

超高压榴辉岩退变质作用对岩石磁化率的影响

徐海军¹, 金振民², 欧新功³, 金淑燕², 余日东¹

1. 中国地质大学研究生院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东广州 510640

摘要: 系统测量了中国大陆科学钻探(CCS D)主孔 100~2 000 m 超高压榴辉岩的磁化率及其各向异性, 并进行了相应的岩石学和矿物学分析。研究表明, 不同退变质程度榴辉岩的磁化率特征具有明显差别。新鲜—弱退变质榴辉岩对应超高压榴辉岩相, 平均体积磁化率 $\kappa=1.4 \times 10^{-3}$ SI, 磁化率各向异性度 $P_j=1.09$, 磁性载体主要是顺磁性矿物石榴子石和绿辉石; 中等—强退变质榴辉岩对应角闪岩相, $\kappa=5.1 \times 10^{-3}$ SI, $P_j=1.20$, 磁性载体主要是退变质所产生的磁铁矿和钛铁矿—钛磁铁矿; 完全退变质榴辉岩对应绿帘角闪岩相—绿片岩相, $\kappa=1.3 \times 10^{-3}$ SI, $P_j=1.08$, 磁性载体主要来自顺磁性矿物角闪石、绿帘石、黑云母等。该研究为超高压变质岩石地区磁异常的解释提供了基础数据和重要的科学约束, 同时也为大陆深俯冲峰期变质岩石和折返阶段岩石退变质程度提供了磁化率鉴别特征。

关键词: 磁化率; 各向异性; 超高压榴辉岩; 退变质; 中国大陆科学钻探; 东海。

中图分类号: P318.4; P588.346

文章编号: 1000-2383(2004)06-0674-11

收稿日期: 2004-08-30

Effects of Retrogression of Ultrahigh-Pressure Eclogites on Magnetic Susceptibility and Anisotropy

XU Hai-jun¹, JIN Zhen-min², OU Xin-gong³, JIN Shu-yan², YU Ri-dong¹

1. Graduate School, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

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

3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

Abstract: The magnetic susceptibility and anisotropy of the ultrahigh-pressure (UHP) eclogite from Chinese Continent Scientific Drilling (CCSD) 100–2 000 m mainhole and their relationship with petrology and mineralogy are systematically investigated. The results show that eclogites of different retrogressions have specific magnetic characters. Fresh to weakly retrograded eclogites which correspond to UHP eclogite facies have relatively low magnetic susceptibility ($\kappa=1.4 \times 10^{-3}$ SI) and low anisotropy ($P_j=1.09$), the paramagnetic mineral omphacite and garnet being the principal carriers. For moderately to strongly retrograded eclogites corresponding to amphibolite facies, because of the formation of magnetite and ilmenite by retrogression, the magnetic susceptibility and anisotropy increases up to $\kappa=5.1 \times 10^{-3}$ SI and $P_j=1.20$. However, for the totally retrograded eclogites corresponding with epidote amphibolite to greenschist facies, magnetite disappears while ilmenite and titanomagnetite changes to sphene. Thus the magnetic susceptibility and anisotropy reduces to $\kappa=1.3 \times 10^{-3}$ SI and $P_j=1.08$, respectively. This research provides fundamental data and constrains for the interpretation of geophysical magnetic surveying on the UHP metamorphic terranes. Furthermore, the magnetic characters show us the insight into the identification of the peak metamorphic rocks during subduction and the degree of retrogression during exhumation.

Key words: magnetic susceptibility; anisotropy; UHP eclogite; retrogression; CCSD; Donghai.

岩石在地磁场中会产生感应磁化,其磁化能力通常用磁化率(magnetic susceptibility)来表征.磁化率取决于岩石的矿物种类、矿物含量和结构构造等因素.岩石磁化率具有非均一性,不同方向上的磁化率有所差别,表现为磁化率的各向异性(AMS, anisotropy of magnetic susceptibility).矿物形态优选方位(SPO)和矿物结晶学优选方位(LPO)是影响磁化率各向异性的2个重要因素(Borradaile and Henry, 1997).岩石的磁学特征含有丰富的地质和地球物理信息(Dunlop, 1995),磁化率来源及其各向异性是进行岩石磁学研究的基础资料(Clark *et al.*, 1992).大陆地壳岩石的磁化率特征与岩石组成、矿物蚀变和变质作用等密切相关(Wasilewski and Warner, 1988; 刘庆生等, 1998),地表出露岩石的磁学研究有助于了解这些地球深部的地质作用.

20世纪80年代以来,世界各地许多大陆碰撞造山带(如西阿尔卑斯、挪威和大别—苏鲁等地区)的榴辉岩中相继发现了证明大陆地壳可能俯冲到大于120 km深度并折返到地表的超高压矿物柯石英(Chopin, 1984; Smith, 1984)和微粒金刚石(Sobolev and Shatsky, 1990; Xu *et al.*, 1992; Dobrzhinetskaya *et al.*, 1995; Xu *et al.*, 2003),使得榴辉岩和与其相关的超高压变质作用成为目前国际地学界研究的热点.榴辉岩是大陆碰撞造山带根部的重要组成部分,较好地保存了超高压变质作用峰期的矿物组成和多期退变质过程的岩石学记录,在俯冲和折返过程中可能记录并保存复杂的涉及榴辉岩形成和分解的完整地球动力学过程.榴辉岩的磁学研究是超高压变质岩石物理性质研究的一个重要方面,可以提供大陆下地壳乃至上地幔深处重要的磁学信息,对于解释大陆造山带地区的航磁调查和卫星磁学调查数据至关重要,也是建立这些地区陆壳模型的基础(Schnetzler and Allenby, 1983).目前国内外一些学者仅对榴辉岩做了少量的磁学研究工作: Wasilewski *et al.* (1979)和 Florio *et al.* (1993)研究了地表出露的榴辉岩包体的磁化率及其各向异性,探讨了它们对于地壳和上地幔磁性特征的影响以及对于航磁异常的影响; Abalos *et al.* (1998)研究了西班牙 Cabo Ortegal 榴辉岩磁化率各向异性的矿物学来源及其与构造组构之间的关系,指出该地区出露的榴辉岩磁化率主要载体是顺磁性矿物石榴子石和绿辉石,磁化率各向异性主要来源于榴辉岩主矿物(石榴子石和绿辉石)的形态优选方位(SPO)和

结晶学优选方位(LPO); 刘庆生等(1999)分析了江苏省东海县 ZK703 钻孔榴辉岩的磁性结构,指出该钻孔榴辉岩具有中等磁性强度与磁性相的分布特征,显示出位于镁铁质麻粒岩与上地幔橄榄岩之间的特征磁性结构; 余钦范等(2002)对中国大陆科学钻探靶区的地表榴辉岩及其围岩的磁化率和剩磁强度进行了初步研究.

正在实施的中国大陆科学钻探(CCS D)工程从地下连续采集超高压岩石样品,孔深已经超过4 000 m.在 CCS D 主孔 0~2 000 m 的岩心中,榴辉岩累计厚度达1 000 m 以上(许志琴, 2004),具有从新鲜榴辉岩到完全退变质榴辉岩的完整退变质系列.本文对 CCS D 主孔 100~2 000 m 榴辉岩样品的磁化率及其各向异性进行了系统测量,并结合相应的岩石学和矿物学分析结果探讨了超高压榴辉岩退变质作用对岩石磁化率及其各向异性的影响.

