

南天山榆树沟麻粒岩相构造岩研究*

王居里 王润三 周鼎武 王焰 刘养杰

西北大学地质系, 西安 710069.

Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069.

1998-05-12 收稿, 1999-07-10 改回.

Wang Juli, Wang Runsan, Zhou Dingwu, Wang Yan and Liu Yangjie. 1999. A study of tectonites of granulite facies in Yushugou, South Tianshan, China. *Acta Petrologica Sinica*, 15(4):539~547

Abstract Tectonites of granulite facies in Yushugou occur as mylonite zones and mylonitized zones with highly rheomorphic foliations, and are characterized by the microstructures of plastic deformation of main rock-forming minerals. During the deformation, chemical composition change was very slight between neocrysts of dynamic recrystallization and porphyroclasts of plastic deformation from the same rock-forming mineral, which shows that the activity of water was low and the deformation mechanism was mainly dislocation creep. The tectonites were formed at the late-stage of metamorphism of granulite facies in deep crust, and were products of retrograde metamorphism and intense deformation of ductile shear due to the tectonic uplift that made the terrane got into the environment of deep crust granulite facies after the metamorphism of high pressure granulite facies of the terrane at the bottom of lower crust or the top of upper mantle. The tectonites underwent fast tectonic uplift after their formation.

Key words South Tianshan, Xinjiang, Ductile shearing in deep crust, Tectonites of granulite facies, Tectonic uplift

摘要 榆树沟麻粒岩相构造岩宏观上呈糜棱岩带和糜棱岩化带产出, 发育强烈流变叶理; 微观上主要造岩矿物发育各种塑性变形显微构造。变形过程中同种造岩矿物的动态重结晶新品与塑变残斑(残晶)之间化学成分变化不明显, 表明在变形期间水活度低, 以位错蠕变为主。该构造岩形成于深地壳麻粒岩相变质的晚期阶段, 是地体在早期阶段于下地壳底部-上地幔顶部发生高压麻粒岩相变质作用后因构造抬升进入深地壳麻粒岩相环境下发生退变质和强烈韧性剪切变形的产物, 其形成后经历了快速的构造折返过程。

关键词 新疆; 南天山; 深地壳韧性剪切作用; 麻粒岩相构造岩; 构造抬升

中图分类号 P588.33

70年代以来, 构造岩研究取得了长足的进展, 尤其是近十多年来, 人们开始重视岩石在下地壳环境中的变形行为乃至上地幔流变状态的研究, 对麻粒岩相条件下岩石中矿物变形显微构造, 不论是天然变形还是实验变形方面的研究都取得了不少重要成果 (Ji and Mainprice, 1988, 1990; Ji and Martignole, 1994; 何永年等, 1988; 马宝林等, 1992, 1993; 郭敬辉等, 1992; Carney *et al.*, 1991; Ross and Wilks, 1996)。最近笔者在新疆南天山榆树沟深地壳麻粒岩地体(王润三等, 1999a)中发现了变形现象丰富、独特的麻粒岩相构

造岩。这一发现对于认识深部地壳的物质组成、结构, 尤其是深地壳麻粒岩相条件下岩石、矿物的变形行为, 进一步探讨深地壳乃至上地幔顶部的构造作用过程提供了难得的天然实例。本文重点论述榆树沟麻粒岩相构造岩的组构特征, 主要造岩矿物的变形显微构造, 变形与岩石、矿物化学成分的关系以及变形环境, 扼要讨论其构造动力学意义。

