

# 大别山双河超高压硬玉石英岩显微组构特征及其流变学意义

王璐<sup>1</sup>, 金振民<sup>1</sup>, 刘祥文<sup>2</sup>, 金淑燕<sup>1</sup>

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学纳米科技中心, 湖北武汉 430074

**摘要:** 硬玉石英岩是大别—苏鲁超高压(UHP)变质带内重要超高压岩石类型之一, 其变形机制和动力学背景参数(应变、应力、应变速率)对于全面了解超高压造山带的形成和演化有非常重要的意义. 对大别山双河地区超高压硬玉石英岩 3 个样品中的主要组成矿物硬玉和石英进行显微组构和透射电镜(TEM)的初步研究. 晶格优选方位(LPO)测量成果表明: 硬玉组构类型与绿辉石相近, 为 L、LS 型; 石英组构类型主要为单斜对称. TEM 研究表明硬玉滑移系以(100)[001]、(110)[001]及 $(\bar{1}10)1/2[110]$ 为主. 石英中位错发育, 滑移系以(0001)[ $\bar{1}120$ ]底面滑移为主, 代表硬玉石英岩折返过程中经历的区域性剪切作用.

**关键词:** 硬玉; 绿辉石; 组构; 变形; 流变学; 双河; TEM.

中图分类号: P585

文章编号: 1000-2383(2004)03-0293-10

收稿日期: 2003-03-22

## Microfabric Characteristics of Ultrahigh Pressure Jadeite-Quartzite and Its Rheology Significances in Shuanghe, Dabie Mountains

WANG Lu<sup>1</sup>, JIN Zhen-min<sup>1</sup>, LIU Xiang-wen<sup>2</sup>, JIN Shu-yan<sup>1</sup>

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Nano-Science and Technology Center, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** Jadeite-quartzite of Dabie Mountains is one of the important rock types occurring in ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic belts. It is significant to study the jadeite-quartzite's deformation mechanisms and geodynamical parameters (such as stress, strain, strain rate) for the knowledge on the formation and evolution of the Dabie-Sulu ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic belts. Three representative samples of the Shuanghe jadeite-quartzite from Dabie UHP belt were undertaken by the microfabric and TEM for lattice preferred orientation (LPO). The results show that the LPOs of jadeite are similar to those of omphacite. Their LPOs are L- and LS-type. However, the LPOs of quartzite are monoclinic symmetry type. The slip systems of jadeite are mainly (100)[001], (110)[001] and  $(\bar{1}10)1/2[110]$ . Abundant dislocations develop in quartz, which is of dominant slip system of (0001)[ $\bar{1}120$ ] derived from basal glide. The slip system represented regional shearing during the exhumation of the UHP belt.

**Key words:** jadeite; omphacite; fabric; UHP; rheology; Shuanghe; TEM.

近 20 年来,在越来越多的大陆造山带内发现了如柯石英榴辉岩这样具有超高压特征的岩石,深刻地改变了以往对地壳岩石变质条件范围的认识,揭示了陆壳岩石有俯冲达地幔深度并经历超高压变质作用的可能性.最近,徐树桐等在中国大别—苏鲁超高压变质带东部发现了若干硬玉质岩块,并称之为

硬玉岩或硬玉石英岩。硬玉石英岩与榴辉岩和大理岩一起是一个表壳岩序列,它们形成于地表,硬玉石英岩中的柯石英及其假象(Su *et al.*, 1996)证明了这种硬玉石英岩也与榴辉岩一起经历了超高压变质作用,并表明硬玉岩可以在大于 2.8 GPa 的压力下稳定。因此,这套变质岩中最有可能保存了从俯冲到折返全过程的信息,研究硬玉石英岩带构造演化过程对于全面了解超高压带的形成和演化有非常重要的意义。前人对超高压硬玉石英岩已经进行过详细的岩石学、地球化学和年代学研究(翟明国等,1992; 刘晓春等,1993; Su *et al.*, 1996; Liou *et al.*, 1997; 庄育勋,1998; 吴维平等,1998; 苏文等,2000; Ayers *et al.*, 2002)。

硬玉( $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ )为单斜辉石,空间群为  $C2/c$ ,在化学成分上是绿辉石富钠的单斜辉石端员,一般单斜辉石中硬玉分子大于 80 者即可称为硬玉,它是辉石族矿物中最为稀少者之一。硬玉在蓝片岩相岩石中一直被认为是低温高压变质条件的指示矿物。高温硬玉首次发现于西阿尔卑斯 Dora Maira 地块蓝晶石石英岩和钠质白片岩中,变质温度为 700~800 °C。大别山高压变质杂岩中的硬玉属于高温硬玉的第 2 个产地,硬玉中柯石英的存在证明硬玉石英岩与共生的柯石英榴辉岩同属超高压变质岩石。所以,硬玉不仅仅指示低温高压变质条件,也有可能形成于高温超高压变质条件下(刘晓春等,1993)。

研究显微组构可以用来确定变形参数。榴辉岩、硬玉石英岩的显微组构特征对研究影响深部俯冲带的变形特点很有用,对俯冲带地震深反射的充分解释也非常重要。榴辉岩构造岩中绿辉石晶内缺陷结构、位错特征、形态组构(SPO)和晶格优选方位(LPO)可以用来确定榴辉岩高压变质过程中的流变学性质。天然岩石中绿辉石的 LPO 组构特征大致归为 4 类:L 型、S 型、两者之间的各种过渡类型以及退火型组构。文献中报道最多的为前 3 种类型。理想条件下,S 型/压扁型组构(flattening fabric)由垂直于面理的 $[010]$ 轴极密控制;L 型/收缩型组构(constriction fabric)主要表现为平行于线理的 $[001]$ 轴极密。前人对绿辉石的组构特征研究已经比较深入(Helmstaedt *et al.*, 1972; Van Roermund, 1983; Godard and Roermund, 1995; Abalos *et al.*, 1997),尤其是 TEM 研究的加强以及 EBSD(electron backscattered diffraction)手段引进地质学界后,更是大大推动了绿辉石显微组构的研究和对其

