

中国大陆科学钻探主孔正片麻岩磁性及深部流体活动

曾庆理^{1,2}, 刘庆生¹, 郑建平², 刘志峰³, 王红才⁴

1. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

4. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

摘要:通过对中国大陆科学钻探工程主孔花岗质片麻岩进行详细的岩石磁学研究及岩石矿物学分析表明:花岗质片麻岩磁化率($0.570 \times 10^{-7} \sim 120.450 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均 $29.996 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)在主孔所有岩石中仅次于蛇纹石化石榴石橄榄岩, 而其天然剩余磁化强度($0.002 \times 10^{-3} \sim 2.109 \times 10^{-3} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均 $0.210 \times 10^{-3} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)则是所有岩性中最低的。磁化率随温度变化曲线、交变退磁曲线及磁滞回线特征表明, 花岗质片麻岩中磁性矿物组合主要成分为磁铁矿, 小部分样品中含有赤铁矿, 其中磁铁矿以多畴为主, 伪单畴磁铁矿仅在少量样品中出现。和同为完全退变质岩的角闪岩(完全退变质榴辉岩)相比, 花岗质片麻岩具有相似的磁性矿物组合, 但其磁铁矿的颗粒明显较大。多畴磁铁矿的形成, 可能和超高压变质岩折返过程中, 花岗质片麻岩较强的流体活动相关。部分分布于花岗质片麻岩主体岩性段外的样品, 具有较高的天然剩余磁化强度, 则可能反映了花岗质片麻岩及周围榴辉岩之间的流体交换。

关键词:花岗质片麻岩;CCSD主孔;岩石磁性;流体活动;地磁场。

中图分类号:P318.4

文章编号:1000-2383(2014)12-1915-12

收稿日期:2014-01-03

Magnetism of Granitic Gneiss from Chinese Continental Scientific Drilling Main Hole and Fluid Activities

Zeng Qingli^{1,2}, Liu Qingsheng¹, Zheng Jianping², Liu Zhifeng³, Wang Hongcai⁴

1. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

4. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Detailed magnetic studies and mineralogy analysis show that the granitic gneiss has the second highest (only second to the serpentinized garnet peridotite) low-field susceptibility (χ) ($0.570 \times 10^{-7} \sim 120.450 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, average $29.996 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) and the lowest natural remanent magnetization (NRM) ($0.002 \times 10^{-3} \sim 2.109 \times 10^{-3} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, average $0.210 \times 10^{-3} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$). Temperature dependence of magnetic susceptibility, alternating field (AF) demagnetization and magnetic hysteresis properties suggest that the magnetic minerals in granitic gneiss are magnetite \pm hematite, the magnetites are mainly multi-domain (MD), pseudo-single domain (PSD) magnetites are also presented in small amounts. The grain size of magnetites are obviously larger than that in the completely retrograded eclogites, which have the same magnetic mineral assemblage and experienced amphibolite facies retrograde metamorphism. The formation of MD magnetites are thought to be related with stronger fluid activities during the retrogression. Samples occurring out of the major gneiss subunit and adjacent to the eclogites, which have related high NRM, may reflect fluid movements between felsic and mafic UHPM rocks.

Key words: granitic gneiss; CCSD main hole; rock magnetism; fluid activity; geomagnetism.

大别—苏鲁超高压变质带由华北板块和扬子板块碰撞形成,是世界已知规模最大的超高压变质带(Cong et al., 1996; Wallis et al., 1999; Xu et al., 2009b).中国大陆科学钻探主孔位于江苏东海县西南约17 km的毛北村附近($34^{\circ}25'N, 118^{\circ}40'E$),隶属于苏鲁超高压变质带南缘(图1).中国大陆科学钻探工程主孔为研究大陆汇聚边界深部岩石地球物理及地球化学特征提供了极佳的机会.前人围绕大陆科学钻探主孔岩芯开展了大量岩石地球化学研究,而对于岩石磁学研究相对较少(张泽明等,2004; Liu et al., 2007, 2008a, 2008b, 2009, 2010; Qi et al., 2009; Wang et al., 2009).岩石磁性能反映岩石中磁性矿物的成分、含量、颗粒大小及显微结构等信息(Dunlop, 1990; Dunlop and Özdemir, 2001; Robinson et al., 2002; Harrison and Feinberg, 2009),从而进一步揭示岩石所经历的地质过程(Abalos and Aranguren, 1998; Oufi et al., 2002; Guena et al., 2008).因此,针对CCSD主孔超高压变质岩岩石磁性的研究,对于了解大陆汇聚边界深部磁性结构,反演岩石经历的深部地质过程等具有重要意义(Xu et al., 2009a; Liu et al., 2010).

对CCSD主孔及附近ZK703孔岩心中榴辉岩磁性的研究表明,折返过程中的退变质作用是控制

榴辉岩磁性的关键因素(徐海军等,2004,2006; Liu et al., 2007, 2009).对于CCSD主孔中超镁铁质岩而言,其高磁性则与折返过程中橄榄石的蛇纹石化程度密不可分(Qi et al., 2009; Liu et al., 2010).前人针对超高压变质岩磁性的研究,主要集中于榴辉岩及超镁铁质岩(徐海军等,2004, 2006; Yang et al., 2006; Liu et al., 2007, 2009, 2010; Qi et al., 2009),因为这些岩石有可能记录超高压变质峰期的地质信息(Cong et al., 1996; 张泽明等,1996, 2002, 2004; Xu et al., 2009b).而对于花岗质片麻岩—苏鲁地区最常见的岩石类型之一,详细的岩石磁性研究依旧比较缺乏(徐海军等,2006; 杨涛等,2006).流体活动在超高压变质岩俯冲及折返过程中,尤其是对于折返过程中的退变质作用,具有关键作用(Liou and Zhang, 1996; Fu et al., 2001; Zhang et al., 2003; 张泽明等,2004),而超高压变质岩中磁性矿物的成分与含量往往和退变质过程密切相关(徐海军等,2004, 2006; Liu et al., 2007, 2009, 2010; Qi et al., 2009).因此,对花岗质片麻岩磁性的研究能够进一步深化对于深部流体活动对岩石磁性的影响及其机制的了解.

本文对来自CCSD主孔100~2 000 m深度段花岗质片麻岩磁化率(χ),天然剩余磁化强度

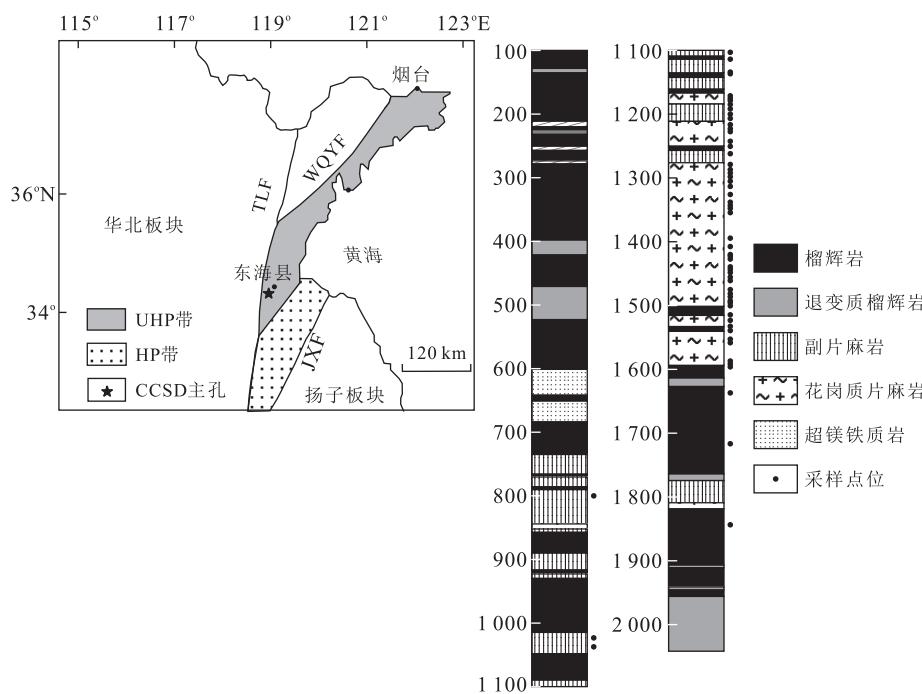


图1 CCSD主孔位置及采样点位(Xu et al., 2009b)

