

CCSD 主孔 1113~1600 m 花岗质片麻岩单元的变形构造特征

唐哲民 柴耀楚 陈世忠 陈方远

(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)

提要: 中国大陆科学钻探(CCSD)主孔 2000 m 岩性剖面揭示了 1113~1600 m 花岗质片麻岩段为地表北苏鲁超高压花岗质变质岩剪切构造叠覆岩片中的石湖镇构造岩片的花岗质片麻岩的下延部分。本单元之上下界线为韧性剪切带, 内部发育小型韧性剪切变形, 仅局部可见旋转碎斑体系等剪切指向标志, 以 SE 向 NW 的逆冲剪切指向为主, 其次为 NW 向 SE 的正滑剪切指向, 并主要发育于较软弱夹层内, 后者成为苏鲁地区存在伸展型穹隆构造的新证据; 在 1140~1280 m 岩性段内发育断续、较弱的拉伸线理, 拉伸线理总体向 SE 倾伏, 倾伏角为 10~36°; 花岗质片麻岩单元内部分石英以多晶石英条带的形式存在, 花岗质片麻岩主要矿物长石基本没有动态重结晶现象, 仅具较弱的形态拉长特征 ($X:Z=2$ 左右), 总体面理倾向 170°E, 倾角平均 20°, 明显不同于其他岩性单元内的面理产状, 可能主要代表折返变形之前的近东西向构造, 而其他岩性单元受折返变形影响较大, 其面理产状主要代表折返阶段形成的 NE-NNE 向构造; 运用电子背散射 (EBSD) 技术进行石英组构分析并与费氏台测定对比, 表明 1113~1600 m 花岗质片麻岩单元经历了中—低温变形, 局部残留有高温组构, 剪切指向主要为 SE 向 NW 的逆冲, 其中高温组构与中温组构均显示为 SE 向 NW 的逆冲剪切指向, 反映折返早期与折返主期岩片的相对剪切方向一致; 花岗质片麻岩单元内部变形较弱是由于苏鲁超高压变质带在折返变形过程中花岗质片麻岩单元岩石能干性强因而不易变形所致。晚期脆性变形主要表现为张扭性断裂活动。

关键词: 花岗质片麻岩; 韧性剪切; 石英组构模型

中图分类号: P588.34⁷⁵ **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2005)02-0265-11

1 地质背景

中国大陆科学钻探工程(CCSD)主孔位于苏鲁超高压变质带内的江苏东海县毛北村境内。苏鲁高压—超高压变质带的总体折返面理轨迹为 NE—SW 走向, 朝 SE 和 SEE 缓倾, 其基本构造单元为“剪切构造岩片”, 剪切构造岩片之间的界限为强变形带组成的韧性剪切带, 若干剪切构造岩片又组成“剪切构造叠覆岩片”超单元, 自 SE 向 NW 分为如下单元: 南苏鲁高压低温变质岩剪切构造叠覆岩片 (I)、南苏鲁高压中温变质岩剪切构造叠覆岩片 (II)、北苏鲁超高压变质表壳岩剪切构造叠覆岩片 (III) 和北

苏鲁超高压花岗质变质岩剪切构造叠覆岩片 (IV)^[1]; CCSD 主孔位于北苏鲁超高压变质表壳岩剪切构造叠覆岩片内 (图 1)。根据成分特征, 苏鲁超高压变质岩总体上可划分为 5 大类: 以橄榄岩为代表的超基性岩类, 以榴辉岩为代表的基性岩类, 以片麻岩 (和片岩) 为代表的中酸性岩类, 以石英岩为代表的硅质岩类, 和以大理岩为代表的碳酸岩类^[2]。在超高压变质地体中, 大量榴辉岩和超基性岩呈大小不一的透镜状、团块状夹在大面积分布的围岩—变质表壳岩和花岗质片麻岩中, 其中, 花岗质片麻岩占 70%, 变质表壳岩占 25%, 榴辉岩和超基性岩占 5%^[3]。因此, 花岗质片麻岩在苏鲁超高压变质带占有十分重要的

收稿日期: 2005-03-04; 改回日期: 2005-03-15

基金项目: 科技部 973 项目 (2003CB716500)、中国地质调查局地质大调查项目 (121201056606) 和中国大陆科学钻探工程项目资助。

作者简介: 唐哲民, 男, 1966 年生, 副研究员, 主要从事变形构造研究、区调填图及岩心构造编录等工作; E-mail: tzm6899@163.com。

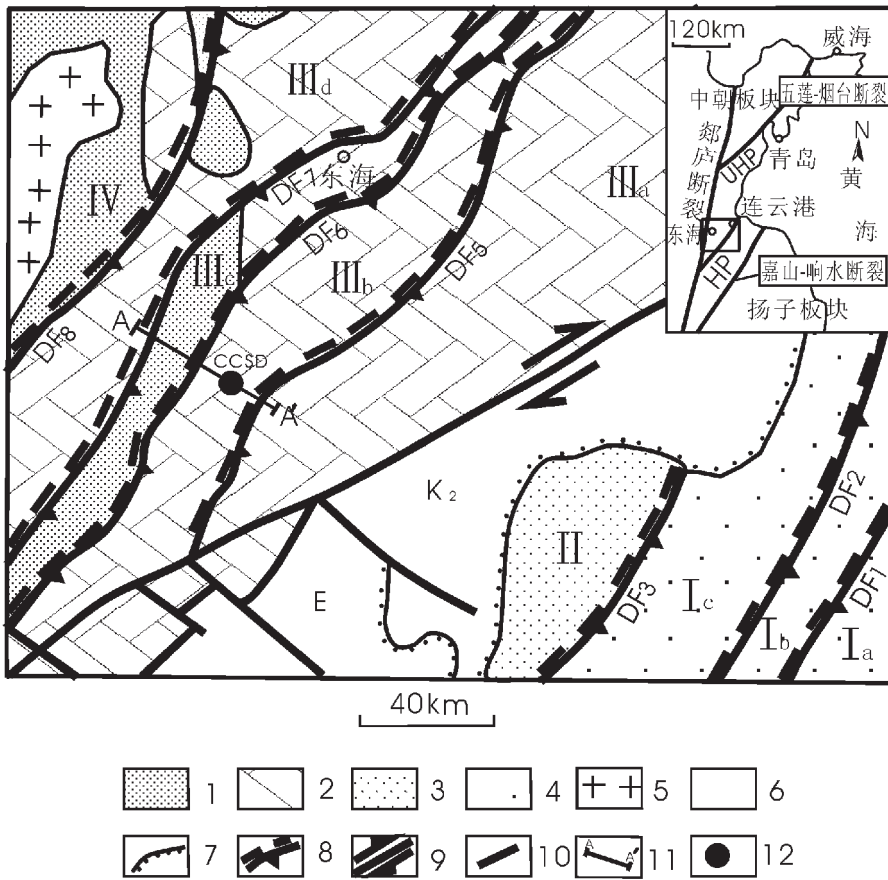


图1 苏鲁连云港地区构造平面图^[9]