1 地质背景与研究样品

苏鲁超高压变质带是秦岭—大别造山带的东延部分,是中朝板块与扬子板块俯冲—碰撞作用的产物.苏鲁变质地体位于 NNE 向郯庐断裂以东,北部边界以烟台—五莲断裂与中朝克拉通相接,南部边界以嘉山—响水断裂与扬子克拉通相邻.据 Zhang 等(1995)研究,苏鲁地体可以进一步划分为北部超高压(UHP)变质带和南部高压(HP)变质带,其中北部的超高压变质带被认为是俯冲到100 km 以下而后经快速折返回到地表的俯冲陆壳(Cong, 1996; Liou *et al.*, 1998; Xu *et al.*, 1998; 许志琴等, 2003; 徐树桐等, 2003).东海地区位于苏鲁超高压变质带的西南部,区内出露的主要岩石为花岗质片麻岩、表壳岩系(包括黑云斜长片麻岩、黑云二长片麻岩、角闪斜长片麻岩和片岩等)、第四纪更新世碧玄岩、白垩纪盆地沉积岩和未变质花岗岩(刘福来等, 2003).榴辉岩在本区出露广泛,多呈透镜状、团块状、条带状或似层状产出,夹在大面积分布的变质表壳岩和花岗质片麻岩中,显示榴辉岩在超高压变质折返过程中具有强烈构造侵位的特点.中国大陆科学钻探(CCS D)5 km 主孔位于江苏省东海县西南部的毛北村,构造上属于苏鲁超高压变质带的西南端.主孔2 000 m 岩性剖面揭示出榴辉岩、正片麻岩、副片麻岩、石榴子橄榄岩、片岩和石英岩等50多种岩石类型,其中具有特殊地质意义的榴辉岩累计厚度

超过 1 000 m(许志琴, 2004)。

本次研究的榴辉岩取自 CCSD 主孔 100~2 000 m 岩心, 样品在钻孔中的主要深度区间为 100~1 100 m 和 1 600~2 000 m。榴辉岩样品被加工成直径 25 mm、高 25 mm 的小圆柱体(共计 173 个), 并磨制了相应的岩石薄片。岩石的磁化率及其各向异性测量在中国大陆科学钻探工程现场岩石物性实验室进行, 采用的仪器为南京地质矿产研究所的 HKB-3 型磁化率仪, 其测量灵敏度最高为 5×10^{-8} SI, 精度优于 10^{-7} SI。样品的密度测量采用的是 LP1002 型比重仪, 测量误差为 $\pm 0.03\%$ 。同时, 根据手标本和镜下鉴定特征对榴辉岩样品进行了系统的退变质分类, 并选择具有代表性的样品进行了相应的矿物学和岩石学分析。

2 榴辉岩的退变质分类及岩石学特征

CCSD 主孔 100~2 000 m 井段榴辉岩的累计厚度达 1 200 m, 包括多硅白云母榴辉岩、金红石榴辉

岩、石英榴辉岩和角闪石化榴辉岩等多种类型。张泽明等(2004)根据岩石化学成分将榴辉岩划分为高 Si 型、高 Al 型、高 Ti 型、高 Ti-Fe 型、高 Mg 型和正常型六大类。游振东等(2004)按照起源将其划分为壳源和幔源两种类型。该井段的榴辉岩曾经历不同程度的退变质作用改造, 具有从新鲜榴辉岩到完全退变质榴辉岩的完整退变质系列, 为研究退变质作用对于榴辉岩物理性质的影响提供了很好的条件。本文根据磁性研究的需要, 结合岩石学和矿物学分析, 从岩石物理学角度出发, 将所研究样品分为新鲜榴辉岩、弱退变质榴辉岩、中等退变质榴辉岩、强退变质榴辉岩和完全退变质榴辉岩 5 种类型。CCSD 主孔 100~2 000 m 井段 5 类榴辉岩的代表性样品及其矿物组成详见表 1。

(1)新鲜榴辉岩。矿物组合为石榴子石+绿辉石±多硅白云母±石英±金红石, 残存少量柯石英或者柯石英假象, 也可以含有少量的磷灰石、黄铁矿、方解石脉体等。岩石新鲜, 基本没有发生退变质, 石榴子石和绿辉石矿物颗粒边界没有出现冠状体反

表 1 CCSD 主孔退变质榴辉岩分类及其代表性样品的矿物组成

Table 1 Classification of retrograded eclogites and mineral compositions of core samples from CCSD main holes

退变质分类	样品	深度/m	岩石名称	矿物组成/%
新鲜榴辉岩	083	556.89	含黄铁矿钛磁铁矿榴辉岩	Gt 32, Omp 40, TiMt 25, Pr 3
	086	569.00	含黄铁矿钛磁铁矿榴辉岩	Gt 50, Omp 35, TiMt 13, Pr 2
	089	583.16	含黄铁矿钛磁铁矿榴辉岩	Gt 38, Omp 50, TiMt 10, Pr 1
	060	443.09	含黄铁矿金红石方解石榴辉岩	Gt 50, Omp 40, Ru 4, Cc 3, Ap 2, Pr 1
	084	560.00	含黄铁矿金红石榴辉岩	Gt 60, Omp 35, Ru 4, Pr 1
	121	651.93	含黄铁矿金红石石英榴辉岩	Gt 45, Omp 40, Q 10, Ru 3, Pr 2
	332	1 927.10	含黄铁矿金红石多硅白云母榴辉岩	Gt 45, Omp 40, Q 5, Ph 8, Ru 1, Pr 1
弱退变质榴辉岩	003	109.68	含金红石石英榴辉岩	Gt 45, Omp 25, Q 20, Am 4, Pl 4, Ru 1, Mt 1
	017	172.35	含金红石多硅白云母石英榴辉岩	Gt 35, Omp 40, Q 15, Ph 2, Ru 3, Am 2, Pl 2, Mt 1
	112	697.37	含黄铁矿金红石多硅白云母榴辉岩	Gt 50, Omp 20, Q 10, Ph 7, Ru 5, Am 2, Bi 3, Ap 1, Pr 2
	198	1 070.55	含金红石多硅白云母榴辉岩	Gt 35, Omp 50, Q 5, Ph 3, Ru 2, Am 2, Pl 2, Mt 1
中等退变质榴辉岩	005	112.70	含金红石石英榴辉岩	Gt 25, Omp 10, Q 25, Ru 3, Am 15, Pl 20, Pr 2
	027	236.86	含金红石多硅白云母石英榴辉岩	Gt 35, Omp 30, Q 8, Ph 4, Ru 4, Bi 3, Am 8, Pl 7, Mt 1
	071	502.78	含黄铁矿金红石榴辉岩	Gt 35, Omp 25, Q 8, Ru 4, Am 12, Pl 10, Mt 3, Pr 2
	307	1 761.95	多硅白云母石英榴辉岩	Gt 35, Omp 30, Q 8, Ph 6, Am 10, Pl 10, Ru 1
强退变质榴辉岩	030	250.55	角闪石化含金红石石英榴辉岩	Gt 20, Q 25, Ilm 3, Bi 5, Am 20, Pl 25, Mt 2
	058	427.29	含金红石石英榴辉岩	Gt 30, Q 10, Am 20, Pl 20, Bi 8, Ilm 5, Ap 2, Ep 5
	170	948.75	含金红石多硅白云母榴辉岩	Gt 50, Omp 2, Q 6, Ph 6, Ilm 2, Am 18, Pl 12, Mt 2, Bi 2
	199	1 075.70	角闪石化多硅白云母榴辉岩	Gt 25, Q 8, Ph 8, Ilm 2, Bi 2, Am 20, Pl 20, Czo 10, Mt 3
完全退变质榴辉岩	001	101.65	石榴角闪岩	Gt 7, Am 35, Q 25, Pl 25, Sph 3, Bi 4, Pr 1
	006	117.00	石榴黑云角闪岩	Gt 15, Am 40, Pl 22, Bi 15, Ep 3, Sph 4, Pr 1
	035	275.33	含楣石绿帘黑云斜长角闪岩	Am 35, Pl 35, Bi 15, Q 5, Ep 4, Sph 4, Gt 2
	123	743.00	黑云角闪岩	Am 58, Q 20, Bi 10, Ep 5, Pl 5, Ap 1, Sph 1

