

# 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

齐金忠<sup>1,2</sup> 戚学祥<sup>1</sup> 陈方远<sup>1</sup>

(1. 中国地质科学院地质研究所, 国土资源部大陆动力学重点实验室, 北京 100037;

2. 武警黄金地质研究所, 河北 廊坊, 065000)

**摘要:**结合地质剖面对南苏鲁高压变质带中的南岗—高公岛韧性剪切带特征进行了研究, 结果表明, 剪切带上部变形较弱, 主要发育 S-C 组构及拉伸线理; 剪切带中部变形较强, 发育不对称褶皱、S-C 组构、 $\sigma$  型及  $\delta$  型旋转碎斑以及多米诺骨牌等; 剪切带下部变形最强, 糜棱质颗粒达 80%~90%, 并见有同斜褶皱等。EBSD 组构分析结果表明, 剪切带上部糜棱质石英以中温柱面组构和中低温菱面组构为特征, 中、下部以低温底面组构和中低温菱面组构为主, 剪切带中石英条带以中温柱面组构为主, 石英组构的剪切指向以 SE→NW 为主, 其次为 NW→SE, 反映本区经历了中温→中低温→低温、以逆冲韧性剪切为主并曾发生韧性滑脱的复杂变形过程。各构造层化学成分及稀土元素变化趋势不明显, 可能与原岩成分有关。剪切带中黑云母、白云母的 <sup>39</sup>Ar-<sup>40</sup>Ar 同位素年龄分析表明在 253.8~214.2 Ma 期间本区曾发生强烈的变形变质作用。

**关键词:** 高压变质带; 韧性剪切带; EBSD; 石英组构; 苏鲁

**中图分类号:** P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2005)02-0287-12

自 1987 年许志琴<sup>[1]</sup>报道了大别地块变质杂岩内发现的柯石英假象后, 大别—苏鲁超高压和高压变质带成了地球科学研究的热点, 研究领域涉及高压—超高压变质岩石的年代学<sup>[2-9]</sup>、岩石学<sup>[10-14]</sup>、变质作用演化<sup>[15-17]</sup>、构造地质学研究等<sup>[18-21]</sup>。其中构造地质学研究相对较为薄弱, 这制约了人们对高压超高压带折返机制的认识。

对于南苏鲁地区的高压变质带前人也进行了研究, 于津海等<sup>[22]</sup>将其划分为 3 个 NNE 向变质亚带, 并认为由 SE 向 NW 变质温压逐渐升高。邱海峻<sup>[23,24]</sup>在连云港地区发现了文石、多硅白云母、冻蓝闪石等矿物, 证实本区为低温高压变质带, 并初步分析了其构造变形特征。许志琴<sup>[25]</sup>将苏鲁高压—超高压变质带划分为一系列 NNE-NE 向剪切构造岩片, 其间为韧性剪切带, 从而确立了苏鲁高压—超高压变质带

基本构造格架, 并且初步分析了各韧性剪切带的基本特征以及石英组构特征, 认为南岗—高公岛韧性剪切带存在中温和低温剪切应变, 剪切方向为 NW 向逆冲剪切。笔者即在此基础上进一步研究了南岗—高公岛韧性剪切带的形态及运动学特征、地球化学特征、同位素年代学特征等, 并对其中石英进行了 EBSD 组构分析, 以揭示该剪切带的变形特征及变形过程, 进而为折返机制的完善提供佐证。

## 1 构造背景

苏鲁高压—超高压变质带基本构造格架包括由高压变质岩组成的“南苏鲁剪切构造叠覆岩片”超单元与超高压变质岩组成的“北苏鲁剪切构造叠覆岩片”超单元<sup>[26]</sup>。根据剪切构造叠覆岩片的组成及剪切构造岩片之间的界限, 自上而下分为如下单元: 南苏