1 地质概况

南天山榆树沟麻粒岩地体位于南天山早一中古生代活

* 本文研究由国家自然科学基金项目(批准号49472135)资助。

第一作者简介: 王居里, 男, 1958年出生, 博士, 副教授, 岩石学专业。

动大陆边缘的南缘(肖序常等, 1992), 北距中天山南缘包尔图断裂带约 21km。榆树沟麻粒岩地体由四个岩石单元组成

(图 1-a, -b); 变质橄辉岩(I)单元, 主要由尖晶二辉橄辉岩(辉石地幔岩)组成, 夹多层尖晶斜长二辉岩; 二辉麻粒岩

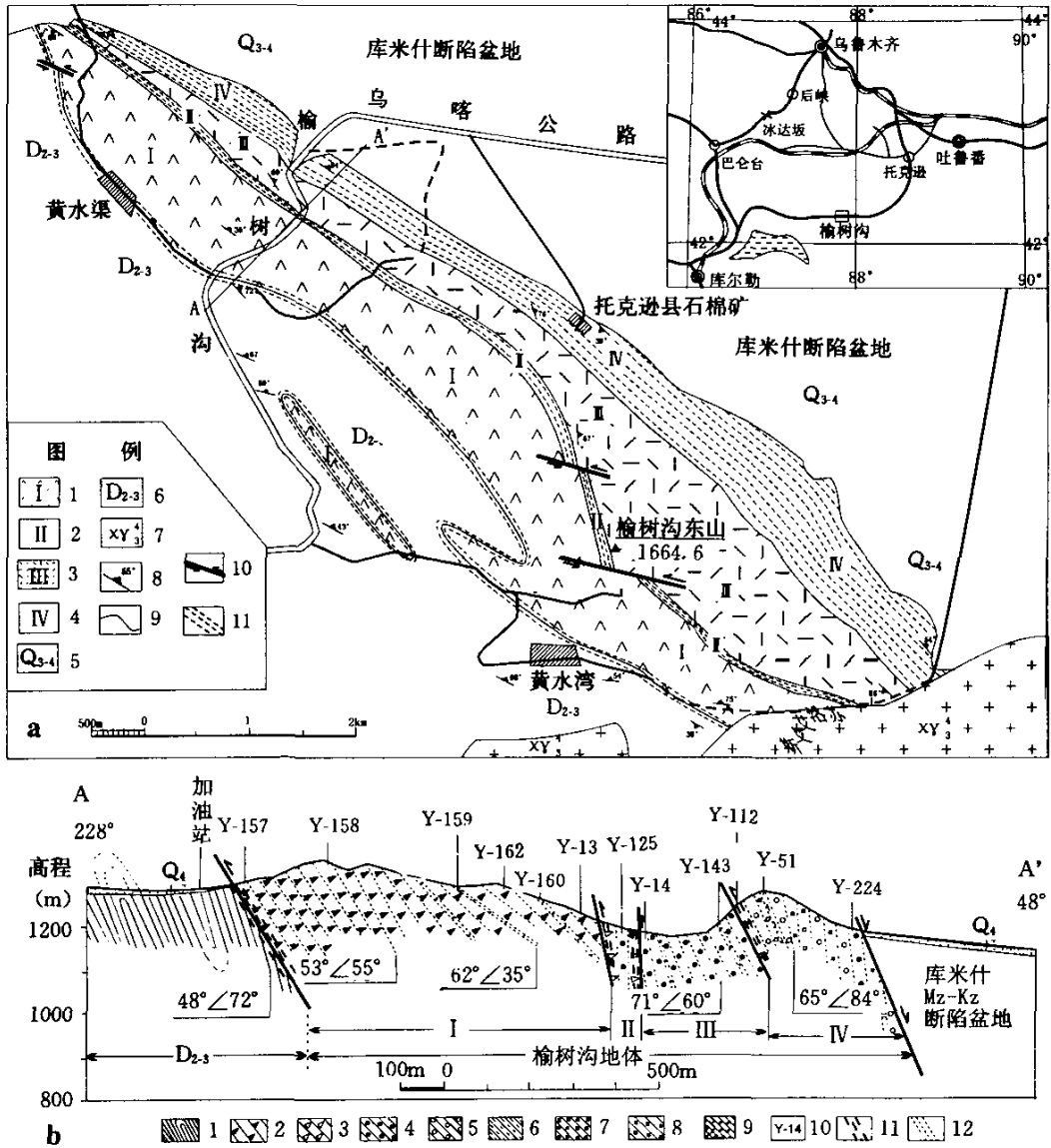


图 1 榆树沟麻粒岩地体地质略图(a)和地质剖面图(b)

a 图中: 1. 变质橄辉岩(I)单元; 2. 二辉麻粒岩(I)单元; 3. 石榴方辉麻粒岩(II)单元; 4. 中基性麻粒岩互层(IV)单元; 5. Q₃₋₄砂砾层; 6. 中-上泥盆统地层; 7. 红色钾长花岗岩; 8. 构造面理产状; 9. 地质界线; 10. 平移断层; 11. 剪切带。b 图中: 1. 中、上泥盆统(?)绢云石英片岩、大理岩及石英角斑岩; 2. 变质橄辉岩; 3. 尖晶斜长二辉岩(超超镁铁质-镁铁质堆晶岩或变橄辉斑玄武岩); 4. 斜长石榴单斜辉石岩(变斑玄武岩及个别玄武质砂岩); 5. 斜长石榴二辉岩(变斑玄武岩); 6. 夕线石榴片麻岩(变粘土岩); 7. 斜长石榴紫苏辉石岩(变玄武质砂岩); 8. 石榴紫苏麻粒岩(变杂砂岩); 9. 大理岩; 10. 采样位置及样品编号; 11. 韧性剪切带; 12. 构造面理

Fig. 1 Geological sketch (a) and geological section (b) of Yushugou terrane of granulite facies

(Ⅱ)单元,主要由尖晶斜长二辉岩组成,夹少量斜长石榴单斜辉石岩,底部有极少量强变形的尖晶斜方辉石岩和斜长岩;石榴单斜辉石麻粒岩(Ⅲ)单元,主要由斜长石榴单斜辉石岩组成,夹少量斜长角闪岩和极少量斜长石榴紫苏辉石岩透视镜体;中、基性麻粒岩互层(Ⅳ)单元,由(角闪)斜长石榴单斜辉石岩、斜长石榴二辉岩、斜长石榴紫苏辉石岩,石榴紫苏麻粒岩、夕线石榴斜长片麻岩和大理岩等组成。它们呈构造层状依次由南西向北东排列,走向北西-南东,向北东呈中等陡倾斜,各单元间以韧性剪切带接触,局部被晚期构造改造。地体北侧为库米什中-新生界断陷盆地,南侧以剪切带与中-上泥盆统地层构造接触,南东端被华力西期红色钾长花岗岩侵入(图1-a)。地质及岩石学和地球化学特征表明,榆树沟麻粒岩地体中Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ单元及Ⅳ单元中的变质超镁铁质和镁铁质岩的原岩成分分别相当于方辉橄辉岩(大洋岩石圈地幔岩)、超镁铁质堆晶岩和橄辉拉斑玄武岩,少量石英拉斑玄武岩,是一个遭受(高压)麻粒岩相变质变形改造的、基本完整的蛇绿岩套(王润三等,1999b),蛇绿岩的形成年龄为 $440 \pm 18 \text{ Ma}$,第一期变质年龄为 $364 \pm 5 \text{ Ma}$ (锆石 U-Pb,王润三等,1998)。Ⅳ单元中副变质岩的原岩为构造卷入的杂砂岩、粘土质岩和碳酸盐岩(王润三等,1997)。

榆树沟麻粒岩地体经历了麻粒岩相条件下强烈的应变作用过程,整体上呈遭受强烈韧性剪切变形的构造岩片出露。但由于岩石的矿物组成和原岩化学成分不同,使得岩石力学性质不同,各岩石单元以及单元内部的变形强度有明显的差异,形成规模不等、变形强度有别的次级韧性剪切带。各次级剪切带具有一致或相近的产状,在空间上呈平行或近平行带状排列,构成强应变带与弱应变域相间分布的总体格局(图1-a)。榆树沟麻粒岩相构造岩在地体内Ⅰ单元、Ⅱ单元和Ⅳ单元的基性麻粒岩(正变质岩)中发育较好,由剪切带的两侧向中心分别发育糜棱岩化岩石、初糜棱岩和糜棱岩;在Ⅳ单元的中性麻粒岩(副变质岩)中,变形强烈,构造岩主要为糜棱岩;在Ⅲ单元中,变形相对较弱,仅在单元边缘变形较明显,局部发育初糜棱岩。

2 构造岩的岩石学特征

榆树沟麻粒岩相构造岩由强烈塑性变形的糜棱岩类岩石组成,按照原岩岩石学化学特征可划分为超基性糜棱岩类、基性糜棱岩类和中性糜棱岩类,各类中按糜棱岩化程度的不同又可分为糜棱岩化岩石,初糜棱岩和糜棱岩。

超基性糜棱岩类主要发育于Ⅰ单元,Ⅱ单元底部也有少量发育。由于Ⅰ单元岩石普遍遭受后期不同程度的蛇纹石化及相应的脆-韧性或脆性变形,对麻粒岩相变形形迹有一定改造、破坏,但详细的野外工作发现仍保留有麻粒岩相超基