- 1—北苏鲁超高压花岗质变质岩剪切构造叠覆岩片(IV);2—北苏鲁超高压变质表壳岩剪切构造叠覆岩片(III);
- 3—南苏鲁高压中温变质岩剪切构造叠覆岩片(II);4—南苏鲁高压低温变质岩剪切构造叠覆岩片(I);5—中生代花岗岩;
- 6—超高压—高压变质岩以外的地层单元;7—角度不整合;8—韧性剪切带(DF₁,DF₂,DF₃,DF₄,DF₅,DF₆,DF₇,DF₈);
- 9—走滑断裂;10—断裂;11—构造剖面位置;12—超深钻位置;
- I—南苏鲁高压低温变质岩剪切构造叠覆岩片: I_a—灌南构造岩片; I_b—连云港构造岩片; I_c—云台山构造岩片;
- II—南苏鲁高压中温变质岩剪切构造叠覆岩片; III—北苏鲁超高压变质表壳岩剪切构造叠覆岩片: III_a—青龙山—房山构造岩片;
- III_b—毛北构造岩片; III_c—石湖镇构造岩片; III_d—石梁河构造岩片; IV—北苏鲁超高压花岗质变质岩剪切构造叠覆岩片

Fig. 1 Tectonic map of the Lianyungang area in the Sulu high-pressure (HP) and ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic belt^[9]

- 1—North Sulu UHP metamorphic granitic gneiss imbricate slice of the northern Sulu (IV);2— North Sulu UHP metamorphic supracrustal imbricate slice (III);
- 3— South Sulu HP and MT (medium-temperature) imbricate slice(II);4— South Sulu HP and LT (low-temperature) imbricate slice(I);
- 5—Mesozoic granite; 6—Other units; 7—Uncomformity;8—Ductile shear zone(DF₁, DF₂, DF₃, DF₄, DF₅, DF₆, DF₇ and DF₈);9—Strike-slip fault;
- 10—Fault; 11—Location of tectonic section; 12— Location of the CCSD; I_a—Guannan slice; I_b—Lianyungang slice;
- I_c—Yuntaishan slice; III_a—Qinglongshan—Fanshan slice; III_b—Maobei slice; III_c—Shihu slice; III_d—Shilianghe slice

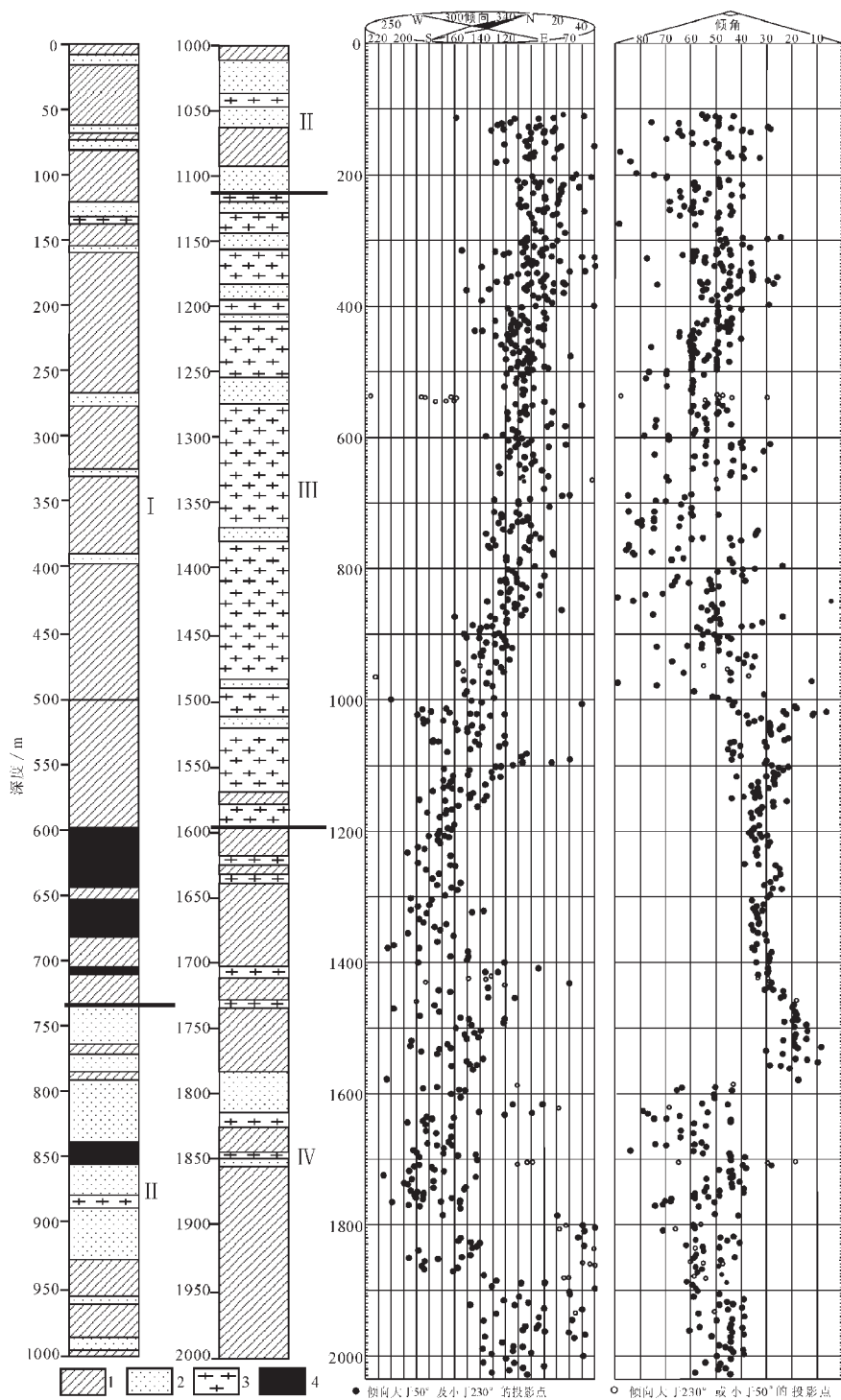


图 2 CCSD 主孔 2000 m 岩性剖面及面理产状变化^[1]

