

# 迁安铁矿变形岩石的 EBSD 组构分析

崔玲玲, 陈正乐, 陈柏林, 杨 农

(中国地质科学院 地质力学研究所, 北京 100081)

**摘要:** 迁安铁矿是我国大型沉积变质型铁矿之一, 该矿区含矿变质岩系为前寒武纪老变质岩石, 时代老, 变质程度深, 现存岩石的内部矿物发生过多次变形、变质和重结晶等变化, 宏观上表现为该区岩石矿物组构的复杂性。为了更深入、清晰地了解该区变形岩石的组构, 采用电子背散射衍射(EBSD)技术对该区岩石样品做了分析, 通过 EBSD 系统的配套软件(HKL 公司开发的 Channel 5), 对采集数据进行处理绘制成相应磁铁矿和石英的极图, 经分析后重点总结出变形岩石内部石英的组构特点, 由此进一步反映出本区构造变形时主要为中温-中高温的变形温度环境, 少量组构图反映叠加了中低温变形。

**关键词:** EBSD 技术; 岩石组构; 迁安铁矿; 石英

中图分类号: P585; P588.34

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2010)04-0387-10

## An analysis of the fabric of deformed rock: the application of EBSD (electron backscatter diffraction) in the Qian'an iron mine

CUI Ling-ling, CHEN Zheng-le, CHEN Bai-lin and YANG Nong

(Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geosciences, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The Qian'an iron mine is one of the large-sized metamorphic sedimentary iron mines in China. As the ore-bearing metamorphic rocks here are of Precambrian hypometamorphic ones, the minerals in the existent rocks have been deformed, metamorphosed and recrystallized several times, resulting in the extreme complexity of the rock microstructure. In order to have a better understanding of the fabric of the deformed rocks, the authors employed EBSD (electron backscatter diffraction) to analyze the samples in the study area. With the help of Channel 5 developed by HKL Co., the authors processed all the data collected and drew the corresponding magnetite pole figures and quartz pole figures. Quartz optical axes, which exist in gneiss and granulite, are basically consistent with the direction of foliation in hand specimen and are also in the same direction or at the small-angle intersection with the elongated direction and wave extinction of quartz under microscope. The analysis shows that the characteristics of magnetite do not show a preferred orientation, while the internal fabric of quartz in deformed rock does. Furthermore, the authors have also obtained the information concerning the conditions during the structural deformation. Most pole figures reflect a circumstance of medium to medium-high temperature, whereas a small number of figures suggest the composition of medium-low temperature deformation. In combination with the knowledge of deformation partitioning which belongs to the deformation field, the authors believe that different minerals in the solid rock such as quartz, feldspar and garnet have different mechanical strength and ductile shear deformation conditions, and such differences would contribute to partition deformation between the light-color deformed quartz and the high mechanical strength magnetite.

**Key words:** EBSD; rock fabric; Qian'an iron mine; quartz

收稿日期: 2009-12-29; 修订日期: 2010-03-31

基金项目: 国家危机矿山办公室资助项目(200799094, 20089950)

作者简介: 崔玲玲(1985-), 女, 汉族, 硕士研究生, 构造地质专业, 电话: 13581735431, E-mail: bachelorzemail@126.com

岩石组构是指组成岩石的矿物在岩石中分布的各向异性,或者说岩石结构要素的规律性,构造变形是引起岩石组构的重要原因。岩石变形组构分析是指基于岩石中标志体的研究,通过几何方法或者运用岩石中的矿物物性,借助一定的测试技术来确定岩石的变形程度、变形方式和变形机制。岩石组构的研究测定方法很多:基于晶体内部光轴转动而产生光性等性质上变化的方法,如光学显微镜、弗氏台(U-stage)、X射线衍射组构测量仪和中子衍射仪、透射电镜微区分析等等;基于受到定向应力和温度作用而使岩石内磁性矿物产生定向排列、韧性变形或定向重结晶的变化,如磁组构分析方法。虽然上述方法的依据有本质的不同,但是它们都是以最终确定岩石变形方式及变形机制为目的。本文综合各分析方法的优缺点并结合迁安铁矿的地质特征,对本区复杂的变形岩石选用电子背散射衍射这一实验方法进行组构分析。