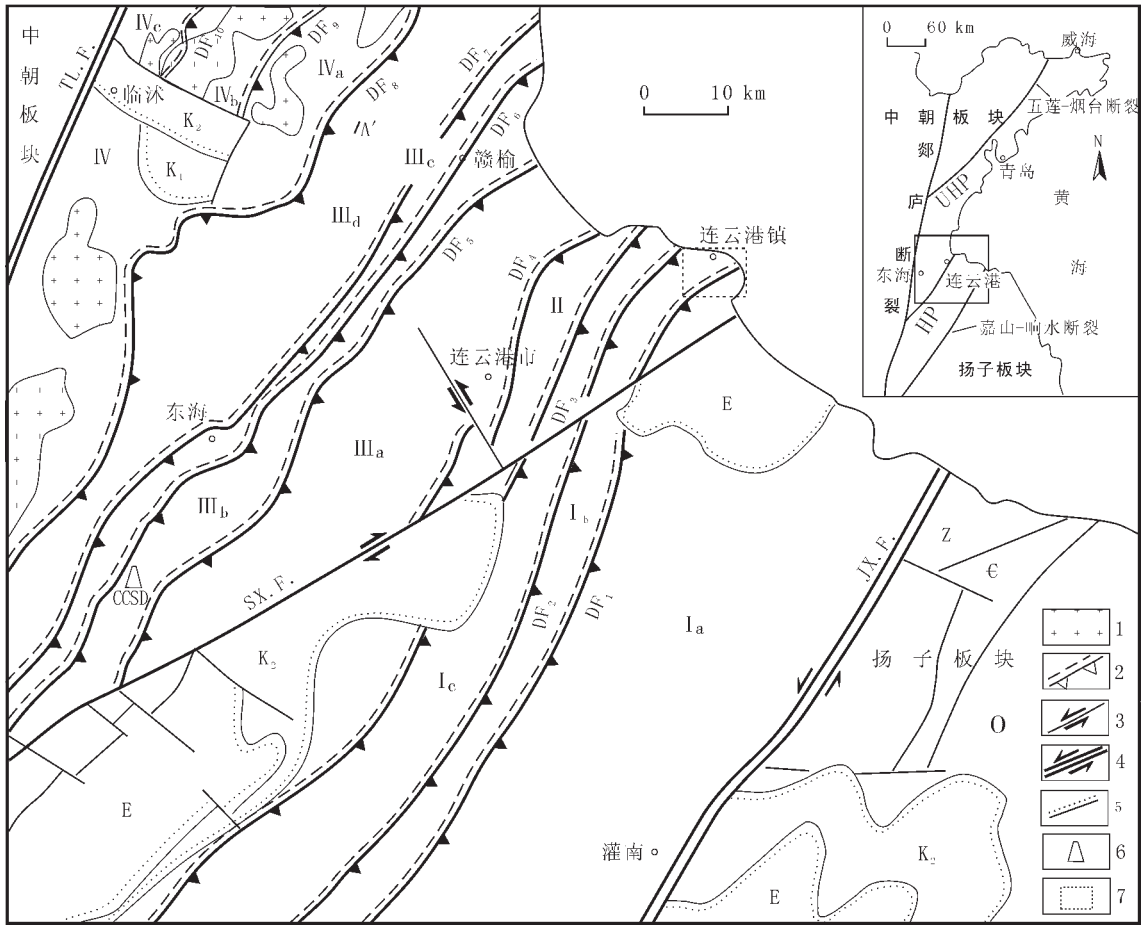


图1 南苏鲁地区地质简图<sup>[26]</sup>

E—古近系;K<sub>1-2</sub>—白垩系;O—奥陶系;ε—寒武系;Z—震旦系;1—中生代花岗岩;2—韧性逆冲型剪切带;3—走滑断层;4—大型走滑断层 (TL.F—郟庐断裂,JX.F—响水断裂);5—不整合;6—大陆科学钻孔址;7—工作区范围;I—南苏鲁高压(HP)低温(LT)变质岩剪切构造叠覆岩片; I<sub>a</sub>—灌南剪切构造岩片;I<sub>b</sub>—连云港剪切构造岩片;I<sub>c</sub>—云台山剪切构造岩片;II—南苏鲁高压(HP)中温(MT)变质岩剪切构造叠覆岩片; III—北苏鲁超高压(UHP)变质表壳岩剪切构造叠覆岩片;III<sub>a</sub>—青龙山—房山剪切构造岩片;III<sub>b</sub>—毛北剪切构造岩片; III<sub>c</sub>—石湖镇剪切构造岩片;III<sub>d</sub>—石梁河剪切构造岩片;IV—北苏鲁超高压(UHP)花岗质变质岩剪切构造叠覆岩片; IV<sub>a</sub>—三清阁剪切构造岩片;IV<sub>b</sub>—抗日山剪切构造岩片;IV<sub>c</sub>—苍山剪切构造岩片;DF<sub>1</sub>—DF<sub>10</sub>—韧性剪切带编号

Fig. 1 Tectonic sketch map of the South Su-Lu area

E—Paleogene;K<sub>1-2</sub>—Cretaceous;O—Ordovician;C—Cambrian;Z—Sinian;1—Mesozoic granite;2—Ductile "thrusting" shear zone;3—Strike-slip fault; 4—Large strike-slip fault (TL.F—Tanlu fault,JX.F—Xiangshui fault);5—Unconformity;6—Main hole site of CCSLD;7—Study area

I—Shear tectonic imbricate slice of high pressure-low temperature metamorphic rocks in South Sulu; I<sub>a</sub>—Guannan shear tectonic slice;

I<sub>b</sub>—Lianyungang shear tectonic slice; I<sub>c</sub>—Yuntaishan shear tectonic slice; II—Shear tectonic imbricate slice of high-pressure and medium-temperature metamorphic rocks in South Sulu; III—Shear tectonic imbricate slices of ultrahigh-pressure metamorphic supracrustal rocks in North Sulu;

III<sub>a</sub>—Qinglongshan—Fangshan shear tectonic slice; III<sub>b</sub>—Maobei shear tectonic slice; III<sub>c</sub>—Shihu shear tectonic slice;

III<sub>d</sub>—Shilianghe shear tectonic slice; IV—Shear tectonic imbricate slices of ultrahigh-pressure granitic metamorphic rocks in North Sulu;

IV<sub>a</sub>—Sanqingge shear tectonic slice; IV<sub>b</sub>—Kangrishi shear tectonic slice; IV<sub>c</sub>—Cangshan shear tectonic slice;DF<sub>1</sub>—DF<sub>10</sub>—Number of ductile shear zone

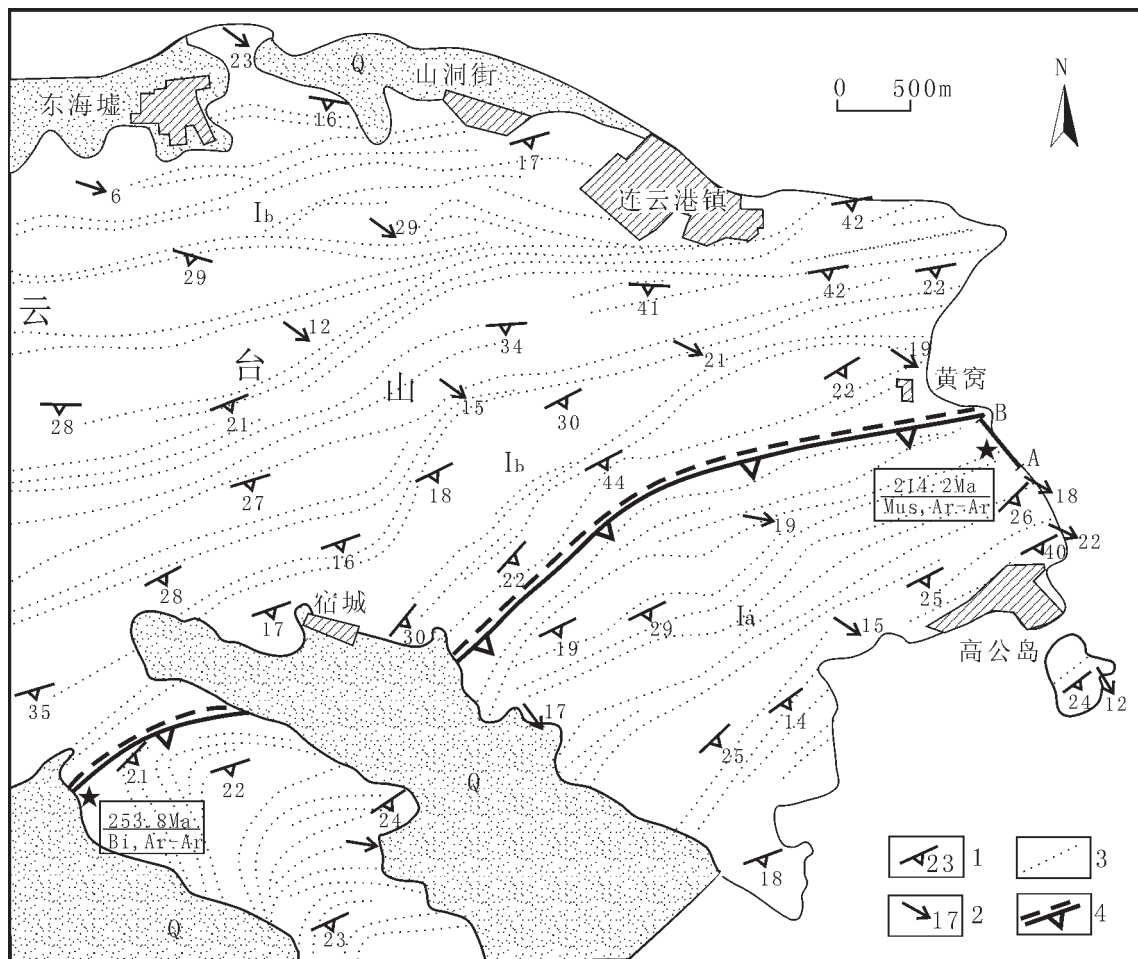


图 2 连云港地区韧性剪切带面理线理产状

(底图据江苏地质调查研究所, 1994)

1—面理产状; 2—线理产状; 3—面理轨迹; 4—南岗—高公岛韧性剪切带;