Fig.1 Location map of CCSD main hole with the simplified lithological profile of the depth interval 100–2 000 m and sample location
TLF.郯庐断裂;JXF.嘉山—响水断裂;WQYF.武梁—青岛—烟台断裂

(NRM)、磁化率随温度变化($\chi-T$ 曲线)及磁滞回线特征等进行研究,并结合其矿物学及岩石地球化学特征,探讨了花岗质片麻岩中磁性矿物的形成特征及深部流体活动对岩石磁性的影响。

1 地质背景

苏鲁一大别超高压变质带形成于三叠纪华北板块与扬子板块之间的碰撞造山运动时期,北东走向的郯庐断裂(TLF)将苏鲁一大别超高压变质带划分为相距约 500 km 的苏鲁超高压变质带及大别超高压变质带。苏鲁超高压变质带南北分别以武莲—青岛—烟台断裂(WQYF)和嘉山—响水断裂(JXF)为界,与北部华北板块及南部扬子板块分离(Hacker *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2009b)。在来自榴辉岩及其围岩中的锆石中,常发现柯石英及其他超高压变质标志矿物(如金刚石等),表明这些岩石至少曾经俯冲到超过 150 km 深度并折返出露(Okay *et al.*, 1989; Hirajima *et al.*, 1990; Xu *et al.*, 1992; 杨文采等, 1999)。花岗质片麻岩是苏鲁超高压变质带中主要超高压变质岩之一,其出露面积约占所有超高压变质岩的 70%。

CCSD 主孔岩心中超高压变质岩包括新鲜及部分退变质榴辉岩、角闪岩(完全退变质榴辉岩)、花岗质片麻岩、副片麻岩、石榴石橄榄岩及少量片岩和石英岩。其中 100~2 000 m 井段在构造上隶属于南苏鲁超高压变质构造板片,其变质峰期温压条件为 2.8 GPa 和 650~900 °C(Xu *et al.*, 2009b)。井中花岗质片麻岩主体集中分布于 1 113~1 596 m 深度范围内,并以夹层或透镜体形式存在于榴辉岩、角闪岩和副片麻岩中(刘福来等, 2004; Zhang *et al.*, 2006)。研究显示,花岗质片麻岩原岩成分与 A 类花岗岩类似,经历了深俯冲超高压变质及其后折返过程中的退变质过程(刘福来等, 2004; Xu *et al.*, 2009b)。

花岗质片麻岩中含有较多含水矿物(如绿帘石、黑云母及白云母等)(Chen *et al.*, 2007)。当超高压变质发生时,黑云母能转化为多硅白云母,并保存一部分水;当折返过程中降温降压,多硅白云母分解并释放水分(刘晓春等, 1999)。因此,花岗质片麻岩中,榴辉岩相矿物组合已经完全退变质为角闪岩相。

2 研究方法

样品制成直径及高度均为 2.5 cm 的柱状,用来

测量密度(ρ)、低场磁化率(χ)及天然剩余磁化强度(NRM),配套样品磨片供镜下观察及激光拉曼光谱分析。激光拉曼分析采用 Thermo Scientific 公司生产的 DXR 显微拉曼光谱仪,波长 532 nm,最大功率 10 mw。密度测量使用 LP-1002 密度计,分辨率为 0.01 g · cm⁻³,误差为 ±0.03%。低场磁化率测量采用 AGICO 公司 KLY-3S 卡帕桥,热磁曲线($\chi-T$ curve)使用 KLY-2 卡帕桥及 CS-2 加热炉,温度可从室温加热到 700 °C,磁化率测量分辨率为 2.5 × 10⁻⁸ SI,误差为 ±0.1%。天然剩余磁化强度测量使用美国 Schonstedt 公司生产的 DSM-2 及 SSM-2A 旋转磁力仪,分辨率为 10⁻¹¹ Am²。Q 值(Koenigsberger ratio)由 NRM/Ji 计算得到,其中 Ji 为感应磁化强度($J_i = \chi \times H$, H 为当地地磁场强度,本文中 $H = 0.05089$ mT)。密度、磁化率及天然剩余磁化强度测量在中国地质大学地球物理与空间信息学院岩石磁学实验室及生物地质与环境地质国家重点实验室岩石磁学实验室完成。磁滞回线测量使用 VSM Model 2900 震动磁力计,最大磁场为 1 T。磁滞回线参数(饱和等温磁化强度 M_s ,饱和等温剩余磁化强度 M_{rs} ,矫顽力 B_c)在顺磁性校正后得出,剩磁矫顽力(B_{cr})由饱和等温剩余磁化强度的反向退磁曲线计算得到。笔者还测量了 0~200 mT 饱和等温剩余磁化强度的交变退磁(AF demagnetization)曲线。磁滞回线、热磁曲线及交变退磁曲线的获取在明尼苏达大学岩石磁学实验室完成。

3 结果

3.1 岩石矿物组成

花岗质片麻岩中,石英+斜长石+钾长石的矿物组合约占 90%~95%,还含有少量角闪石、辉石、石榴石、云母、绿帘石和榍石(刘福来等, 2004)。不透明矿物含量通常低于 1%,经镜下观察及显微激光拉曼谱研究,表明其主要为磁铁矿,含少量赤铁矿、钛铁矿和黄铁矿(图 2c~2f, 图 3a~3d),不透明矿物颗粒直径可达 200~500 μm(图 2a, 2b)。

如图 3a 所示,镜下鉴定为黄铁矿的颗粒,其拉曼位移为 430.64 cm⁻¹、379.66 cm⁻¹ 和 343.36 cm⁻¹ 具有典型的黄铁矿拉曼光谱特征(图 3a)。图 3b 中,暗色部分(白色十字,黑色曲线)光谱具有 671.78 cm⁻¹、43.64 cm⁻¹ 和 296.54 cm⁻¹ 特征峰,与磁铁矿的光谱特征类似(de Faria *et al.*, 1997)。图 3b 的亮色区域,图 3c 中拉长状亮色颗粒及图 3d 中

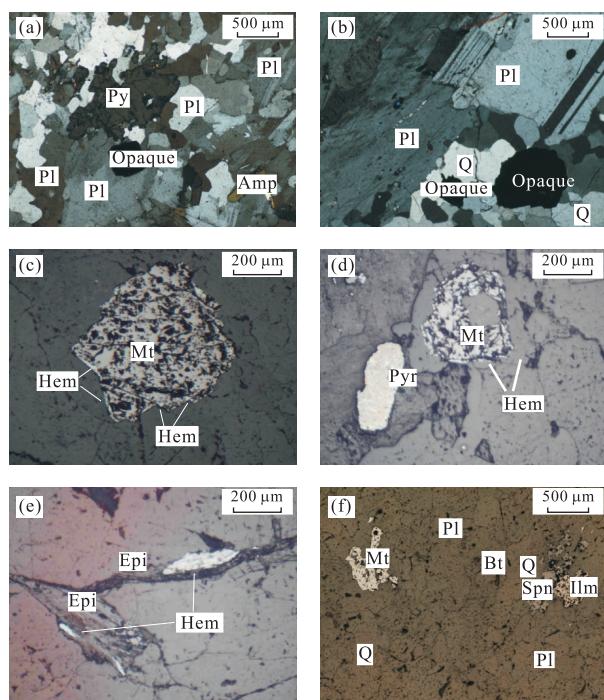


图2 花岗质片麻岩显微照片

Fig.2 Microscopy photo of granitic gneiss under transmitted and reflected light

a,b.187和152号样品透射光照片;c,d.样品252反射光照片;e,f.样品278和190反射光照片.Amp.角闪石;Bt.黑云母;Epi.绿帘石;Hem.赤铁矿;Ilm.钛铁矿;Mt.磁铁矿;Opaque.不透明矿物;Pl.斜长石;Py.辉石;Pyr.黄铁矿;Q.石英;Spn.榍石