电子背散射衍射(electron back scattered diffraction system: EBSD)的原理早在 20 世纪 50 年代就已经清楚,随着计算机技术、计算软件和照相技术的发展,直到 20 世纪 80 年代现代的 EBSD 技术才真正问世,并广泛应用于材料科学分析与研究中(刘庆, 2005)。该技术最原始的功能是确定晶体材料某一微区的取向,即单个晶粒取向测定技术(杨平, 2007),然而,将其应用于地质领域,尤其是在岩石组构方面却是最近几年才做的尝试。

本文所选样品采自河北省迁安县迁安铁矿,该区地质条件复杂,表现为该区构造变形期次多、岩石矿物组构复杂。温建林(1984)认为本区变质岩系变化较大,既有组构的变化,又有物质成分的变化;刘永祥(1990)还对该区尖晶石橄榄大理岩的特征和成因做了相关的研究,认为该大理岩是区内最早的一次岩浆活动的产物;郑敏等(1993)利用磁组构技术通过分析褶皱前后磁组构特征及其在褶皱过程中的变化,推测产生褶皱的应力机制及其形态特征;谢坤一(1983)论述了迁安隆起与边缘褶皱带的关系,是对铁矿形成空间分布规律和控矿构造的综合论述;上世纪 70 年代末,钱祥麟等(1985)通过前震旦纪结晶基底的构造、变质和变形作用及其结晶基底与沉积盖层之间的不整合面研究冀东富铁矿的分布及其形成规律,明确提出了冀东铁矿主要受构造、地层和岩石建造等诸方面因素控制的新认识。纵观前人研究发现,对本区研究工作主要集中在矿产方面,且做

岩石组构方面的专门性研究并不深入,故本文旨在前人基础上,结合 EBSD 技术,对本区 8 个薄片做组构方面的测试分析,进而推测本区岩石变形环境。

## 1 区域地质背景

迁安铁矿是我国大型沉积变质型铁矿之一(温建林, 1984),大地构造上位于华北地台北缘,燕辽沉降带中更次一级的构造单元——山海关隆起带中。区内褶皱和断裂比较复杂,褶皱带呈弧形分布。根据褶皱级别,将矿区的褶皱分为五级构造:一级为东西向褶皱带,二级为北区 NE 向和南区 NNW 向褶皱,三级为层间褶皱,四、五级指的是矿体内部褶皱。由于应力作用的存在使得该区断裂构造也相当发育,具有多期活动的特点,全区断层按其走向可划分为东西向、东西向弧形、北东向和北西向断层。其中东西向断层多分布在遵化-青龙复背斜轴部及其北缘地带,以蓝旗营-董家口-青龙东西一线的中-新元古界与太古宇接触界线左近最为发育、规模较大、呈波状延伸;近东西向展布的弧形构造在本区明显可见的有迁西弧形构造和东路庄弧形构造两个,北东向断层一般规模较小,仅在复背斜核部一线最发育;可视为自成系统的北西向断层主要集中在董家口南东至建昌营北西一线,形成一条北西向的构造带(图 1)。

本区地层属太古界迁西群,含矿岩系是一套麻粒岩夹变粒岩和磁铁石英岩互层组合,自下而上分别为紫苏辉石斜长片麻岩、紫苏麻粒岩、紫苏黑云变粒岩夹多层辉石斜长角闪岩组合、紫苏黑云斜长(二长)片麻岩、黑云变粒岩、石榴黑云变粒岩、含两层主要铁矿层组合,铁矿层中包括磁铁石英岩类和磁铁石英辉石岩两类岩石;富铝的片麻岩组合,常见有硅线石榴黑云钾长(斜长)片麻岩、硅线紫苏堇青黑云斜长(钾长)片麻岩、兰晶硅线黑云斜长片麻岩。据前人(兰玉琦等, 1990)研究,本区岩相主要属于高角闪岩相,同时包含部分麻粒岩相。

通过对比显示迁安铁矿区外围变质程度北深南浅,但是在变形程度上差别不大。

在年代学研究方面,乔广生等(1987)在曹庄黄柏峪一带获得了斜长角闪岩或黑云斜长片麻岩中的斜长角闪岩包体的 Sm-Nd 等时线年龄(3 495 ± 19) ~ (3 561 ± 15) Ma,同时, Liu 等(1990)获得的黄柏峪铬云母石英片岩中碎屑锆石年龄为 3 610 ~ 3 851 Ma,据此可以认为迁安地区变质岩的原岩属于我国目前