变形机制的深入认识(Mauler *et al.*, 2001; Bascou *et al.*, 2002; Brenker *et al.*, 2002)。超高压硬玉的显微组构和位错等变形特征研究并不多见。陈晶(1994)首次对阿尔卑斯 Sesia-Lazon 带典型高压低温榴辉岩相矿物共生组合  $\text{Jd} + \text{Qz} = \text{Ab}$  中硬玉单晶进行过位错特征的精细研究,测得滑移系为 $(hk0)[001]$ 和 $(110)1/2[110]$ ,推断该榴辉岩相片麻岩中导致矿物的主要变形机制为位错滑移和攀移。

前人对硬玉的流变学研究主要集中于单矿物集合体实验研究,因为单矿物集合体的流变学行为仅受一种矿物性质的控制从而容易模拟。Hacker and Christie(1990)、Gleason and Green(1996)在超高压条件下进行钠长石→硬玉+石英反应的实验,研究差异应力和变形作用对钠长石分解生成硬玉的影响作用。Stöckhert and Renner(1998)曾对合成硬玉集合体进行过初步流变学变形实验,获得初步流变学参数。根据 Bell 等人的研究,Stöckhert and Renner(1998)强调在 3 GPa 围压条件下硬玉熔融温度约 1410 °C,低于透辉石,指示绿辉石或硬玉的流变强度比透辉石系列的单斜辉石低得多。但除了这些少量的早期研究外,对天然硬玉的流变学研究还很缺乏,对其塑性变形机制至今了解不多,仅能从单斜辉石/绿辉石的天然和实验研究中得以借鉴(Mauler *et al.*, 2000; Bystricky and Mackwell, 2001)。

硬玉石英岩是由硬玉和石英组成的双相岩石,想获得它在俯冲折返过程中力学性质的信息需要了解其中硬玉和石英的显微组构特征和变形机制,并与榴辉岩中绿辉石的组构特征和变形机制进行对比,目前还没有人在这方面进行过深入研究。因此本文的研究目的为:(1)展示超高压硬玉石英岩显微构造和组构类型;(2)应用透射电镜研究超高压硬玉石英岩的超显微构造特征;(3)在上述研究基础上,对超高压硬玉石英岩组成因进行探讨。

## 1 地质背景及样品描述

### 1.1 地质背景

硬玉岩石成带分布在大别山超高压变质带的东部。东起潜山县的野寨、毛岭、苗竹园、韩长冲呈东西向分布,向西往潜山县横冲、五庙、新建、到岳西县菖蒲、女儿街和五河呈北西向产出,分布在长约 50 km、宽 1 km 向南凸出的弧形带内。关于大别山超高压变质带和其中具代表性的超高压变质岩区双

河的地质背景,前人已有大量文献提及(Liou *et al.*, 1997;江来利等,1998;Li *et al.*, 2000),这里不再赘述.文中涉及样品采自安徽省潜山县双河地区,硬玉石英岩在该地区分别出露在罗家岭、韩长冲水库、苗竹园、东边凹和熊中屋等 5 处.出露规模为长 130~230 m,宽 20~50 m,面理产状为  $152^{\circ}\angle 22^{\circ}$ ,  $176^{\circ}\angle 26^{\circ}$ ,  $180^{\circ}\angle 15^{\circ}$ ,  $201^{\circ}\angle 32^{\circ}$ , 线理方位  $190^{\circ}\angle 13^{\circ}$ ,  $167^{\circ}\angle 21^{\circ}$ ,  $144^{\circ}\angle 10^{\circ}$ .硬玉石英岩呈透镜状产自黑云斜长片麻岩中,附近同时产出透镜状榴辉岩和相似规模的大理岩块.在上述 5 处出露点所采集样品分别为 ZH92B, X4, WL16I, X92, WL49B.作者于 2000 年进行双河地区野外填图,在安徽省地科所和 311 地质队对韩长冲地区 1:10 000 填图的基础上(江来利等,1998)对双河地区地质图进行了补充(图 1).图 1 中显示了硬玉石英岩的分布特征.

### 1.2 岩相学特征

在岩石手标本中,新鲜的硬玉石英岩为中粒变晶结构,主要由 45%~50%硬玉、35%~45%石英、5%~10%石榴石和少量金红石、锆石组成.新鲜硬玉石英岩硬玉组分 Jd84—Jd92(样品 X92、ZH92B),而退变硬玉石英岩中硬玉组分则从 Jd60—Jd81(WL16I、WL49B)基本没有分带,石榴石成分以铁铝榴石为主.硬玉、石榴石中含有较丰富的金红石包体、柯石英的假象和柯石英的包体,柯石英包体边部已退变为栅状石英(图 2a, 2b).退变的硬玉常常形成冠状体结构:核为硬玉残晶,内带为纤维状的钠长石和绿铁闪石形成的后成合晶,中间是由钠长石构成的细晶,最外带则为细粒的霓石构成的反应边(图 2e).对双河硬玉石英岩的离子探针锆石定年所得峰期变质年龄为  $(236 \pm 32)$  Ma(Ayers *et al.*, 2002).采用常用的温压计(Ellis and Green, 1979; Powell, 1985; Krogh, 1988)估计硬玉石英岩的峰期  $p, T$  条件为  $p \geq 28 \times 10^5$  kPa,  $T = 900 \sim 1\ 100$  °C(表 1).应用 Ellis 温压计所得的温度可能相对偏高,根据 Koons(1984)对硬玉质辉石—石榴石温度计的研究,认为这是由于辉石中硬玉含量高于 70%时,硬玉中顽火辉石型的非理想离子交换影响了石榴石—单斜辉石之间的 Fe—Mg 配分行为,使  $K_D$  值偏低,从而造成温度偏高.

### 1.3 光学显微构造和形态组构

野外露头及手标本显示岩体普遍发育由拉长的硬玉、石榴石构成的线理、面理.选取了 3 个有代表性变形特征的样品(从强面理到强线理,不同应变强

度),对它们进行形态组构(SPO)、结晶学优选方位(CPO)、光学显微构造和透射电镜(TEM)研究.