的亮色区域具有相似的拉曼位移峰,呈现出赤铁矿特征峰值(de Faria *et al.*, 1997),而图3d中的暗色区域则为钛铁矿。

磁铁矿颗粒直径通常超过 $200\text{ }\mu\text{m}$,并具有赤铁矿反应边,表明这些磁铁矿在岩石退变质过程中曾遭受氧化(图2c~2d),部分样品中出现与绿帘石共生的长条状赤铁矿,其宽度小于 $50\text{ }\mu\text{m}$ (图2e),钛铁矿则往往以赤铁矿—钛铁矿固溶体的形式存在(HISSL),然而这些固溶体不具与CCSD主孔高铁钛榴辉岩类似的薄层结构(Liu *et al.*, 2010)。在样品190中,钛铁矿被榍石部分被取代(图2f);类似现象在完全退变质榴辉岩中常见(Liu *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2009)。

3.2 密度、磁化率及天然剩余磁化强度

样品的密度(ρ)、磁化率(χ)和天然剩磁(NRM)统计见表1。花岗质片麻岩密度范围 $2.58\sim 2.88\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,平均为 $2.65\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,标准差(SD)仅为0.039,表明花岗质片麻岩密度比较均一。样品的磁化率变化范围为 $(0.570\times 10^{-7}\sim 120.450\times 10^{-7}\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均为 $29.996\times 10^{-7}\text{ m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$,天然剩余磁化强度则为 $(0.002\times 10^{-3}\sim 2.109\times 10^{-3}\text{ Am}^2\cdot\text{kg}^{-1}$;平均 $0.210\times 10^{-3}\text{ Am}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ 。和主孔 $100\sim 2000\text{ m}$ 深度范围内其他岩性样品相比(杨涛等,2006),岗质片麻岩磁化率仅次于蛇纹石化石榴石橄榄岩,而其天然剩余磁化强度却

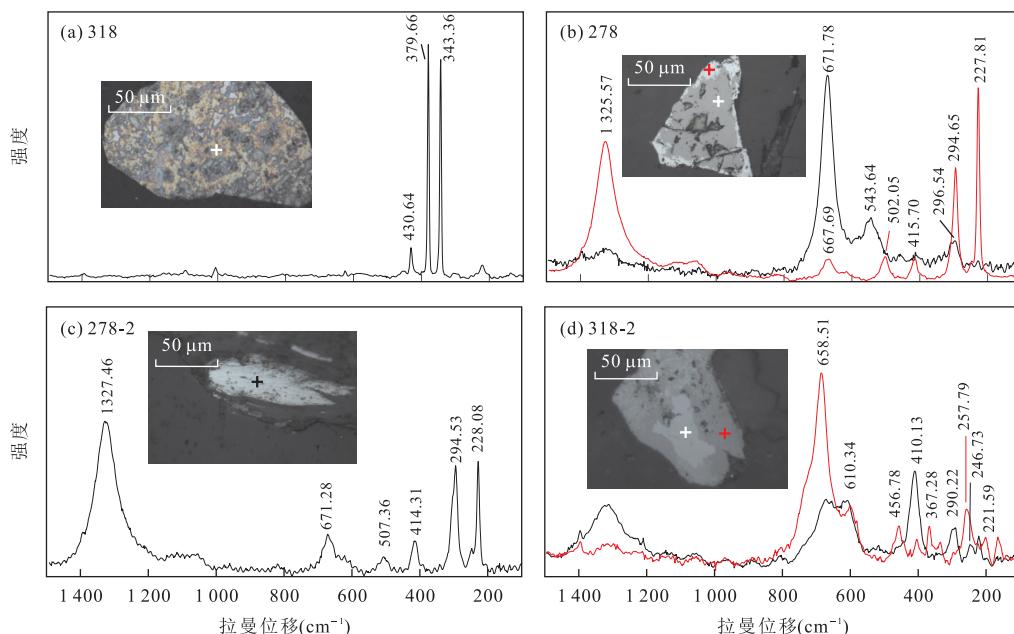


图3 代表性样品中不透明矿物显微激光拉曼光谱分析

Fig.3 Micro Raman spectrum of typical opaque mineral of the granitic gneiss

a.黄铁矿;b.具赤铁矿反应边的磁铁矿;c.和绿帘石共生的拉长型磁铁矿;d.赤铁矿—钛铁矿颗粒

表 1 花岗质片麻岩样品密度、磁化率及天然剩余磁化强度统计

Table 1 The summary of density, susceptibility and NRM of granitic gneiss

类别		ρ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	χ ($10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	NRM ($10^{-3} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	Q
全体样品	范围	2.581~2.878	0.570~120.450	0.002~2.109	0.100~28.590
全体样品	Mean±SD	2.649±0.039	29.996±32.418	0.210±0.444	2.562±5.548
主体岩性段	范围	2.606~2.878	0.570~120.450	0.003~1.142	0.100~20.310
内样品	Mean±SD	2.645±0.040	22.988±25.478	0.098±0.252	1.573±3.582
主体岩性段	范围	2.581~2.693	0.590~115.240	0.002~2.109	0.150~28.590
外样品	Mean±SD	2.653±0.030	49.682±40.581	0.504±0.663	5.197±8.452

是所有岩性中最低的(Liu *et al.*, 2009, 2010).

对于分布于花岗质片麻岩主体单元(1 113~1 596 m)之外的样品,其磁化率、天然剩磁和Q值明显高于主体单元内样品(表1).

3.3 磁滞回线特征

代表性样品的磁滞回线(顺磁性校正后)如图4所示,大部分样品磁滞回线都与样品207、210等类似,在300 mT以下达到饱和,呈现典型的低矫顽力亚铁磁性特征.样品227、240和318则呈现出高矫顽力特征,其中227号样甚至在500 mT以上仍未达到饱和,表明其中可能存在赤铁矿.

样品的磁滞回线参数见表2,饱和磁化强度(M_s)为 $5.487 \times 10^{-3} \sim 4.101.900 \times 10^{-3} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$;饱和等温剩余磁化强度(M_{rs})范围 $(0.573 \times 10^{-3} \sim 18.740 \times 10^{-3} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$,绝大多数样品其 M_{rs}/M_s 值小于0.05.样品的矫顽力及剩磁矫顽力分别为0.402~26.600 mT和10.3~196.0 mT,仅有少数样品的 B_{cr}/B_c 值小于10.

3.4 磁化率随温度变化特征

代表性样品的 χ -T曲线见图5.所有样品磁化

率在大约580 °C时迅速下降,显示出磁铁矿的居里温度,只有229号样品,在580~680 °C之间显示出微弱磁性,可能是由于样品磁性太弱,居里温度之上出现噪音或者在高温下有新的磁性矿物形成.样品229的冷却曲线,其磁化率达到初始磁化率的3倍,其居里温度也略有提高,这可能表明样品中有新的磁性矿物生成或者原本不纯的磁铁矿经过加热后生成了纯的磁铁矿,同样的现象也可在样品278中观察到.其他样品,其冷却曲线中磁化率比初始磁化率略微升高(<20%),居里温度无明显变化,表明在加热过程中磁性矿物没有出现相变.霍普金森峰仅在278号样品曲线中比较明显.