1—含柯石英榴辉岩类岩石;2—含柯石英副片麻岩类岩石;3—含柯石英花岗质片麻岩类岩石;4—超镁铁质类岩石; I—金红石榴辉岩夹超镁铁质岩岩性—构造单元(深度 0~738 m); II—绿帘黑云(角闪)斜长片麻岩夹超镁铁质岩和金红石榴辉岩岩性—构造单元(深度 738~1113 m); III—花岗质片麻岩岩性—构造单元(深度 1113~1637 m); IV—多硅白云母榴辉岩岩性—构造单元(深度 1637~2000 m)

Fig. 2 The upper 2000 m lithologic section and variation in foliation attitude of the main hole of CCSD^[1]

1—Coesite-bearing eclogite; 2—Coesite-bearing paragneiss; 3— Coesite-bearing granitic gneiss; 4—Ultramafic rocks; I—Lithologic-tectonic unit composed of rutile eclogite with ultramafic rocks (0~738 m depth); II— Lithologic-tectonic unit composed of epidote-biotite (-amphibole) plagiogneiss with ultramafic rocks and rutile eclogite (738~1113 m depth); III— Lithologic-tectonic unit composed of granitic gneiss (1113~1637 m depth); IV— Lithologic-tectonic unit composed of phengite eclogite (1637~2000 m depth)

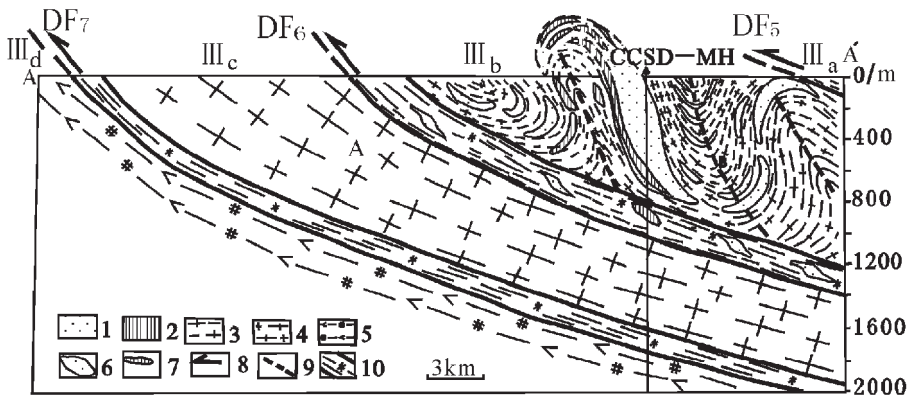


图3 毛北孔区2000m深度以上的构造模式^[1]

1—榴辉岩;2—超镁铁质岩;3—黑云斜长片麻岩;4—花岗质片麻岩;5—角闪石化多硅白云母榴辉岩;
6—榴辉岩透镜体;7—超镁铁质岩透镜体;8—剪切方向;9—褶皱轴(B);10—韧性剪切带;
CCSD-MH—中国大陆科学钻探工程主孔位置;CCSD-PP2—卫星孔。其他图例和剖面位置见图1

Fig. 3 Tectonic model above 2000 m depth of the Maobei drilling site^[1]

1—Eclogite;2—Ultramafic rocks;3—Biotite plagiogneiss;4—Felsic gneiss;5—Retrograde phengite eclogite;
6— Eclogite lens;7—Ultramafic lens;8—Shear sense;9—Fold axis;10—Ductile shear zone;

CCSD-MH—site of the main hole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project;CCSD-PP2—satellite hole

地位。

CCSD 主孔 0~2000 m 自上而下可划分为 4 个岩性-构造单元(图 2):

(1)金石榴辉岩岩性-构造单元(深度 0~738 m),共 738 m。由金石榴辉岩夹超镁铁质岩及少量片麻岩组成。

(2)绿帘黑云(角闪)斜长片麻岩岩性-构造单元(深度 738~1113 m),共 375 m。其中夹超镁铁质岩 8 m 及金石榴辉岩 65 m,还含少量花岗质片麻岩。

(3)花岗质片麻岩岩性-构造单元(深度 1113~1600 m),共 524 m,含少量绿帘黑云(角闪)斜长片麻岩及斜长角闪岩。

(4)多硅白云母榴辉岩岩性-构造单元(深度 1600~2000 m),共 363 m。由多硅白云母榴辉岩夹绿帘黑云(角闪)斜长片麻岩组成,其中榴辉岩 350 m,片麻岩 50 m^[1]。

第一、第二岩性-构造单元对应于图 1 的 III_b—毛北构造岩片,第三岩性-构造单元对应于图 1 的 III_c—石湖镇构造岩片,第四岩性-构造单元对应于图 1 的 III_d—石梁河构造岩片(图 1,图 3),笔者主要研究第三岩性-构造单元(花岗质片麻岩岩性-构造单

元)的变形特征。花岗质片麻岩具 A 型花岗岩的地球化学特征,原岩形成时代为 700~800 Ma,苏鲁地体由榴辉岩及其围岩的原岩所组成的巨量陆壳物质曾普遍发生深俯冲,并经历了超高压变质作用^[4]。

2 花岗质片麻岩单元变形特征

CCSD 主孔 1113~1600 m 花岗质片麻岩单元总体面理走向 80°E,倾向 170°E,倾角 20°^[1];1140~1280 m 岩性段内发育断续、较弱的拉伸线理,由石英、角闪石等沿叶理面的定向拉长显示,拉伸线理总体向 SE 倾伏,倾伏角为 10°~36°,叶理向 S—SSE 倾斜,倾角为 20°~40°(图 4);花岗质片麻岩单元与上下其他岩片之间以韧性剪切带为界^[3],上部韧性剪切带(DF₆,870~1113 m)对应于地表的毛北韧性剪切带,为折返阶段的产物,伴随角闪岩相→绿帘角闪岩相→绿片岩相退变质作用,经历了先由 SE 到 NW 方向的(逆冲)剪切应变,后又由 NW 到 SE 方向的(正滑)剪切应变^[1];下部韧性剪切带(DF₇,1600 m 附近)对应于地表的阿湖—驼峰韧性剪切带,该剪切带发育糜棱岩化退变榴辉岩;花岗质片麻岩单元内部的韧性剪切变形零星发育且较弱,仅局部可见旋转

