Tectonophysics*, 156: 21~36.
- O'Hara K, Blackburn W H. 1989. Volume-loss model for trace-element enrichments in mylonites. *Geology*, 17: 524~527.
- Qi Xuexiang, Xu Zhiqin, Qi Jinzhong. 2005a. Geochemical characteristics of metamorphic rocks in the HPM belt along the south margin of Sulu terrane and its geological significances. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(5): 476~484 (in Chinese with English abstract).
- Qi Xuexiang, Li Haibing, Wu Cailai, et al. 2005b. Constraints of ductile shear deformation on rock geochemical features—A case study of the Bashikaogong ductile shear zone in the northern Altyn Tagh. *Geological Bulletin of China*, 24(3): 252~257 (in Chinese with English abstract).
- Qi Jinzhong, Qi Xuexiang, Chen Fangyuan. 2005. Characteristics of the Nangang—Gaogongdao ductile shear zone in the south Su-Lu high-pressure metamorphic belt and EBSD fabric analysis of quartz. *Geology in China*, 32(2): 287~298 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Haijun, Xu Zhiqin, Zhang Zeming, et al. 2002. New mineral evidence of high-pressure metamorphism of the Subei high-pressure belt—Aragonite inclusions in garnet from greenschist. *Geological Bulletin of China*, 21(10): 617~624 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Haijun, Xu Zhiqin, Zhang Jianxin, et al. 2003. The discovery of glaucophane greenschist facies rock mass in Lianyungang, northern Jiangsu. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(1): 34~40 (in Chinese with English abstract).
- Srivastava H B, Hudleston P, Earley D. 1995. Strain and possible volume loss in a high-grade ductile shear zone. *Journal of Structural Geology*, 17(9): 1217~1231.
- Tang Hongfeng, Liu Congqiang, Xie Guogang. 2000. Mass transfer and element mobility of rocks during regional metamorphism—A case study of metamorphosed polities from the Shuanqashan Group in Lushan. *Geological Review*, 46(3): 245~254 (in Chinese with English abstract).
- van Baalen M R. 1993. Titanium mobility in metamorphic systems: a review. *Chem. Geol.*, 110: 233~249.
- Wilkinson J J, Nolan J, Rankin A H. 1996. Silico-thermal fluid: A novel medium for mass transport in the lithosphere. *Geology*, 24: 1059~1062.
- Xu Zhiqin, Zhang Zeming, Liu Fulai, et al. 2003. Exhumation structure and mechanism of the Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt, central China. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 433~450 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Qi Xuexiang, Yang Jinsui, et al. 2006. Deep subduction erosion model for continent-continent collision of the Sulu HP-UHP metamorphic terrain. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 427~436 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Zeng Lingsen, Liu Fulai, et al. 2006. Polyphase subduction and exhumation of the Sulu high-pressure—ultrahigh-pressure metamorphic terrane. *Geological Society of America*, 403: 93~113.
- Zhao Z F, Zheng Y F, Chen B, et al. 2005. A geochemical study of element and Sr-Nd isotopes for eclogites and gneiss from CCSD core 734 to 933m. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 325~338 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z M, Zhang J F, You Z D, et al. 2005. Ultrahigh-pressure metamorphic *P-T-t* path of the Sulu orogenic belt, eastern central China. *Acta Petrologica Sinica*, 21(2): 257~270 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Zenqiu, You Zhendong. 1995. Composition variation and volume loss of ductile shear zone—A case of Hetai ductile shear zone. *Chinese Science Bulletin*, 40(10): 913~916 (in Chinese).
- Zhou Jianpo, Hu Ke, Hong Jinpeng. 1999. Application of REE anomaly in volume deficiency of a ductile shear zone—An example from the ductile shear zone on the northern margin of the Jiaonan orogenic belt. *Geological Review*, 45(3): 241~246 (in Chinese with English abstract).

Deformational Record, Compositional Variation and Volume Loss for the Nanguang—Gaogongdao Ductile Shear Zone in the Southern Sulu Terrane

QI Xuexiang¹⁾, XU Zhiqin¹⁾, QI Jinzhong²⁾

1) Key Laboratory for Continental Dynamic, Institute of Geology, CAGS, Beijing, 100037