性糜棱岩的特征。由剪切带两侧向中心分别发育糜棱岩化岩石、初糜棱岩和糜棱岩。随糜棱岩化程度增强,岩石中残斑含量减少,粒度减小;基质含量增多,粒度进一步变小($0.005 \sim 0.01 \text{ mm}$)。糜棱岩化强烈处残斑含量为 $55\% \sim 30\%$,构成典型的初糜棱结构和糜棱结构(图2-1),发育明显的塑性变形显微构造;残斑和基质均定向排列构成条带状构造。该糜棱岩类中,基质(新品)与残斑(残晶)除各矿物相对含量不同外,分别具有相同的矿物组合:Sp + Opx(顽-古铜辉石) + Cpx(透辉石、深绿辉石) + Ol,表明韧性剪切变形与麻粒岩相变质处于相同或相近的环境下。

基性糜棱岩类主要形成于Ⅰ单元和Ⅳ单元的基性麻粒岩(正变质岩)中,在Ⅲ单元边部也有分布。Ⅰ单元和Ⅳ单元全部遭受糜棱岩化(图1-a),但Ⅲ单元比Ⅳ单元糜棱岩化强烈,由剪切带边缘向中心依次发育糜棱岩化岩石、初糜棱岩和糜棱岩。随着糜棱岩化程度的增高,岩石中残斑含量减少,基质含量增多,动态重结晶程度增高,整体粒度减小。剪切带的组成以糜棱岩为主,初糜棱岩次之,糜棱岩化岩石较少。糜棱岩中残斑含量较少($35\% \sim 25\%$),粒度较小($0.5 \sim 1.5 \text{ mm}$),动态重结晶强烈,基质粒度为 $0.005 \sim 0.02 \text{ mm}$ 。残斑矿物斜长石、斜方辉石和单斜辉石多被压扁、拉长、或扭折,或呈不对称状,强烈波状、带状消光、亚颗粒化和边缘动态重结晶形成核幔构造。岩石发育典型的初糜棱结构和糜棱结构(图2-2, -3)。塑变残斑和基质强烈定向排列构成显著的流变叶理,使岩石呈细条带状-条纹状构造。Ⅳ单元中基性麻粒岩糜棱岩化程度相对较低,主要形成初糜棱岩,局部发育糜棱岩(图2-4),残斑含量为 $55\% \sim 35\%$,岩石中主要造岩矿物也表现出明显的塑性变形特征。此糜棱岩类中,基质(新品)与残斑(残晶)也具有相同的矿物组合:Ⅰ单元中为Opx(紫苏-古铜辉石) + Cpx(深绿辉石) + Pl ± Q;Ⅳ单元中为Opx(紫苏辉石) + Cpx(深绿辉石、透辉石) + Gt + Pl ± Q。也表明韧性剪切变形发生于麻粒岩相条件下。

中性糜棱岩类仅产于Ⅳ单元中的副变质岩中,变形强烈,在Ⅳ单元剪切带中主要为糜棱岩,岩石中残斑含量明显减少,为 $20\% \sim 10\%$,矿物的压扁拉长、亚颗粒化和动态重结晶等塑性变形更加明显,极细粒基质(新品)矿物含量显著增高,构成典型的糜棱结构(图2-5, -6);新品与残晶均定向排列形成强烈流状构造,使岩石呈致密条纹状。该糜棱岩类中新品与残晶同样具有相同的矿物组合:Opx(紫苏辉石) + Gt + Pl + Q,也说明韧性剪切变形发生于麻粒岩相环境。

在基性糜棱岩类中,保留有部分高压麻粒岩(Y-125, Y-126, Y-14等)。其特征变质矿物组合为Gt + Cpx + Pl + Sph + Ilm ± Q。与其他麻粒岩相比,高压麻粒岩总体变形相对较弱,岩石多表现为粒状变晶结构(Y-14),局部变形稍