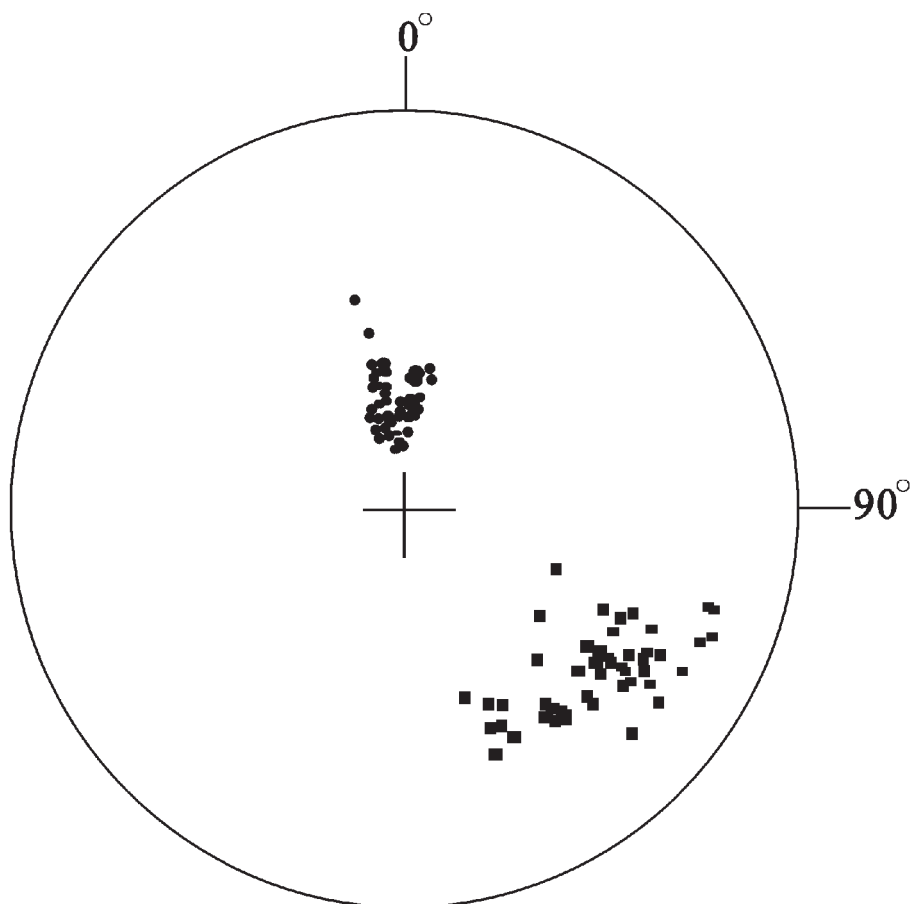


图 4 CCSD 主孔 1140~1280m 内叶理极点及拉伸线理投影图

圆点代表叶理极点投影,方块代表拉伸线理投影

Fig. 4 Projection diagram of the foliation pole and stretching lineation in the 1140 - 1280 m interval of the CCSD main hole

Dot represents projection of the foliation pole; square block represents projection of stretching lineation

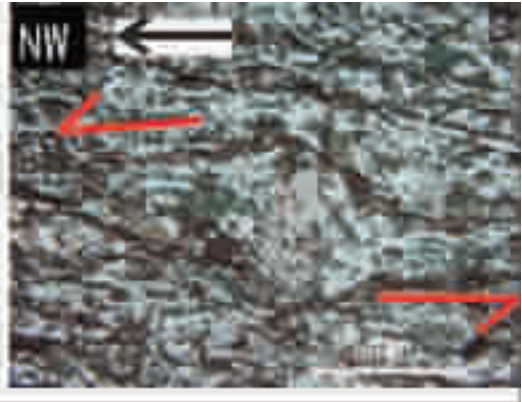
碎斑体系(图版 I-1-2-5)、长英质脉剪切布丁构造(图 5)、S-C 组构(图版 I-4)等剪切指向标志,这些剪切指向标志主要发育于副片麻岩及斜长角闪岩等较软弱夹层内(图 5、图版 I),以逆冲剪切指向为主,其次为正滑剪切指向;花岗质片麻岩单元内叶理普遍发育,部分石英以多晶石英条带的形式存在(图版 I-3),多晶石英条带内石英颗粒大部分呈矩形,长轴平行叶理面,局部见亚颗粒构造。花岗质片麻岩内(图版 I-3-4)的主要矿物长石基本没有动态重结晶现象,仅具较弱的形态拉长特征、透镜体化或以碎斑形式存在(X:Z=2 左右),局部见长石碎斑的端部

被拉长变细或拉断;花岗质片麻岩局部含较多的白云母(图版 I-4),可能与弱韧性剪切变形有关。综上所述,CCSD 主孔 1113~1600 m 花岗质片麻岩单元韧性剪切变形零星发育且较弱,主要发育于较软弱夹层内,是苏鲁超高压变质带在折返变形过程中,花岗质片麻岩单元岩石能干性强因而不易变形所致;由图 2 可知,花岗质片麻岩岩性-构造单元的面理倾向、倾角明显不同于其他岩性单元,它的形成机制可能是:花岗质片麻岩单元受折返变形影响较小,因此它的面理产状主要代表折返变形之前的近东西向构造,而其他岩性单元受折返变形影响较大,其面理产