注: Am. 角闪石, Ap. 磷灰石, Bi. 黑云母, Cc. 方解石, Czo. 斜黝帘石, Ep. 绿帘石, Gt. 石榴子石, Ilm. 钛铁矿, Mt. 磁铁矿, Omp. 绿辉石, Ph. 多硅白云母, Pl. 斜长石, Pr. 黄铁矿, Q. 石英, Ru. 金红石, Sph. 楣石, TiMt. 钛磁铁矿。

应边和后成合晶(图版 1)。金红石新鲜无蚀变,分布于矿物颗粒的间隙或者以包裹体形式寄存在石榴子石和绿辉石矿物中。钛磁铁矿榴辉岩是新鲜榴辉岩一个特殊的亚类,它主要由石榴子石、绿辉石、钛磁铁矿($\text{TiO}_2 > 14\%$)和少量黄铁矿组成,基本不含其他矿物。其中,钛磁铁矿的体积百分含量可达 25% (图版 2),在岩石中形成网脉状或者团块状富集域,其聚合体中心通常有少量黄铁矿,背散射电子扫描图像中可见到钛磁铁矿中有大量钛铁矿长条状出溶体(图版 3)。

(2)弱退变质榴辉岩。矿物组合为石榴子石+绿辉石+金红石+石英+多硅白云母,含有少量黄铁矿、磷灰石等矿物。绿辉石颗粒边界发育有细脉状后成合晶和冠状体反应边,后成合晶主要由斜长石、透辉石和角闪石组成。石榴子石和金红石等矿物基本无蚀变,偶见颗粒边部发育薄层的深绿色韭闪石薄膜。可见到少量晶形较好的磁铁矿微晶沿着颗粒边界分布于后成合晶体中(图版 4)。

(3)中等退变质榴辉岩。矿物组成为石榴子石+绿辉石+石英+金红石+多硅白云母,含有少量黄铁矿、黑云母和钛铁矿,后成合晶发育。绿辉石有 50% 左右发生退变质,后成合晶由角闪石、长石和磁铁矿组成。金红石边部出现钛铁矿化,可见钛铁矿呈港湾状在金红石颗粒边部生长。石榴子石颗粒基本未退变,少数颗粒边界处发育窄细的深绿色韭闪石反应边(图版 5)。多硅白云母逐渐被斜长石+黑云母组成的海绵状后成合晶所取代。

(4)强退变质榴辉岩。矿物组合为石榴子石+石英+钛铁矿+黑云母,出现斜黦帘石、绿帘石等矿物,后成合晶非常发育。绿辉石几乎全部被角闪石、斜长石和磁铁矿组成的后成合晶所取代,石榴子石颗粒被韭闪石包裹,并逐渐被斜长石+磁铁矿取代。大量磁铁矿微晶散布于后成合晶中或者围绕残余的石榴子石与后成合晶边界形成链状(图版 6, 7)。钛铁矿总体上呈现透镜状,其核心常见有金红石残余,表明钛铁矿是金红石被交代的结果。

(5)完全退变质榴辉岩。矿物组成为角闪石+长石+石英+黑云母+石榴子石,含有少量的楣石和黄铁矿。部分角闪岩中残余有少量石榴子石,部分角闪石和斜长石微晶集合体勾勒出早期的石榴子石轮廓。绿帘石和斜黦帘石呈长条状,多数以聚合体形式出现。金红石和钛铁矿均不同程度地向楣石转化。楣石呈现水滴状,有时可见其核部包裹钛铁矿或者金

红石(图版 8)。

3 榴辉岩的磁化率及其各向异性

3.1 磁化率

物质在外磁场中将被磁化,其磁化程度通常用感应强度 M 来表示。在相同的磁场中不同物质的磁化程度不同,磁化率 κ 就是用来描述其磁化难易程度的物理量。在物质内任意一点,感应磁化强度量值与有效磁化磁场(H)之间有如下关系:

$$M = \kappa \cdot H.$$

其中, M 表示感应磁化强度; H 表示外加磁场强度; κ 表示磁化率。

磁化率一般在与地磁场相近的低磁场中测量,也称为低场磁化率(low field magnetic susceptibility),通常表示为体积磁化率 κ (单位 10^{-6} SI) 或质量磁化率 κ_g (体积磁化率 κ 与密度的比值,单位 $10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$),本文采用前者。矿物磁性可以分为反磁性、顺磁性、反铁磁性和亚铁磁性 4 种类型,岩石的磁化率来源于以上 4 种类型矿物磁化率的总和,可以用公式表示为:

$$k_{LF} = k_d + k_p + k_{af} + k_f, \quad (\text{Rochter, 1994})$$

其中, k_{LF} 为岩石总磁化率; k_d 反磁性磁化率; k_p 顺磁性磁化率; k_{af} 亚反铁磁性磁化率; k_f 铁磁性磁化率。

岩石的磁化率(κ)不仅可以反映岩石的主要矿物组成,而且对于强磁性的副矿物(主要为反铁磁性和铁磁性矿物)也非常敏感。岩石的密度则取决于其所含的主矿物成分及其百分含量,主要反映岩石的主矿物组成情况。因此,岩石的磁化率与密度相结合可以在很大程度上反映岩石的矿物组成情况。本文测量了 CCSD 主孔 100~2 000 m 岩心样品的磁化率和密度,发现榴辉岩的退变质程度与密度和磁化率之间具有良好的对应关系(图 1)。主孔榴辉岩样品的磁化率及其各向异性统计数据详见表 2。从图 1、表 2 中可以看出:(1)新鲜钛磁铁矿榴辉岩具有很高的密度和磁化率,平均值分别为 7.7×10^{-3} SI 和 $3.79 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;(2)新鲜榴辉岩(不含钛磁铁矿)具有高密度低磁化率的特征,平均值分别为 1.0×10^{-3} SI 和 $3.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;(3)弱退变质榴辉岩与新鲜榴辉岩特征相近,其磁化率有所增加,而密度稍微有所降低,平均值分别为 1.2×10^{-3} SI 和 $3.41 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;(4)中等退变质榴辉岩随着退变质程度的增加,磁化

