

毛北榴辉岩古地磁及岩石磁学初探

孟小红^{1,2}, 余钦范^{1,2}, 郭友钊³, 周姚秀⁴

1. 地质过程与矿产资源国家重点实验室和地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室, 北京 100083
2. 中国地质大学地球物理与信息技术学院, 北京 100083
3. 国土资源部地球物理地球化学勘探研究所, 河北廊坊 065000
4. 国土资源部航空物探遥感中心, 北京 100083

摘要:对中国大陆科学钻探孔区——江苏省东海县毛北地区的55块榴辉岩样品进行了古地磁研究,并从中抽样测试了等温剩磁、磁滞回线、磁组构、热磁化率以及电子探针和镜下分析,结果表明,毛北榴辉岩有两组稳定的剩磁,即反向磁化和正向磁化,稳定剩磁方向分别为: $D=94.3^\circ, I=-29.1^\circ$ 和 $D=273.7^\circ, I=15.4^\circ$,携带正向磁化与携带反向磁化样品的磁化强度和密度变化很大;毛北榴辉岩的磁各向异性非常弱,最小轴方向很难确定;等温剩磁和磁滞回线显示磁铁矿可能是毛北榴辉岩的主要载磁矿物,且在以 M_r/M_s 和 H_c/H_e 的对数为纵、横坐标的图上落在视单畴(PSD)区域.根据磁性特征,对毛北榴辉岩的磁性载体成因、剩磁获得机制及构造意义进行了讨论.

关键词:古地磁;岩石磁学;榴辉岩;超高压变质带.

中图分类号:P631.2

文章编号:1000-2383(2007)04-0533-07

收稿日期:2007-04-12

A Pilot Study on Paleomagnetism and Rock Magnetism of Maobei Eclogite

MENG Xiao-hong^{1,2}, YU Qin-fan^{1,2}, GUO You-zhao³, ZHOU Yao-xiu⁴

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources; Geo-detection Laboratory of the Ministry of Education, Beijing 100083, China
2. School of Geophysics and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
3. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China
4. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China

Abstract: In this paper, a pilot study of paleomagnetism and rock magnetism is done on 55 eclogite samples collected from Maobei area, Donghai County, Jiangsu Province. Synchronously, some of the samples are analyzed by electron-probe and scanning electric microscope, and tested for the isothermal remanence, hysteresis loop, magnetic fabric, thermal magnetic properties. The result indicates that there are two groups of stable remanence, i.e. the normal polarity and reversed polarity. The remanence orientations are: $D=94.3^\circ, I=-29.1^\circ$ and $D=273.7^\circ, I=15.4^\circ$ respectively. The magnetization and the density of the samples with normal polarities are very different from that of the samples with reversed polarities. The magnetic anisotropy is weak, and the minimum axis is hardly confirmed. The isothermal remanence and the hysteresis loop show that the magnetic carriers of the eclogite may be SD (single domain) and PSD (pseudo-single domain) magnetite. According to the magnetic property, the cause of the formation of magnetic carrier, the causation of the remanence, and the significance for the geotectonic are discussed at the end of the paper.

Key words: paleomagnetism; rock magnetism; eclogite; ultrahigh-pressure metamorphic zone.

江苏省东海县毛北地区位于大别—苏鲁超高压变质带内.自20世纪80年代末在该区发现了含柯石英的榴辉岩以来,许多国内外的科学家从各个方面对该区超高压变质带进行了研究,在超高压变质作用的许多关键性问题上,如:超高压变质岩是“原地的”还是“外来的”大陆地壳能够俯冲至多深?超

基金项目:北京市重点学科“地球探测与信息技术(XK104910598)”资助.

作者简介:孟小红(1958—),女,教授,主要从事勘探地球物理学领域的教学和研究.E-mail:mhx@cugb.edu.cn

高压变质作用是否有流体参与? 以及超高压变质作用的构造背景、折返过程与机制等方面取得了丰富的实际资料和认识(Cong and Wang, 1994; Cong *et al.*, 1995; Harley and Carswell, 1995; Schreyer, 1995; 从柏林和王晨清, 1999; 许志琴等, 2006; 吴冲龙等, 2006).

对榴辉岩的古地磁和岩石磁学研究则刚刚开始. 刘庆生等(1999)通过对东海 ZK703 孔 9 件榴辉岩样品的磁性分析认为, 该区榴辉岩具有中等强度和强均一性的磁性特征, 暗示磁性的形成和深部过程有关. 余钦范等(2002)通过对东海地区 200 余件榴辉岩样品的包括磁性在内的物性分析认为, 该区榴辉岩极为复杂, 反映了榴辉岩侵位的多期性. 本文从古地磁、岩石磁学和磁组构的角度开展进一步研究, 试图认识榴辉岩中磁性载体成分、成因和磁化历史, 探讨榴辉岩磁性可能记录的地质演化信息, 为认识超高压变质带的形成、折返和相应的动力学过程提供参考.