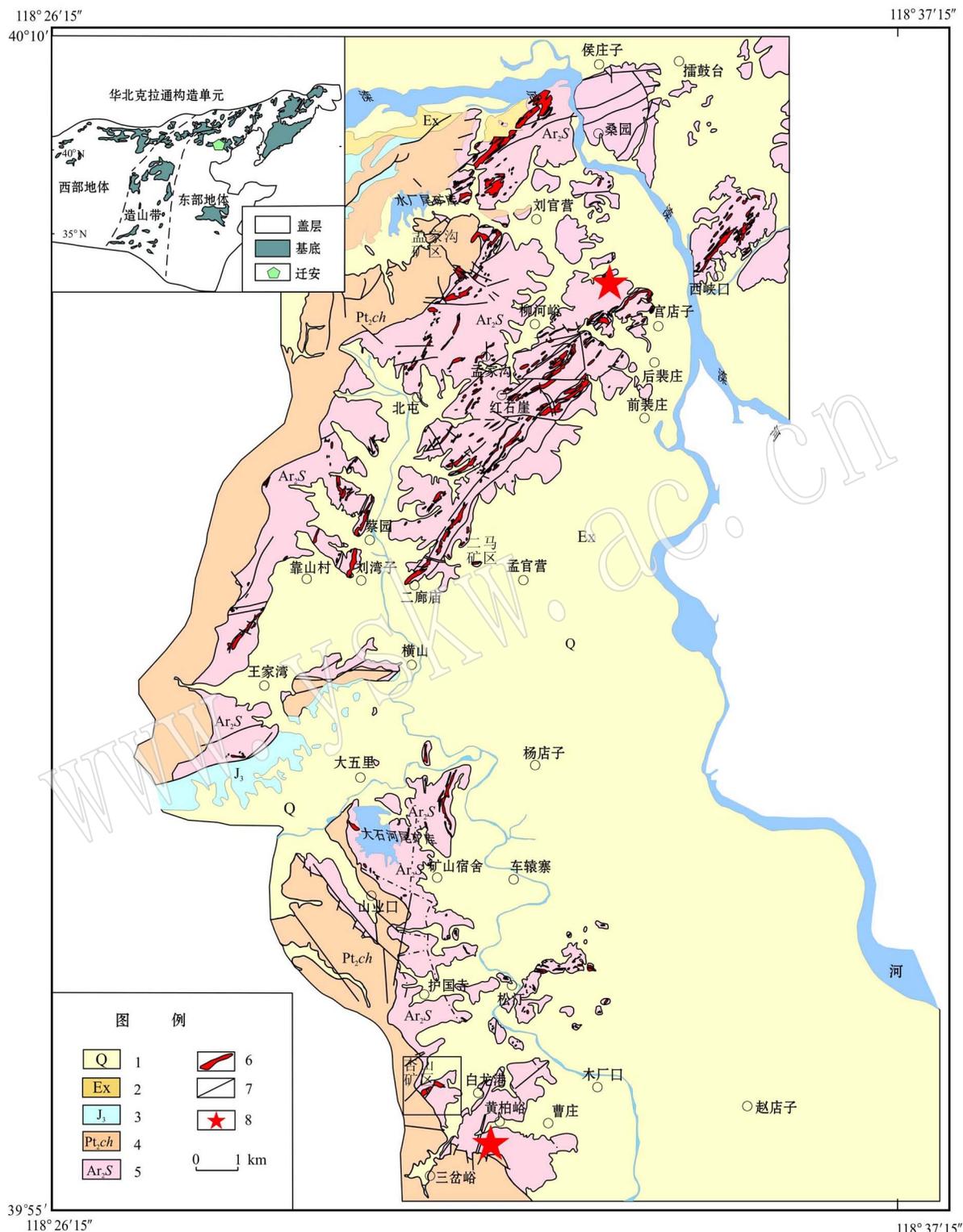


图 1 迁安铁矿地质构造简图[据丁文君等(2009)修改]

Fig. 1 Tectonic sketch map of the Qian'an iron mine (after Ding Wenjun *et al.*, 2009)