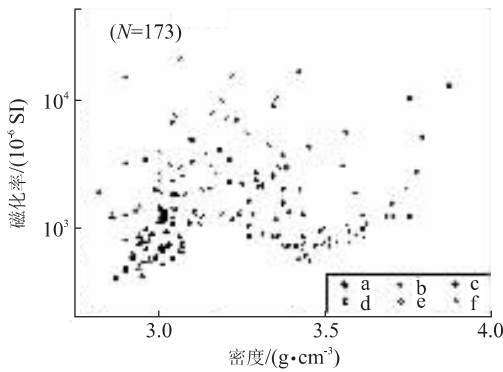


图 1 CCSD 主孔 100~2 000 m 榴辉岩的磁化率与密度对应关系

Fig. 1 Relationship between magnetic susceptibility and density of 100—2 000 m eclogites from CCSD main hole

a. 新鲜钛磁铁矿榴辉岩; b. 新鲜榴辉岩; c. 弱退变质榴辉岩; d. 中等退变质榴辉岩; e. 强退变质榴辉岩; f. 完全退变质榴辉岩; N. 样品数量。(以下图解沿用此类符号定义)

率逐渐增高,而密度却相应降低,平均值分别为 2.7×10^{-3} SI 和 $3.24 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; (5) 强退变质榴辉岩具有很高的磁化率和较低的密度,平均值分别为 5.0×10^{-3} SI 和 $3.12 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; (6) 完全退变质榴辉岩是榴辉岩退变质的末期产物,此类榴辉岩的密度和磁化率都是最低的,平均值分别为 1.0×10^{-3} SI 和 $2.98 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

总体上看,榴辉岩的磁化率在退变质过程中具有先升高后降低的特征,而其密度则随岩石退变质程度的增强逐渐降低。这种趋势可以划分为 3 个阶段: (1) 新鲜—弱退变质榴辉岩所代表的低磁化率高密度阶段,平均值分别为 1.1×10^{-3} SI 和 $3.48 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; (2) 中等—强退变质榴辉岩所代表的中高磁化率中低密度阶段,岩石随着退变质程度的增加磁化率升高而密度降低,平均值分别为 3.8×10^{-3} SI 和 $3.18 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; (3) 完全退变质榴辉岩所代表的

低磁化率低密度稳定阶段,岩石的磁化率和密度都明显降低,平均值分别为 1.0×10^{-3} SI 和 $2.98 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。新鲜钛磁铁矿榴辉岩是新鲜榴辉岩中一个特殊的亚类,具有很高的磁化率和密度,平均值分别高达 7.7×10^{-3} SI 和 $3.79 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

3.2 磁化率各向异性

磁化率各向异性张量是一个二维向量,通常可以表示为一个椭球体,椭球体的三轴磁化率分别为 k_{\max} 、 k_{int} 、 k_{\min} (或者 k_1 、 k_2 、 k_3), 其形状通常用磁化率各向异性度 (P_j , anisotropy degree) 和形状因子 (T , shape parameter) 来表示 (Jelinek, 1981):

$$P_j = \exp \sqrt{2[(\eta_1 - \eta)^2 + (\eta_2 - \eta)^2 + (\eta_3 - \eta)^2]},$$

$$T = \frac{2\eta_2 - \eta_1 - \eta_3}{\eta_1 - \eta_3}.$$

其中, $\eta_1 = \ln \kappa_1$, $\eta_2 = \ln \kappa_2$, $\eta_3 = \ln \kappa_3$, $\eta = (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3)/3$ 。

磁化率各向异性度 (P_j) 是磁化率各向异性 (AMS) 的一个重要参数,源于具有磁各向异性矿物的结晶学优选方位 (LPO) 和形态优选方位 (SPO) (Borradaile and Henry, 1997), 不仅与岩石的应变程度有关,而且还依赖于岩石的矿物组成 (Borradaile, 1988; Rochette *et al.*, 1992)。形状因子 (T) 则能反应磁化率椭球体的形状,当 $1 > T > 0$ 时,磁面理发育,磁化率量值椭球体呈压扁状;当 $0 > T > -1$ 时,磁线理发育,磁化率量值椭球体呈拉长状。

CCSD 主孔 2 000 m 榴辉岩的磁化率椭球体形状因子 T 与磁化率各向异性度 P_j 之间的对应关系见图 2。从图 2 中可以看出,新鲜榴辉岩、退变质榴辉岩和完全退变质榴辉岩的 T 值都比较分散,没有明显的区别,显示出榴辉岩在不同退变质阶段的压扁变形和拉伸变形比较均衡。榴辉岩的磁化率各向异性度 P_j 变化范围较大,从 1.00 到 1.52,平均值 1.14,主要集中在 1.0~1.3 范围内(图 2); 新鲜—

表 2 CCSD 主孔榴辉岩的密度、磁化率及其各向异性度统计

Table 2 Statistics of density and magnetic susceptibility and anisotropy of eclogites from CCSD main hole

榴辉岩退变质分类	样品数	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)			磁化率/(10^{-6} SI)			各向异性度 P_j		
		最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
新鲜钛磁铁矿榴辉岩	4	3.75	3.87	3.79	2 738	12 856	7 734	1.07	1.32	1.21
新鲜榴辉岩	20	3.37	3.74	3.55	542	2 016	980	1.00	1.26	1.03
弱退变质榴辉岩	21	3.01	3.75	3.41	558	4 304	1 196	1.00	1.48	1.10
中等退变质榴辉岩	37	3.00	3.68	3.24	701	16 561	2 654	1.01	1.54	1.19
强退变质榴辉岩	34	2.90	3.36	3.12	1 044	21 174	4 992	1.04	1.52	1.23
完全退变质榴辉岩	57	2.82	3.09	2.98	402	3 205	954	1.01	1.48	1.10

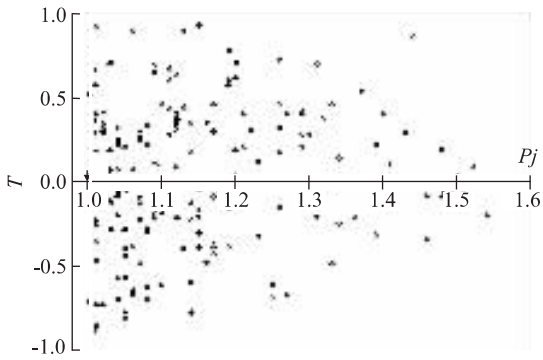


图 2 榴辉岩磁化率各向异性度(P_j)与形状因子(T)对应关系

Fig. 2 Relationship between the anisotropy intensity (P_j) and the shape parameter (T) of eclogites