3.5 交变退磁

在50 mT的交变场下,约41.2%(7/17)的花岗质片麻岩样品,其饱和等温剩余磁化强度与初始值之比(J/J_0)仅为20%以下,而约23.5%(4/17)的样品,其 J/J_0 值在20%~50%之间,还有约35.3%(6/17)的样品,其磁化强度可达初始值的80%.甚至在200 mT的交变场下,某些样品的 J/J_0 值依然在50%以上(图6).

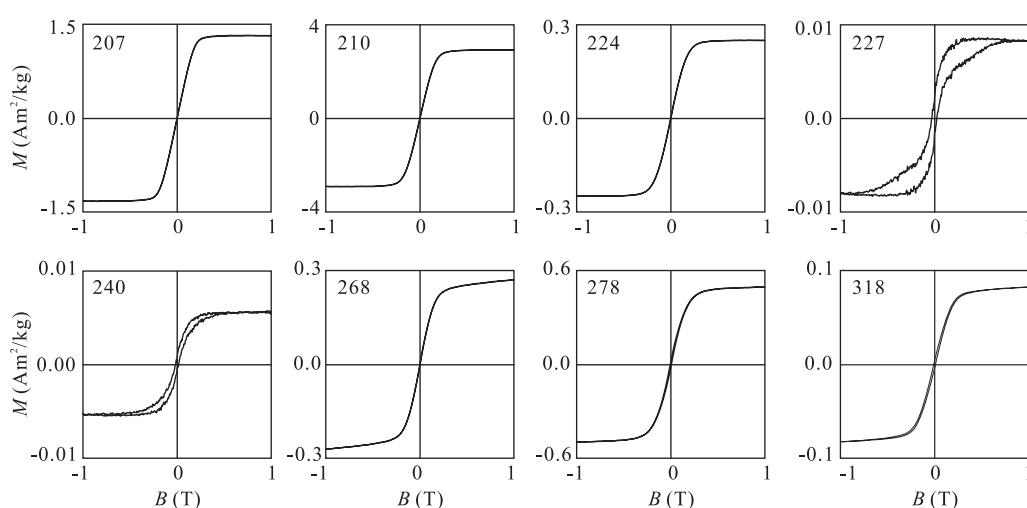


图4 代表性样品的典型磁滞回线(顺磁性校正后)

Fig.4 Typical hysteresis curves (after paramagnetic slope correction) of selected samples

表 2 代表性样品磁滞回线参数
Table 2 Magnetic hysteresis parameters of selected samples

编号	深度 (m)	M_{rs} (10^{-3} Am 2 · kg $^{-1}$)	M_s (10^{-3} Am 2 · kg $^{-1}$)	B_c (mT)	B_{cr} (mT)	M_{rs}/χ (kAm $^{-1}$)	M_{rs}/M_s	B_{cr}/B_c
187	1 023.30	9.256	4 101.900	0.402	10.3	0.738	0.002	25.622
204	1 103.10	2.431	302.732	1.080	14.3	2.524	0.008	13.241
207	1 113.85	3.820	1 326.527	0.515	12.1	0.667	0.003	23.495
210	1 134.09	10.795	2 914.471	0.594	12.6	1.084	0.004	21.212
219	1 175.38	5.510	1 201.784	0.747	17.3	1.042	0.005	23.159
222	1 191.81	0.635	19.326	5.050	66.2	11.437	0.033	13.109
224	1 200.00	2.125	249.313	1.370	19.4	1.667	0.009	14.161
227	1 216.50	1.941	8.124	26.600	35.0	27.190	0.239	1.316
229	1 227.48	1.178	26.673	6.970	92.9	9.567	0.044	13.329
230	1 242.50	4.843	258.580	2.820	56.3	3.527	0.019	19.965
239	1 305.17	1.774	282.314	1.140	24.2	1.491	0.006	21.228
240	1 313.26	0.573	5.487	16.600	196.0	14.111	0.105	11.807
243	1 343.19	0.805	227.930	0.613	21.3	0.734	0.004	34.747
249	1 394.38	0.876	165.494	0.916	20.9	1.155	0.005	22.817
251	1 420.00	2.073	639.551	0.621	17.0	0.829	0.003	27.375
252	1 422.50	6.375	886.693	1.080	14.4	1.420	0.007	13.333
255	1 443.50	3.532	997.163	0.700	12.7	0.836	0.004	18.143
259	1 475.00	5.466	578.362	1.740	16.2	2.672	0.009	9.310
266	1 514.50	8.757	1 999.339	0.731	14.5	1.004	0.004	19.836
268	1 523.20	2.716	271.584	1.610	16.2	2.125	0.010	10.062
274	1 552.65	10.774	310.391	4.820	22.0	6.149	0.035	4.564
278	1 591.50	18.740	476.798	6.120	27.8	11.053	0.039	4.542
318	1 843.57	3.910	82.713	9.280	111.0	10.576	0.047	11.961

注: M_{rs} .饱和等温剩余磁化强度; M_s .饱和磁化强度; B_c .矫顽力; B_{cr} .剩磁矫顽力; χ .低场磁化率。

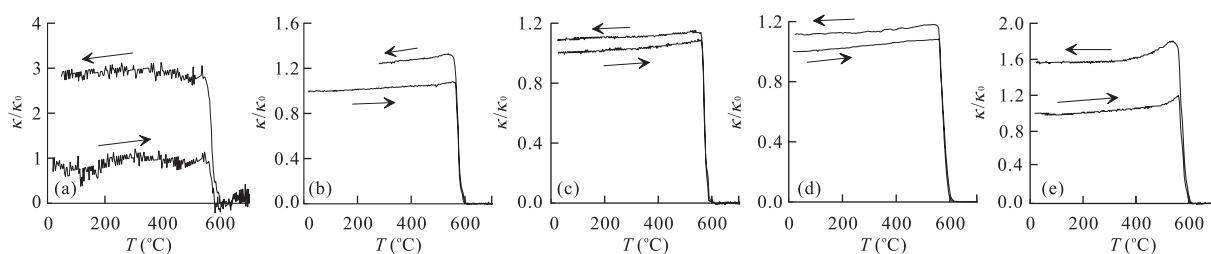


图 5 代表性样品的热磁曲线特征(升降温曲线如箭头所示)

Fig.5 χ - T curves for representative samples

a.229 号;b.230 号;c.259 号;d.266 号;e.278 号

4 讨论

4.1 花岗质片麻岩磁性矿物学

热磁曲线显示,磁铁矿是花岗质片麻岩中的主要磁性矿物之一,所有样品热磁曲线均具有接近580 °C的居里温度,虽然赤铁矿在岩石薄片镜下观察及显微激光拉曼光谱中有发现,但热磁曲线中很难发现赤铁矿存在的信号,表明样品中赤铁矿含量很少,从而导致其热磁信号被磁铁矿所压制,或者赤铁矿在样品中分布有限,仅在部分样品中存在(图 5)。

交变退磁曲线显示,大部分样品的退磁曲线特征与直径超过 1 mm 的多畴磁铁矿类似(Liu et al., 2008b).在 50 mT 交变退磁场下,饱和等温剩余磁化强度迅速下降(图 6),显示样品中磁性矿物为“软”磁性矿物,可能是多畴磁铁矿.尽管如此,依然有部分样品 J/J_0 在 200 mT 的交变退磁场下,依然大于 50.0%,甚至可以高达 65.5%,表明这些样品中存在“硬”磁性矿物,如赤铁矿。