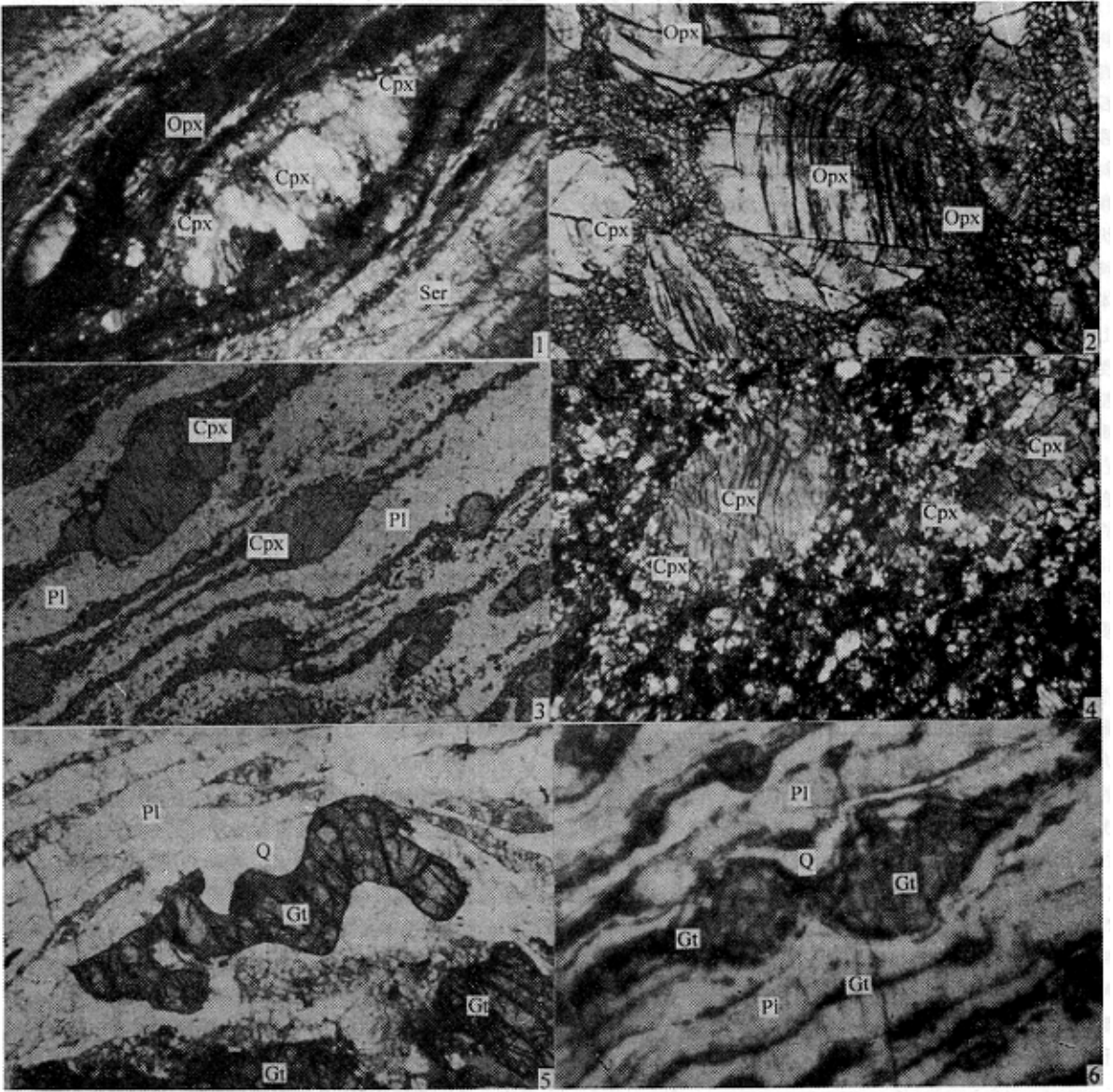


图2 榆树沟麻粒岩相构造岩的结构特征

1. 糜棱结构, 单斜辉石(Cpx)集合体呈长透镜状沿糜棱面理分布, 边缘动态重结晶, 斜方辉石(Opx)扭曲。I单元, Y-157, 单偏光, 长边=2.3mm; 2. 初糜棱结构, Opx强烈扭折, 边缘动态重结晶形成核幔构造。II单元, Y-121, 单偏光, 长边=2.3mm; 3. 糜棱结构, Cpx残斑及核幔构造和拖尾构造, Cpx动态重结晶颗粒的细条带状流状构造。III单元, Y-126, 单偏光, 长边=2.3mm; 4. 糜棱结构, Cpx晶体扭折、亚颗粒化及边缘动态重结晶形成核幔构造, 塑变残斑及其拖尾平行糜棱面理分布(照片中左下角-右上角方向)。N单元, Y-173, 正交偏光, 视域长边=1.8mm; 5. 糜棱结构, 褶曲状石榴石(Gt)塑变残斑, 内部发育密集微裂纹, 残斑包络面平行流状糜棱面理, N单元, Y-39, 单偏光, 长边=2.2mm; 6. 糜棱结构, Gt的不对称型变残斑、核幔构造及拖尾构造。重结晶极细粒Gt条带(纹)状集合体沿糜棱面理流状分布, N单元, Y-149, 单偏光, 长边=3.8mm

Fig. 2 Photomicrographs showing the textures of the tectonites of granulite facies in Yushugou

强者为糜棱结构(Y-126), 残斑含量 45%~30%。这种情况说明, 榆树沟麻粒岩地体曾经历高压麻粒岩相变质(王润三等, 1999a), 高压麻粒岩形成后有一定幅度的构造抬升, 在深地壳中压(偏高)麻粒岩相条件下经再变质、变形叠加改造形成相应的麻粒岩相构造岩。

3 变形矿物的显微构造

上述表明, 榆树沟麻粒岩相构造岩是深地壳麻粒岩相条件下矿物强烈塑性变形的产物。由于矿物本身物理性质的差异, 导致在相同或相近的构造作用条件(T 、 P 、 ϵ 、 t)下不同矿物表现出不尽相同的变形行为, 而同种矿物在不同的应变条件下则发育不同的变形显微构造。榆树沟麻粒岩相构造岩中主要造岩矿物 Orx 、 Cpx 、 Pl 、 Gt 等均表现出强烈的塑性变形特征, 均变成塑变残斑(残晶)和动态重结晶基质(新晶)两部分。

随岩石应变强度的增大, 斜方辉石由强烈波状、带状消光逐渐演变为强烈曲折(图 2-2)、压扁, 拉长扭曲成“带鱼状”, 亚颗粒化及边缘强烈动态重结晶形成核幔构造等, 皆表现出强烈塑性变形显微构造特征。单斜辉石由发育强烈波状、带状消光演变为呈不对称残斑状, 晶体内部发育机械双晶、曲折、亚颗粒化及边缘动态重结晶形成核幔构造, 重结晶极细粒新晶同时构成单斜辉石残斑的拖尾或呈细条带状集合体流状分布(图 2-3、-4)。同样表现出强烈塑性变形显微构造特征。斜长石普遍表现为强烈塑性变形, 强烈波状消光, 晶体被拉长成透镜状或带状, 发育机械双晶及动力砂钟构造, 强烈亚颗粒化和动态重结晶形成核幔构造。有的残斑消失, 演变为由亚颗粒化和重结晶新晶集合体组成的流状条带, 绕辉石和石榴石残斑分布(图 2-3、-6)。

非常突出的是, 榆树沟麻粒岩相构造岩中石榴石表现出强烈塑性变形特征, 既表现为呈强烈褶曲状的塑变残斑(图 2-5)产出, 发育密集晶内破裂, 也呈极细粒动态重结晶新晶基质沿糜棱面理流状分布(图 2-6), 甚至在石榴石塑变残斑边缘由动态重结晶形成薄幔而构成核幔构造, 并形成不对称塑变残斑的拖尾。这与华北板块南、北缘深地壳构造岩中石榴石表现为脆性变形行为(马宝林等, 1992)截然不同。这些显微构造特征表明, 石榴石在发生强烈塑性变形的同时伴有晶内破裂流变, 整体表现出固态流变特征。石榴石的塑性变形行为表明变形发生于非常高的温度条件下(Ji and Martignole, 1994)。

4 变形与岩石、矿物化学成分的关系

4.1 变形强度受岩石矿物组成和原岩化学成分制约

岩石矿物组成的不同, 使其性状有别, 进而导致其在同一构造作用过程中整体变形强度表现出明显的差异。而在同一变质作用过程中, 在相同或相近的变质作用条件下形成的岩石, 其矿物组合则主要取决于原岩化学成分。