对 3 个具有代表性样品的硬玉形态组构分析表明:柱状硬玉近平行排列形成线理、面理(图 2c, 2g, 2h).样品 X94 线理、面理都比较发育,因此在 XZ 面中硬玉的排布也呈现拉长显著(图 2c—2f)现象. ZH92B 线理较发育,面理微弱. WL49B 面理较发育,线理微弱.石榴石通常呈他形粒状,也发生拉长现象,显示与硬玉一致的延长方向(图 2g, 2h),但 X4 样品中的石榴石已经大部分转变为钠质闪石,仅保留拉长的轮廓(图 2c).大多硬玉颗粒边界被冠状反应边所侵蚀,退变矿物普遍没有明显沿平行于 L 和 S 的方向拉伸的迹象,也没有显示和主要变形事件相关的组构(图 2e, 2f).比如,硬玉的后成合晶是由复杂的蠕虫状细粒集合体组合而成,不能在强的变形中幸存,且大多垂直于硬玉边界生长,表明硬玉变形发生在后成合晶之前.

在 X4 样品中,发现局部颗粒发生脆性破裂,使原始单颗粒硬玉分裂为 2 个或多个部分(解理方向

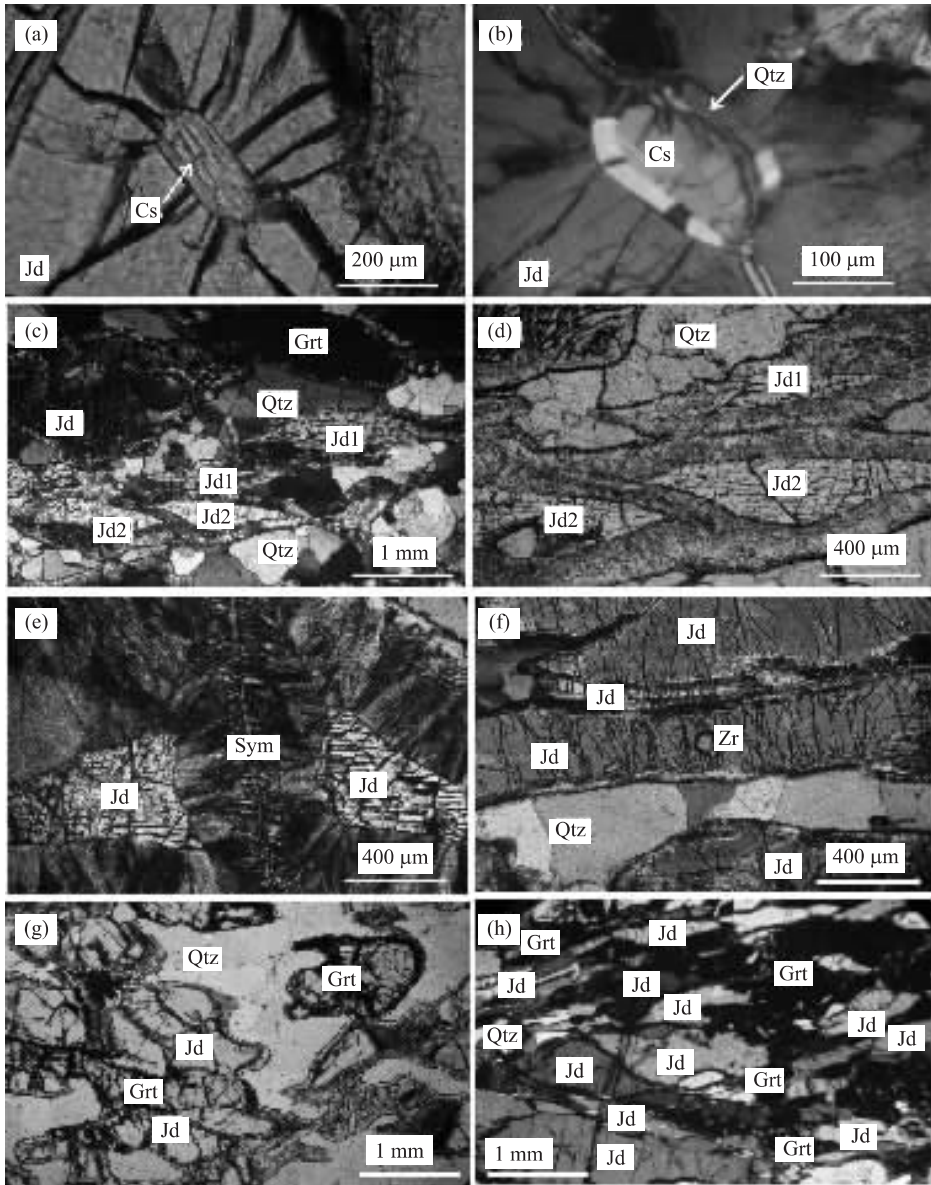


图 2 硬玉石英岩及硬玉中的显微构造

Fig. 2 Optical micrographs of the studied jadeite-quartzite and microstructures of jadeite

a, b. ZH92B、X92, 硬玉中的柯石英包体; c. X4, 拉长的硬玉和石榴石, XZ 面; d, e. X4, 硬玉颗粒内的 2 组裂隙及其中发育的反应边结构, XZ 面; f. X4, 穿过不同拉长硬玉颗粒的后期穿透性裂隙, XZ 面; g. ZH92B, XZ 面; h. WL49B, XZ 面, 拉长及成层分布的硬玉和石榴石。a, d, g 为单偏光模式, b, c, e, f, h 为正交偏光, b 为正交锥光模式; Jd, 硬玉; Grt, 石榴石; Cs, 柯石英; Qtz, 石英; Sym, 后成合晶, Ru, 金红石; Zr, 锆石

和干涉色保持不变), 破裂方向分别与硬玉长轴方向成近  $30^\circ$  斜交或近垂直分布, 后成合晶沿破裂面垂向生长并没有穿透最外圈的薄层霓石(图 2c, 2d, 2e)。说明该脆性破裂发生在硬玉塑性变形之后、后成合晶产生之前或同期, 属于早期脆性变形。岩体中还广泛发育穿透性脆性裂纹, 这种裂纹以一致性方向穿透不同层的硬玉颗粒及其周围的后成合晶(图 2f), 表明该期脆性变形发生在后成合晶产生之后,