I<sub>a</sub>—灌南剪切构造岩片; I<sub>b</sub>—连云港剪切构造岩片; A—B—地质剖面起止位置

Fig. 2 Geological sketch map showing the attitudes of foliation and lineation of the ductile shear zone in the Lianyungang area

1—Attitude of foliation; 2— Attitude of lineation; 3—Strike path of foliation; 4—Nangang—Gaogongdao ductile shear zone;

I<sub>a</sub>—Guannan shear tectonic slice; I<sub>b</sub>—Lianyungang shear tectonic slices;

A—B— Start and end points of the geological section

鲁高压(HP)低温(LT)变质岩剪切构造叠覆岩片(I)、南苏鲁高压(HP)中温(MT)变质岩剪切构造叠覆岩片(II)、北苏鲁超高压(UHP)变质表壳岩剪切构造叠覆岩片(III)和北苏鲁超高压(UHP)花岗质变质岩剪切构造叠覆岩片(IV)。其中,岩片(I)叠覆在岩片(II)上,岩片(II)叠覆在岩片(III)上,岩片(III)叠覆在岩片(IV)上,岩片(IV)中有大量中生代的花岗岩侵入,而各剪切构造叠覆岩片由若干个剪

切构造岩片构成(图1),其间为糜棱岩带及强剪切应变带所构成的韧性剪切带(图1,DF<sub>1</sub>—DF<sub>10</sub>)。

南苏鲁高压(HP)低温(LT)变质岩剪切构造叠覆岩片(I)的东南界为嘉山—响水断裂(JX.F.),西北界为猴嘴—韩山韧性剪切带(DF<sub>3</sub>),叠覆岩片主要由二云钠长片麻岩、绿帘钠长角闪岩、绿帘黑云阳起钠长片岩、白云绿帘阳起片岩、白云石英片岩、钠长阳起片岩和蓝透闪石石榴钠长阳起片岩等组成,以

出现蓝透闪石、冻蓝闪石、多硅白云母、文石等低温(360~400℃)高压(0.7~0.85 GPa)变质矿物为特征<sup>[23]</sup>。该叠覆岩片由上到下分为3个剪切岩片,即灌南剪切构造岩片(I<sub>a</sub>)、连云港剪切构造岩片(I<sub>b</sub>)和云台山剪切构造岩片(I<sub>c</sub>),其间的界限分别为南岗—高公岛韧性剪切带(DF<sub>1</sub>)和墟沟—陡沟韧性剪切带(DF<sub>2</sub>)。其中南岗—高公岛韧性剪切带(DF<sub>1</sub>)位于整个高压超高压带的东南端,其出露较好、构造变形清晰,为研究提供了较为有利的条件。

## 2 南岗—高公岛韧性剪切带特征

南港—高公岛韧性剪切带位于灌南剪切构造岩片(I<sub>a</sub>)与连云港剪切构造岩片(I<sub>b</sub>)之间,总体走向为NE向(图2)。根据对高公岛—黄窝村地质剖面进行观察,该韧性剪切带宽达400 m以上,但由南向北岩性不同,变形程度也有差异(图3)。其中剪切带上部(南部)主要为浅肉红色二长片麻岩、灰白色钠长片麻岩,其中含较多浅色矿物团块;剪切带中部主要

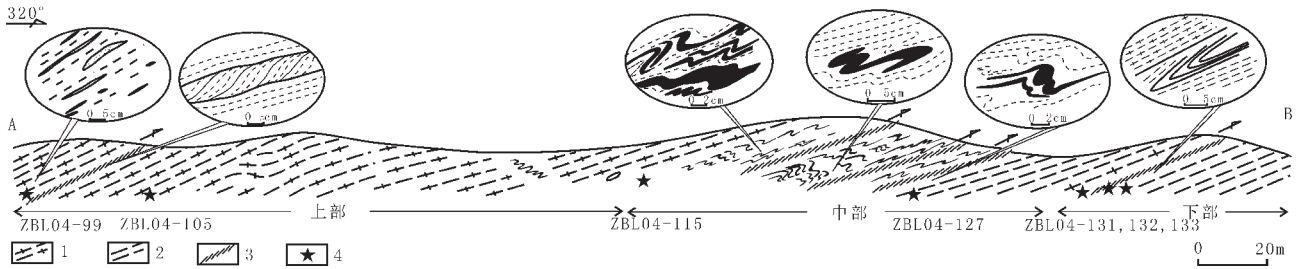


图3 高公岛—黄窝村地质剖面

1—二长片麻岩;2—钠长片岩、石英片岩;3—糜棱岩带;4—EBSD 样品位置(其下部为样品编号)

Fig. 3 Gaogongdao-Huangwocun geological section

1—Monzonitic gneiss;2—Albite schist, quartz-schist and mica schist;3—Mylonitic zone;4— Location of EBSD sample (and its number)

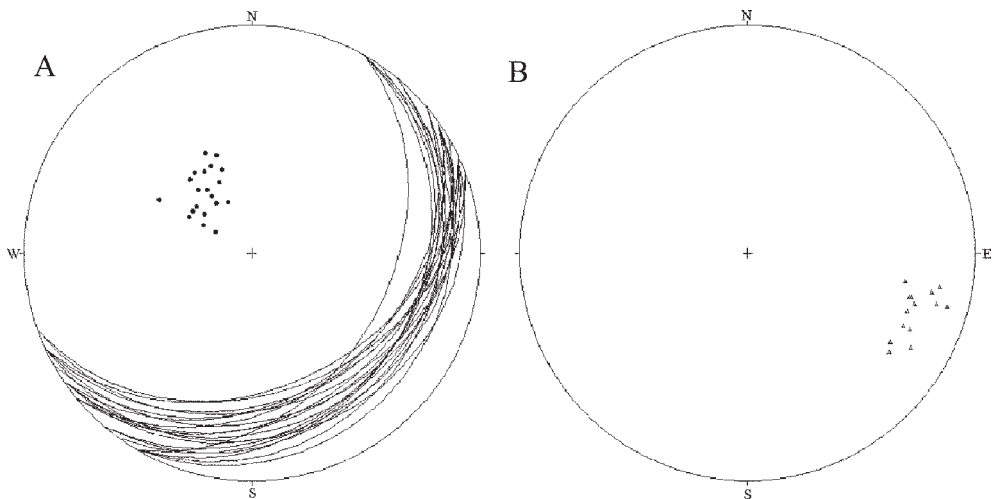


图4 南岗—高公岛韧性剪切带面理(A)、线理(B)产状投影图

(等面积下半球投影)

Fig. 4 Projection plot showing the attitudes of foliation (A) and lineation (B) of the Nangang-Gaogongdao ductile shear zone

(equal-area lower-hemisphere projection)