1 古地磁、岩石磁学测试

研究区位于江苏省东海县毛北村和蒋庄村之间的一个约 300 m² 的榴辉岩采石坑(34°23'N, 118°41'E). 采石坑外围多为厚数米的第四系覆盖. 坑内岩性均为榴辉岩, 只是局部存在着石榴子石富集和金红石矿化现象.

在采石坑内布设了 7 个采样点, 每个采样点的范围约为直径 2 m 的圆. 在每个采样点内, 用轻便取样钻机钻取 7~15 个定向标本, 每个标本在室内加工成直径 25 mm、高 22 mm 的圆柱状标准样品, 共计获得 111 个榴辉岩标准样品.

选择了磁性较强的 55 块样品, 在中国科学院地质与地球物理研究所古地磁实验室和中国地质大学(北京)古地磁实验室, 利用 2G 超导磁力仪及交变退磁仪(美)和 DSM-2 数字旋转磁力仪(美)、TSD-1 热退磁仪进行了系统的古地磁测试. 交变退磁步骤最多 23 步, 平均 12 步, 退磁间隔最小 2.5 mT, 平均 10 mT; 热退磁步骤最多 17 步, 平均 12 步, 退磁间隔最小 25°C, 最大 100°C. 对逐步退磁结果用主分量分析方法进行剩磁成分分离, 确定单个样品的稳定剩磁分量, 然后以样品为单位利用 Fisher 方法进行统计, 确定毛北采点榴辉岩样品的平均稳定剩磁方向.

用 JR-5 磁力仪(捷克)和 2G-magnetier-660 脉冲磁力仪对 4 块样品作了等温剩磁测量; 用 Macro-mag2900-AGM(美)对 2 块样品进行了磁滞迴线的测试; 用卡帕-3(捷克)对 6 块样品做了磁各项异性测试、两块样品作了做了氩气状态下的剩磁分析; 用 SM-LUX-POL 型显微镜(放大倍数: 10×10)对 5 块样品进行了镜下分析; 用 GCSA-733 型仪器, 在加速电压 15 kV, 探针电流 2×10^{-8} A、束斑直径 0.5 μm 的测试环境下对 2 块样品的 4 个点作了电子探针.

此外, 对全部 111 块榴辉岩样品用 Minisep 磁化率测量系统(英)测量了总的磁化率, 用 MP120-1 天平(中国)测量了样品的密度. 为了与围岩磁性特征对比, 对毛北采石坑附近的驼峰采石场出露的角闪岩和片麻岩也做了相应的古地磁和岩石磁学研究.

2 毛北榴辉岩的主要磁性特征

2.1 主要剩磁特征

毛北榴辉岩逐步退磁结果表现出两种磁化特征, 有些样品在退磁时矫顽力很大或阻挡温度很高, 作交变退磁时, 退磁场达到 200 mT 时, 剩磁的强度和方向基本不变; 做热退磁时, 退磁温度小于 580°C 时, 剩磁强度和方向变化不大, 退磁温度达到 580°C 时, 剩磁强度陡降到天然剩磁强度的 1/10 以下(图 1, M111). 另一些样品, 剩磁强度随着退磁场的增加或退磁温度的提高而逐步衰退, 在整个退磁过程中, 剩磁方向不变或逐渐变化至稳定(图 1, M772). 经过剩磁成分分离, 毛北榴辉岩有两组稳定的剩磁方向, 磁性较强且矫顽力较大或阻挡温度较高, 分布于采点东部的样品携带反向磁化, 层面坐标系下平均偏角方向为 94.3°, 倾角为 -29.1°, 古纬度 15.6°, 统计精度参数 $K=40.3$, $\alpha_{95}=4$, 样品数 $N=32$. 磁性相对较弱且矫顽力较小或阻挡温度较低, 分布于采点西部的样品携带正向磁化, 层面坐标系下平均偏角方向为 273.7°, 倾角为 15.4°, 古纬度 7.8°, 统计精度参数 $K=17.5$, $\alpha_{95}=8$, 样品数 $N=20$. 榴辉岩围岩的退磁曲线见图 1(D652), 从赤平投影图上可以清楚地看到从现代地磁场粘滞剩磁到稳定剩磁之间的磁化过程, 剩磁矫顽力很低, 强度也很弱, 与榴辉岩的退磁特征完全不同.