属于折返过程中的晚期脆性破裂。

由上述观察可知: (1) 硬玉石英岩中硬玉的形态组构特征从线理、面理均发育的 LS 型(X4)、到强面理—弱线理的 S—型(WL49B)到弱面理、强线理 L—型(ZH92B); (2) 硬玉的主要塑性变形事件发生在退变作用之前, 即榴辉岩相变质条件下。

表 1 双河硬玉石英岩中石榴石、硬玉电子探针数据及峰期变质  $p-T$  条件估算值

Table 1 Composition of garnets and jadeites in Shuanghe jadeite quartzite and  $p-T$  estimates for peak metamorphism

样品	WL16I		ZH92B		WL49B					
	Grt	Jd	Grt	Jd	Grt	Jd	CsP-Grt	CsP-Jd	Grt	Jd
SiO <sub>2</sub>	38.694	57.754	38.520	57.836	40.182	58.635	40.514	58.664	38.931	57.819
TiO <sub>2</sub>	0.000	0.011	0.000	0.000	0.000	0.017	0.000	0.018	0.000	0.002
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.310	19.167	22.311	20.397	22.998	17.091	23.053	17.489	22.381	17.508
FeO	26.397	4.275	30.812	4.550	24.053	3.975	23.147	3.846	24.411	3.584
MnO	0.356	0.000	0.131	0.000	0.205	0.009	0.329	0.000	0.142	0.008
MgO	5.846	2.278	4.578	1.395	9.407	3.780	9.038	3.829	8.995	3.828
CaO	6.219	3.591	3.562	2.311	3.530	5.885	5.009	6.065	4.504	5.430
Na <sub>2</sub> O	0.020	13.323	0.008	14.277	0.000	10.826	0.000	10.855	0.000	11.253
K <sub>2</sub> O	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.007	0.002	0.014	0.003	0.000	0.016	0.000	0.000	0.000	0.004
总计	100.046	100.400	99.936	100.769	100.383	100.233	101.090	100.765	99.365	99.436
Si	3.012	1.974	3.040	1.962	3.050	2.038	3.053	2.027	2.992	2.015
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000
Al	2.047	0.772	2.076	0.816	2.058	0.700	2.048	0.712	2.028	0.719
Fe <sup>2+</sup>	1.718	0.122	2.034	0.129	1.527	0.116	1.459	0.111	1.569	0.092
Mn	0.024	0.000	0.009	0.000	0.013	0.000	0.021	0.000	0.009	0.000
Mg	0.678	0.116	0.539	0.071	1.065	0.196	1.015	0.197	1.031	0.199
Ca	0.519	0.132	0.301	0.084	0.287	0.219	0.404	0.225	0.371	0.203
Na	0.003	0.883	0.001	0.939	0.000	0.730	0.000	0.727	0.000	0.760
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cr	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe <sup>3+</sup>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012
T <sub>E</sub> /C		1 123		1 119		1 039		1 061		938
T <sub>P</sub> /C		1 114		1 108		1 024		1 048		918
T <sub>K</sub> /C		1 116		1 046		948		1 014		859
T/C		1 118		1 091		1 004		1 041		905

$T_E, T_P, T_K$  分别据 Ellis and Green (1979)、Powell (1985)、Krogh (1988)提供的方法计算,  $T$  为平均温度,  $p \geq 28 \times 10^5$  kPa; CsP-Grt, CsP-Jd 分别为含柯石英假象的石榴石、硬玉; 其余代号同图 2.

## 2 硬玉石英岩组构特征

硬玉的 3 个结晶学轴  $a, b, c$  三者有如下关系:  $a$  轴  $\perp b$  轴,  $c$  轴  $\perp b$  轴,  $a \wedge c = 107^\circ$ , 而绿辉石的  $a \wedge c = 106^\circ$ , 两者同属单斜晶系. 因此硬玉的测量方式基本与绿辉石相同. 参考金淑燕和焦述强(1998)对绿辉石的 LPO 测量方式, 测量 60~80 个颗粒, 按下半球投影方法, 编制硬玉 LPO 组构图及解理面法线投影图.

### 2.1 硬玉的组构类型和特征

在图 3 的硬玉组构图中, 投影面都为 XZ 面. 结果表明: ZH92B —— [001] 轴极密位于线理附近; [010] 轴形成一个不完整的大圆环带, 环带与面理、线理垂直. 环带当中有 2 个极密, 两极密与 S 面的夹角为  $40^\circ \sim 60^\circ$ ; [100] 轴的分布比较分散, 无明显定向性.

WL49B —— [001] 轴极密形成一个位于面理面

内的大圆环带, 最强极密位于线理附近, 并与线理呈  $13.5^\circ$  夹角; [010] 轴定向性较弱, 但仍形成一个较宽的不完整大圆环带, 环带与 S 面和 L 线理呈大角度斜交, 环带中存在多个极密; 同样的 [100] 轴的分布比较分散, 无明显定向性.

X4 —— [001] 轴极密位于线理附近, 与线理呈小角度夹角; [010] 轴形成一个不完整的大圆环带, 环带与面理、线理垂直. 环带当中有 2 个极密, 两极密与 S 面的夹角近  $40^\circ$ ; [100] 轴的分布比较分散, 无明显定向性.