1—第四系; 2—古近系新集组; 3—上侏罗统; 4—中元古界; 5—中太古界三屯营组; 6—磁铁矿石英岩; 7—断层; 8—采样位置  
 1—Quaternary; 2—Paleogene Xinji Formation; 3—Upper Jurassic; 4—Mesoproterozoic; 5—Mid-Archaean Santuning Formation; 6—magnetite quartzite; 7—fault; 8—sampling site

最老(古太古代)的地层单元。在变质年代学方面,有学者(尹庆柱,1988;伍家善等,1998)认为这些岩体周围表壳岩系经历了25亿年麻粒岩相变质改造,推测迁西岩群还经历了30亿年左右的中压变质。

前人对迁安铁矿矿区做过大量工作,但是由于该矿区含矿变质岩系为前寒武纪老变质岩石,时代老,变质程度深,故现存的岩石内部矿物发生多期次变形、变质和重结晶等变化,宏观上表现为该区岩石矿物结构的复杂性。因此,对本区深变质岩石变形期次和变形条件上的研究,一直是国内前寒武纪地质研究中的一个令人瞩目且争论较多的问题。

## 2 方法原理与设备

### 2.1 电子背散射衍射的原理

电子背散射衍射(EBSD)系统通常作为附件安装在扫描电子显微镜(SEM)上,是利用不同晶体结构或方位的电子背散射衍射花样(EBSP)来测量晶体或矿物取向等显微构造和结构的分析技术。它借助荧光屏和CCD相机采集样品在高能电子束轰击下产生的电子背散射衍射花样(EBSP),然后将之与数据库中不同晶体的EBSP模拟结果进行匹配,并对匹配结果进行指标化和标定,从而计算出样品中晶体的相分布特征及其三维取向关系等显微构造信息(曹淑云等,2006;徐海军等,2007)。

电子背散射衍射(EBSD)具有不同于费氏台、X射线衍射、中子衍射和透射电镜方法进行晶体结构和取向分析的特点,它可以在观测微观组织结构的同时快速、统计性地获得宏观多晶体和各晶粒形貌、结构和取向分析的信息,而且可以计算扫描电镜观测微区组织的结构特征,从而解决了宏观统计性分析与微观局域性分析之间的矛盾(刘俊来等,2008)<sup>①</sup>。

### 2.2 实验设备简介

实验仪器型号为HKL Channel 5.0 System with Nordlys-II Detector,由丹麦HKL技术有限公司生产。EBSD由硬件和软件两大部分组成:硬件系统包括一台高灵敏度CCD相机和一套电子背散射衍射花样平均化和背景校正的图像处理系统;软件系统则主要用于控制EBSD图像的采集和数据分析。此外,有关的其他辅助设备还有:扫描电镜和电子背

散射衍射仪的附件、样品磨片机和抛光机、离子溅射仪、超声波清洗器和电解抛光仪等。

## 3 实验样品和EBSD测试

### 3.1 实验样品类型和岩相结构

本次实验的8个样品均取自迁安矿区内,相关岩石类型主要有2种:磁铁石英岩(含磁铁石英岩)和片麻岩。各样品矿物组成和结构特点(图2)如下:

(1)Q209-2:主要组成矿物为石英约55%,粒径0.15~0.3 mm;磁铁矿25%~30%;透辉石15%~20%,粒径0.1~0.25 mm。石英与磁铁矿不显示为条带状,而是粒状变晶结构。块状、片麻状构造。

(2)Q210-1:石榴石片麻岩,主要组成矿物为石英45%~50%,粒径0.2~0.5 mm(未变形的颗粒);长石25%~30%,粒径0.5~6 mm(以碱性长石为主,可见格子双晶);黑云母15%~20%,粒径0.1~0.4 mm;石榴子石约5%,粒径约1 mm;透辉石约2%。