根据前人对超高压变质作用发生的构造背景研究(Ernst *et al.*, 1994), 参考大别—苏鲁超高压变质带是在二叠至三叠纪, 中朝克拉通与扬子克拉通

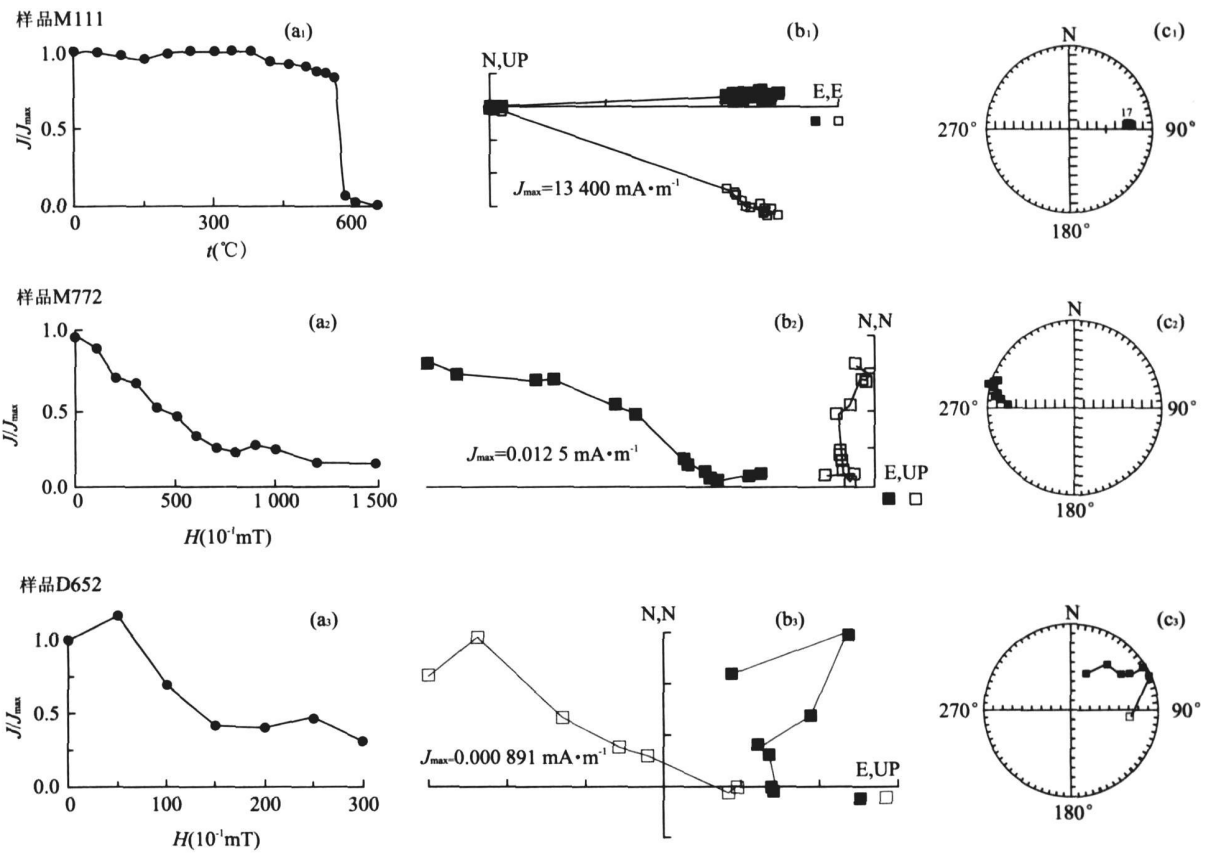


图 1 毛北榴辉岩及围岩退磁曲线

Fig. 1 The demagnetization curves of Maobei eclogite and its surrounding rocks

a₁, a₂, a₃ 为剩磁强度归一化衰减曲线; b₁, b₂, b₃ 为正交矢量投影图; c₁, c₂, c₃ 为退磁矢量赤平投影图

陆-陆碰撞的过程中形成的普遍认识,我们计算了由华北、扬子晚二叠至早三叠世古地磁极(Zhu and Tschu, 2001)推算出的毛北地区古地磁场方向,其中由华北古地磁极推算出的毛北地区晚二叠世古地磁场的方向为: $D=327.2^\circ, I=16.1^\circ, \varphi=8.2^\circ$;早三叠世古地磁场方向为: $D=332.5^\circ, I=23.6^\circ, \varphi=12.6^\circ$;由扬子古地磁极推算出的毛北地区晚二叠至早三叠世古地磁场方向为: $D=41.6^\circ, I=29.8^\circ, \varphi=16.0^\circ$ 。图 2 是毛北正向和反向磁化稳定剩磁方向,以及由华北、扬子古地磁极推算出的毛北地区古地磁场方向赤平投影图。从图中可以看出,毛北榴辉岩稳定剩磁倾角与华北、扬子古地磁极推算出的古地磁场方向倾角相似,偏角则差别较大,说明毛北榴辉岩获得稳定剩磁时与华北、扬子板块所处的纬度相似,但相对位置关系与现今不同。