前人对绿辉石的组构已经进行过大量和详细的测量, 并根据其分布特征分为“L-型或收缩型”和“S-型或压扁型”(Godard and Roermund, 1995; Abalos *et al.*, 1997) 以及介于两者中间的过渡类型. S 型/压扁型组构特征是 [010] 轴集中在垂直于面理的极密上, 而 [001] 轴散布在垂直于 [010] 的大

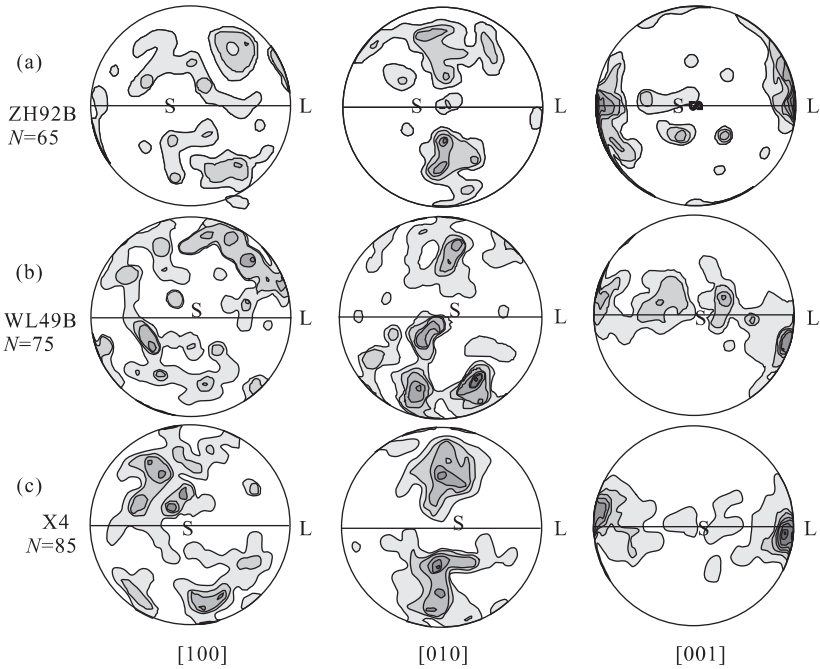


图 3 硬玉晶格优选方位(LPOs)

Fig. 3 LPOs of jadeite in pole figures

双河地区硬玉石英岩中硬玉的晶格优选方位.等面积下半球投影.等密级为 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9%. S. 页理面; L. 线理

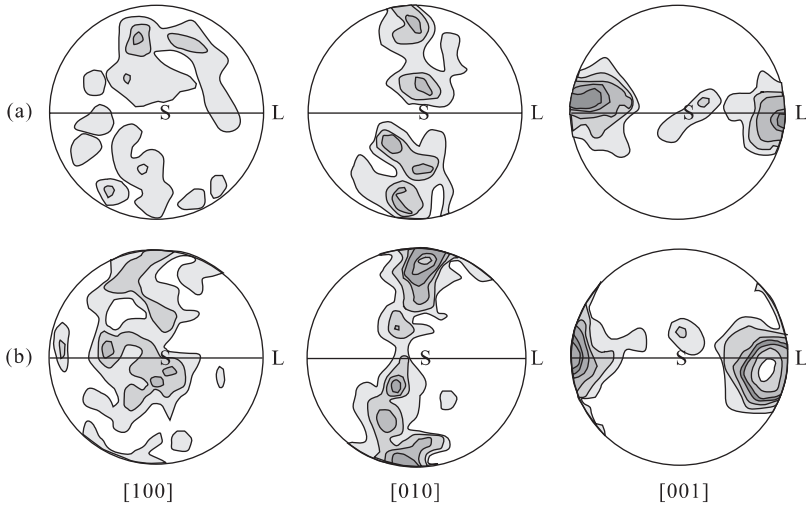


图 4 绿辉石晶格优选方位(LPOs)[据金淑燕和焦述强(1998)修改]

Fig. 4 LPOs of omphacite in pole figures (modified from Jin and Jiao (1998))

a. 大别双河地区绿辉石晶格优选方位(DS-23 号样)(下半球投影, 108 颗粒, 等密级 1%, 3%, 5%, 7%); b. 法国西部绿辉石晶格优选方位(C22 号样)(下半球投影, 150 颗粒, 等密级 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9%, 10%, 15%)

圆上; L 型/收缩型组构则包含一个较强的平行于线理的[001]轴极密, 并基本垂直于[010]环带. 将本文所测结果与前人所测绿辉石的组构特征对比, ZH92B 样品的组构特征与 L-型组构相似, 而后 2 个样品的组构特征则属于 L-S 型, 为 L 和 S 型的过渡型组构. 金淑燕和焦述强(1998)已对双河地区

线理发育的榴辉岩样品 DS-23 中绿辉石进行过组构测量, 并与法国西部榴辉岩中绿辉石组构对比, 发现同属 L 型组构特征(图 4).

## 2.2 石英组构类型和特征

对硬玉石英岩中占主体的大颗粒石英进行组构测量. 测量结果见图 5.

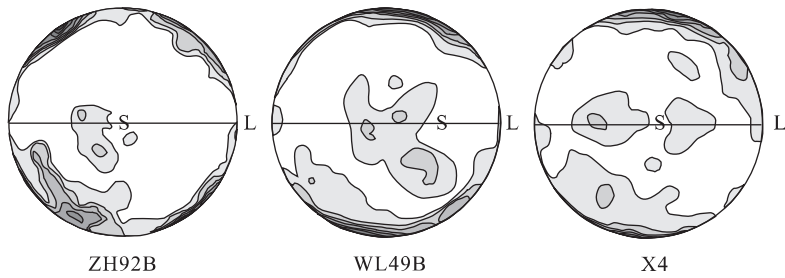


图 5 双河硬玉石英岩中的石英 C 轴结构

Fig. 5 C-axis fabrics of quartz in Shuanghe jadeite quartzites

双河地区硬玉石英岩中石英 C 轴结构.等面积下半球投影.等密度分别为 2%,4%,6%,16%;1%,4%,7%,16%;1%,5%,9%,29%. S. 页理面;L. 线理. 测量石英颗粒数分别为 165,152,156

ZH92B, 石英 C 轴结构为垂直于面理的不完整大圆环带, 环带内有一主极密和次极密, 与面理法线成近 30°交角, 近似斜方对称, 但主体仍属于单斜对称型结构. WL49B, 石英组构为垂直于面理的不完整大圆环带, 环带内有一极密近垂直于面理, 并与面理法线呈 17°交角, 属于单斜对称型结构. X4, 石英组构类似 WL49B 样品, 为垂直于面理的不完整大圆环带, 环带内有一极密近垂直于面理, 并与面理法线成 14°交角, 属于单斜对称型结构. 3 个样品组构类型都基本为单斜对称类型, 反映了硬玉石英岩经历过区域性简单剪切作用.