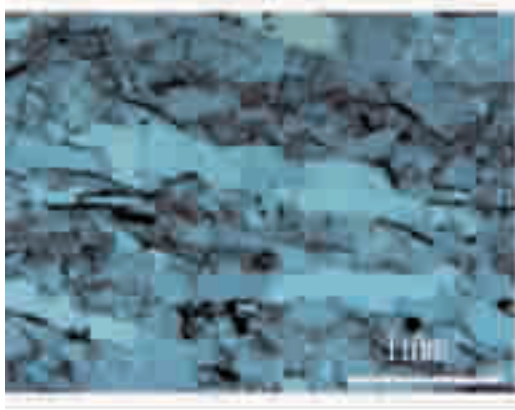
图版 I plate I



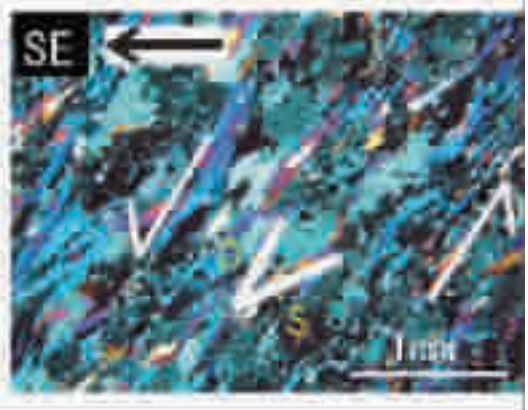
B622R439P5d, 1121 m
 绿帘石旋转碎斑体系示正滑剪切指向
 B622R439P5d, 1121 m
 epidote rolled porphyroclastic
 structure indicates the normal-slip shear sense



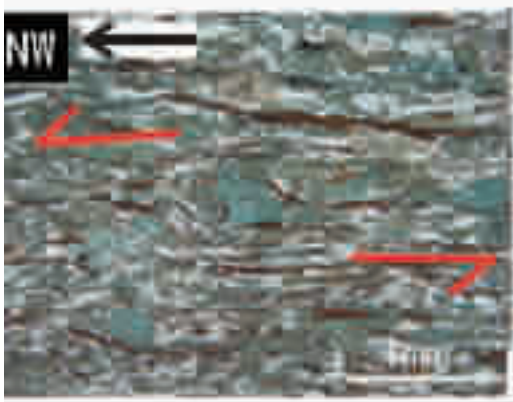
B635R448P7c, 1144 m
 斜长角闪岩内旋转碎斑体系示逆冲剪切指向
 B635R448P7c, 1144 m
 rolled porphyroclastic structure in the interior of amphibolite
 indicates the thrusting shear sense



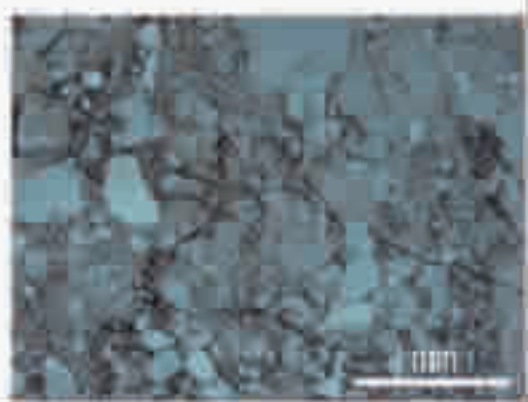
B641R453P2b, 1156 m
 花岗质片麻岩内多晶石英条带
 B641R453P2b, 1156 m
 polycrystalline quartz bands of
 granitic gneiss



B651R461Plx, 1177 m
 白云花岗质片麻岩内 S-C 组构示正滑剪切指向
 B651R461Plx, 117 m
 S-C fabrics in the interior of muscovite granitic gneiss
 indicates the normal-slip shear sense



B691R482P4j, 1256 m
 斜长角闪岩内旋转碎斑体系示逆冲剪切指向
 B691R482P4j, 1256 m
 rolled porphyroclastic structure in the interior of
 amphibolite indicates the thrusting shear sense



B822R560P10, 1586 m
 破碎岩及后期次断裂
 B822R560P10, 1586 m
 cataclastic rocks and late-stage secondary fault

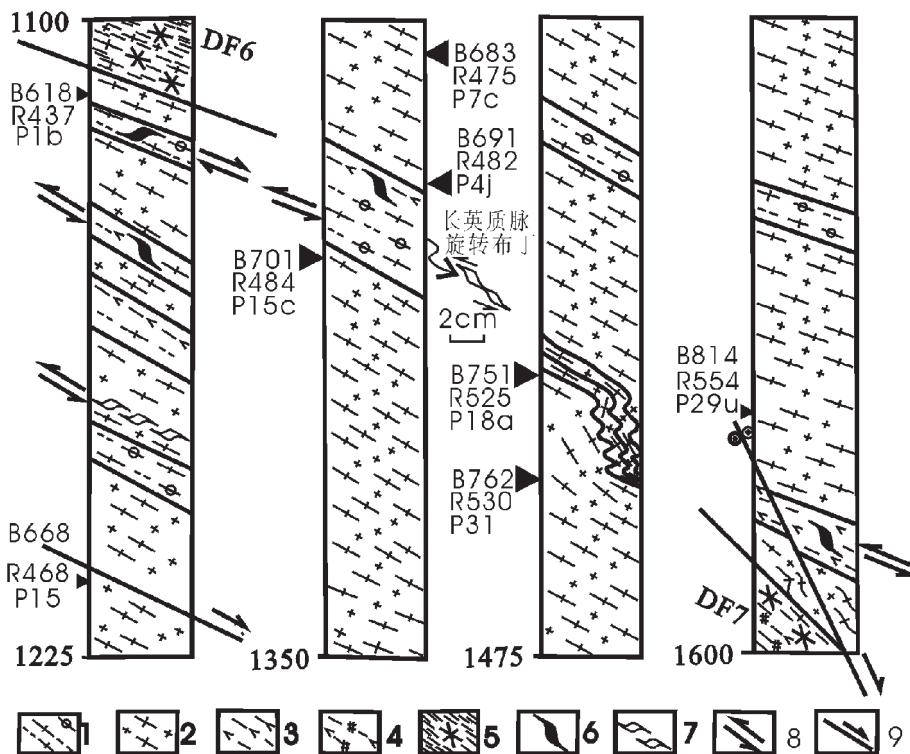


图 5 CCSD 主孔 1113~1600 m 花岗质片麻岩单元构造变形剖面图

1—绿帘黑云斜长片麻岩;2—花岗质片麻岩;3—斜长角闪岩;4—角闪石榴辉岩;5—糜棱岩化带;
6—旋转碎斑;7—S-C 结构;8—剪切指向;9—正断层;DF6—DF7 为岩片界线断层(见图 1)

Fig. 5 Structural deformation section of the granitic gneiss unit in the 1113~1600 m interval of the main hole, CCSD

1-Epidote-biotite plagiogneiss; 2-Granitic gneiss; 3-Amphibolite; 4-Amphibolized eclogite; 5-Mylonitized zone;
6-Rolled porphyroblasts; 7-S-C fabrics; 8-Shear sense; 9-Normal fault.