毛北榴辉岩携带正向磁化与携带反向磁化样品的磁化强度与密度变化很大,图 3 给出的是正向与反向磁化样品的磁化率、天然剩磁强度和密度分布,

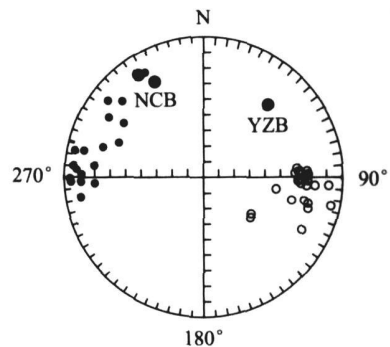


图 2 毛北榴辉岩稳定剩磁方向赤平投影图

Fig. 2 Stereographic projection of the stable remanence orientations of Maobei eclogite

从图中可以看出,携带正向磁化样品的磁化率、天然剩余磁化强度和密度低,携带反向磁化样品的磁化率、天然剩余磁化强度和密度高,两者之间呈明显的过渡变化,反映出磁性矿物由弱到强、密度从小到大的形成过程,并且在这一过程中地磁场发生了倒转。

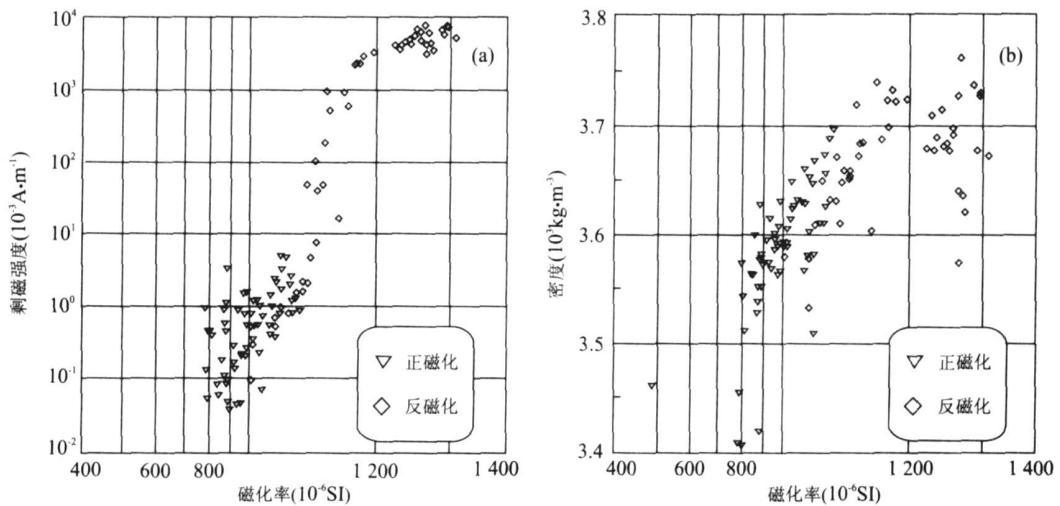


图 3 (a)磁化率与剩余磁化强度散点图; (b)磁化率与密度散点图

Fig. 3 (a) Scatter plot of susceptibility and remanence; (b) Scatter plot of susceptibility and density

表 1 毛北榴辉岩样品磁组构测量结果

Table 1 The measured magnetic fabric of Maobei eclogite samples

样品号	平均磁化率(10^{-6} SI)	最大轴	中间轴	最小轴	各向异性度	磁面理	磁线理
M331	779.6	185/32	289/22	48/50	1.011	1.009	1.003
M382	741.2	134/22	225/3	322/68	1.003	1.003	1.000
M7131	725.8	175/21	285/42	66/41	1.001	1.000	1.000
M511	721.5	179/50	335/37	74/2	1.002	1.001	1.001
M613-1	515.7	193/35	340/50	91/17	1.001	1.001	1.001
M613-2	516.2	212/22	312/23	82/57	1.001	1.001	1.001
平均	651.76	189/32	312/34	72/35	1.0036	1.0028	1.001