### 3 硬玉和石英 TEM 研究

对超高压硬玉石英岩样品 ZH92B、WL49B 中的硬玉和石英进行了透射电镜的超显微构造研究.

#### 3.1 硬玉的超显微构造特征

样品 WL49B 中硬玉的超显微构造研究表明, 硬玉内发育低密度位错网和位错壁, 自由位错分布不均匀(图 6). 采用透射电镜衍衬法对硬玉滑移系进行了测定. 以图 6a 所示的 5 条位错为例, 图 6a 显示 1~5 号位错线在  $g_{002}$  双束条件下的明场像中都清晰可见, 表明都满足  $g_{002} \cdot b \neq 0$ ,  $b$  为位错的 Burgers 矢量. 但当  $g_{080}$  和  $g_{260}^-$  分别处于双束条件时位错线都消失了, 仅有很弱的残余衬度, 表明都满足  $g_{080} \cdot b = 0, g_{260}^- \cdot b = 0$ , 由此可知, 1~5 号位错线具有相同的 Burgers 矢量, 即  $b = g_{080} \times g_{260}^- = [001]$ .

同时, 分别在  $[\bar{1}10]$ 、 $[\bar{1}00]$  和  $[\bar{1}01]$  带轴下观察位错线的投影方向, 采用迹线分析方法, 测得 1~5 号位错线的方向 ( $u$ ) 分别为:  $u_1 = [205]$ 、 $u_2 = [516]$ 、 $u_3 = [112]$ 、 $u_4 = [314]$ 、 $u_5 = [213]$ . 由  $b \times u$  可求得

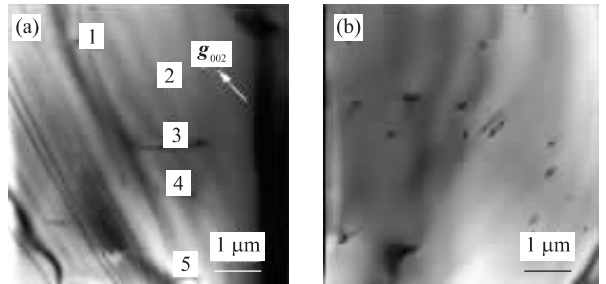


图 6 透射电镜衍衬法测定硬玉位错滑移系(样品号: WL49B)

Fig. 6 Determination of split systems of jadeite with TEM diffraction contrast method (specimen No. WL49B)

a.  $g_{002}$  双束条件下的明场像, 5 条位错线可见; b. 硬玉位错的透射电镜明场像

滑移面的指数分别为: (010)、(150)、(110)、(130)、(120). 所以, 1~5 号位错线的滑移系分别为: (010)[001]、(150)[001]、(110)[001]、(130)[001]、(120)[001]. 另外, 用同样的方法还观测到了如下一些位错的滑移系:  $(110)1/2[110]$ 、 $(\bar{1}10)1/2[110]$ 、 $(2\bar{2}1)1/2[110]$ 、(100)[001]、 $(hk0)[001]$  (纯螺位错)、(120)[001], 结果见表 2. 在这些观察到的滑移系中, 以 (100)[001]、(110)[001] 及  $(\bar{1}10)1/2[110]$  滑移系为主. 对出现位错的区域进行位错密度统计得平均值为  $6.4 \times 10^7 / \text{cm}^2$ .

样品 ZH92B 中, 观察了 3 个硬玉的透射电镜试样, 但没有发现位错, 仅发现晶内有类似“三连点”形式的“界面”, “界面”为连续过渡状态, “界面”两边晶体有小角度(1°~2°)的取向差.

#### 3.2 石英的超显微构造特征

样品 WL49B 中石英内的自由位错密度高. 主

表 2 样品 WL49B 中所测得的硬玉的滑移系

Table 2 Slip system characteristics observed in jadeite of sample WL49B by TEM

测样区	点号	$u$	$b$	滑移系
图 6	1	$[\bar{2}05]$	$[001]$	$(010)[001]$
	2	$[\bar{5}1\bar{6}]$	$[001]$	$(150)[001]$
	3	$[\bar{1}1\bar{2}]$	$[001]$	$(110)[001]$
	4	$[\bar{3}1\bar{4}]$	$[001]$	$(130)[001]$
	5	$[\bar{2}1\bar{3}]$	$[001]$	$(120)[001]$
其他区		$[001]$	$1/2[\bar{1}10]$	$(\bar{1}10)1/2[\bar{1}10]$
		$[\bar{1}0\bar{2}]$	$1/2[\bar{1}10]$	$(2\bar{2}1)1/2[\bar{1}10]$
		$[03\bar{2}]$	$[001]$	$(100)[001]$
		$[001]$	$[001]$	$(hko)[001]$

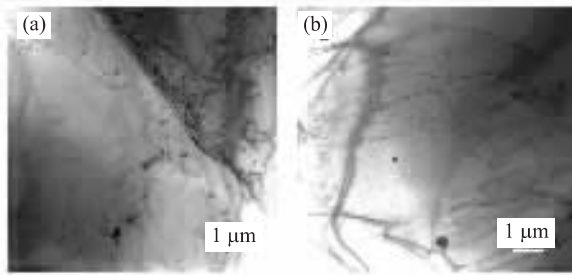


图 7 硬玉石英岩中石英的透射电镜照片

Fig. 7 TEM photos of quartz in jadeite-quartzite

a. 样品 ZH92B 中石英的透射电镜明场像; b. 样品 WL49B 中石英的 TEM 明场像

要是自由位错、位错弓弯、无位错壁发育,说明石英颗粒处于位错滑移阶段(图 7a)。样品 ZH92B 中的石英内部发育自由位错、位错网、位错壁、位错环。位错壁、位错网构成小角度亚边界。位错墙两边晶体取向有  $1^\circ \sim 2^\circ$  的差异(图 7b)。

TEM 测得 WL49B 和 ZH92B 2 个样品中石英的滑移系都以  $(0001)[110]$  底面滑移为主,即在底面  $(0001)$  内以平行于柱面法线  $[110]$  方向产生滑移,反映低温高应变速率的变形条件。这与石英的单斜对称型组构一致,反映硬玉石英岩经历过区域性简单剪切作用。由于石英是对应力很敏感的矿物,保留的变形特征基本反映折返后期变形行为,因此这种组构特征表明硬玉石英岩快速折返过程中经历过剪切作用。