M_{rs}/χ - B_{cr} 交会图中,大多数样品落入磁铁矿+钛磁铁矿区域内,说明样品中的主要磁性矿物为磁铁矿(图 7)(Perters and Dekkers, 2003).有部分样

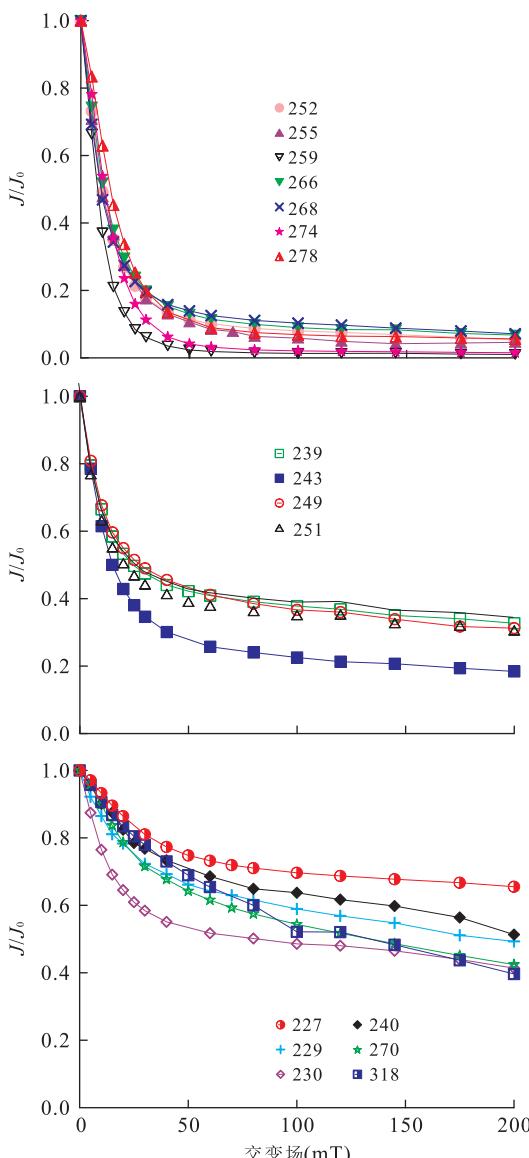


图 6 花岗质片麻岩代表性样品交变退磁(AF demagnetization)曲线

Fig.6 AF demagnetization curves of typical samples

品分布于磁铁矿/钛铁矿区域和赤铁矿区域之间,可能反映了磁铁矿与赤铁矿混合的磁性特征。

以上岩石磁性特征表明,在多数样品中,磁铁矿是主要的磁性矿物,而在小部分样品中,赤铁矿也是重要的磁性矿物之一。镜下观察及显微激光拉曼光谱显示,花岗质片麻岩中的不透明矿物主要为磁铁矿(亚铁磁性)、赤铁矿(反铁磁性)、及钛铁矿和黄铁矿(顺磁性),与岩石磁学分析结果一致。花岗质片麻岩中磁性矿物组合为磁铁矿及少量赤铁矿,与同样经历超高压变质作用并退变质到角闪岩相的完全退变质榴辉岩(角闪岩)类似(Liu et al., 2007, 2009; Xu et al., 2009a)。

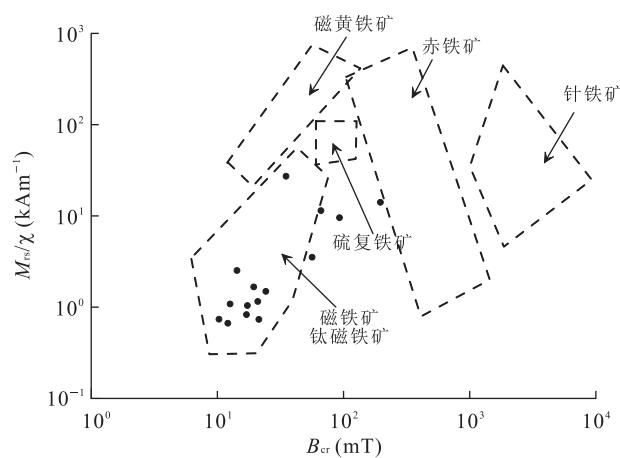


图 7 正片麻岩 M_{rs}/χ v.s. B_{rc} 交会图(Perters and Dekkers, 2003)

Fig.7 M_{rs}/χ vs B_{rc} plot of granitic gneiss

$B_{rc}/B_c - M_{rs}/M_s$ 图,即 Day 氏图,常被用来估计(钛)磁铁矿的颗粒大小(Day et al., 1977; Dunlop, 2002)。由于部分样品中存在赤铁矿,可能会令 Day 氏图的估计结果产生偏差,因而在绘制 Day 氏图时,为尽可能减小赤铁矿的影响,先行排除那些在图 7 中落入钛磁铁矿—磁铁矿区域外的样品。如图 8 所示,17 个样品中的 15 个位于多畴(MD)区域,占样品总数的 88%,仅有 2 个样品(12%)落在伪单畴(PSD)区域,这表明多数花岗质片麻岩中的磁铁矿为多畴(MD),伪单畴(PSD)磁铁矿仅在少量样品中出现。与同样处于完全退变质阶段的完全退变质榴辉岩(角闪岩)相比(Liu et al., 2007, 2009),花岗质片麻岩中的磁铁矿粒度明显较大。多畴磁铁矿携带热剩余磁化强度(TRM)的能力随着其颗粒大小的增大而急剧下降,颗粒直径超过 100 μm 的磁铁矿,其携带的热剩余磁化强度小于单畴颗粒的 1% (Dunlop, 2012)。因此,花岗质片麻岩中的多畴磁铁矿很难携带较高的剩余磁化强度,这也可能是花岗质片麻岩磁化率较高而天然剩余磁化强度却低于主孔中其他岩性的重要原因。

4.2 花岗质片麻岩岩石磁性及其对深部流体活动的指示

花岗质片麻岩的原岩成分与 A 型花岗岩类似(刘福来等, 2004; Xu et al., 2009b)。高温高压实验表明,在类似的长英质岩石中,辉石和石榴石在约 1.5 GPa 及 750 °C 时开始出现,而当到达苏鲁超高压变质带变质峰期温压条件时,绿辉石和石榴石能够在长英质岩石中稳定存在(刘晓春等, 1999)。

当变质峰期时,原岩中的磁铁矿会分解进入新生成的石榴石及绿辉石中,因此现今花岗质片麻岩

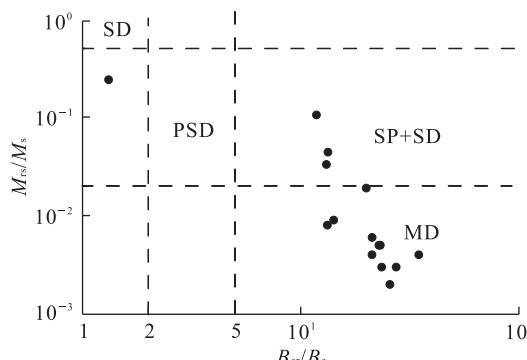
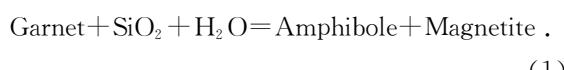


图 8 片麻岩样品 Day 氏图(Dunlop, 2002)