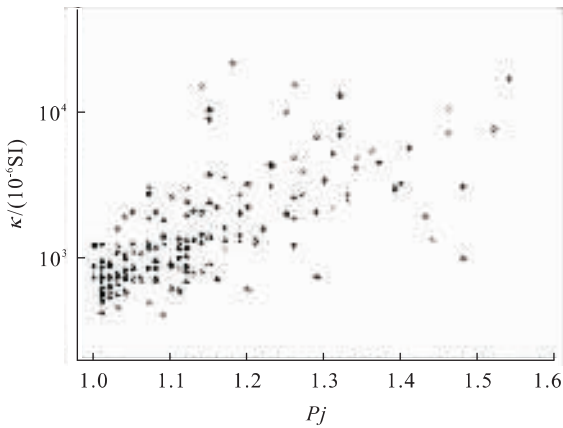


图 3 榴辉岩磁化率各向异性度(P_j)随平均磁化率(κ)的变化关系

Fig. 3 Anisotropy intensity (P_j) varies with the mean susceptibility (κ) of eclogites

弱退变质榴辉岩和完全退变质榴辉岩磁化率各向异性度较低, P_j 平均值分别为 1.07 和 1.10; 中等—强退变质榴辉岩具有相对较高的磁化率各向异性度, P_j 平均值为 1.21; 新鲜钛磁铁矿榴辉岩是一个特例, 具有较高的磁化率各向异性度, P_j 平均值也为 1.21. 总体上看, 榴辉岩的磁化率各向异性度 P_j 在退变质过程显示先增高后降低的特征, P_j 与 κ 之间比较好的对应关系, 高磁化率的榴辉岩一般具有较高的磁化率各向异性度(图 3).

4 讨论与结论

4.1 退变质作用对于榴辉岩磁化率的影响

大别—苏鲁超高压榴辉岩形成于大陆深俯冲和

折返阶段, 经历了宽广的温度、压力、应力和流体状况的变化 (Wang *et al.*, 1994; 张泽明等, 1995; Nakamura and Hirajima, 2000), 这些变化作为主导因素控制着超高压榴辉岩的矿物相变以及相应的矿物组合. CCSD 主孔 100~2 000 m 榴辉岩保留了新鲜榴辉岩到完全退变质榴辉岩的完整退变质系列, 不同退变质程度榴辉岩的磁化率特征具有明显差别(图 1, 表 2).

(1) 新鲜钛磁铁矿榴辉岩. 此类榴辉岩集中出现在 CCSD 主孔 546~608 m 井段, 主要组成矿物为石榴子石、绿辉石、钛磁铁矿和少量的黄铁矿, 岩石化学特征为高 Fe、高 Ti、高 Ca、低 SiO_2 (张泽明等, 2004), 是一个重要的钛矿化层位(徐珏等, 2004). 岩石中所含的钛磁铁矿含量可达到 25%, 钛磁铁矿在榴辉岩退变质过程中随着温度和压力的降低而产生大量的钛铁矿出溶体(图版 2, 3). 高磁化率高密度的钛磁铁矿及其钛铁矿出溶体是造成此类榴辉岩具有很高的密度和磁化率的主要原因.

(2) 新鲜—弱退变质榴辉岩. 此类岩石主要由顺磁性矿物石榴子石和绿辉石组成, 可以含有石英、多硅白云母和金红石等矿物, 不含或者含有少量的反铁磁性矿物(例如钛铁矿). 岩石中基本不含铁磁性矿物, 磁化率的主要载体是顺磁性矿物石榴子石和绿辉石. 此类榴辉岩具有较高的密度和相对较低的磁化率, 据此特征可以与其他变质程度的榴辉岩相区分.

(3) 中等—强退变质榴辉岩. 这种类型的榴辉岩后成合晶广泛发育, 变质峰期的绿辉石、多硅白云母、石榴子石等矿物逐渐被后成合晶所蚕食并进而取代. 后成合晶化的过程中, 伴随着变质反应而出现了高磁化率的大量铁磁性矿物: ①磁铁矿. 磁铁矿是榴辉岩中石榴子石和绿辉石后成合晶化的产物, 反应式为 $\text{Grt} + \text{Omp} + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Am} + \text{Pl} + \text{Mt}$, $\text{Grt} + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Am} + \text{Mt}$ (张泽明, 1996). 显微镜下可以看到, 磁铁矿微晶呈密集星点状散布于后成合晶内部, 或者呈环链状围绕着残余的石榴子石和绿辉石等矿物颗粒边界(图版 6, 7); ②钛铁矿和钛磁铁矿. 中等—强退变质榴辉岩中的大多数金红石都已经发生钛铁矿化, 钛铁矿—钛磁铁矿在金红石边部呈港湾状, 甚至完全取代金红石颗粒(图版 6, 7). 钛铁矿—钛磁铁矿是金红石被 Fe 交代的结果(杨天南等, 2003), 具有较高的磁化率. 金红石蚀变产生的钛铁矿—钛磁铁矿和榴辉岩后成合晶化过程

中产生的磁铁矿是中等—强退变质榴辉岩的主要磁化率来源,也是其高磁化率的物质基础。

(4)完全退变质榴辉岩。杨天南等(2003)认为榴辉岩退变质晚期以流体的渗滤交代作用为主导,表现为石榴子石被角闪石取代、后成合晶的角闪石化,以及黝帘石、白云母的形成,最终石榴子石转化为斜长角闪岩。在此过程中,钛铁矿和金红石逐渐转变为稳定的榍石,可以见到榍石中心包裹的残余金红石或者钛铁矿(图版 8)。与此同时,后成合晶化过程中产生的磁铁矿减少直至消失,其消失的可能解释是:一部分以铁元素形式进入到角闪石、帘石和黑云母等矿物中,一部分铁元素随流体转移。在这一退变质阶段,伴随着磁铁矿和钛铁矿—钛磁铁矿的减少和消失,完全退变质榴辉岩的磁化率又明显降低,磁化率载体主要是角闪石、绿帘石、黑云母等顺磁性矿物。

4.2 退变质作用对榴辉岩磁化率各向异性的影响

磁化率各向异性(AMS)是一种有效的岩石结构工具,它源自于具有磁各向异性矿物的结晶学优选方位(LPO)和形态优选方位(SPO)(Borradaile and Henry, 1997)。中级—高级变质岩石的 AMS 不仅与岩石的应变程度有关,而且依赖于岩石的矿物组成(Borradaile, 1988; Rochette *et al.*, 1992)。从图 3 可以看出,在磁化率各向异性度(P_j)和磁化率(κ)之间比较好的对应关系,并且 P_j 的大小与榴辉岩的退变质程度相关:(1)新鲜钛磁铁矿榴辉岩($P_j=1.21$)。岩石中的钛磁铁矿在榴辉岩降温减压过程中产生大量长条状钛铁矿出溶体,钛铁矿具有很高的磁化率各向异性度($P_j=15$)(Borradaile *et al.*, 1987),是其高磁化率各向异性的主要来源。钛铁矿出溶体在钛磁铁矿单个颗粒中定向性比较好,但是由于钛磁铁矿并不具有很好的优选方位,所以钛铁矿出溶体总体的优选性较差(图版 3),使得岩石总体的 P_j 并不高。(2)新鲜—弱退变质榴辉岩($P_j=1.07$)。此类榴辉岩的磁化率各向异性主要来自于顺磁性矿物石榴子石和绿辉石以及少量的钛铁矿,磁化率各向异性度比较低。Abalos(1998)通过对西班牙 Cabo Ortegal 面理化和块状榴辉岩磁化率各向异性的研究发现,面理化榴辉岩比块状榴辉岩的磁化率各向异性度稍微高一些(P_j 分别为 1.06 和 1.03),各向异性主要源于矿物的结晶学优选方位(LPO)和多晶集合体形态优选方位(SPO)。(3)中等—强退变质榴辉岩($P_j=1.21$)。此类岩石的磁化