## 4 讨论

硬玉石英岩中硬玉的组构类型从 L-型到 S-型发生变化。这与绿辉石组构类型中的 L-型和 L-

S 型类似;  $[001]$  近平行线理 L,  $[010]$  则近垂直于 S;  $[001]$  轴与线理之间有小的倾角表明硬玉石英岩中硬玉的 LPO 的形成除了压扁或收缩作用外,还有非共轴变形成分。如果假设这种组构的发育主要受在主滑移系上的位错滑移控制的话,那么  $(010)$  是晶内滑移面,而面理面内  $[001]$  极密指示了晶内流动方向,即主滑移系是  $(010)[001]$ 。但 TEM 研究测得主滑移系为  $(100)[001]$ 、 $(110)[001]$  及  $(\bar{1}10)1/2[\bar{1}10]$ , 仅有的一个  $(010)[001]$  滑移系也是在样品 WL49B 中为数不多的几条位错线中测出的。这与绿辉石非常相似,即从未在天然和实验变形单斜辉石的主导滑移系中鉴定出  $(010)[001]$ 。因此理解硬玉变形机制的关键在于探明天然变形单斜辉石(绿辉石、硬玉)组构推出的滑移系与 TEM 研究结果不一致的原因以及分析影响和控制硬玉的组构发育类型的因素。但由于对硬玉变形机制和流变学研究的缺乏,我们仅能从前人对榴辉岩中绿辉石组构和变形机制的探讨中加以借鉴。

对榴辉岩中绿辉石的组成因还处在争论之中。人们曾认为位错蠕变在岩石变形中是造成矿物优选方位的主要原因之一。目前除位错蠕变外,对形成绿辉石不同类型 LPO 起重要影响作用的代表性观点有:扩散蠕变、颗粒边界迁移、应变体系和有序度等(Godard and Roermund, 1995; Abalos *et al.*, 1997; Bascou *et al.*, 2002; Brenker *et al.*, 2002)。扩散蠕变伴随各向异性生长的假设解决了组构特征与 TEM 结果相矛盾的问题。但本研究中硬玉颗粒内成分环带不明显,没有发现显著扩散蠕变的显微构造证据。TEM 没有观察到高角度颗粒边界,表明没有明显颗粒边界迁移证据。而根据有序度变化与组构类型对应的观点,硬玉为  $C2/c$  型结构,应该全部落入 S-型组构特征。但本研究中样品 ZH92B 中硬玉组构特征却表现为 L-型。这与 Brenker 的观点相矛盾。

Stöckhert and Renner(1998)对合成硬玉集合体进行初步流变学变形实验中获得流变学参数  $n = 3.6$ , 为典型位错蠕变参数。本研究在硬玉中发现位错超显微构造,证明硬玉中发生过位错蠕变。TEM 测得硬玉中总体具有低位错密度和发育有限的亚颗粒结构,可能是动态重结晶过程对它产生的影响。

通过对硬玉组构和 TEM 研究,我们认为双河硬玉石英岩中硬玉的变形机制可能以位错蠕变为



主,至于是否涉及扩散蠕变和颗粒边界迁移等其他变形机制有待进一步研究。硬玉组构[001]轴极密近平行线理但与之有倾角,表明岩石可能曾经历过非共轴简单剪切应变作用。

尽管我们对硬玉流变学性质和硬玉石英岩变形期间的行为理解还很有限,但硬玉的显微组构研究可能会有重要应用。研究超高压岩区岩石的俯冲和折返机制是现今构造地质学的主要挑战。系统的超高压岩石(榴辉岩、硬玉石英岩等)组构研究能为将来解决这些问题发挥重要作用。

## 5 结论

通过对大别双河地区超高压硬玉石英岩中硬玉和石英的显微组构和 TEM 研究,得出结论如下:(1)双河硬玉石英岩中硬玉的组构类型基本与绿辉石 L、S 型组构类似。(2)石英的滑移系以(0001)[110]底面滑移为主,代表低温高应变速率变形环境。石英的组构类型以斜方对称和单斜对称型为主,显示原岩区域经历过局部简单剪切非共轴变形和压扁作用。(3)通过对硬玉的 TEM 研究结果,我们认为双河硬玉石英岩中硬玉的变形机制以位错蠕变为主,至于是否涉及扩散蠕变和颗粒边界迁移等其他变形机制还有待进一步研究。

致谢:文中电子探针数据由中国地质大学电子探针室刘惠芳老师完成。填图过程和采集样品由来自德国慕尼黑工业大学的留学生 Ruth Prelicz 和中国地质大学肖树青、赵坤同学共同完成。在此对他们的帮助表示衷心感谢!

## References

Abalos, B., 1997. Omphacite fabric variation in the Cabo Ortegal eclogite (NW Spain): Relationships with strain symmetry during high-pressure deformation. *Journal of Structural Geology*, 19(5): 621–637.

Ayers, J. C., Dunkle, S., Gao, S., 2002. Constraints on timing of peak and retrograde metamorphism in the Dabie-Shan ultrahigh-pressure metamorphic belt, east-central China, using U-Th-Pb dating of zircon and monazite. *Chemical Geology*, 186: 315–331.

Bascou, J., Tommasi, A., Mainprice, D., 2002. Plastic deformation and development of clinopyroxene lattice preferred orientations in eclogites. *Journal of Structural Geology*, 24: 1357–1368.

Brenker, F. E., Prior, D. J., Müller, W. F., 2002. Cation ordering in omphacite and effect on deformation mechanism and lattice preferred orientation (LPO). *Journal of Structural Geology*, 24: 1991–2005.

Bystricky, M., Mackwell, S., 2001. Creep of dry clinopyroxene aggregates. *Journal of Geophysical Research*, B106(7): 13443–13454.

Chen, J., 1994. Study on slip system of dislocation in jadeite. *Acta Petrologica Sinica*, 10(3): 317–322 (in Chinese with English abstract).