M382 号样品没有参加统计。

2.2 磁组构与岩石磁学特征

对 6 块毛北榴辉岩样品的磁组构测量结果见表 1。毛北榴辉岩各向异性非常弱,类似于火成岩的磁各向异性度量级,磁线理和磁面理同等发育,最小轴倾角方向不确定,没有区域变质岩那种最小轴方向确定、且近于垂直的磁组构特征以及韧性剪切带的磁组构特征(Hrouda, 1982)。

等温剩磁主要特征见图 4a。总体上看,场强度 0.5 T 时曲线达到了准饱和(约 80%),然后随着场的增加剩磁逐渐增加,至 2.5 T 时基本上达到饱和,反映以磁铁矿为主要载磁矿物。采自采石场西侧,携带正磁化的 M772 号样品的等温饱和和剩磁强度为 $0.088 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$,最大剩磁矫顽力为 50 mT,采自采石场东侧,携带反向磁化的 M161 号样品的饱和剩磁强度为 $50.8 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$,在外加磁场为零时就具有相对较强的剩磁底数(交变退磁退不掉),矫顽磁力非常强,为 260 mT。由此进一步看出,毛北榴辉岩不仅磁化方向不同,而磁性载体含量、粒度以及结构构

造等均有很大的不均匀性。榴辉岩围岩的等温剩磁曲线见图 4b,与榴辉岩的等温剩磁曲线对比可以看出,低矫顽力成分相对较多,而且在场强达到 2.5 T 时,曲线仍有上升的趋势,由此推断,毛北榴辉岩围岩磁性载体含有粗粒磁铁矿和赤铁矿成分。

磁滞迴线测量结果见图 4c,在 0.8 T 场强下迴线闭合,形状显示混合粒度磁铁矿特征,主要参数为: $H_{cr}/H_c = 3.71$, $M_r/M_s = 0.34$,在以 M_r/M_s 和 H_{cr}/H_c 的对数为纵、横坐标的图上样品落在 PSD 区域(King *et al.*, 1982),说明磁性载体以细粒(似单畴)磁铁矿为主。氩气环境下热磁分析曲线典型特征见图 4d,加热过程中在 580°C 左右出现唯一的拐点,反映出磁性载体为单一的磁铁矿。在冷却过程中 M152 样品的冷却曲线与加热曲线基本平行,说明磁性非常稳定,加热没有引起磁性矿物发生变化。M373 号样品的冷却曲线与加热曲线有明显区别,并且在 580°C 和 450°C 附近冷却曲线有拐点,由于是在氩气环境下加热的,不可能发生氧化还原反应,因