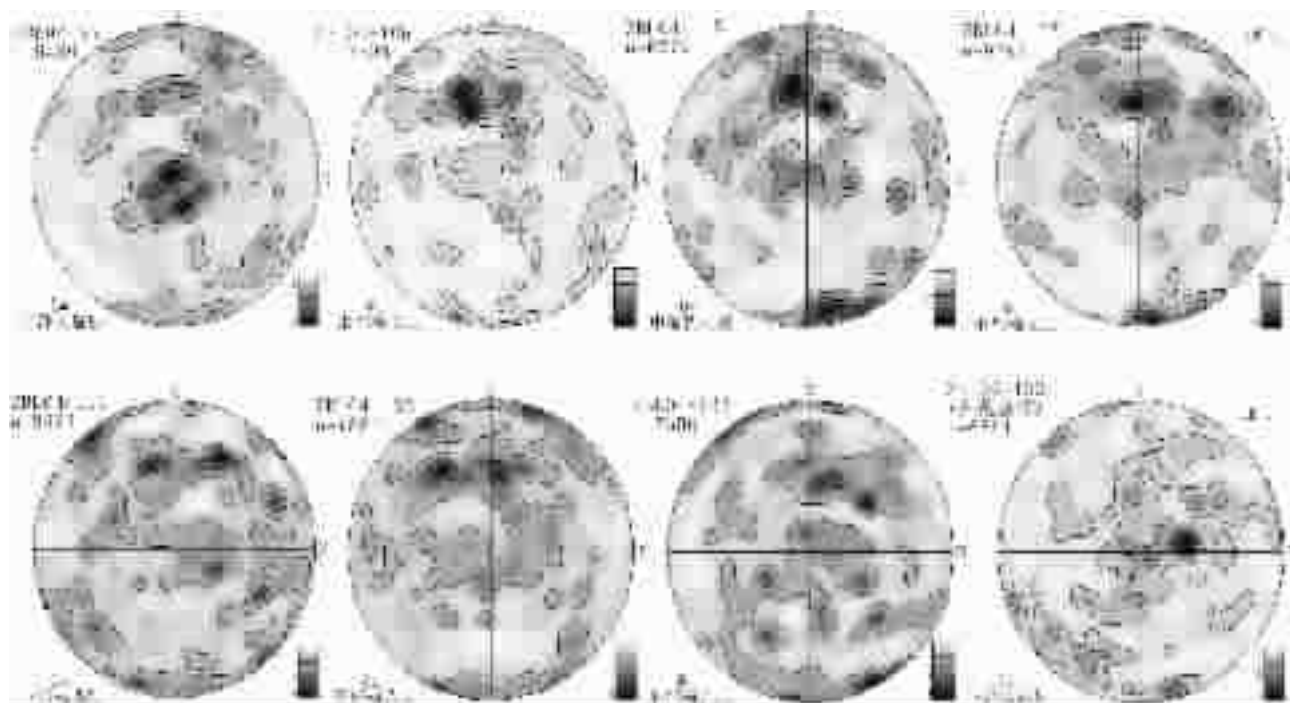


图 5 南岗—高公岛韧性剪切带石英 EBSD 组构

左上编号为样品号,右下数值为极点等密度线的百分数;n—测点数;Qm—糜棱质石英;Qt—一条带状石英

Fig. 5 Contoured EBSD fabric diagram for quartz from the Nangang-Gaogongdao ductile shear zone

Figures in the upper left denote the sample numbers, figures at the right bottom indicate the percentage of the contour;

n—analyzed number of quartz grains; Qm—mylonitized quartz; Qt—banded quartz

为灰白色白云钠长片岩、白云二长片麻岩、二云片岩、黑云母片岩、白云母片岩等;剪切带下部(北部)主要由二长片麻岩及石英片岩构成。

(1)面理:韧性剪切带中面理为透入性流劈理,主要由云母、石英、长石等矿物的定向排列构成,在中、下部构造层内极为发育,而在上部构造层中发育较弱。受后期构造变形作用的影响面理发生褶皱,其中在中部构造层褶皱强烈。面理的总体走向为 NE-NEE 向(图 2),缓倾角南倾。面理走向轨迹线也呈 NE-NEE 向展布,受褶皱影响局部呈宽缓波状。在各构造层中面理产状变化不大,其优选产状为  $52^\circ(\text{SE}) \angle 28^\circ$ (图 4)。

(2)拉伸线理:在上部构造层拉伸线理主要由叶理面上拉长的浅色矿物团块构成(图版 I-1),在中下部构造层主要由拉长的石英、长石颗粒构成。受面理褶皱的影响,拉伸线理产状也有一定的变化,但总体以缓倾角向 SE-SEE 方向倾伏为主(图 2),且在

构造层其产状变化不大,统计结果显示其优选产状为  $112^\circ \angle 25^\circ$ (图 4)。

(3)褶皱构造:在各构造层均可见及,且以中部构造层最为发育,褶皱形态也较为复杂。褶皱规模变化也较大,在露头尺度以及在显微镜下均能见到,且褶皱轴面与面理方向一致。在上部构造层中褶皱较少,主要为岩石中的长英质脉体在剪切过程中形成的同斜褶皱;在中部构造层中出现有不对称褶皱、无根褶皱、紧闭同斜褶皱等(图版 I-3~5);在下部构造层中褶皱极其少见,仅发现紧闭同斜褶皱(图版 I-6)。

(4)旋转应变:南岗—高公岛韧性剪切带经历了强烈的韧性变形,具有大量反映剪切指向的旋转应变标志,如不对称褶皱、S-C 组构(图版 I-2)、旋转碎斑、长石多米诺骨牌等,其运动学标志显示以 SE→NW 的逆冲剪切指向为主,偶见 NW→SE 滑脱剪切指向。

S-C 组构在露头尺度及镜下均可见及,且以中

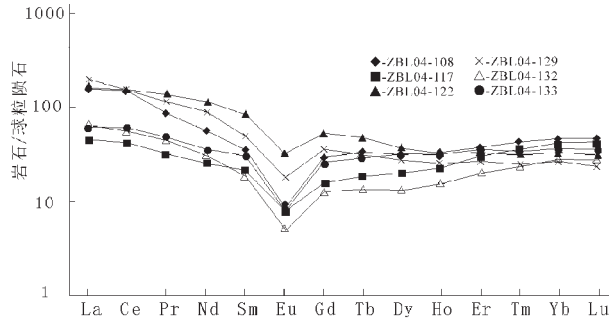


图 6 南岗—高公岛韧性剪切带岩石稀土元素配分模式图

Fig. 6 REE distribution patterns for rocks in the Nangang-Gaogongdao ductile shear zone