Ellis, D. J., Green, D. H., 1979. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibrium. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 71: 13–22.

Gleason, G. C., Green, H. W., 1996. Effect of differential stress on the albite to jadeite + coesite transition at confining pressures of > 3 GPa. *Transactions of the American Geophysical Union, Eos.*, 77: 662.

Godard, G., Van Roermund, H. L. M., 1995. Deformation-induced clinopyroxene fabrics from eclogites. *Journal of Structural Geology*, 17(10): 1425–1443.

Hacker, B. R., Christie, J. M., 1990. Effect of stress and deformation on albite breakdown. *Transactions of the American Geophysical Union, Eos*, 71: 639.

Helmstaedt, H., Anderson, D. L., Gacasci, A. T., 1972. Petrofabric studies of eclogite, spinel websterite, and spinel-herzolite xenoliths from kimberlite-bearing breccia pipes in southeastern Utah and northeastern Arizona. *Journal of Geophysical Research*, 77: 4350–4365.

Jiang, L. L., Wu, W. P., Fan, L. H., et al., 1998. The geological structure features of the Hanchangchong area, Qianshan, Anhui. *Geology of Anhui*, 8(1): 1–9 (in Chinese with English abstract).

Jin, S. Y., Jiao, S. Q., 1998. Fabric measurements of omphacite from ultrahigh pressure eclogite and its rheological significance. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 23(1): 37–40 (in Chinese with English abstract).

Koons, P. O., 1984. Implication to garnet-clinopyroxene geothermometry of non-ideal solid solution in jadeitic pyroxene. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 88: 340–347.

Krogh, E. J., 1988. The garnet-clinopyroxene Fe-Mg geothermometer—A reinterpretation of existing experimental data. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 99: 44–48.

Li, S. G., Jagoutz, E., Chen, Y. Z., et al., 2000. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic chronology and cooling history of ultrahigh pressure metamorphic rocks and their country rocks at Shuanghe in the Dabie Mountains, Central Chi-

- na. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64 (6): 1077—1093.
- Liou, J. G., Zhang, R. Y., Jahn, B., 1997. Petrology, geochemistry and isotope data on a ultrahigh-pressure jadeite quartzite from Shuanghe, Dabie Mountains, east-central China. *Lithos*, 41: 59—78.
- Liu, X. C., Guan, Y. X., Zhang, P. P., et al., 1993. Jadeite in high-pressure metamorphic complexes in the Dabie Mountain region. *Acta Mineralogica Sinica*, 13(4): 341—345 (in Chinese with English abstract).
- Mauler, A., Bystricky, M., Kunze, K., et al., 2000. Microstructures and lattice preferred orientations in experimentally deformed clinopyroxenes aggregates. *Journal of Structural Geology*, 22(11—12): 1633—1648.
- Mauler, A., Godard, G., Kunze, K., 2001. Crystalligraphic fabrics of omphacite, rutile and quartz in Vende eclogites (Armorican Massif, France), Consequences for deformation mechanisms and regimes. *Tectonophysics*, 342: 81—112.
- Powell, R., 1985. Regression diagnosis and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: The garnet-clinopyroxene geothermometer revisited. *Journal of Metamorphic Geology*, 3: 231—243.
- Stöckhert, B., Renner, J., 1998. Rheology of crustal rocks at ultrahigh pressure. In: Hacker, B. R., Liou, J. G., eds., When continents collide: Geodynamics and geochemistry of ultrahigh-pressure rocks. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 57—95.
- Su, W., Xu, S. T., Jiang, L. L., et al., 1996. Coesite from the quartz jadeite, eastern China. *Mineral Magazine*, 60: 229—239.
- Su, W., Xu, S. T., Wu, W. P., et al., 2000. Geochemical variation of jadeite-quartzite in the Changpu of Dabie Mountains during retrogressive metamorphism. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 20(2): 8—13 (in Chinese with English abstract).
- Van Roermund, H. L. M., 1983. Petrofabrics and microstructures of omphacites in a high temperature eclogite from the Swedish Caledonides. *Bulletin de Mineralogie*, 106: 709—713.
- Wu, W. P., Xu, S. T., Jiang, L. L., et al., 1998. Quartz-jadeite in ultrahigh-pressure metamorphic belt in the Dabie Mountains, eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 14(1): 60—70 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M. G., Cong, B. L., Zhao, Z. Y., et al., 1992. High pressure jadeite quartzite in eclogite belt of Dabie Mountain and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, (11): 1013—1015 (in Chinese).
- Zhuang, Y. X., 1998. Characteristic of garnet jadeite-quartzite and associated rocks in the assemblage of UHP metamorphic rocks in Dabie Mountains—Evidence from genesis of continental crust rocks. *Geology in China*, (4): 30—34 (in Chinese).

#### 附中文参考文献

- 陈晶, 1994. 硬玉位错滑移系及流变学特征的研究. *岩石学报*, 10(3): 317—322.
- 江来利, 吴维平, 范良红, 等, 1998. 安徽省潜山县韩长冲地区的地质构造特征. *安徽地质*, 8(1): 1—9.
- 金淑燕, 焦述强, 1998. 超高压榴辉岩中绿辉石组构测定及其流变学意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 23(1): 37—40.
- 刘晓春, 关雅先, 张培萍, 等, 1993. 大别山高压变质杂岩中的硬玉. *矿物学报*, 13(4): 341—345.
- 苏文, 徐树桐, 吴维平, 等, 2000. 大别山菖蒲硬玉石英岩退变质作用过程中岩石地球化学的变异. *矿物岩石*, 20(2): 8—13.
- 吴维平, 徐树桐, 江来利, 等, 1998. 中国东部大别山超高压变质杂岩中的石英硬玉岩带. *岩石学报*, 14(1): 60—70.
- 翟明国, 丛柏林, 赵中岩, 等, 1992. 大别山榴辉岩带的高压硬玉石英岩块体及其地质意义. *科学通报*, (11): 1013—1015.
- 庄育勋, 1998. 大别山超高压变质岩组合中石榴硬玉石英岩及相关岩石的特征——陆壳成因岩石的证据. *中国地质*, (4): 30—34.