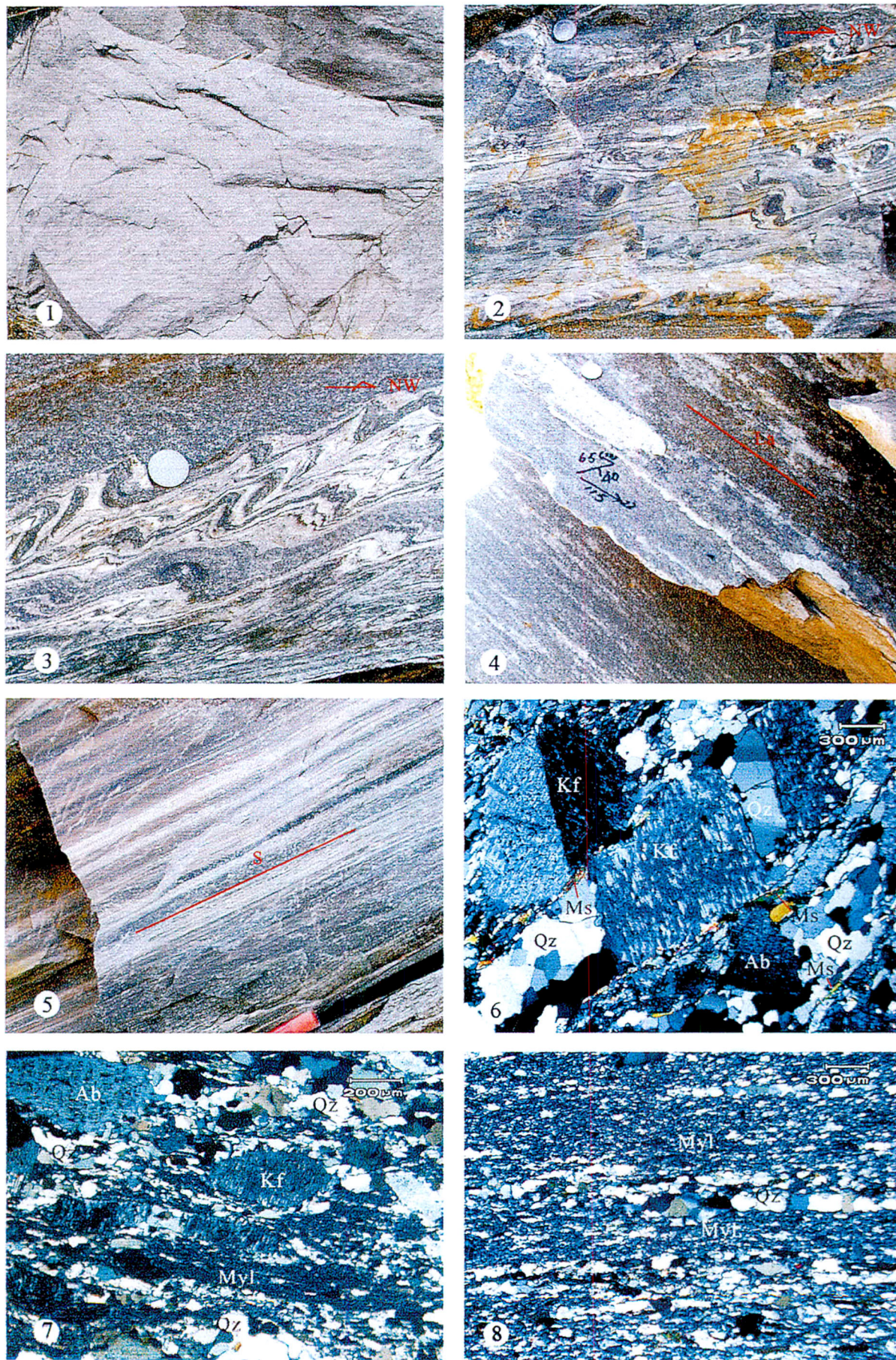
2) Gold Geological Institute of China Armed Police Force, Langfang, Hebei, 065000

Abstract

The Nangang—Gaogongdao ductile shear zone is a slice boundary tectonic zone with strong mylonitization, which formed by thrusting from the southeast to the northwest. The main minerals in rock, such as feldspar and biotite et al., had decomposed or altered with different degree, that resulted in compositional variation during ductile deformation. Thereinto, the variation of mobile components in the rock resulted from fluid

infiltration, and the variation of immobile components was caused by the volume loss during mylonitization. The isocon line slopes are determined by comparing the geochemical compositions of rocks before and after deformation of feldspar or albite quartz schist within the ductile shear zone. The mass balance calculation shows that the volume losses of protomylonite and mylonite during mylonitization are 17% and 27% respectively. The mass balance analysis and isocon diagram indication that the loss of SiO_2 is largest, the next is Al_2O_3 , and while FeO , CaO and Na_2O lose to different extent, showing that they are mobile components in the rock. MgO located over the isocon line, is the import components. The quartz vein or felsic band in mylonites formed by separation and transfer of SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O and FeO et al., which resulted from the saussuritization and sericitization of feldspar and the chloritization of biotite during mylonitization. The volume loss and component variation during ductile shearing are the important enrichment mechanism of immobile components, and have the important guidance for researching the mechanism of felsic band and metallogenesis of precious metals deposits.

Key words: Sulu terrane; ductile shear zone; compositional variation; volume loss



高公岛—黄窝村韧性剪切带有不同变形程度岩石特征

Ab—钠长石；Kf—钾长石；Qz—石英；Ms—多硅白云母；Myl—糜棱质