DF6 and DF7 are faults between slices (see Fig. 1)

状主要代表折返阶段形成的 NE-NNE 向构造,向 SE-SEE 倾斜。

除以上韧性变形以外,主孔 2000 m 范围内,已经识别出不同期次的脆性破裂系统^[5]。1583 m 附近,见 30 cm 厚构造角砾岩,角砾棱角状,角砾内含角砾,反映至少两次断层活动,断层面产状:SEE \angle 68°,擦痕向北侧倾伏,侧伏角 40°,显示左旋张扭性断层活动(图 5);并发育 13 m 厚碎裂岩,碎裂岩内还发育不同方位的后期次级断裂(图版 I-6)。在 1213 m 附近,发育厘米级张性构造角砾岩带及米级碎裂岩带,断层面产状:174° \angle 36°;以上构造角砾岩的角砾成分为花岗质片麻岩,角砾杂乱无定向,胶结物为岩粉、铁质或碳酸盐岩。由上可知,尽管存在多期次的脆性断裂活动,但在 1113~1600 m 花岗质片麻岩岩

性单元内,以左旋张扭性断裂活动最为明显。

3 石英组构特征

3.1 EBSD 技术简介

电子背散射(EBSD)岩石组构测定采用日本电子公司(JEOL)制造的 jsm-5610IV 型扫描电镜和丹麦 HKL 公司制造的 CHANNEL5 型号的 EBSD 仪器,选择了 2 个 CCSD 主孔的花岗质片麻岩定向薄片(XZ 面)——X 轴为拉伸线理方向,XY 面为面理,Z 轴垂直面理方向,经过精细抛光后置于仪器之中,在电镜电子束电压 20 kV 下,首先利用 EBSD 系统对所测的矿物石英确定其 EBSP 衍射模型,然后在薄片的范围内进行矿物的优选方位测定,每幅点数:5063 点。使用 EBSD 仪器测定岩石组构与费氏台

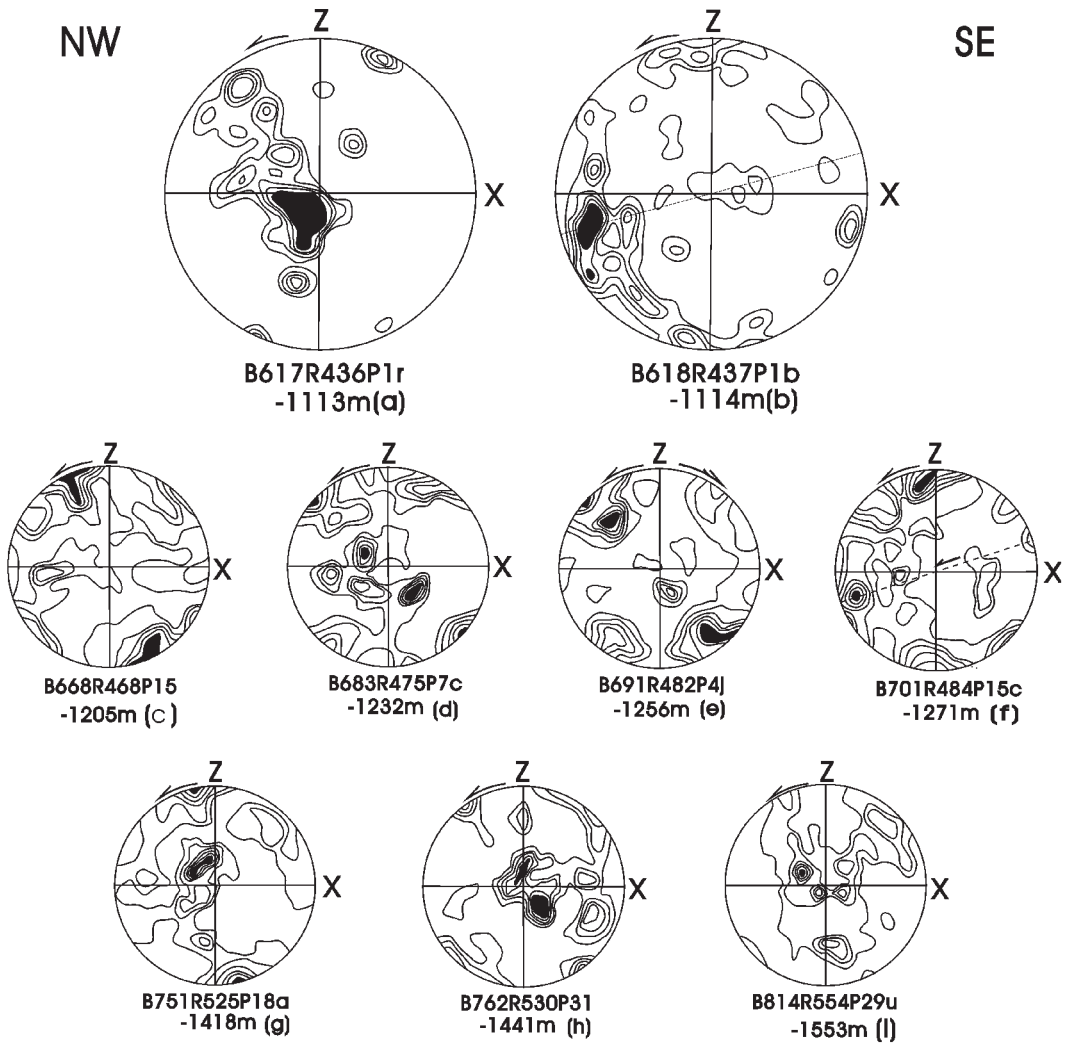


图 6 CCSD 主孔 1113~1600 m 花岗质片麻岩单元的重结晶石英条带优选方位图

- (a)–(b) 采用 EBSD 技术测定; 花岗质片麻岩, $N=12065$ (a), 22758(b), 等密线: 1%~2%~3%~4%~5%;
 (c)、(h)—花岗质片麻岩, $N=120$, 等密线: 0.8%~1.7%~2.5%~3.3%~4.2%;
 (d)、(g)、(i)—花岗质片麻岩, $N=120$, 等密线: 0.8%~1.7%~2.5%~3.3%~4.2%~5%;
 (e)—绿帘斜长角闪岩, $N=120$, 等密线: 0.8%~1.7%~2.5%~3.3%~4.2%~5%;
 (f)—绿帘角闪斜长片麻岩, $N=120$, 等密线: 0.8%~1.7%~2.5%~3.3%~4.2%~5%