率各向异性度最高,由金红石转化成的钛铁矿—钛磁铁矿和后成合晶中生成的磁铁矿是磁化率各向异性度增高的物质基础。榴辉岩的退变质反应过程中,流体的参与是一个重要条件,而榴辉岩的变形为流体提供了通道,便于退变质反应的进行。显微镜下显示,此类榴辉岩变形强烈,矿物具有良好的形态优选方位(SPO),退变质过程中产生的钛铁矿—钛磁铁矿和磁铁矿等后生矿物沿着原生矿物的颗粒边界排列,显示出明显的优选定向(图版 5)。这是造成中等—强退变质榴辉岩具有高磁化率各向异性的本质原因。(4)完全退变质榴辉岩($P_j=1.10$)。在榴辉岩的退变质晚期以流体的渗滤交代作用为主导(杨天南等, 2003),磁铁矿逐渐减少甚至消失,钛铁矿—钛磁铁矿和金红石向稳定的榍石转化,角闪石和绿帘石等矿物在后成合晶中自由生长,不显示明显的优选定向。因此,完全退变质榴辉岩的磁化率各向异性度明显偏低。

4.3 榴辉岩磁化率特征的动力学意义

张泽明等(1999)对江苏东海县 ZK703 钻孔榴辉岩的变质作用进行了详细研究,认为该区超高压榴辉岩经历了至少 3 期变质作用,从早到晚分别是:超高压榴辉岩相,以柯石英、高硅多硅白云母和金刚石出现为特征;角闪岩相退变质作用,斜长石+角闪石+黑云母+石英+绿帘石共生;绿帘角闪岩相退变质作用,角闪石+钠长石+绿帘石+石英共生。CCSD 主孔 2 000 m 榴辉岩与 ZK703 钻孔具有可比性,也具有多期变质的特点。本文研究发现,榴辉岩不同变质阶段的密度、磁化率及其各向异性度有比较明显的差别:新鲜—弱退变质榴辉岩($\kappa=1.1 \times 10^{-3}$ SI, $P_j=1.07$, $\rho=3.48 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$),对应于超高压榴辉岩相变质作用;中等—强退变质榴辉岩($\kappa=3.8 \times 10^{-3}$ SI, $P_j=1.21$, $\rho=3.18 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$),对应于角闪岩相变质作用;完全退变质榴辉岩($\kappa=1.0 \times 10^{-3}$ SI, $P_j=1.10$, $\rho=2.98 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$),对应于绿帘角闪岩相—绿片岩相变质作用。从超高压榴辉岩 $P-T$ 轨迹与其磁化率随退变质程度变化的图解(图 4)中可以看出,磁化率大小与退变质期次之间具有良好的对应关系:超高压榴辉岩相→角闪岩相转变的过程中,岩石退变质发应中产生大量的高磁性矿物(例如钛铁矿—钛磁铁矿和磁铁矿等),使得其磁化率逐渐增高,并在角闪岩相达到最大;角闪岩相→绿帘角闪岩相→绿片岩相转变过程中,岩石磁化率迅速减小,并趋于稳定。

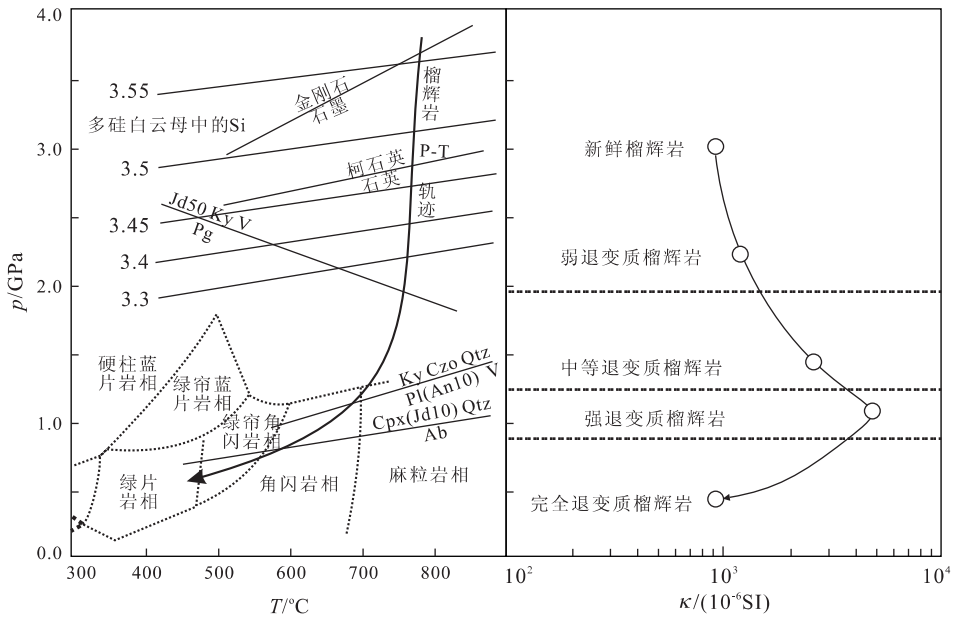


图 4 超高压榴辉岩 P-T 轨迹与磁化率变化关系(张泽明等,1999)

Fig. 4 P-T path and magnetic susceptibility of ultrahigh-pressure eclogites

因此,变质岩区地磁研究的解释中必须考虑到矿物相变作用和变质程度对岩石磁化率及其各向异性的影响.岩石的磁化率可以为大陆深俯冲峰期变质岩石和折返退变质岩石提供磁性鉴别特征,并且可以用来定性地判断岩石所经历的 P-T 轨迹.

References

Abalos, B., Aranguren, A., 1998. Anisotropy of magnetic susceptibility of eclogites; Mineralogical origin and correlation with the tectonic fabric (Cabo Ortegal, Spain). *Geodinamica Acta* (Paris), 11(6): 271-283.

Borradaile, G. J., 1988. Magnetic susceptibility, petrofabrics and strain. *Tectonophysics*, 156: 1-20.

Borradaile, G. J., Henry, B., 1997. Tectonic applications of magnetic susceptibility and its anisotropy. *Earth Science Reviews*, 42: 49-93.

Borradaile, G. J., Keeler, W., Alford, C., et al., 1987. Anisotropy of magnetic susceptibility of some metamorphic minerals. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 48: 161-166.

Chopin, C., 1984. Cosite and pure pyrope in high-grade blueschists of the western Alps; A first record and some consequences. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 86: 107-118.

Clark, D. A., French, D. H., Lackie, M. A., et al., 1992. Magnetic petrology: Application of integrated rock magnetic and petrological techniques to geological interpretation of magnetic surveys. *Explor. Geophys.*, 23: 65-68.

Cong, B. L., 1996. Ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabieshan-Sulu region of China. Science Press, Beijing.

Dobrzynetskaia, L. F., Eide, E., Larsen, R., et al., 1995. Diamond in metamorphic rocks of the western Gneiss Region in Norway. *Geology*, 23: 597-600.