(3)Q210-6:主要组成矿物为石英40%~45%,粒径小,为0.1~0.2 mm;磁铁矿约35%;透辉石25%~30%,粒径0.5~1.5 mm。

(4)Q210-13:变形麻粒岩,主要组成矿物为石英50%~55%,粒径0.2~1 mm;透辉石30%~35%,粒径0.1~0.2 mm,粒状或短柱状;石榴子石2%~5%,粒径0.2~1 mm;磁铁矿2%~3%;黑云母8%~10%,粒径0.05~0.2 mm;长石3%~5%,粒径0.3~0.5 mm,粒状或短柱状。原岩为麻粒岩,但发生强烈构造变形,主要由石英承担,表现为石英颗粒强烈的拉长、波状消光和亚颗粒现象;镜下观察的消光方位(石英光轴)与片理方向为小角度相交(图2:Q210-13-2)。

(5)Q210-15:主要组成矿物为石英约50%,粒径0.2~0.4 mm;磁铁矿约35%;透辉石15%~20%,粒径0.1~0.5 mm,自形程度好。其中石英与磁铁矿和透辉石组成的整体呈条带状分布,透辉石呈短柱状,而磁铁矿呈他形充填于透辉石颗粒中。

(6)Q236-2:主要组成矿物为石英45%~50%,粒径0.2~0.3 mm,自形程度稍高;磁铁矿25%~30%,粒径0.05~0.5 mm;方解石20%~25%,粒径0.1~0.3 mm;透辉石约5%,粒径0.1 mm。

① 刘俊来,曹淑云. 2008. EBSD技术在岩石组构分析中的应用(多媒体文件)。

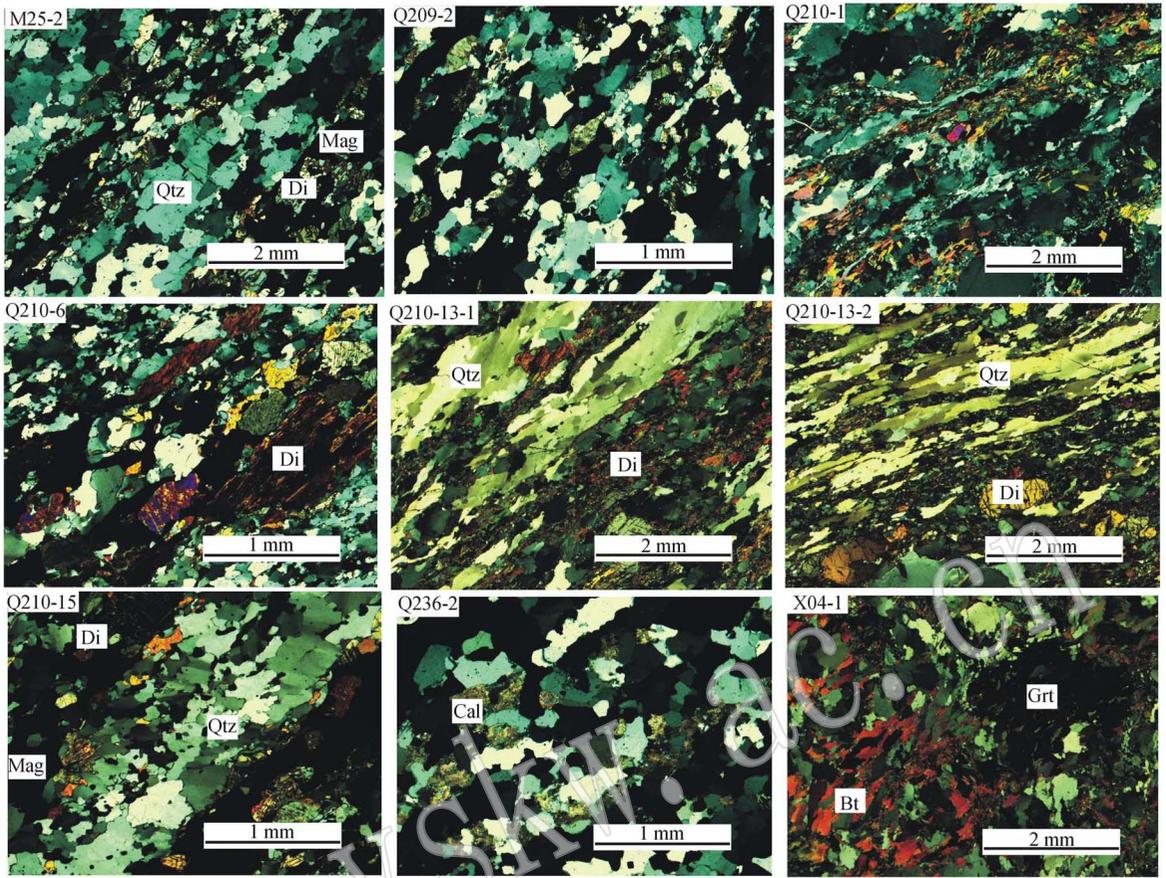


图 2 迁安铁矿矿区样品显微构造图(矿物缩写符号据沈其韩,2009)