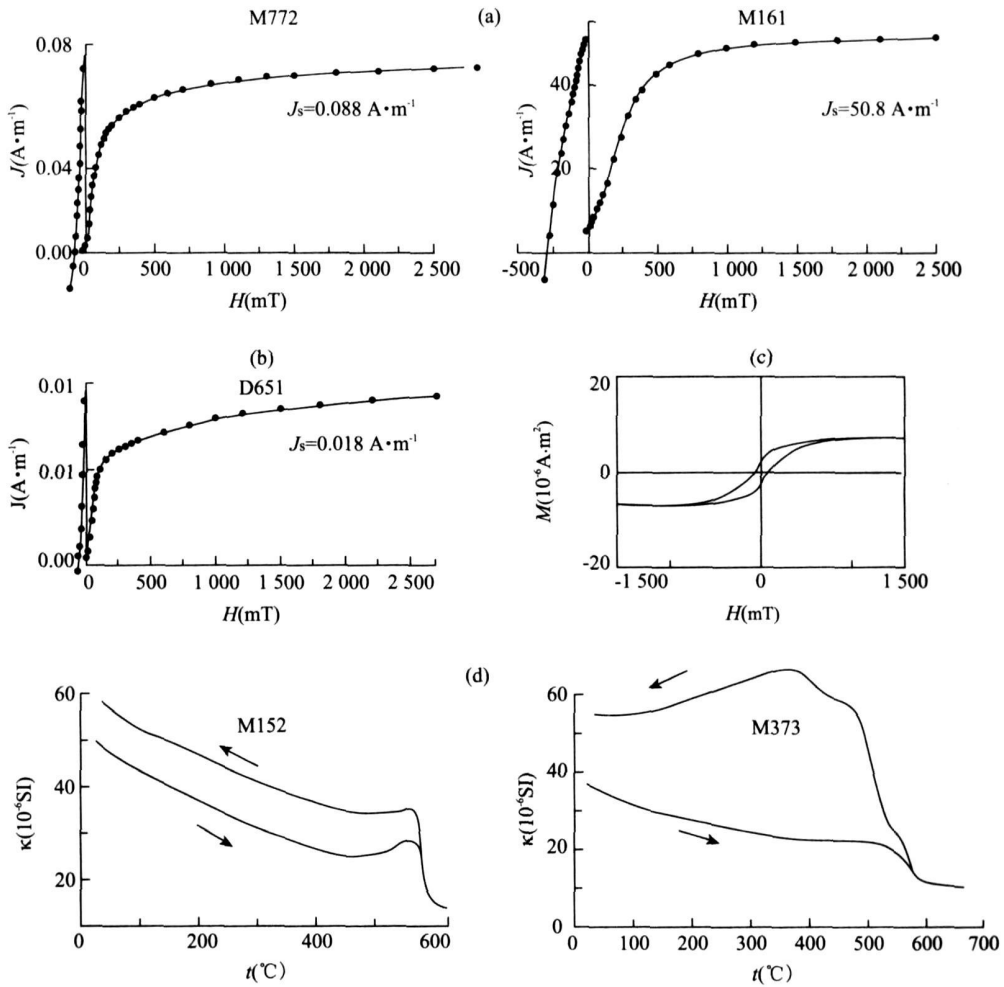


图 4 (a) 榴辉岩等温剩磁获得曲线及反向磁场退磁曲线; (b) 围岩等温剩磁获得曲线及反向磁场退磁曲线; (c) 磁滞迴线; (d) $\kappa-t$ 曲线

Fig. 4 (a) The curve gotten from isothermal remanence and the demagnetization curves gotten from reversed polarities of the eclogite; (b) The curve gotten from isothermal remanence and the demagnetization curves gotten from reversed polarities of the surrounding rocks; (c) Hysteresis loop; (d) $\kappa-t$ curve

图 3c 中 $H_r = 236.4$ mT, $H_c = 63.6$ mT, $H_r/H_c = 3.71$, $M_r = 2.35 \times 10^{-6}$ A·m², $M_s = 6.91 \times 10^{-6}$ A·m², $M_r/M_s = 0.34$

此拐点的出现反映在加热过程中, 该样品的矿物成分发生了相变, 并引起其磁性发生了变化.

2.3 榴辉岩磁性载体分析测试结果

对毛北榴辉岩中的磁性载体镜下观测发现, 铁氧化物集合体充填在榴辉岩缝隙中, 集合体形状, 大小视缝隙而定, 铁氧化物在榴辉岩形成之后结晶, 非均质, 成分为钛磁铁矿系列矿物, 不同的榴辉岩样品含量变化很大, 未见刘庆生等(1999)所发现的蛇纹石化橄榄岩磁铁矿含量增加的交代蚀变现象. 电子探针结果表明, 榴辉岩中的铁氧化物成分有些是金红石, 有些是磁铁矿.

3 从磁性特征对榴辉岩体地质问题的探讨

3.1 毛北榴辉岩磁性载体成因的初步讨论

根据毛北榴辉岩的岩石学研究(Li *et al.*, 1996; Li *et al.*, 1997), 榴辉岩中的磁性矿物——磁铁矿可以在榴辉岩相变、退变质或流体交代过程中形成. 地幔橄榄石相向尖晶石相的转变是一种超高压现象, 通常发生在地幔, 多产生金红石矿物, 伴随产生的磁性矿物一般含量较少, 粒度以单畴、似单畴颗粒为主; 退变质指榴辉岩相向角闪岩相转换, 通常发生在下地壳, 产生的磁性矿物含量中等, 粒度也

以单畴似单畴颗粒为主;流体交代通常是在有流体的参与下进行的,流体可促进熔融进而产生粗粒多畴磁铁矿,通常发生在上地壳。

毛北榴辉岩的岩石磁学和磁性矿物分析测试结果显示,其剩磁载体成分主要为磁铁矿(图 4d),粒度以似单畴颗粒为主(图 4c),与金红石矿物具有相同的结构构造、未发生交代蚀变,含量不均(图 4a),携带正向磁化的样品与携带反向磁化的样品磁化率、天然剩余磁化强度和密度呈过渡变化(图 3),这些特征表明榴辉岩中的磁性矿物形成主要受榴辉岩退变质过程控制,可能是在无流体参与条件下榴辉岩退变质阶段形成的。

毛北榴辉岩的磁各向异性非常弱(表 1),表明榴辉岩中磁铁矿生成后,未经后期构造应力挤压,某种程度上支持其沿拆离面固态侵位的假说(Davies *et al.*, 1995)。