榆树沟麻粒岩地体中, 不同岩石单元和岩石单元内部由于岩性差异导致变形不均匀, 形成强应变带与弱应变域相间分布的总体格局(图 1-a)。原岩成分为超镁铁质岩、基性岩(SiO_2 不饱和)的正变质岩(I、II 单元中)变形较强烈, 发育初糜棱岩和糜棱岩; 成分相当于中性岩浆岩的副变质岩(IV 单元中)变形强烈, 主要发育糜棱岩; 它们共同构成榆树沟地体中的强应变带。 SiO_2 饱和的基性岩类(III 单元)变形较弱, 岩石仍主要表现为粒状变晶结构, 仅在单元边缘有轻微变形, 局部可发育初糜棱岩, 总体构成地体中的弱应变域。

镜下观察表明, 不同类型岩石的变形差异与岩石的主要组成矿物对岩石力学性质的影响密切相关。超镁铁质变质岩主要由橄榄石组成, 含一定量的斜方辉石和单斜辉石, 因斜方辉石相对较易变形, 因而岩石变形相对较强。 SiO_2 不饱和的基性变质岩主要由斜方辉石、单斜辉石和斜长石组成, 局部可含少量石榴石; SiO_2 相对饱和的基性变质岩主要由石榴石、单斜辉石和斜长石组成, 虽可出现石英, 但其含量很低($<1\%$), 对岩石力学性质影响不明显。缺少相对易变形的斜方辉石而较多石榴石的出现使 SiO_2 饱和的基性变质岩的能干性显著增大, 因而构成地体的弱应变域。成分相当于中性岩浆岩的副变质岩中石英含量明显增多而使岩石能干性降低、变形强烈。

4.2 变形过程中矿物化学成分变化不明显

表 1 为代表性变形矿物斜方辉石、单斜辉石、斜长石及石榴石塑变残斑(残晶)与重结晶基质(新晶)的电子探针分析结果。该结果表明岩石中同一斜方辉石塑变残斑的核部、边缘及其重结晶基质的化学成分变化很不明显, 仅表现为个别样品中新晶的 SiO_2 略有增高, Al_2O_3 有升有降, FeO^* 多数略有增高, MgO 、 CaO 均略有降低。除 MgO 、 CaO 外, 其他氧化物变化规律不明显。在成分变异图(图 3-a)上, 端员组分 En 和 Fs 的变异曲线均呈近水平状(端员组分 Wo 含量非常低, 图中未表示)。单斜辉石成分变化也很不明显。在成分变异图(图 3-b)上, 各端员组分的变异曲线也多呈近水平状分布, 只有个别样品残斑与重结晶新晶的端员组分 Wo 和 En 呈较明显的反消长关系。斜长石新晶与残晶成分变化也不太明显, 表现为 SiO_2 略有降低, Al_2O_3 稍有增高, CaO 相对增高, Na_2O 相对降低。在成分变异图(图 3-c)上, 新晶端员组分 An 略有增高, 变化幅度不大。石榴石总体成分变化也不是很明显, 但比其他矿物变化幅度稍大, 多数情况下新晶的 FeO^* 略有增高, MgO 、 CaO 略有降低, SiO_2 、 Al_2O_3 变化无规律。在成分变异图(图 3-

表 1 代表性矿物的化学成分(%)
Table 1 Chemical compositions(%) of representative minerals

样号	矿物测点	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO*	MnO	NiO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	总和
Y-160	Срхв	50.82	1.25	6.86	0.10	3.99	0.02	0.00	14.22	20.57	1.46	0.00	99.29
	Срхм	52.56	0.77	5.79	0.00	4.38	0.05	0.02	14.95	21.46	1.33	0.00	101.31
Y-83	Орхвс	51.94	0.10	2.70	0.05	19.26	0.26	0.00	25.16	0.46	0.05	0.00	99.98
	Орхвр	50.64	0.02	3.93	0.05	20.19	0.32	0.00	23.33	0.44	0.04	0.00	98.96
	Орхм	51.93	0.13	4.28	0.09	19.64	0.27	0.00	23.46	0.37	0.00	0.00	100.17
Y-83	Срхв	49.70	1.12	5.78	0.45	7.01	0.14	0.11	12.59	21.74	1.10	0.00	99.74
	Срхм	49.38	1.07	6.42	0.08	6.75	0.19	0.16	12.81	21.40	1.18	0.00	99.44
Y-83	Plвс	56.37	0.00	27.83	0.09	0.03	0.05	0.00	0.05	10.94	4.97	0.13	100.46
	Plвр	54.20	0.12	28.60	0.00	0.00	0.00	0.12	0.03	11.32	5.11	0.00	99.50
	Plм	53.31	0.07	27.75	0.15	0.04	0.00	0.06	0.00	12.26	5.06	0.10	98.80
Y-121	Орхвс	54.72	0.11	3.08	0.50	9.36	0.13	0.13	32.02	0.31	0.00	0.00	100.36
	Орхвр	55.91	0.00	2.80	0.44	9.50	0.06	0.00	31.51	0.27	0.02	0.00	100.51
	Орхм	54.97	0.05	3.13	0.60	9.56	0.16	0.05	31.03	0.22	0.02	0.00	99.79
Y-125	Срхв	47.89	1.14	6.40	1.37	7.57	0.06	0.04	11.58	23.04	1.05	0.00	100.14
	Срхм	48.10	0.73	6.77	0.14	8.16	0.00	0.10	11.65	22.11	1.30	0.00	99.06
Y-126	Срхвс	53.34	0.52	2.46	1.71	4.57	0.00	0.02	14.94	20.04	0.84	0.00	98.44
	Срхвр	52.57	0.52	3.70	0.00	4.83	0.09	0.00	15.52	20.07	1.05	0.00	98.35
	Срхм	52.20	0.49	3.44	0.06	4.48	0.04	0.08	14.81	21.80	1.04	0.00	98.44
Y-126	Plв	50.44	0.00	30.28	0.71	0.00	0.00	0.17	0.00	13.72	4.87	0.13	100.32
	Plм	49.44	0.04	30.79	0.00	0.47	0.10	0.06	0.18	13.43	4.42	0.14	99.07
	Plвс	60.25	0.02	25.07	0.09	0.11	0.00	0.05	0.02	7.71	6.86	0.35	100.53
Y-23	Plвр	59.95	0.00	23.73	0.12	0.00	0.02	0.05	0.02	7.76	7.05	0.50	99.20
	Plм	59.29	0.04	24.68	0.04	0.04	0.01	0.01	0.00	8.15	7.30	0.14	99.70
	Gtвс	39.42	0.07	22.50	0.00	22.62	0.36	0.13	13.79	1.46	0.04	0.00	100.39
Y-51	Gtвр	38.78	0.08	22.61	0.11	23.04	0.30	0.00	13.99	1.73	0.07	0.00	100.71
	Gtм	38.11	0.02	20.66	0.51	23.49	0.21	0.00	14.49	1.44	0.10	0.00	99.03
	Gtв	39.81	0.13	17.85	0.08	24.54	0.54	0.00	8.35	7.60	0.03	0.00	98.93
Y-112	Gtм	39.16	0.00	16.80	0.07	28.65	0.65	0.00	7.55	6.08	0.00	0.00	98.96
	Gtвс	39.08	0.09	21.55	0.08	26.06	0.45	0.00	9.21	3.78	0.02	0.00	100.32
	Gtвр	40.57	0.02	20.50	0.06	26.59	0.44	0.02	8.45	4.24	0.03	0.00	100.92
Y-150	Gtм	38.59	0.06	22.07	0.00	25.86	0.53	0.00	7.95	4.82	0.00	0.00	99.88
	Орхвс	50.47	0.08	2.67	0.00	20.37	0.15	0.04	25.50	0.45	0.05	0.00	99.89
	Орхвр	52.82	0.07	2.07	0.15	20.27	0.05	0.08	24.81	0.44	0.03	0.00	100.79
Y-173	Орхм	52.85	0.10	2.63	0.15	19.36	0.13	0.16	23.93	0.43	0.02	0.00	99.76
	Срхв	52.50	0.29	2.55	0.07	6.32	0.04	0.17	14.34	22.40	0.52	0.00	99.20
	Срхм	53.28	0.38	3.59	0.34	6.12	0.08	0.03	15.45	21.12	0.59	0.00	100.98
Y-195	Орхвс	52.30	0.02	2.66	0.13	22.84	0.09	0.00	22.80	0.43	0.02	0.00	101.29
	Орхвр	51.31	0.04	1.86	0.11	23.34	0.10	0.00	22.91	0.42	0.00	0.00	100.09
	Орхм	52.78	0.08	1.86	0.09	23.13	0.15	0.00	22.33	0.23	0.00	0.00	100.65
Y-195	Gtвс	40.17	0.04	19.48	0.05	27.27	0.50	0.00	8.85	2.68	0.04	0.00	99.08
	Gtвр	39.29	0.05	20.81	0.00	26.42	0.51	0.00	8.37	5.03	0.00	0.00	100.48
	Gtм	39.20	0.00	21.42	0.13	26.73	0.51	0.04	6.88	6.08	0.00	0.00	100.99