表 1 南岗—高公岛韧性剪切带岩石化学成分特征

Table 1 Chemical compositions of rocks in Nangang-Gaogongdao ductile shear zone

样号	ZBL04-108	ZBL04-117	ZBL04-122	ZBL04-129	ZBL04-132	ZBL04-133
岩石类型	白云二长片麻岩	碳酸盐白云钠长片岩	二云钠长片岩	二云二长片麻岩	白云石英片岩	白云二长片麻岩
Na <sub>2</sub> O × 10 <sup>-2</sup>	2.98	3.49	3.40	3.54	0.56	3.48
MgO	0.46	0.89	0.33	0.79	0.44	0.57
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.84	10.89	10.78	12.27	9.79	11.28
SiO <sub>2</sub>	77.96	62.52	76.76	74.98	79.37	78.90
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.03	0.02	0.04	0.02	0.01
K <sub>2</sub> O	5.11	3.24	4.94	5.08	8.27	4.04
CaO	0.24	8.36	0.32	0.24	0.06	0.10
TiO <sub>2</sub>	0.16	0.21	0.30	0.34	0.25	0.18
MnO	0.07	0.44	0.03	0.08	0.03	0.05
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.24	2.61	2.50	1.95	0.77	1.12
FeO	0.48	0.66	0.59	0.63	0.47	0.32
H <sub>2</sub> O	0.20	1.06	0.06	0.54	0.14	0.48
CO <sub>2</sub>	0.07	6.24	0.09	0.04	0.07	0.04
总和	100.82	100.64	100.12	100.52	100.24	100.57
La × 10 <sup>-5</sup>	49.8	14.2	52.0	63.1	20.2	19.5
Ce	119	35.0	126	127	46.4	50.3
Pr	10.4	4.02	17.1	14.0	5.38	5.84
Nd	32.9	15.4	69.8	53.0	18.8	21.5
Sm	7.13	4.27	16.6	9.77	3.69	6.05
Eu	0.64	0.60	2.38	1.32	0.37	0.59
Gd	7.89	4.10	13.9	9.40	3.30	6.78
Tb	1.56	0.89	2.27	1.55	0.63	1.41
Dy	10.4	6.51	12.1	8.91	4.32	10.2
Ho	2.43	1.64	2.29	1.84	1.10	2.30
Er	8.22	6.50	7.01	5.72	4.39	7.56
Tm	1.40	1.16	1.03	0.80	0.77	1.14
Yb	9.79	8.60	6.88	5.51	5.81	7.91
Lu	1.60	1.45	1.07	0.80	0.94	1.19
Y	78.9	54.1	68.9	55.3	36.7	69.6

注:由国家地质实验测试中心测定,2004。

图版 I Plate I



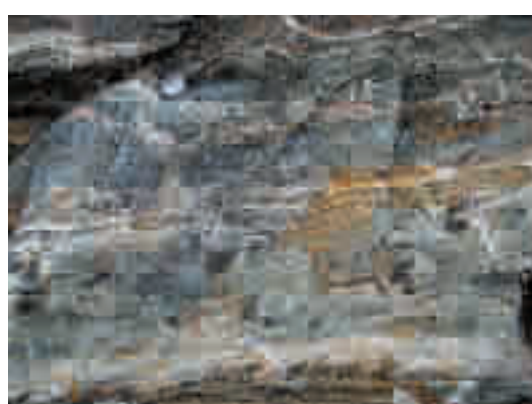
1 二长片麻岩中的拉伸线理(上部)  
1 Stretching lineation in monzonitic gneiss  
(upper part)



2 黑云片岩、白云钠长片岩的不对称褶皱(中部)  
2 Asymmetrical folded Biotite schist and muscovite  
-albite schist (middle part)



3 黑云片岩所形成的无根钩状褶皱(中部)  
3 Rootless hook-like fold of biotite schist  
(middle part)



4 黑云片岩所形成的旋转碎斑(中部)  
4 Rolled porphyroblast structure of biotite schist  
(middle part)



5 二云片岩夹层的 S-C 组构(中部)  
5 S-C fabric in biotite schist (middle part)



6 白云石英片岩所形成的同斜紧闭褶皱(下部)  
6 Tightly folded muscovite quartz schist (lower part)

部构造层最为发育,主要由岩层中所夹的二云母片岩受剪切形成,S面与C面的夹角一般为 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 。

旋转碎斑,在露头尺度的旋转碎斑主要由岩石中暗色矿物团块受剪切旋转造成,在镜下的旋转碎斑则主要由长石、石英、磁铁矿等矿物碎斑旋转形成,且 $\sigma$ 型及 $\delta$ 型旋转碎斑均可见到。

多米诺骨牌,在镜下可见斜长石受剪切作用沿解理错动所形成的多米诺骨牌状构造。

在韧性剪切带的不同部位构造变形强度也有差异,其中在剪切带上部岩石韧性变形及糜棱岩化相对较弱,主要发育S-C组构及拉伸线理;在剪切带中部构造变形较强,发育不对称褶皱、S-C组构、 $\sigma$ 型及 $\delta$ 型旋转碎斑以及多米诺骨牌等;在剪切带下部糜棱岩化最强烈,小于0.1mm的基质矿物含量高达80%~90%,并见有同斜褶皱等,可见下部(黄窝村南)应为韧性剪切带主体发育部位。

### 3 EBSD 石英组构特征

EBSD(Electron Backscatter Diffraction)组构分析是通过分析晶体背散射衍射图像来确定晶轴方向,进而确定晶体颗粒排列的取向性的。其特点与费氏台石英组构分析较类似,但EBSD可以更精确地分析糜棱质中的细小石英颗粒,而且测试颗粒多(一般测量5000~20000个数据),所以能更客观地反映样品中矿物颗粒排列的优势方位。本次EBSD分析在中国地质科学院大陆动力学实验室进行,所选样品为高公岛—黄窝村地质剖面中糜棱岩化较强的片岩、片麻岩,实验所用仪器为英国Oxford公司生产的Inca Crystal扫描电镜,石英标样为Quartz-new。扫描区域一般选择样品中糜棱质发育部位,每个样品扫描10帧,每帧扫描范围为 $0.8\times 1\text{mm}^2$ ,扫描步长为 $15\mu\text{m}$ 。作图采用下半球投影,统计半径为 $10^{\circ}$ ,极点等密度线以所占百分数表示(图5)。

测试结果表明,本区韧性剪切带中石英组构较为复杂,按嵇少丞<sup>[7]</sup>的分类,本区石英组构包括:

- ①低温底面组构,形成温度低于 $400^{\circ}\text{C}$ ,滑移系为 $\{0001\}$ ,〈C〉轴极密区位于应变椭球体Z轴附近;
- ②中低温菱面组构,形成温度为 $400\sim 550^{\circ}\text{C}$ ,滑移系为 $\{1011\}$ ,〈C〉轴极密区位于Y轴与Z轴附近;
- ③中温柱面组构,形成温度为 $550\sim 650^{\circ}\text{C}$ ,滑移系为 $\{1010\}$ ,〈C〉轴极密区位于Y轴附近。

剪切带上部样品ZBL04-99以中温柱面组构最

为明显,中低温菱面组构次之,而样品ZBL04-105则以中低温菱面组构最为明显;中部2个样品ZBL04-115、ZBL04127的中低温菱面组构和低温底面组构均较为明显;下部的3个样品ZBL04-131、ZBL04132、ZBL04133也以中低温菱面组构和低温底面组构为特征;样品ZBL04-133中石英条带以中温柱面组构为主,显示其保留了早期中温韧性剪切组构。可见本区岩石经历了从中温→中低温→低温的一系列韧性变形过程,而在宏观上保存完好的变形应为晚期低温韧性变形。目前本区所发现的蓝透闪石、冻蓝闪石、多硅白云母、文石等变质矿物也表明岩石最终经历了低温( $360\sim 400^{\circ}\text{C}$ )高压变形变质作用<sup>[2]</sup>。早期的中温韧性变形由于受后期变形变质作用的叠加改造,仅在微观变形特征上反映得较为明显,而且在不同的构造部位其被叠加改造的程度也有所不同,在剪切带上部被叠加改造的程度相对较弱,而在中下部被叠加改造得较为强烈。岩石物理性质的不同可能是造成这种差异的主要因素,剪切带上部以能干性较强的二长片麻岩为主,而中下部以能干性较弱的片岩为主,所以中下部岩层更易于受后期低温变形变质作用的改造。