3.2 毛北榴辉岩剩磁获得机制及构造意义的初步讨论

毛北榴辉岩剩磁载体、退磁特征与稳定剩磁方向与围岩不同(图 1、图 4a, 4b)说明二者获得剩磁的时间和机制不同。根据同位素年代学对潜山双河地区超高压变质岩及其花岗片麻围岩的同位素年代学研究(Davies and Blanckenburg, 1995)。双河超高压变质岩经历了两期快速冷却过程,一期在 200 Ma 之前,另一期在 180 Ma 之后;超高压变质岩围岩花岗片麻岩只发生过一次快速冷却,时间在 190~170 Ma 间。也就是说超高压变质岩与其花岗片麻围岩在 200 Ma 以前有完全不同的冷却历史,只是在 180 Ma 之后才有了共同的快速冷却历史,指示了超高压岩体与围岩在 190 Ma 以前是“外来的”关系。结合同位素年代学结果,毛北榴辉岩剩磁特征与围岩不同,说明其剩磁获得时间可能在 190 Ma 之前。

毛北榴辉岩稳定剩磁方向呈正负对跖。根据磁性地层学研究(Harland *et al.*, 1982; 孟小红等, 2000),晚石炭世至晚二叠世(大约 300~250 Ma),地磁场是一个倒转极性期,即 Kiaman 反向极性超时;晚二叠世至三叠纪期间(约 250~220 Ma),地磁场极性频繁倒转,称为 IIIawarra 混合极性时;如果象前人研究指出的,苏鲁-大别超高压变质岩退变质发生在晚二叠世至三叠纪期间的话(Chen *et al.*, 1995),那么正处于地磁场频繁倒转时期。由此推断毛北榴辉岩的剩磁获得跨越了晚二叠世至三叠纪之间的一次地磁极性倒转(间隔约 4 000 年),剩磁获

得时间大约在 250~220 Ma。

榴辉岩剩磁获得的机制有两种可能:一种是在榴辉岩退变质过程中形成磁铁矿时获得的(化学剩磁),另一种是铁磁性矿物形成后,在折返冷却过程中经过居里点时获得的(热剩磁),取决于榴辉岩发生退变质时的温度。温度低于铁磁性矿物的居里点获得化学剩磁,否则获得热剩磁。如果是化学剩磁,根据化学剩磁结核机理(Stacey and Banerjee, 1974),榴辉岩应首先获得低矫顽力或低阻挡温度的正向磁化;如果是热剩磁,根据热剩磁磁畴热扰动机理(Stacey and Banerjee, 1974),榴辉岩应首先获得高矫顽力或高阻挡温度的反向磁化。依据古地磁自身结果判断,由毛北榴辉岩正向磁化稳定剩磁方向计算出的古纬度为 7.8° ,由反向磁化稳定剩磁方向计算出的古纬度为 15.6° ,假如苏鲁是在向北推移过程中与华北、扬子碰撞并发生超高压变质作用的(朱日祥等, 1998; 杨文采和余长青, 2001; 杨文采, 2003),那么应该是首先获得正向磁化,然后在北向推移的过程中地磁场倒转获得反向磁化,也就是说,毛北榴辉岩的稳定剩磁是在榴辉岩退变质过程中形成磁铁矿时获得的(化学剩磁),发生退变质时温度低于磁铁矿的居里点 580°C 。

将毛北榴辉岩的稳定剩磁方向与华北、扬子晚二叠至早三叠世古地磁极推算出的毛北地区古地磁场方向对比(图 2),可得出多种推断解释。其中一种可能的解释是:毛北榴辉岩获得稳定剩磁时,既不属于华北,也不属于扬子,支持 Ernst *et al.* (1994)提出的看法,即大别-苏鲁在大陆碰撞之前是位于中朝克拉通与扬子克拉通之间的微陆块。

References

- Chen, J. F., Xie, Z., Liu, S. S., et al., 1995. Cooling age of Dabie orogen, China, determined by ^{40}Ar - ^{39}Ar and fission track techniques. *Science in China (Series B)*, 38(6): 749-757.
- Cong, B. L., Wang, Q. C., 1994. Review of researches on ultrahigh pressure metamorphic rocks in China. *Chinese Science Bulletin*, 39: 2068-2075.
- Cong, B. L., Wang, Q. C., 1999. The Dabie-Sulu UHP rocks belt: Review and prospect. *Chinese Science Bulletin*, 44(12): 1074-1086.
- Cong, B. L., Zhai, M. G., Carswell, D. A., et al., 1995. Petrogenesis of the ultrahigh-pressure rocks and their country rocks at Shuanghe in Dabieshan, Central China. *European J. Mineralogy*, 7: 119-138.