Fig. 6 Quartz preferred orientation diagrams of recrystallized quartz bands of the granitic gneiss unit in the 1113–1600 m interval of the main hole, CCSD

- (a)–(b) analyzed using EBSD technology granitic gneiss $N=12065$ (a), 22758(b), isodensity: 1%~2%~3%~4%~5%;
 (c)、(h)—granitic gneiss, $N=120$, isodensity: 0.8%~1.7%~2.5%~3.3%~4.2%;
 (d)、(g)、(i) – granitic gneiss, $N=120$, isodensity: 0.8%~1.7%~2.5%~3.3%~4.2%~5%;
 (e) – epidote amphibolite, $N=120$, isodensity: 0.8%~1.7%~2.5%~3.3%~4.2%~5%;
 (f) – epidote–hornblende plagiogneiss, $N=120$, isodensity: 0.8%~1.7%~2.5%~3.3%~4.2%~5%

测定岩石组构相比的一个主要优点是:前者测定的矿物晶体数目远远大于后者,因此,通过 EBSD 仪器测定得到的岩石组构模型更具代表性。

3.2 石英组构特征

运用新的 EBSD 技术对花岗质片麻岩为主的 1113~1600 m 岩性单元内发育重结晶石英条带的岩石的石英组构分析(图 6-a-b)并与费氏台测定(图 6-c, 6-i)对比表明:花岗质片麻岩内重结晶石英条带(图 6-a,d,g)发育低温($\leq 400^\circ$)底面 $\{0001\}$ $\langle a \rangle$ 型组构及中温($550\sim 650^\circ$)柱面 $\{1010\}$ $\langle a \rangle$ 型组构,花岗质片麻岩(图 6-b)与绿帘角闪斜长片麻岩(图 6-f)发育高温($\geq 650^\circ$)柱面 $\{1010\}$ $\langle c \rangle$ 型组构及低温($\leq 400^\circ$)底面 $\{0001\}$ $\langle a \rangle$ 型组构,花岗质片麻岩(图 6-c)及绿帘斜长角闪岩(图 6-e)发育低温($\leq 400^\circ$)底面 $\{0001\}$ $\langle a \rangle$ 型组构,花岗质片麻岩(图 6-h-i)发育中温($550\sim 650^\circ$)柱面 $\{1010\}$ $\langle a \rangle$ 型组构。在以上花岗质片麻岩为主的 1113~1600 m 岩性单元内重结晶石英条带的所有组构模型中,以逆冲剪切指向为主,剪切指向从 SE 到 NW,部分叠加较弱的后期正滑剪切指向,与岩心露头及显微构造指示的剪切指向总体一致,其中高温组构与中温组构均显示为 SE 向 NW 的逆冲剪切指向。

区域上苏鲁超高压剪切叠覆岩片的石英组构测定表明:即有中低温组构模型,又有高温组构模型,前者强极密表明剪切指向从 SE 到 NW;弱极密表明剪切指向从 NW 到 SE,与后期韧-脆性正滑构造吻合。因此,CCSD 主孔 1113~1600 m 花岗质片麻岩单元石英组构测定结果与区域上苏鲁超高压剪切叠覆岩片的石英组构测定结果基本吻合。

4 结论与讨论

(1)CCSD 主孔 1113~1600 m 花岗质片麻岩单元(第三岩性-构造单元)内部的韧性剪切变形零星发育且较弱,仅局部可见旋转碎斑体系等剪切指向标志,以逆冲剪切指向为主,并主要发育于较软弱夹层内,该单元内部分石英以多晶石英条带的形式存在,花岗质片麻岩内主要矿物长石基本没有动态重结晶现象,仅具较弱的形态拉长特征($X:Z=2$ 左右);因此,花岗质片麻岩单元总体上反应了较弱的变形特征。第一岩性-构造单元(金石榴榴辉岩岩性-构造单元)与第二岩性-构造单元(绿帘黑云斜长片麻岩岩性-构造单元)上段构成同斜倒转褶皱

系,褶皱轴面向 SE 倾斜,第二岩性-构造单元下段为强应变的韧性剪切带^[1],第四岩性-构造单元(多硅白云母榴辉岩岩性-构造单元)大部分岩石均具强烈压扁拉长特征($X:Z=4$ 左右);因此,4 个岩性-构造单元中唯有花岗质片麻岩岩性-构造单元变形较弱,是苏鲁超高压变质带在碰撞或折返变形过程中,花岗质片麻岩单元岩石能干性强因而不易变形所致,说明了在相同的变形环境下,不同岩性变形强弱可以差异很大。

(2)虽然花岗质片麻岩单元变形较弱,但每一期折返变形在该单元均有表现,并与其他岩性-构造单元显示了基本相同的变形运动学特征,以 SE 向 NW 的逆冲剪切指向为主;区域上苏鲁等地区都经历了一期主要的折返变形,发育 NW-SE 向拉伸线理,上部向 NW 剪切^[3,9],因此,CCSD 主孔 0~2000 m 岩心段与苏鲁地区区域上具有相同的折返主期变形运动学特征,许志琴等^[9]认为该期变形是在挤出机制下形成的;苏鲁地区 NW 向 SE 的正滑剪切指向是伸展变形的结果^[1,7-8],形成穹隆构造,北部形成白垩纪莱阳盆地^[9]及剪切指向向 N(W)的伸展型正滑构造带^[9],南部由早期的 SE 向 NW 的逆冲剪切指向转为 NW 向 SE 的正滑剪切指向^[9];CCSD 主孔花岗质片麻岩单元内相对较弱但很明确的 NW 向 SE 的正滑剪切指向是苏鲁地区具伸展型穹隆构造的证据之一。

(3)1140~1280 m 岩性段内发育断续、较弱的拉伸线理,拉伸线理总体向 SE 倾伏,倾伏角为 $10^\circ\sim 36^\circ$,与苏鲁地区区域上的拉伸线理方位总体一致。

(4)石英组构分析表明,1113~1600 m 花岗质片麻岩单元经历了中、低温变形,局部残留有高温组构,剪切指向主要为 SE 向 NW 的逆冲,与岩心露头及显微构造指示的剪切指向总体一致,其中高温组构与中温组构均显示为 SE 向 NW 的逆冲剪切指向;高温组构反映的是折返早期的变形特征,而中温组构反映的是折返主期(角闪岩相变形环境)的变形特征^[9],因此,折返早期与折返主期岩片的相对剪切方向是一致的。