另外,从上述EBSD石英组构图(图5)反映的剪切指向来看,中低温以及低温组构均以由SE→NW的剪切指向为主,而由NW→SE的剪切指向发育较差。镜下显微结构也显示由SE→NW的逆冲剪切为主要剪切指向,而NW→SE的剪切指向少见,与EBSD石英组构特征相吻合。在露头尺度上所见的后期低温韧性变形的剪切指向均为从SE→NW向,早期的中低温、低温滑脱剪切指向(NW→SE)则难以见到。

### 4 岩石化学成分特征

以往的研究表明,云台山岩群属于细碧岩-石英角斑岩组合<sup>[8]</sup>,岩石化学成分具有双峰式特征。本次主要对高公岛以北酸性火山岩的化学成分进行了分析(表1),与典型流纹岩化学成分相比,其 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 含量高, $\text{Na}_2\text{O}/\text{CaO}$ 比值大, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 及 $\text{FeO}$ 、 $\text{CaO}$ 及 $\text{K}_2\text{O}$ 含量低,具有石英角斑岩高硅、高钠、低钙、低铁的特征。与典型石英角斑岩的化学成分比较接近,仅 $\text{Na}_2\text{O}$ 含量略低,而 $\text{K}_2\text{O}$ 含量较高。

从岩石稀土配分模式图(图6)可见配分曲线自La→Eu陡倾,自Gd→Lu变平缓,呈轻稀土富集型。



岩石稀土元素丰度总体较高, 稀土含量  $\Sigma\text{REE}$  为  $104.34 \times 10^{-6} \sim 330.43 \times 10^{-6}$ , 岩石  $\delta\text{Eu} = 0.27 \sim 0.47$ , 呈 Eu 负异常, 为 Eu 亏损型, 与世界其他地区石英角斑岩的稀土特征一致。一般认为, 稀土元素在变质作用过程中不发生变化或变化极少<sup>[29]</sup>, 而周建波等<sup>[30]</sup>认为韧性变形作用所伴随的体积亏损造成稀土元素相对富集。在本区从剪切带上部到下部稀土元素没有明显变化规律, 所以稀土元素含量的差异更可能是原岩成分不同所造成的。

## 5 $^{39}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$ 同位素年代学

对南岗—高公岛韧性剪切带中的黑云母和白云母分别进行了  $^{39}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$  同位素年代学测试。其中样品白云母 HWP-33 采自高公岛以北的白云钠长片麻岩, 样品黑云母 LYG1025-8 采自蟹脐沟的二云钠长片麻岩, 样品测试在美国斯坦福大学  $^{39}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$  同位素实验室进行。测得黑云母的  $^{39}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$  坪年龄为  $(253.8 \pm 2.6)\text{Ma}$ , 等时线年龄为  $(254.0 \pm 2.7)\text{Ma}$  ( $\text{MSWD} = 1.16$ ); 白云母的  $^{39}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$  坪年龄为  $(214.2 \pm 2.3)\text{Ma}$ , 等时线年龄为  $(213.8 \pm 2.7)\text{Ma}$  ( $\text{MSWD} = 5.52$ )。表明在  $253.8 \sim 214.2\text{Ma}$  期间本区曾发生强烈的变形变质作用, 该时期也应为区内韧性剪切带的主要活动时期。据陈火根<sup>[31]</sup>的资料, 猴咀一带白云石英片岩中的黑硬绿泥石及白云母的  $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$  年龄分别为  $228.2\text{Ma}$ 、 $221.3\text{Ma}$ , 与笔者的测试结果较为一致。

## 6 结论与讨论

(1) 南岗—高公岛韧性剪切带在高公岛以北出露宽度达  $400\text{m}$  以上, 其面理优选产状为  $52^\circ(\text{SE}) \angle 28^\circ$ , 线理的优选产状为  $112^\circ \angle 25^\circ$ 。在剪切带中不同部位韧性变形强度有所不同, 剪切带上部主要由二长片麻岩组成, 其变形较弱, 主要发育 S-C 组构及拉伸线理; 剪切带中部变形较强, 发育不对称褶皱、S-C 组构、 $\sigma$  型及  $\delta$  型旋转碎斑以及多米诺骨牌等; 剪切带下部变形最强, 糜棱质颗粒达  $80\% \sim 90\%$ , 并见有同斜褶皱等, 显示剪切带下部(黄窝村一带)应为韧性剪切带主体经过的部位。

(2) EBSD 组构分析结果表明, 剪切带上部糜棱质石英以中温柱面组构和中低温菱面组构为特征, 剪切带中、下部糜棱质石英以低温底面组构和中低温菱面组构为主, 剪切带中石英条带以中温柱面组

构为主, 石英组构的剪切指向以 SE $\rightarrow$ NW 为主, 也有 NW $\rightarrow$ SE 向, 反映本区经历了中温 $\rightarrow$ 中低温 $\rightarrow$ 低温、以逆冲韧性剪切为主并曾出现过韧性滑脱剪切的复杂变形过程。

(3) 剪切带内岩石化学成分具有高硅、高钠、低钙、低铁的特征; 稀土配分模式显示为轻稀土富集型, 具 Eu 负异常, 与石英角斑岩成分特征相近。各构造层化学成分及稀土元素变化趋势不明显, 可能与原岩成分有关。

(4)  $^{39}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$  同位素测试结果显示韧性剪切带内黑云母的  $^{39}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$  坪年龄为  $(253.8 \pm 2.6)\text{Ma}$ , 白云母的  $^{39}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$  坪年龄为  $(214.2 \pm 2.3)\text{Ma}$ , 表明在  $(253.8 \sim 214.2)\text{Ma}$  期间本区曾发生较强烈的变形变质作用, 该时期也应为区内韧性剪切带的主要活动时期。