Dunlop, D. J., 1995. Magnetism in rocks. *Journal of Geophysical Research*, 100: 2161-2174.

Florio, G., Fedi, M., Rapolla, A., et al., 1993. Anisotropic magnetic susceptibility in the continental lower crust and its implications for the shape of magnetic anomalies. *Geophys. Res. Lett.*, 20: 2323-2326.

Jelínek, V., 1981. Characterization of magnetic fabric of rocks. *Tectonophysics*, 79: 63-67.

Liou, J. G., Maruyama, S., Cong, B., 1998. Introduction to Geodynamics for high- and ultrahigh-pressure metamorphism. *The Island Arc*, 7(1-2): 115.

Liu, F. L., Zhang, Z. M., Xu, Z. Q., 2003. Three-dimensional distribution of ultrahigh-pressure minerals in Sulu terrane. *Acta Geologica Sinica*, 77(1): 69-84 (in Chinese with English abstract).

Liu, Q. S., Gao, S., Zheng, J. P., 1998. Magnetic structure of the continental crust: Significance for crustal structure and evolution. *Chinese Science Bulletin*, 43(12): 1246-1252 (in Chinese).

Nakamura, D., Hirajima, T., 2000. Granulite-facies overprinting of ultrahigh pressure metamorphic rocks, North-eastern Sulu region, eastern China. *Journal of Petrology*

- gy, 41: 563—582.
- Richter, P., 1994. Comment on “Magnetic fabrics, crystallographic preferred orientation and strain of progressively deformed metamorphosed pelites in the Helvetic zone of the Central Alps (Quartzenschiefer Formation)” by Richter, C., Ratschbacher, L., Frisch, W. *J. Geophys. Res.*, 99: 21825—21827.
- Rochette, P., Jackson, M., Aubourg, C., 1992. Rock magnetism and the interpretation of anisotropy of magnetic susceptibility. *Rev. Geophys.*, 30: 209—226.
- Schnetzler, C. C., Allenby, R. J., 1983. Estimation of lower crust magnetization from satellite derived anomaly field. *Tectonophysics*, 93: 33—45.
- Smith, D. C., 1984. Coesite in clinopyroxene in the Caledonides and its implications for geodynamics. *Nature*, 310: 641—644.
- Sobolev, N. V., Shatsky, V. S., 1990. Diamond inclusions in garnets from metamorphic rocks. *Nature*, 343: 742—746.
- Wang, Q., Ishiwatari, A., Zhao, Z., et al., 1994. Cosite-bearing granulite retrograded from eclogite in Weihai, eastern China. *Europe Journal of Mineralogy*, 5: 141—152.
- Wasilewski, P., Warner, R. D., 1988. Magnetic petrology of deep crustal rocks—Ivrea Zone, Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 87: 347—361.
- Wasilewski, P. J., Thomas, H. H., Mayhew, M. A., 1979. The Moho as a magnetic boundary. *Geophys. Res. Lett.*, 6: 541—544.
- Xu, J., Chen, Y. C., Wang, D. H., et al., 2004. Titanium mineralization in the ultrahigh-pressure metamorphic rocks from Chinese Continental Scientific Drilling 100—2 000 m main hole. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 119—126 (in Chinese with English abstract).
- Xu, S., Okay, A., Ji, S., et al., 1992. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting. *Science*, 256(5053): 80—82.
- Xu, S. T., Liu, Y. C., Chen, G. B., et al., 2003. New discovery of diamonds of eclogite from Sulu area. *Chinese Science Bulletin*, 48(10): 1069—1075 (in Chinese).
- Xu, Z. Q., 2004. The scientific goals and investigation progresses of the Chinese Continental Scientific Drilling Project. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Yang W. C., Zhang, Z. M., 1998. Scientific significance and site-selection of the first Chinese Continental Scientific Deep Drillhole. *Continental Dynamics*, 3: 1—13.
- Xu, Z. Q., Zhang, Z. M., Liu, F. L., et al., 2003. Exhumation structure and mechanism of the Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt, central China. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 443—450 (in Chinese with English abstract).
- You, Z. D., Su, S. G., Liang, F. H., et al., 2004. Petrography and metamorphic deformational history of the ultrahigh pressure metamorphic rocks from the 100—2 000 m core of Chinese Continental Scientific Drilling, China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 43—52 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Q. F., Guo, Y. Z., Meng, X. H., et al., 2002. Petrophysical parameters at continental scientific drilling site in Subei, China. *Chinese J. Geophys.*, 45(1): 93—100 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R., Hirajima, T., Banno, S., et al., 1995. Petrology of ultrahigh pressure rocks from the southern Sulu region, eastern China. *Journal of Metamorphic Geology*, 13: 659—675.
- Zhang, Z. M., 1996. Disequilibrium reactions and kinetics of ultra-high pressure metamorphic rocks from the Dabie Mountains. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 21(5): 501—507 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. M., Xu, Z. Q., Liu, F. L., et al., 2004. Geochemistry of eclogites from the main hole (100~2 050 m) of the Chinese Continental Scientific Drilling project. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 27—42 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. M., Xu, Z. Q., Xu, H. F., 1999. Metamorphism of eclogite from the ZK703 drillhole in Donghai, south Sulu (Jiangsu-Shandong) ultrahigh-pressure metamorphic belt, eastern China. *Acta Geologica Sinica*, 73(4): 321—333 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. M., You, Z. D., Han, Y. J., et al., 1995. Petrology metamorphic process and genesis of the Dabie-Sulu eclogite belt, east-central China. *Acta Geologica Sinica*, 69(4): 306—325 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 刘福来, 张泽明, 许志琴, 2003. 苏鲁地体高压矿物的三维分布. *地质学报*, 77(1): 69—84.
- 刘庆生, 高山, 郑建平, 1998. 大陆地壳磁性结构研究及意义. *科学通报*, 43: 1246—1252.
- 刘庆生, 张泽明, 刘勇胜, 1999. 江苏东海地区 ZK703 钻孔榴辉岩的磁性结构及其深部地质意义. *现代地质*, 13(S): 45—50.

徐珏,陈毓川,王登红,等,2004. 中国大陆科学钻探主孔100~2 000米超高压变质岩中的钛矿化. 岩石学报,20(1): 119-126.

徐树桐,刘贻灿,陈冠宝,等,2003. 大别山、苏鲁地区榴辉岩中新发现的微粒金刚石. 科学通报,48(10): 1069-1075.

许志琴,2004. 中国大陆科学钻探工程的科学目标及初步成果. 岩石学报,20(1): 1-8.

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): 443-450.

杨天南,许志琴,陈方远,2003. 江苏东海榴辉岩向斜长角闪岩转化的研究. 地质学报,77(4): 510-521.

游振东,苏尚国,梁凤华,等,2004. 中国大陆科学钻探主孔100~2 000 m超高压变质岩岩相学特征与变质变形史. 岩石学报,20(1): 43-52.

余钦范,郭友钊,孟小红,等,2002. 苏北大科学钻探靶区岩石物理性质. 地球物理学报,41(1): 93-100.

张泽明,1996. 大别山地区超高压变质岩的不平衡退变质反应及动力学. 地球科学——中国地质大学学报,21(5): 501-507.