原地矿部西安地矿所电子探针室刘文峰测定。矿物代号下角字母 B 为型变残斑, M 为基质新晶, Bc 为残斑核部, Br 为残斑边部。Y-160 为 I 单元样品, 初糜棱岩; Y-83、Y-121、Y-125、Y-126 为 II 单元样品, 糜棱岩; Y-23 为 III 单元样品, 初糜棱岩; Y-51、Y-112、Y-150、Y-173、Y-195 为 IV 单元样品, 糜棱岩。

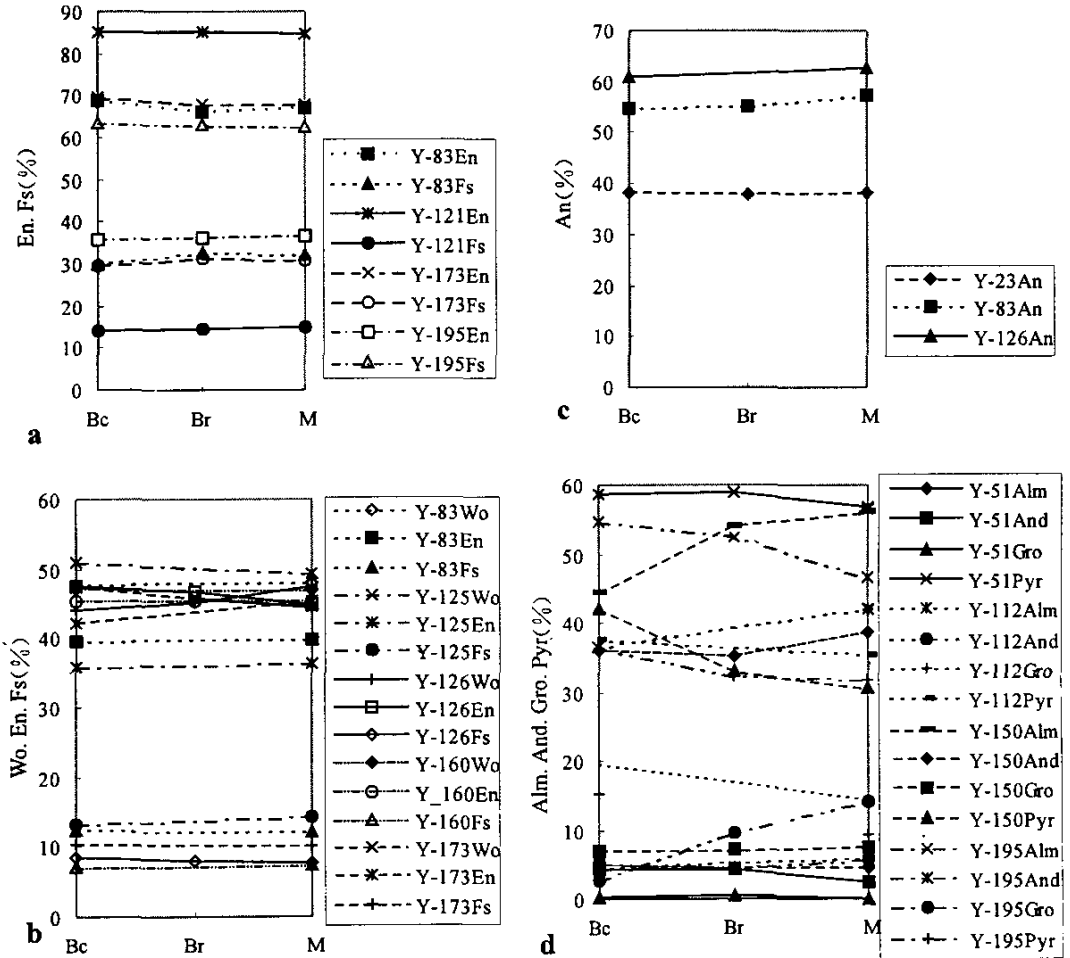


图3 变形矿物成分变异图

Bc为残斑核部, Br为残斑边部, M为基质新品

Fig. 3 Variation diagram of deformed minerals

d)上,新晶的 Alm 有较明显的增高, Pyr 有较明显的降低,二者呈反消长关系, And 和 Gro 均有降有升(Spe、Uva 含量很低,变化不明显,未予图示)。