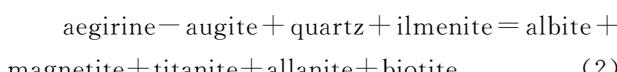
Fig.8 Day-plot of gneiss samples

中出现的磁铁矿应该为退变质过程中含铁的超高压矿物(如石榴石、绿辉石等)分解形成(潘永信和朱日祥, 2005; 任留东等, 2008)。

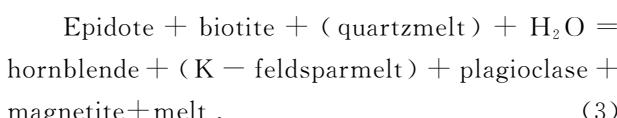
超高压变质岩折返过程中, 花岗质片麻岩由于存在较多含水矿物, 会释放出大量流体(Chen et al., 2009)。石榴石在折返过程中能够很快水化并形成磁铁矿, 其反应过程如下(Strada et al., 2006):



孟小红等(2007)认为流体的活动有利于较大颗粒的磁铁矿结晶, 而任留东等(2008)认为霓辉石是超高压变质花岗质片麻岩退变质初期的重要产物, 而花岗质片麻岩中大颗粒磁铁矿的生成与其后的退变质流体活动关系密切。其反应过程为:



Schmidt and Thompson(1996)认为, 在 0.5~0.9 GPa 和 ~650 °C 条件下, 绿帘石和富水熔体反应能生成磁铁矿, 其反应过程如下:



该温压条件恰好与苏鲁超高压变质岩中榴辉岩部分退变质阶段的温压条件相似, 此阶段中, 榴辉岩中绿辉石及石榴石开始大量退变质生成磁铁矿, 处于此阶段的部分退变质榴辉岩, 其磁性最强(梁凤华等, 2005; Liu et al., 2007, 2009; Xu et al., 2009a)。

随着超高压变质岩的进一步折返, 超高压变质岩进入完全退变质阶段。对于完全退变质榴辉岩而言, 在部分退变质阶段生成的磁铁矿会进一步转化为赤铁矿和钛铁矿(Liu et al., 2007, 2009; Xu et al., 2009a)。在花岗质片麻岩中, 也观察到类似过

程。较大的磁铁矿颗粒常具有赤铁矿反应边(图 2c~2d, 图 3b), 而较小颗粒的磁铁矿, 如绿帘石中的磁铁矿(图 2f, 图 3c), 则完全氧化为赤铁矿。

总而言之, 随着退变质过程的不断加深, 花岗质片麻岩中磁性矿物经历了与榴辉岩中类似的相变过程(Liu et al., 2007, 2009; Xu et al., 2009a), 反映了花岗质片麻岩及榴辉岩具有共同的俯冲折返历程。在退变质初期, 由于花岗质片麻岩中具有较强的流体活动, 绿辉石和石榴石更容易水化生成磁铁矿, 而在富水条件下, 也有利于较大颗粒磁铁矿晶体的形成。退变质早期形成的大颗粒磁铁矿, 在后期退变质中的氧化过程中, 仅生成赤铁矿反应边, 而较小颗粒的磁铁矿则完全被氧化为赤铁矿, 如同绿帘石共生的赤铁矿(Liu et al., 2007, 2009; Xu et al., 2009a)。因此, 和榴辉岩相比, 花岗质片麻岩中较大颗粒的磁铁矿更容易在完全退变质过程中保留下来, 从而具有较高的磁化率。而相对榴辉岩中的伪单畴磁铁矿, 花岗质片麻岩中的多畴磁铁矿携带剩余磁化强度的能力较弱, 从而具有较低的天然剩余磁化强度, 多畴磁铁矿是花岗质片麻岩高磁化率低天然剩磁特征的重要原因, 而流体活动是控制多畴磁铁矿生成的关键因素, 因而也进一步对花岗质片麻岩的磁性有着重要影响。Pan and Zhu(2005)在对来自大别超高压变质带的花岗质片麻岩进行磁性研究中也发现了多畴磁铁矿的存在, 这表明在苏鲁一大别超高压变质岩的俯冲折返过程中, 广泛存在着较强的流体活动。

在 χ -NRM 交会图中, 大部分样品天然剩余磁化强度随磁化率变化趋势一致, 表明这些样品中磁性矿物特征相似, 但有些样品明显具有更高的天然剩余磁化强度, 其随磁化率的变化趋势也不同(图 9), 表明这些样品中磁性矿物特征与其他样品不同。高天然剩磁样品主要分布于花岗质片麻岩主体岩性段外, 相对主体岩性段内样品明显具有更高的天然剩磁及 Q 值(表 1)。由于花岗质片麻岩中的赤铁矿主要是在退变质晚期形成, 其形成温度大大低于赤铁矿的尼尔温度, 因此只能携带较低的化学剩磁, 难以对样品的天然剩余磁化强度产生较大影响。因此, 这些具有相对高的剩余磁化强度样品, 其特殊的磁性特征应该是由磁铁矿的颗粒大小不同引起。高剩磁样品中可能含有较小的磁铁矿颗粒, 例如伪单畴磁铁矿。

这些分布于主体花岗质片麻岩单元之外的高剩磁样品, 靠近(退变质)榴辉岩或者以夹层形式存在于(退变质)榴辉岩中(刘福来等, 2004; Xu et al.,

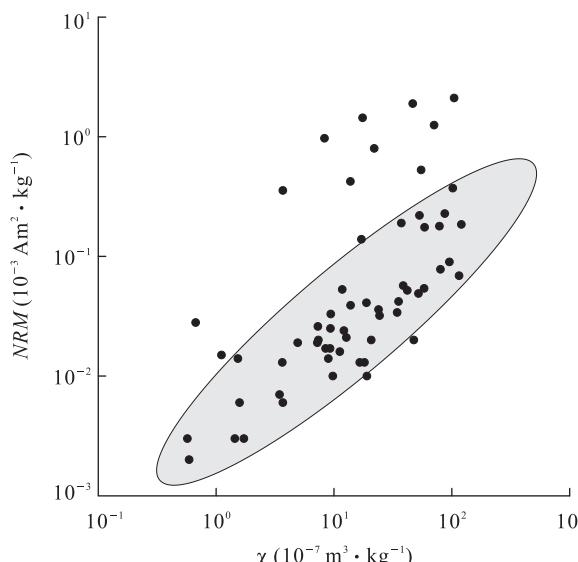


图 9 CCSD 主孔 100~2 000 m 花岗质片麻岩样品 NRM- χ 交会

Fig.9 NRM- χ plot for granitic gneiss in CCSD MH 100—2 000 m

2009b).在退变质过程中,榴辉岩和花岗质片麻岩中存在小范围的流体交换,榴辉岩中石榴石和绿辉石的退变质会消耗来自花岗质片麻岩中的流体(Chen et al., 2007),从而减弱与之相邻的花岗质片麻岩中的流体活动.在这种情况下,可能导致花岗质片麻岩中的磁铁矿颗粒减小,从而能携带更强的天然剩余磁化强度(Dunlop, 2012).因此,花岗质片麻岩中部分样品相对较高的天然剩磁特征,可能和退变质过程中花岗质片麻岩和榴辉岩之间的流体交换有关.

5 结论

对 CCSD 主孔 100~2 000 m 深度范围内花岗质片麻岩磁性的研究表明,其中的磁性矿物组合为多畴磁铁矿土-伪单畴磁铁矿及赤铁矿.花岗质片麻岩经历超高压变质过程并在折返中退变质到角闪岩相.花岗质片麻岩中磁性矿物组合和角闪岩相的完全退变质榴辉岩(角闪岩)类似,而花岗质片麻岩的高磁化率低剩余磁化强度主要受到多畴磁铁矿磁性特征的影响.

在花岗质片麻岩的退变质过程中,含水矿物能释放大量水,多畴磁铁矿的生成可能与岩石中较强的流体活动相关.而多畴磁铁矿在苏鲁和大别超高压变质带中的花岗质片麻岩里广泛存在,表明在长英质超高压变质岩的折返过程中存在大规模的水化

过程.