张泽明,许志琴,刘福来,等,2004. 中国大陆科学钻探工程主孔(100~2 050 m)榴辉岩岩石化学研究. 岩石学报,20(1): 27-42.

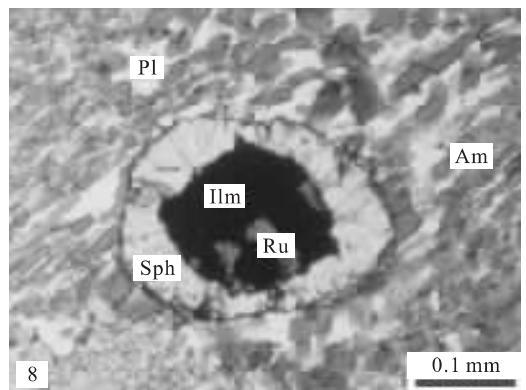
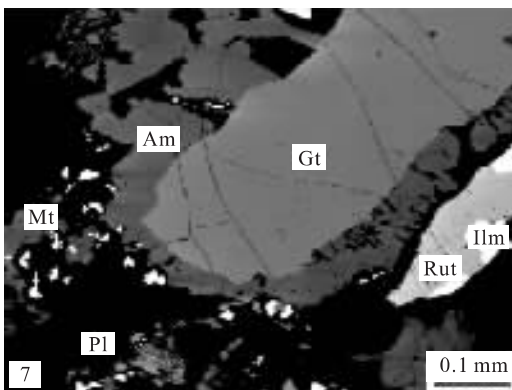
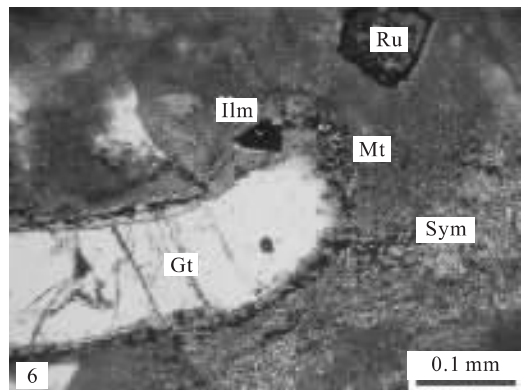
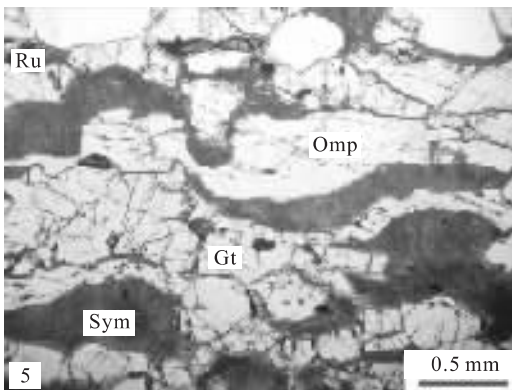
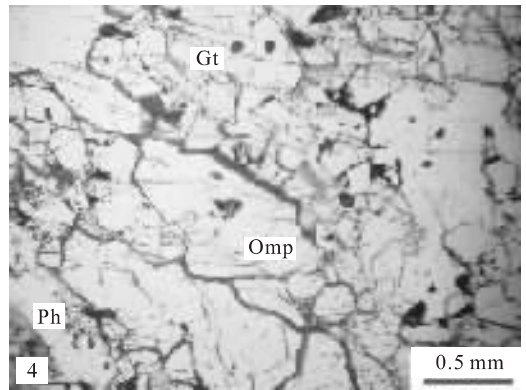
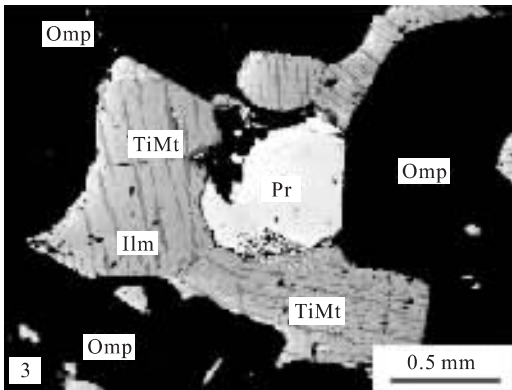
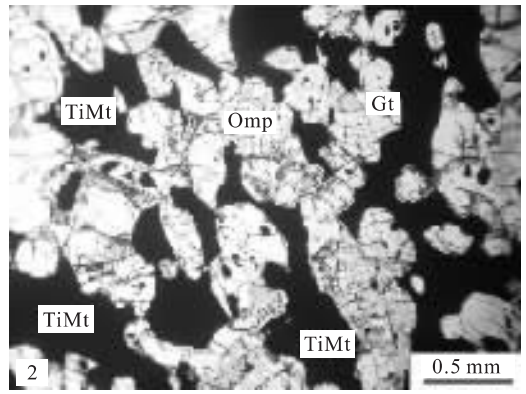
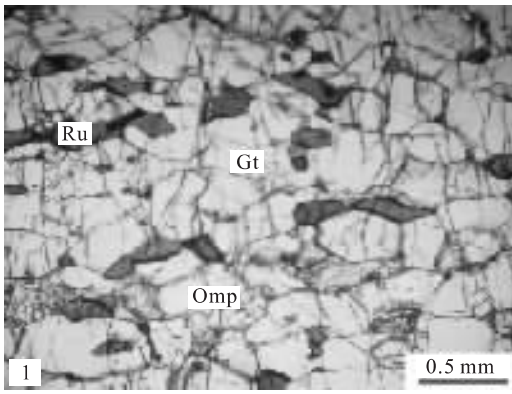
张泽明,许志琴,徐慧芬,1999. 南苏鲁超高压变质带东海ZK703钻孔榴辉岩的变质作用. 地质学报,73(4): 321

-333.

张泽明,游振东,韩郁菁,等,1995. 大别—苏鲁榴辉岩带的岩石学、变质作用过程及成因研究. 地质学报,69(4): 306-325.

图版说明

1. 新鲜榴辉岩,石榴子石、绿辉石和金红石矿物有明显的拉长和定向排列. 样品060(深度443.09 m),单偏光.
2. 钛磁铁矿榴辉岩,钛磁铁矿在岩石中的体积分数高达25%. 样品083(深度556.89 m),单偏光.
3. 钛磁铁矿中出溶大量的长条状钛铁矿. 样品083(深度556.89 m),背散射电子扫描图像.
4. 弱退变质榴辉岩,绿辉石和石榴子石矿物颗粒边界有细脉状反应边. 样品198(深度1 070.55 m),单偏光.
5. 中等退变质榴辉岩,石榴子石和绿辉石明显拉长定向,后成合晶发育. 样品018(深度178.97 m),单偏光.
6. 强退变质榴辉岩,大量磁铁矿晶体围绕在残余的石榴子石矿物颗粒边界. 样品073(深度510.58 m),单偏光.
7. 强退变质榴辉岩,钛铁矿逐渐取代金红石,磁铁矿围绕残余石榴子石. 样品030(深度250.55 m),背散射电子扫描图像.
8. 完全退变质榴辉岩,榴石中包裹钛铁矿和金红石残留体. 样品035(深度275.33 m),单偏光.



徐海军等 超高压榴辉岩退变质作用对岩石磁化率的影响 图版 I