上述情况以及前述新晶与残晶具有一致的矿物组合特征表明:①变形与变质发生于相同或相近的温、压条件下;②变形变质过程中水活度低,进一步说明变形过程处于深地壳麻粒岩相变质作用的晚期阶段,继承了已脱水岩石的特点;③榆树沟麻粒岩相构造岩变形矿物的成分变异特征与中深层次韧性剪切带中矿物的成分变异特征(钟增球等,1990;郑亚东等,1985)明显不同,不仅说明该麻粒岩相构造岩是同期

同相变质变形的产物,同时反映麻粒岩相韧性剪切变形过程中矿物的变形机制可能以位错蠕变为主,扩散蠕变为辅。

5 变形环境

榆树沟麻粒岩相构造岩形成环境的确定主要从以下两方面考虑。首先根据变形岩石中重结晶新晶的矿物组合大致确定变形环境为中压麻粒岩相,同时由新晶与残晶有相同的矿物组合确定变质、变形皆发生于麻粒岩相环境。其次分别根据新晶与残晶矿物组合的成分特征选用合适的地质温压

计估算变形、变质的温压条件。榆树沟麻粒岩相构造岩温压估算结果(王润三等, 1999a)^①和表 2 表明, 高压麻粒岩形成温度为 878~964°C, 压力为 1.26~1.42GPa(Y-14, Y-125 残晶)。但据新品组合求得的压力比按残晶组合求得的压力明显降低(Y-125), 降低幅度为 0.56GPa, 反映新品的形成是原高压麻粒岩经历一定幅度抬升被变质、变形再改造的产物。N 单元强烈变形岩石中, 与残晶组合计算结果相比, 由新品组合求得的压力值普遍略有降低, 也暗示韧性剪切变形与构造抬升有关, 但整体反映中压偏高条件。温度变化情况较为复杂, 残晶和部分新品组合反映麻粒岩相温度条件, 由个别新品组合求得的温度小于并接近 700°C, 说明榆树沟麻粒岩相构造岩形成于深地壳麻粒岩相变质的晚期阶段, 是麻粒岩相条件下变形变质的产物, 但其变形可能延续至高角闪岩相。

表 2 温度、压力估算结果

Table 2 The temperature and pressure values

岩石单元	样号	矿物组合类型	T (°C)	P (GPa)	备注
I	Y-125	残晶*	878	1.26	Gt-Cpx 温度计 ^①
		新品	779	0.70	Gt-Cpx-Pl-Q 压力计 ^②
II	Y-14	原晶*	964	1.42	Gt-Cpx 温度计 ^①
		原晶*	955	1.42	Gt-Cpx-Pl-Q 压力计 ^②
	Y-70	残晶	940	1.12	
		新品	681	1.08	Gt-Opx 温度计 ^③
N	Y-173	残晶	794	1.02	Gt-Opx-Pl-Q 压力计 ^④
		新品	658	0.76	
	Y-224	残晶*	810	0.97	Gt-Cpx 温度计 ^①
		残晶	904	0.93	Gt-Cpx-Pl-Q 压力计 ^②

① Powell (1985), ② Newton and Perkins (1982), ③ Sen *et al.* (1984), ④ Newton and Perkins (1982). 上角 * 号的温度、压力据王润三等(1999a), 其余据脚注。

若按 0.026GPa/km 的地压梯度(Carter and Tsenn, 1987)估算, 榆树沟高压麻粒岩的形成深度为 50km 左右。榆树沟麻粒岩相构造岩形成过程中若按压力下降幅度最大值 0.56GPa 估算, 其抬升幅度为 20km 左右。这些信息说明, 榆树沟麻粒岩地体的形成经历了特殊的构造动力学过程: 早先的榆树沟蛇绿岩套曾俯冲到中天山板块的下地壳底部至上地幔顶部的深度并滞留而变质形成高压麻粒岩, 此后经历了一定幅度的抬升进入深地壳麻粒岩相环境, 伴随这次抬升发生了中压(偏高)麻粒岩相(在原岩 SiO₂ 过剩、Mg/(Mg + Fe²⁺) > 0.6 的情况下出现 Cpx + Gt 的共生, 表明其属中压麻粒岩相的偏高压部分(王仁民等, 1989)变质(相当于早先

的减压退变质)及强烈韧性剪切变形, 强烈改造了原高压麻粒岩, 形成麻粒岩相构造岩。该麻粒岩相构造岩矿物组合及组构特征的完好保存、造岩矿物石榴石也发生了强烈塑性变形但并未出现减压退变质结构, 不仅说明麻粒岩相韧性剪切作用结束于麻粒岩相变质的晚期阶段, 而且提供了该麻粒岩相构造岩形成后又经历了快速的构造折返过程的有力证据。但由于目前尚缺少精细、完整的同位素年龄约束, 榆树沟麻粒岩地体的形成、折返构造动力学过程细节尚有待进一步研究。

6 结论

(1) 榆树沟麻粒岩相构造岩形成于深地壳麻粒岩相变质作用的晚期阶段, 分布于榆树沟麻粒岩地体内的强应变带中, 宏观上以发育强烈流变叶理为特征, 变形强度受原岩性质制约。

(2) 榆树沟麻粒岩相构造岩中主要造岩矿物 Opx、Cpx、Pl、Gt 等均发生强烈塑性变形, 其变形特征综合反映了深地壳麻粒岩相环境下主要造岩矿物的变形行为。变形过程中各主要造岩矿物的重结晶新品与塑变残斑之间化学成分变化不明显, 反映变形过程中水活度低, 变形机制以位错蠕变为主。