**致谢:** 在野外及室内工作期间得到了游振东教授、杨经绥研究员、吴才来研究员、张建新研究员、曾令森博士、杨天南博士、邱海峻博士、陈世忠博士以及邵源红、张晓卫、蔡慈等老师的帮助, 在此深表感谢!

## 参考文献(References):

- [1] Xu Zhiqin. Etude tectonique et microtectonique de la Chine paléozoïque et triasique des Qinlings (China)[D]. Montpellier: Académie de Montpellier Université des Sciences et Tectonique du Langue-doc, 1987, 250(in French).
- [2] Hacker B R, Wang Q.  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  geochronology of ultrahigh pressure metamorphism[J]. Tectonics, 1995, 14(4): 944~1006.
- [3] Chavagnac V, Jahn B M. Coecite-bearing eclogites from the Bixiling complex, Dabie Mountains, China: Sm-Nd ages, geochemical characteristics and tectonic implications[J]. Chemical Geology, 1996, 133(1): 29~51.
- [4] 李曙光, Jagouty E, 肖益林, 等. 大别苏鲁地体超高压变质年代学—I, Sm-Nd 同位素体系[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(3): 249~257.  
Li Shuguang, Jagouty E, Xiao Yilin, et al. Ultrahigh pressure metamorphic chronology of Dabieshan-Sulu terrane I, Sm-Nd isotopic system[J]. Science in China(Series D), 1996, 26(3): 249~257 (in Chinese).
- [5] 程裕祺, 刘敦一, Williams I S, 等. 大别山碧溪岭深色榴辉岩和片麻状花岗岩 SHRIMP 分析——晋宁期高压超高压作用同位素年代学依据[J]. 地质学报, 2000, 74(3): 193~205.  
Cheng Yuqi, Liu Dunyi, Williams I S, et al. SHRIMP U-Pb dating of zircons of a dark-coloured eclogite and a garnet-bearing gneissic-granitic rock from Bixiling, eastern Dabie area—Isotopic chronological evidence of Neoproterozoic HP-UHP metamorphism

- [5] Acta Geologica Sinica, 2000, 75(3):371~378(in Chinese with English abstract).
- [6] 徐惠芬, 杨天南, 刘福来, 等. 苏鲁高压-超高压变质带南部花岗片麻岩-花岗岩的多时代演化[J]. 地质学报, 2001, 75(3):371~378.  
Xu Huifen, Yang Tiannan, Liu Fulai. Multi age-time evolution of granite gneisses-granite in the southern Sulu UHP-HP metamorphic belt [J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(3):371~378(in Chinese with English abstract).
- [7] 杨经绥, 许志琴, 吴才来, 等. 含柯石英锆石的 SHRIMP U-Pb 定年: 胶东印支期超高压变质作用的证据[J]. 地质学报, 2002, 76(3):354~372  
Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Wu Cailai, et al. SHRIMP U-Pb dating on coesite bearing zircon: evidence for Indosinian ultrahigh-pressure metamorphism in Su-Lu, East China [J]. Acta Geologica Sinica, 2002, 76(3):354~372 (in Chinese with English abstract).
- [8] 刘顺生, 殷秀兰, 许志琴. 中国大陆科学钻探 CCSD-PP1 预先导孔岩芯的磷灰石裂变径迹年龄测定[J]. 地质学报, 2003, 77(4):540~543.  
Liu Shunsheng, Yin Xiulan, Xu Zhiqin. Fission track dating of apatites from pilot-PP2 core of the Chinese continental scientific drilling[J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(4):540~543 (in Chinese with English abstract).
- [9] 刘福来, 许志琴, 宋彪. 苏鲁超高压变质带中非超高压花岗质片麻岩的准确识别: 来自锆石微区矿物包体及 SHRIMP U-Pb 定年的证据[J]. 地质学报, 2003, 77(4):533~539.  
Liu Fulai, Xu Zhiqin, Song Biao. Precise restriction of non-UHP granitic gneiss from the UHP metamorphic belt in the Sulu terrane, eastern China: evidence from mineral inclusions, cathodoluminescence images and SHRIMP U-Pb dating in zircon domain[J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(4):533~539 (in Chinese with English abstract).
- [10] Cong B L, Zhai M, Dennis A, et al. Petrogenesis of ultrahigh-pressure rocks and their country rocks at Shuanghe, Dabie Shan, central China[J]. European Journal of Mineralogy, 1995, 7(1): 119~138.
- [11] 张泽明, 游振东, 韩郁菁, 等. 大别-苏鲁榴辉岩带的岩石学、变质作用过程及成因研究[J]. 地质学报, 1995, 69(4):306~325.  
Zhang Zeming, You Zhendong, Han Yujing, et al. Petrology, metamorphic process and genesis of the Sulu-Dabie eclogite belt, east-central China[J]. Acta Geologica Sinica, 1995, 69(4):306~325 (in Chinese with English abstract).
- [12] Zhang R Y, Hirajima T, Banno S, et al. Petrology of ultrahigh-pressure rock from the southern Su-Lu region, eastern China [J]. J. Metamorphic Geology, 1995, 13(3): 659~675.
- [13] 张建珍, 杜建国, 张友联, 等. 大别山榴辉岩岩石学及地球化学特征[J]. 地质论评, 1998, 44(3):255~263.  
Zhang Jianzhen, Du Jianguo, Zhang Youlian, et al. Petrology and geochemistry of eclogite in the Dabie mountains [J]. Geological Review, 1998, 44(3):255~263(in Chinese with English abstract).
- [14] 傅斌, 郑永飞, 肖益林, 等. 大别山苏家河地区榴辉岩和大理岩的地球化学研究[J]. 地质学报, 1998, 72(4):323~339.  
Fu Bin, Zheng Yongfei, Xiao Yilin, et al. Geochemical studies of eclogites and marbles from Sujiahe in the western Dabie mountains [J]. Acta Geologica Sinica, 1998, 72(4):323~339 (in Chinese with English abstract).
- [15] Liou J G, Zhang R Y, Wang X M, et al. Metamorphism and tectonics of high-P and ultrahigh-P belts in the Dabie-Sulu region, eastern central China[A]. In: Harrison M T, Yin A (eds.) Volume VII, Tectonic Development of Asia: Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs. NJ, 1996. 300~344.
- [16] 游振东, 韩郁菁, 张泽明. 秦岭-大别造山带根部超高压变质岩隆升的岩石学证据[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(增刊):83~88.  
You Zhendong, Han Yujing, Zhang Zeming. The petrological evidence for the uplift of ultrahigh-pressure metamorphic rock in root zone of the Qinling-Dabie orogenic belt[J]. Science in China (Series D), 1996, 39 (supp.): 83~88(in Chinese).
- [17] 刘晓春, 曲伟, 谢鸿森, 等. 大别山朱家冲斜长角闪岩-角闪榴辉岩-柯石英榴辉岩相转变实验研究[J]. 地质学报, 1999, 73(3):250~262.  
Liu Xiaochun, Qu Wei, Xie Hongsen, et al. Experimental study on the transformation of amphibolite-amphibole eclogite-coesite eclogite in Zhujiachong, Dabie mountains [J]. Acta Geologica Sinica, 1999, 73(3):250~262 (in Chinese with English abstract).
- [18] Okay A I, Senger A M C. Tectonics of an ultrahigh pressure metamorphic terrane: the Dabieshan-Tongbaishan orogen, China[J]. Tectonics, 1993, 12(6): 1320~1334.
- [19] 许志琴, 张建新, 徐惠芬, 等. 中国主要大陆山链韧性剪切带及动力学[M]. 北京:地质出版社, 1997, 293.  
Xu Zhiqin, Zhang Jianxin, Xu Huifen, et al. Ductile Shear zones in the Main Continental Mountain Chains and Their Dynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House 1997, 293. (in Chinese with English abstract).
- [20] 郭震宇, 董火根, 郭令智. 大别山五庙超高压变质岩的变形构造[J]. 地质论评, 1998, 44(3):249~254.  
Guo Zhenyu, Dong Huogen, Guo Lingzhi. Deformational structure of ultrahigh-pressure metamorphic rocks in Wumiao, Dabie mountains[J]. Geological Review, 1998, 44(3):249~254(in Chinese with English abstract).
- [21] 索书田, 钟增球, 游振东. 大别地块超高压变质期后伸展变形及超高压变质岩石折返过程[J]. 中国科学(D 辑), 2000, 30(1):9~17.  
Suo Shutian, Zhong Zengqiu, You Zhendong. Extensional deformation of post ultrahigh-pressure metamorphism and exhumation process of ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie massif, China[J]. Science in China (Series D), 2000, 43(3): 225~236(in Chinese).
- [22] 于津海, 王锡银, 林黎明. 苏北高压变质带及其与北侧超高压变质带的关系[J]. 地质学报, 2001, 75(1):82~90.  
Yu Jinhai, Wang Xiyin, Lin Liming. The nature of HP metamorphic zone and its relationship with the UHP metamorphic zone in northern Jiangsu, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2001,