- Davies, J. H., Blanckenburg, V., 1995. Slab breakoff: A model of lithosphere detachment and its test in the magnetism and deformation of collisional orogens. *Earth & Planet. Sci. Lett.*, 129: 85—120.
- Ernst, W. G., Liu, J. G., Harker, B. R., 1994. Petrotectonic significance of high- and ultrahigh-pressure metamorphic belts: Inference for subduction zone histories. *International Geology Review*, 36: 213—317.
- Harland, W. B., Cox, A. V., Llewellyn, P. G., et al., 1982. A geologic time scale. Cambridge University Press.
- Harley, S. L., Carswell, D. A., 1995. Ultradeep crustal metamorphism: A prospective view. *J. Geophys. Res.*, 100: 8367—8380.
- Hrouda, K., 1982. Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics. *Geophysical Surveys*, 5: 37—82.
- King, J., Banerjee, S. K., Marvin, J., et al., 1982. A comparison of different magnetic methods for determining the relative grain size of magnetic in natural material: Some results from lake sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 59: 404—419.
- Li, S., Jagoutz, E., Xiao, Y., et al., 1996. Chronology of ultrahigh-pressure metamorphism in the Dabie Mountains an Su-Lu terrane; I. Sm-Nd isotope system. *Science in China (Series D)*, 39(6): 597—608.
- Li, S., Li, H., Chen, Y., et al., 1997. Chronology of ultrahigh-pressure metamorphism in the Dabie Mountain and Su-Lu terrane; II. U-Pb isotope system of zircon. *Science in China (Series D)*, 27(3): 200—206.
- Liu, Q. S., Zhang, Z. M., Liu, Y. S., 1999. Magnetic structures of eclogites from ZK703 drill hole in the Donghai region, eastern China: Implications for deep geological processes. *Geoscience*, 13(Suppl.): 45—50 (in Chinese with English abstract).
- Meng, X. H., Hu, C. S., Wang, W. M., et al., 2000. Magnetostratigraphic study of Meishan Permian—Triassic Section, Changxing, Zhejiang Province, China. *Journal of China University of Geosciences*, 11(3): 361—365.
- Schreyer, W., 1995. Ultradeep metamorphic rocks: The retrospective viewpoint. *J. Geophys. Res.*, 100: 8353—8366.
- Stacey, F. D., Banerjee, S. K., 1974. The physical principles of rock magnetism. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, London, New York.
- Wu, C. L., Zhang, S. W., Mao, X. P., et al., 2006. Geometry and kinematics of tectonic evolution in northern part of Sulu orogenic belt. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(6): 817—822 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Qi, X. X., Yang, J. S., et al., 2006. Deep subduction erosion model for continent-continent collision of the Sulu HP-UHP metamorphic terrain. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(4): 427—436 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. C., Yu, C. Q., 2001. Kinetics and dynamics of development of the Dabie-Sulu UHPM terranes based on geophysical evidences. *Chinese Journal of Geophysics*, 44(3): 346—359 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W. C., 2003. Layered mantle reflectors in Dabie-Sulu areas and their interpretation. *Chinese Journal of Geophysics*, 46(2): 191—196 (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 Journal of Geophysics*, 45(1): 93—100 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, R. X., Tschu, K. K., 2001. Studies on paleomagnetism and reversals of geomagnetic field in China. Science Press, Beijing.
- Zhu, R. X., Yang, Z. Y., Wu, H. N., et al., 1998. Paleomagnetic constraints on the tectonic history of the major blocks of China during the Phanerozoic. *Science in China (Series D)*, 28(Suppl.): 1—16. (in Chinese)

附中文参考文献

- 丛柏林, 王清晨, 1999. 大别山—苏鲁超高压变质带研究的最新进展. *科学通报*, 44(11): 1127—1140.
- 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(增刊): 45—50.
- 吴冲龙, 张善文, 毛小平, 等, 2006. 苏鲁造山带北侧构造演化的几何学运动学特征. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(6): 817—822.
- 许志琴, 戚学祥, 杨经绥, 等, 2006. 苏鲁高压—超高压变质地体的陆—陆碰撞深俯冲剥蚀模式. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(4): 427—436.
- 杨文采, 余长青, 2001. 根据地球物理资料分析大别—苏鲁超高压变质带演化的运动学与动力学. *地球物理学报*, 44(3): 346—359.
- 杨文采, 2003. 大别苏鲁地区层状地幔反射体及其解释. *地球物理学报*, 46(2): 191—196.
- 余钦范, 郭友钊, 孟小红, 等, 2002. 苏北大陆科学钻探靶区岩石物理性质. *地球物理学报*, 45(1): 93—100.
- 朱日祥, 杨振宇, 吴汉宁, 等, 1998. 中国主要地块显生宙古地磁视极移曲线与地块运动. *中国科学(D)*, 28(增刊): 1—16.