(5)花岗质片麻岩单元的面理倾向、倾角明显不同于其他岩性单元,它的形成机制可能是:花岗质片麻岩单元受折返变形影响较小,因此它的面理产状主要代表折返变形之前的近东西向构造,而其他岩性单元受折返变形影响较大,其面理产状主要代表折返阶段形成的 NE-NNE 向构造,向 SE-SEE 倾斜。

(6)晚期脆性变形主要表现为张扭性断裂活动。

本文在成文过程中,得到了许志琴院士的指导,作者深表感谢。

参考文献 (References):

- [1] 许志琴,张泽明,刘福来,等.中国大陆科学钻探主孔 1200m 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 0~2000m in the main borehole,Chinese Continental Scientific Drilling and its preliminary deformation analysis [J]. Acta Petrologica Sinica, 2004,20(1):53~72 (in China with English abstract).
- [2] 张泽明,许志琴,刘福来,等.南苏鲁造山带根部的物质组成及变质作用[J].地质通报,2002,21(8):610~616.
Zhang Zeming, Xu Zhiqin, Liu Fulai,et al.Composition and metamorphism of the root of the southern Sulu orogen[J].Geological Bulletin of China, 2002,21(8):610~616 (in China with English abstract).
- [3] 许志琴,张泽明,刘福来,等.苏鲁高压—超高压变质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 China with English abstract).
- [4] 刘福来,许志琴,杨经绥,等.中国大陆科学钻探工程主孔及周边地区花岗质片麻岩的地球化学性质和超高压变质作用标志的识别[J].岩石学报,2004,20(1):9~26.
Liu Fulai,Xu Zhiqin,Yang Jingsui,et al.Geochemical characteristics and UHP metamorphism of granitic gneisses in the main drilling hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project and its adjacent area[J].Acta Petrologica Sinica,2004,20(1):9~26 (in China with English abstract).
- [5] 崔军文,王连捷,李朋武,等.中国大陆科学钻探主孔 2000 米以上脆性变形构造应力场[J].岩石学报,2004,20(1):73~80.
Cui Junwen,Wang Lianjie,Li Pengwu,et al.Tectonic stress field of brittle deformation within 2000m of the main borehole,Chinese Continental Scientific Drilling[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004,20(1):73~80 (in China with English abstract).
- [6] Michel Faure,Wei Lin,Patrick Monie,et al. Exhumation tectonics of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Qinling orogen in East China:New Petrological-structural-radiometric insights from the Shandong Peninsula[J].Tectonics, 2003,22(3):1~22 .
- [7] 索书田,钟增球,游振东,等.大别—苏鲁区残余超高压构造及其动力学意义[J].地球科学,2000,25(6):55~63.
Suo Shutian,Zhong Zengqiu,You Zhendong,et al.Relic UHP structures in Dabie-Sulu region,China:structural expression and geodynamic significance [J].Earth Science, 2000,25(6):55~63 (in China with English abstract).
- [8] 李锦轶,杨天南,陈文,等.中国东部东海地区超高压变质岩构造变形事件的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年与超高压变质岩折返过程的重建[J].地质学报,2004,78(1):97~108.
Li Jinyi, Yang Tiannan, Chen Wen, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of deformation events and reconstruction of exhumation of ultrahigh-pressure metamorphic rocks in Donghai,East China[J].Acta Geologica Sinica, 2004, 78(1):97~108 (in China with English abstract).
- [9] 杨天南,陈文,李锦轶,等.苏鲁超高压变质地块的回返历史[J].地质论评,2002,48(3):176~182.
Yang Tiannan,Chen Wen,Li Jinyi,et al.Exhumation history of the Sulu UHPM terrane[J].Geological Review, 2002,48(3):176~182(in Chinese with English abstract).

Deformational characteristics of the granitic gneiss unit from the 1113–1600 m core of the CCSD main hole

TANG Zhe-min, CHAI Yao-chu, CHEN Shi-zhong, CHEN Fang-yuan

(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)

Abstract: The lithologic section of the upper 2000 m core from the main hole of CCSD reveals that the granitic gneiss unit of the 1113–1600 m interval of core is the downward extension of granitic gneisses of the Shihu slice of the North Sulu ultrahigh-pressure metagranitic gneiss imbricate tectonic slice at the surface. The upper and lower boundaries of this unit are ductile shear zones, and in the interior of this unit minor ductile shear deformation is developed. The shear sense markers (rolled porphyroclastic structure, etc.) are only seen locally. They, mainly located in interbeds of weakness, are dominated by the SE–NW thrust shear sense with subordinate NW–SE normal-slip shear sense. The latter is new evidence for the existence of extensional dome structure in the Sulu area. In the 1140–1280 m lithologic interval there occurs discontinuous, weak stretching lineation, which generally plunges SE at angles of 10–36°. Some quartz in granitic gneisses occurs as polycrystalline quartz bands. The dominant mineral feldspar in the granitic gneisses essentially shows no phenomenon of dynamic recrystallization and has only the feature of weak stretching ($X:Y=2$ or so); foliation of the granitic gneiss unit generally dips 170°E at 20° on the average, which is notably different from the attitude of foliation the other lithologic units. Foliation of the granitic gneiss unit probably represents E–W-directed structure before exhumation and deformation; whereas other lithologic units are greatly influenced by exhumation and deformation. The foliation mainly represents NE–NNE structure formed in the exhumation phase. EBSD analysis of the quartz fabric and comparison of the analytic results with the results obtained by the Fedorov stage indicate that the granitic gneiss unit in the 1113–1600 m core has undergone medium- to low-temperature deformation, with the high-temperature fabric survived locally. The shear sense is mainly the vergence of thrusting from SE to NW. The high-temperature fabric and medium-temperature fabric both indicate the SE–NW thrusting shear sense, reflecting the consistency of the senses of relative shear of the slice in the early stage and main stage of exhumation. The weak deformation in the interior of the granitic gneiss unit is due to the fact that rocks of the granitic gneiss unit were so competent during exhumation and deformation that they were deformed difficultly. Brittle deformation in the late stage is mainly marked by tension-shear faulting.

Key words: granitic gneiss; ductile shear; quartz LPO model

About the first author: TANG Zhe-min, male, born in 1966, bachelor, senior researcher, mainly engages in the study of deformational structure, regional geological survey and mapping and documentation of structure of core; E-mail: tzm6899@163.com.