- 75(1):82~90 (in Chinese with English abstract).
- [23] 邱海峻. 苏北高压变质岩变质变形演化[D]. 吉林大学博士论文, 2002, 117.  
Qiu Haijun. Metamorphism and deformation evolution of the HP metamorphic rocks, northern Jiangsu province [D]. Changchun: Jilin University, 2002.117 (in Chinese with English abstract).
- [24] 邱海峻, 许志琴, 张建新, 等. 苏北连云港地区蓝闪绿片岩相岩块的发现[J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(1):34~40.  
Qiu Haijun, Xu Zhiqin, Zhang Jianxin, et al. The discovery of glaucophane greenschist facies rock mass in Lianyungang, northern Jiangsu[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2003, 22(1):34~40 (in Chinese with English abstract).
- [25] 许志琴, 张泽明, 刘福来, 等. 苏鲁高压—超高压带的折返构造及折返机制[J]. 地质学报, 2003, 77(4):433~450.  
Xu Zhiqin, Zhang Zeming, Liu Fulai, et al. Exhumation structure and mechanism of the Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt, central China[J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(4):433~450 (in Chinese with English abstract).
- [26] 许志琴, 张泽明, 刘福来, 等. 中国大陆科学钻探主孔 1200 米构造柱及变形构造初步解析[J]. 岩石学报, 2004, 20(1):53~72.  
Xu Zhiqin, Zhang Zeming, Liu Fulai, et al. The Structure profile of 0~1200 m in the main borehole, Chinese Continental Scientific Drilling and its preliminary deformation analysis [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(1):53~72 (in Chinese with English abstract).
- [27] 嵇少丞. 部分熔融的构造地质意义(1): 变形机制转变的实验研究[J]. 地质科学, 1988, 4:347~356.  
Ji Shaocheng. Tectonic significance of partial melting (1): experiment study on transition of deformation mechanism[J]. Acta Geoscientiae Sinica, 1988, 4: 347~356 (in Chinese with English abstract).
- [28] 樊金涛. 苏北海州群细碧角斑岩系的成因[J]. 中国区域地质, 1995, (2):118~124.  
Fan Jintao. The petrogenesis of the spilite-keratophyre sequence of the Haizhou group in northern Jiangsu [J]. Regional Geology of China, 1995, (2): 118~124 (in Chinese with English abstract).
- [29] 王中刚, 于学元, 赵振华. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989.211~289.  
Wang Zhonggang, Yu Xueyuan, Zhao Zhenhua. Chemistry of Rare Earth Elements[M]. Beijing: Science Press, 1989. 211~89 (in Chinese).
- [30] 周建波, 胡克, 申宁华, 等. 稀土元素在剪切带中的含量变异及变异机制——以胶南造山带北缘剪切带为例[J]. 岩石矿物学杂志, 1998, 17(1):17~22.  
Zhou Jianbo, Hu Ke, Shen Ninghua, et al. Variation of REE content in the shear zone and its mechanism—exemplified by the ductile shear zone on the northern margin of Jiaonan orogenic belt [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 1998, 17(1):17~22 (in Chinese with English abstract).
- [31] 陈火根. 苏北中—晚元古代云台岩群变质作用特征[J]. 江苏地质, 1997, 21(4):204~211.  
Chen Huogen. Metamorphic characteristics of Middle-Lower Proterozoic Yuntai group in northern Jiangsu[J]. Jiangsu Geology, 1997, 21(4):204~211 (in Chinese with English abstract).

## Characteristics of the Nangang–Gaogongdao ductile shear zone in the South Su–Lu high–pressure metamorphic belt and EBSD fabric analysis of quartz

QI Jin–zhong<sup>1,2</sup>, QI Xue–xiang<sup>1</sup>, CHEN Fang–yuan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Continental Dynamics of the Ministry of land and Resources of China, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2. Gold Geological Institute, State Administration of Metallurgy Industry, Langfang 065000, Hebei, China)

**Abstract:** The characteristics of the Nangang–Gaogongdao ductile shear zone in the south Su–Lu high–pressure metamorphic belt were studied on the basis of the geological section survey. The results reveal that: rocks in the upper part of the shear zone are deformed weakly, in which the S–C fabric and stretching lineation are developed; rocks in the central part are deformed intensely, in which asymmetric folds, S–C fabrics and  $\sigma$ – and  $\delta$ –type rolled porphyroblasts, as well as domino structure of plagioclase are developed; and rocks in the lower part are deformed most intensely, in which mylonitized grains accounts for up to 80%–90% and congruous tight folds can also be found. EBSD fabric analysis shows that: mylonitized quartz grains in the upper part are characterized by the low– to medium–temperature rhombohedral face fabric and medium–temperature prismatic face fabric, those in the central and lower parts are characterized by low–temperature basal face fabric and low– to medium–temperature rhombohedral face fabric, and banded quartz grains in the shear zone are dominated by medium–temperature prism face fabric, which indicates that the shear zone experienced a complex deformation process from medium–temperature through low–medium temperature to low temperature deformations. The shear sense of the quartz fabrics is mainly from SE to NW and subordinately from NW to SE, reflecting that thrusting shear deformation is dominant, while ductile déollement shear is subordinate in the shear zone. No apparent trend of variations exists in chemical composition and REE patterns of the rocks from the upper part to lower part of the shear zone, so the composition may be determined mainly by the primary compositions of the rocks. <sup>39</sup>Ar–<sup>40</sup>Ar ages of muscovite and biotite from the shear zone indicate that intensive metamorphism and deformation took place in the period of 253.8–214.2 Ma.

**Key words:** high–pressure metamorphic belt; ductile shear zone; EBSD; quartz fabric; South Su–Lu

**About the first author:** QI Jin–zhong, male, born in 1965, senior engineer and postdoctoral researcher, his major research interests include structural geology and mineralogy of gold deposits; E–mail: qijinzhong@126.com.