分布于主体花岗质片麻岩段外,以夹层形式存在于退变质榴辉岩中的样品,具有较高的磁化率、天然剩余磁化强度,其 NRM 随磁化率变化趋势也和主体段内样品不同,表明这些样品中含有较小颗粒,如伪单畴的磁铁矿.这种磁铁矿颗粒大小的改变可能反映了在镁铁质和长英质岩石中流体交换.

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*, 11 (6): 271—283. doi: 10.1016/S0985-3111(99)80017-5
- Cong, B.L., Zhang, R.Y., Liou, J.G., et al., 1996. Metamorphic Evolution of UHPM Rocks. In: Cong, B. L., ed. Ultra-high-Pressure Metamorphic Rocks in the Dabieshan-Sulu Region of China. Springer, Berlin, 128—160.
- Chen, R.X., Zheng, Y.F., Gong, B., et al., 2007. Origin of Retrograde Fluid in Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks: Constraints from Mineral Hydrogen Isotope and Water Content Changes in Eclogite-Gneiss Transitions in the Sulu Orogen. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(9): 2299—2325. doi: 10.1016/j.gca.2007.02.012
- Day, R., Fuller, M., Schmidt, V. A., 1977. Hysteresis Properties of Titanomagnetites: Grain-Size and Compositional Dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 13 (4): 260—267. doi: 10.1016/0031-9201(77)90108-X
- Dunlop, D. J., 1990. Developments in Rock Magnetism. *Rep. Prog. Phys.*, 53 (6): 707—792. doi: 10.1088/0034-4885/53/6/002
- Dunlop, D. J., 2012. Magnetic Recording in Rocks. *Physics Today*, 65 (6): 31—37. doi: 10.1063/PT.3.1604
- Dunlop, D. J., Özdemir, Ö., 2001. Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers. Cambridge University Press, Cambridge, 262—287.
- de Faria, D. L. A., Silva, S. V., de Oliveria, M. T., 1997. Microspectroscopy of Some Iron Oxides Raman and Oxy-hydroxides. *Journal of Raman Spectroscopy*, 28 (11): 873—878. doi: 10.1002/(SICI)1097-4555(199711)28:11<873::AID-JRS177>3.0.CO;2-B
- Fu, B., Touret, J. L. R., Zheng, Y. F., 2001. Fluid Inclusions in Coesite-Bearing Eclogites and Jadeite Quartzites at Shuanghe, Dabie Shan, China. *Journal of Metamorphic Geology*, 19 (5): 31—548. doi: 10.1046/j.0263-4929.2001.00327.x

- Geuna, S. E., McEnroe, S. A., Robinson, P., et al., 2008. Magnetic Petrology of the Devonian Achala Batholith, Argentina: Titanohaematite as an Indicator of Highly Oxidized Magma during Crystallization and Cooling. *Geophysical Journal International*, 175(3): 925—941. doi: 10.1111/j.1365—246X.2008.03964.x
- Harrison, R. J., Feinberg, J. M., 2009. Mineral Magnetism: Providing New Insights into Geoscience Processes. *Elements*, 5(4): 209—214. doi: 10.2113/gselements.5.4.209
- Hacker, B. R., Wallis, S. R., McWilliams, M. O., et al., 2009. ⁴⁰Ar/³⁹Ar Constraints on the Tectonic History and Architecture of the Ultrahigh-Pressure Sulu Orogen. *Journal of Metamorphic Geology*, 27(9): 827—844. doi: 10.1111/j.1525—1314.2009.00840.x
- Hirajima, T., Ishiwatari, A., Cong, B., et al., 1990. Identification of Coesite in Mengzhong Eclogite from Donghai County, Northeastern Jiangsu Province, China. *Mineralogical Magazine*, 45: 579—583.
- Liang, F. H., Su, S. G., You, Z. D., et al., 2005. Retrograde Metamorphism of Eclogites from the Main Hole (0—2 000 m) of the Chinese Continental Scientific Drilling, Donghai, Jiangsu Province. *Geology in China*, 32(2): 218—229 (in Chinese with English abstract).
- Liou, J. G., Zhang, R. Y., 1996. Occurrences of Intergranular Coesite in Ultrahigh-P Rocks from the Sulu Region, Eastern China: Implications for Lack of Fluid during Exhumation. *American Mineralogist*, 81: 1217—1221.
- Liu, F. L., Xu, Z. Q., Yang, J. S., et al., 2004. Geochemical Characteristics and UHP Metamorphism of Granite Gneisses in the Main Drilling Hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project and Its Adjacent Area. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 9—26 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q. S., Liu, Q. S., Liu, Y. S., et al., 2008a. Magnetic Study of Mafic Granulite Xenoliths from the Hannuoba Basalt, North China. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9(6): Q06008. doi: 10.1029/2008GC001952
- Liu, Q. S., Yu, Y., Muxworthy, A. R., et al., 2008b. Effects of Internal Stress on Remanence Intensity Jumps across the Verwey Transition for Multi-Domain Magnetite. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 169(1—4): 100—107.
- Liu, Q. S., Liu, Q. S., Yang, T., et al., 2009. Magnetic Study of the UHP Eclogites from the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Project. *Journal of Geophysical Research*, 114: B02106. doi: 10.1029/2008JB005917
- Liu, Q. S., Liu, Q. S., Zhang, Z. M., et al., 2007. Magnetic Properties of Ultrahigh-Pressure Eclogites Controlled by Retrograde Metamorphism: A Case Study from the ZK703 Drillhole in Donghai, Eastern China. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 160(3—5): 181—191. doi: 10.1016/j.pepi.2006.10.001
- Liu, Q. S., Zeng, Q. L., Zheng, J. P., et al., 2010. Magnetic Properties of Serpentized Garnet Peridotites from the CCSD Main Hole in the Sulu Ultrahigh-Pressure Metamorphic Belt, Eastern China. *Journal of Geophysical Research*, 115(1): B6. doi: 10.1029/2009JB000814
- Liu, X. C., Yang, N., Qu, W., 1999. An Experiment on the Crystallization of Felsic Gneiss from Shuanghe in the Dabie Mountains at 1.0—4.5 GPa and Its Geological Implications. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(2): 113—120 (in Chinese with English abstract).
- Meng, X. H., Yu, Q. F., Guo, Y. Z., et al., 2007. A Pilot Study on Paleomagnetism and Rock Magnetism of Maobei Eclogite. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(4): 533—539 (in Chinese with English abstract).
- Okay, A. I., Xu, S. T., Sengör, A. M. C., 1989. Coesite from the Dabie Shan Eclogites, Central China. *European Journal of Mineralogy*, 1(1): 595—598.
- Oufi, O., Cannat, M., Horen, H., 2002. Magnetic Properties of Variably Serpentized Abyssal Peridotites. *Journal of Geophysical Research*, 107(B5): EPM 3—1—EPM 3—19. doi: 10.1029/2001JB000549
- Pan, Y. X., Zhu, R. X., 2005. Rock Magnetism and Magnetic Fabric Studies of the Ultrahigh-Pressure (UHP) Metamorphic Rocks from the Dabie Orogenic Belt, East-Central China: Implications for Retrograde Metamorphism. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 1101—1108 (in Chinese with English abstract).
- Peters, C., Dekkers, M. J., 2003. Selected Room Temperature Magnetic Parameters as a Function of Mineralogy, Concentration and Grain Size. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28(16—19): 659—667. doi: 10.1016/S1474—7065(03)00120—7
- Qi, X. X., Grimmer, J. C., Xu, Z. Q., 2009. Ultrahigh-Pressure Texture Inheritance during Retrogression: Evidence from Magnetofabrics in Eclogites and Ultramafic Rocks (Chinese Continental Scientific Drilling Project). *Tectonophysics*, 475(2): 267—278. doi: 10.1016/j.tecto.2008.09.015
- Ren, L. D., Niu, B. G., Wu, C. M., et al., 2008. The Retrograde Feature and Magnetite Formation in the Aegirine-Bearing Alkaline Granitic Gneiss in the Dabieshan Mountains. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 28(4): 36—42 (in Chinese with English abstract).