(3) 榆树沟麻粒岩地体的形成经历了复杂的构造动力学过程: 南天山洋壳板块曾俯冲于中天山板块的下地壳底部—上地幔顶部, 经受高压麻粒岩相变质, 高压麻粒岩形成后因构造抬升进入深地壳麻粒岩相环境, 伴随抬升发生中压(偏高)麻粒岩相变质及强烈韧性剪切变形, 形成麻粒岩相构造岩。麻粒岩相构造岩形成后又经历了快速的构造折返过程。榆树沟麻粒岩地体是研究大洋岩石圈向大陆岩石圈转化的良好天然实例, 详细研究其独特的形成过程和折返机制对深入探讨天山造山带的形成与演化、发展大陆动力学具有重要的意义。

References

- Carney J N, Treloar P J, Barton C M *et al.* 1991. Deep-crustal granulites with migmatitic and mylonitic fabrics from the Zambezi Belt, northeastern Zimbabwe. *J. Metamorphic Geol.*, 9 (4): 461~479
- Carter N L and Tsenn M C. 1987. Flow properties of continental lithosphere. *Tectonophysics*, 136(1~2): 27~63
- Guo Jinghui and Zhai Mingguo. 1992. Mylonite of granulite facies in

① 王润三, 周鼎武, 王居里等. 1999. 南天山榆树沟深地壳麻粒岩相地体形成和演化动力学过程初探. 待刊.

- Xuwujia, Nei Monggol. *Scientia Geologica Sinica*, 27(2): 190~192(in Chinese with English abstract)
- He Yongnian, Lin Chuanyong and Shi Lanbin. 1988. Structural petrology. Beijing: Geological Publishing House, 169: 150~166(in Chinese)
- Ji S and Mainprice D. 1988. Natural deformation fabrics of plagioclase: Implications for slip systems and seismic anisotropy. *Tectonophysics*, 147(1~2): 145~163
- Ji S and Mainprice D. 1990. Recrystallization and fabric development in plagioclase. *J. Geol.*, 98(1): 65~79
- Ji S and Martignole J. 1994. Ductility of garnet as an indicator of extremely high temperature deformation. *J. Struct. Geol.*, 16(7): 985~996
- Ma Baolin and Liu Ruoxin. 1993. Crystalline rocks and their deformation behaviour of different layer in the crust. In: Xiao Qinghui (ed.), *Frontiers of geological sciences*. Wuhan: The Press of The China University of Geosciences, 190~194(in Chinese)
- Ma Baolin, Liu Ruoxin, Zhang Zhaozhong *et al.* 1992. Basic characteristics and deformation conditions of deep-crustal tectonites on the borders of North China Plate. *Acta Petrologica Sinica*, 8(1): 18~26(in Chinese with English abstract)
- Ross J V and Wilks K R. 1996. Microstructure development in an experimentally sheared orthopyroxene granulite. *Tectonophysics*, 256(1~4): 83~100
- Wang Renmin, You Zhendong, Fu Gongqin. 1989. Metamorphic petrology. Beijing: Geological Publishing House, 240: 120~121(in Chinese)
- Wang Runsan, Zhou Dingwu, Wang Juli *et al.* 1999a. Study on a Variscan terrane of deep-crustal granulite facies in Yushugou area, Southern Tianshan. *Science in China(Series D)*, 29(4): 306~313 (in Chinese)
- Wang Runsan, Wang Juli, Zhou Dingwu *et al.* 1999b. Study on Yushugou ophiolite suite modified with the metamorphism of granulite facies in Southern Tianshan. *Scientia Geologica Sinica*, 34(2): 166~176(in Chinese with English abstract)
- Wang Runsan, Wang Yan, Li Huimin *et al.* 1998. Zircon U-Pb age and its geological significance of high-pressure terrane of granulite facies in Yushugou area, Southern Tianshan mountain. *Geochimica*, 27(6): 517~522(in Chinese with English abstract)
- Wang Runsan, Wang Yan, Liu Yangjie *et al.* 1997. The para-granulite in bedded complex from Yushugou. *South Tianshan, Xinjiang Autonomous Region: Its petrological characteristics and geodynamic significance*. *Journal of Northwest University(Natural Science Edition)*, 27(5): 411~416(in Chinese with English abstract)
- Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Feng Yimin *et al.* 1992. Tectonic evolution of the Northern Xinjiang and its adjacent regions. Beijing: Geological Publishing House, 169: 1~11(in Chinese with English abstract)
- Zheng Yadong and Chang Zhizhong. 1985. Finite strain measurement and ductile shear zones. Beijing: Geological Publishing House, 185: 128~140(in Chinese)
- Zhong Zengqiu, You Zhendong and Suo Shurian. 1990. Petrological study on the ductile shear zones in the core of the eastern Qinling orogenic belt, Western Henan. *Acta Geologica Sinica*, 64(2): 121~130(in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 郭敬辉, 翟明国. 1992. 徐武家麻粒岩相糜棱岩. *地质科学*, 27(2): 190~192
- 何永年, 林传勇, 史兰斌. 1988. 构造岩石学基础. 北京: 地质出版社, 169: 150~166
- 马宝林, 刘若新. 1993. 地壳不同层次的结晶岩及其变形行为. 见: 肖庆辉等著. 当代地质科学前沿. 武汉: 中国地质大学出版社, 190~194
- 马宝林, 刘若新, 张兆中等. 1992. 华北板块边缘深地壳构造岩的基本特征和变形环境. *岩石学报*, 8(1): 18~26
- 王仁民, 游振东, 富公勤. 1989. 变质岩石学. 北京: 地质出版社, 240: 120~121
- 王润三, 周鼎武, 王居里等. 1999a. 南天山榆树沟华力西期深地壳麻粒岩地体研究. *中国科学(D辑)*, 29(4): 306~313
- 王润三, 王居里, 周鼎武等. 1999b. 南天山榆树沟遭受麻粒岩相变质改造的蛇绿岩套研究. *地质科学*, 34(2): 166~176
- 王润三, 王焰, 李惠民等. 1998. 南天山榆树沟高压麻粒岩地体锆石 U-Pb 定年及其地质意义. *地球化学*, 27(6): 517~522
- 王润三, 王焰, 刘养杰等. 1997. 新疆南天山榆树沟层状杂岩体中的副麻粒岩——岩石学特征及其地球动力学意义. *西北大学学报(自然科学版)*, 27(5): 411~416
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民等. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京: 地质出版社, 169: 1~11
- 郑亚东, 常志忠. 1985. 岩石有限应变测量及韧性剪切带. 北京: 地质出版社, 185: 128~140
- 钟增球, 游振东, 索书田. 1990. 豫西秦岭造山带核部韧性剪切带岩石学研究. *地质学报*, 64(2): 121~130