- Robinson, P., Harrison, R.J., McEnroe, S.A., et al., 2002. Lamellar Magnetism in the Haematite-Ilmenite Series as an Explanation for Strong Remanent Magnetization. *Nature*, 418 (6897): 517—520. doi: 10.1038/nature00942
- Schmidt, M. W., Thompson, A. B., 1996. Epidote in Calc-alkaline Magmas: An Experimental Study of Stability, Phase Relationships, and the Role of Epidote in Magmatic Evolution. *American Mineralogist*, 81: 462—474.
- Strada, E., Talarico, F. M., Florindo, F., 2006. Magnetic Petrology of Variably Retrogressed Eclogites and Amphibolites: A Case Study from the Hercynian Basement of Northern Sardinia (Italy). *Journal of Geophysical Research*, 111(01): B12. doi: 10.1029/2006JB004574
- Wallis, S., Enami, M., Banno, S., 1999. The Sulu UHP Terrane: A Review of the Petrology and Structural Geology. *International Geology Review*, 41(10): 906—920. doi: 10.1080/00206819909465178
- Wang, Q., Burlini, L., Mainprice, D., et al., 2009. Geochemistry, Petrofabrics and Seismic Properties of Eclogites from the Chinese Continental Scientific Drilling Boreholes in the Sulu UHP Terrane, Eastern China. *Tectonophysics*, 475(2): 251—266. doi: 10.1016/j.tecto.2008.09.027
- Xu, H.J., Jin, Z.M., Mason, R., et al., 2009. Magnetic Susceptibility of Ultrahigh Pressure Eclogite: The Role of Retrogression. *Tectonophysics*, 475(2): 279—290. doi: 10.1016/j.tecto.2009.03.020
- Xu, H.J., Jing, Z.M., Ou, X.G., et al., 2004. Effects of Retrogression of Ultrahigh-Pressure Eclogites on Magnetic Susceptibility and Anisotropy. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(6): 674—684 (in Chinese with English abstract).
- Xu, H.J., Jin, Z.M., Ou, X.G., 2006. Lithology Determination of Rocks from CCSD 100—2 000 m Main Hole by Magnetic Susceptibility and Density Using Discriminant Function Analysis. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(4): 513—519 (in Chinese with English abstract).
- Xu, S., Okay, A.I., Ji, S., et al., 1992. Diamond from the Dabie Shan Metamorphic Rocks and Its Implication for Tectonic Setting. *Science*, 256(5053): 80—82.
- Xu, Z.Q., Yang, W.C., Ji, S.C., et al., 2009. Deep Root of a Continent-Continent Collision Belt: Evidence from the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) Deep Borehole in the Sulu Ultrahigh-Pressure (HP-UHP) Metamorphic Terrane, China. *Tectonophysics*, 475(2): 204—219. doi: 10.1016/j.tecto.2009.02.029
- Yang, T., Liu, Q.S., Wu, Y., et al., 2006. Characteristics of Magnetic Susceptibility in the Depth of 100—2 000 m Mainhole of Chinese Continental Scientific Drilling and Its Geological Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7): 2089—2094 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W.C., Cheng, Z.Y., Chen, G.J., et al., 1999. Geophysical Investigations in Northern Sulu UHPM Belt, Part I: Deep Seismic Reflection. *Chinese Journal of Geophysics*, 42(1): 41—52 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R.Y., Liou, J.G., Zheng, Y.F., et al., 2003. Transition of UHP Eclogites to Gneissic Rocks of Low-Grade Amphibolite Facies during Exhumation: Evidence from the Dabie Terrane, Central China. *Lithos*, 70(3—4): 269—291. doi: 10.1016/S0024-4937(03)00102-6
- 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., Xiao, Y. L., Hoefs, J., et al., 2006. Ultrahigh Pressure Metamorphic Rocks from the Chinese Continental Scientific Drilling Project: I. Petrology and Geochemistry of the Main Hole (0—2 050 m). *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152: 421—441. doi: 10.1007/s00410-006-0120-5
- Zhang, Z. M., Xu, Z. Q., Liu, F. L., et al., 2002. Composition and Metamorphism of the Root of Southern Sulu Orogen. *Geological Bulletin of China*, 21(10): 609—616 (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).

附中文参考文献

- 梁凤华, 苏尚国, 游振东, 等, 2005. 中国大陆科学钻探主孔 0~2 000 m 榴辉岩的退变质过程. *中国地质*, 32(2): 218—229.
- 刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等, 2004. 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. *岩石学报*, 20(1): 9—26.
- 刘晓春, 杨农, 曲玮, 1999. 大别山双河长英质片麻岩在 1.0~4.5 GPa 下的结晶实验及其地质意义. *地球学报*, 20(2): 113—120.
- 孟小红, 余钦范, 郭友钊, 等, 2007. 毛北榴辉岩古地磁及岩石磁学初探. *地球科学——中国地质大学学报*, 32(4): 533—539.

潘永信,朱日祥,2005.大别山超高压变质岩带的岩石磁学和磁组构研究及其地质意义.岩石学报,21(4):1101—1108.

任留东,牛宝贵,吴春明,等,2008.大别山霓辉花岗片麻岩中磁铁矿的形成.矿物岩石,28(4):36—42.

徐海军,金振民,欧新功,等,2004.超高压榴辉岩退变质作用对岩石磁化率的影响.地球科学——中国地质大学学报,29(6):674—684.

徐海军,金振民,欧新功,2006.磁化率和密度对中国大陆科学钻探主孔 100~2 000 m 岩石类型的判别.地球科学——中国地质大学学报,31(4):513—519.

杨涛,刘庆生,吴耀,等,2006.中国大陆科学钻探(CCS)主孔 100~2 000 m 区间磁化率的变异特征及其地质意

义.岩石学报,22(7):2089—2094.

杨文采,程振炎,陈国九,等,1999.苏鲁超高压变质带北部地球物理调查(I):深反射地震.地球物理学报,42(1):41—52.

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,2002.南苏鲁造山带根部的物质组成及变质作用.地质通报,21(10):609—616.

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.

《地球科学》荣获第五届中国高校精品科技期刊奖

第五届“中国高校精品·优秀·特色科技期刊奖”颁奖大会于 2014 年 11 月 10—12 日在广州举行.我校主办的《地球科学》(中文版)和《Journal of Earth Science》(英文版)同时获得中国高校精品科技期刊奖,这是中文版连续五届、英文版第 3 次荣获该奖.湖北省高校还有武汉理工大学学报、武汉理工大学学报材料科学版(英文版)、华中科技大学学报(自然科学版)获此殊荣.

据悉“中国高校精品·优秀·特色科技期刊奖”评选活动由教育部科技司主办.科技期刊界有关专家组成评比委员会,对参评期刊提供的 2013 年最后 1 期和 2014 年第 1 期样刊进行评估.精品和优秀期刊评比主要考查期刊荣誉、期刊传播与利用以及期刊国际影响力三个方面,特色期刊评比主要考查期刊在专业学科领域和栏目建设方面的特色与影响力.本次评选共有 49 种期刊荣获精品科技期刊奖、108 种期刊荣获优秀科技期刊奖,30 种期刊荣获特色科技期刊奖.