Fig. 2 Microstructure of the samples in the Qian'an iron mine (abbreviations of minerals after Shen Qihan, 2009)

(7) M25-2: 原岩为麻粒岩,主要组成矿物为石英约 55%, 粒径 0.2~0.5 mm; 磁铁矿 20%~25%; 长石 3%~5%, 粒径 0.3~0.5 mm, 粒状或短柱状; 透辉石约 15%, 粒径 0.3~0.5 mm, 粒状或短柱状。其条带状分布类似于 Q210-15。

物为石英约 45%, 粒径 0.2~0.6 mm; 石榴子石约 25%, 粒径 1~2 mm; 黑云母约 25%, 粒径 0.2~0.5 mm; 含少量长石 5%~10%, 粒径 0.2~0.5 mm, 镜下可见斜长石的聚片双晶。

另外,实验的全部样品的采样位置、岩性、产状、切片及定向方位等见表 1。

(8) X04-1: 黑云石榴石石英片岩,主要组成矿

表 1 实验样品特征一览表

Table 1 Characteristics of tested samples

序号	样品号	采样地点	岩性	磁铁矿含量	片麻理产状	定向面产状	切片面	切片线指向
1	Q209-2	马兰庄-白马山铁矿	条带状 含磁铁矿石英岩	约 25%	50°/NW48°	50°/NW48°(下)	230°∠90°	140°∠-42°
2	Q210-1		石榴石片麻岩	<5%	40°/NW80°	40°/NW80°(下)	130°∠10°	40°∠0°
3	Q210-6		磁铁矿石英岩	约 35%	30°/NW72°	30°/NW72°	120°∠18°	120°∠0°
4	Q210-13	马兰庄-宫店子铁矿	变形麻粒岩	<5%	65°/SE85°	65°/SE85°	335°∠5°	245°∠0°
5	Q210-15		磁铁矿石英岩	约 35%	225°/NW45°	225°/NW45°	225°∠90°	315°∠45°
6	Q236-2	黄柏峪村 NW 垭口	条带状磁铁矿石英岩	25%~30%	350°/SW74°	350°/SW74°	80°∠16°	350°∠0°
7	M25-2	二马采坑	条带状 含磁铁矿石英岩	20%~25%	40°/NW62°	40°/NW62°	130°∠28°	40°∠0°
8	X04-1	杏山采坑	黑云石榴石石英片岩	<5%	290°/SW45°	290°/SW45°	20°∠45°	290°∠0°

注:磁铁矿的含量来自镜下对 8 个薄片的观察。

### 3.2 EBSD 测试说明

本次 EBSD 测试由中国地质大学(武汉)重点实验室工作人员徐海军等完成。共测试 8 个薄片,分别对石英和磁铁矿进行打点测试。通过 EBSD 系统的配套软件——HKL 公司开发的 Channel 5,将测试数据采用等面积下半球投影,得到矿物优选方位极点密度等面积图。限于空间,本文只给出了 Q210-6 样品的  $\langle 0001 \rangle$ 、 $\langle 1120 \rangle$ 、 $\langle 1011 \rangle$ 、 $\langle 1010 \rangle$ 、 $\langle 0111 \rangle$  这

5 个方位的石英极图,但由于分析时仅以 5 个图的首图作为分析对象,故只列出 8 个样品中石英的  $\langle 0001 \rangle$  轴的极图;以下图 3、图 4、图 5 分别为 5 个磁铁矿样品的极图、Q210-6 石英极图和本次测试的 8 个样品中的石英  $\langle 0001 \rangle$  轴极图。研究区岩石面理发育,线理发育稍差,样品定向采用定向构造系统: X 轴为平行面理和线理(定向线方向), Y 轴平行面理、垂直线理, Z 轴垂直面理。

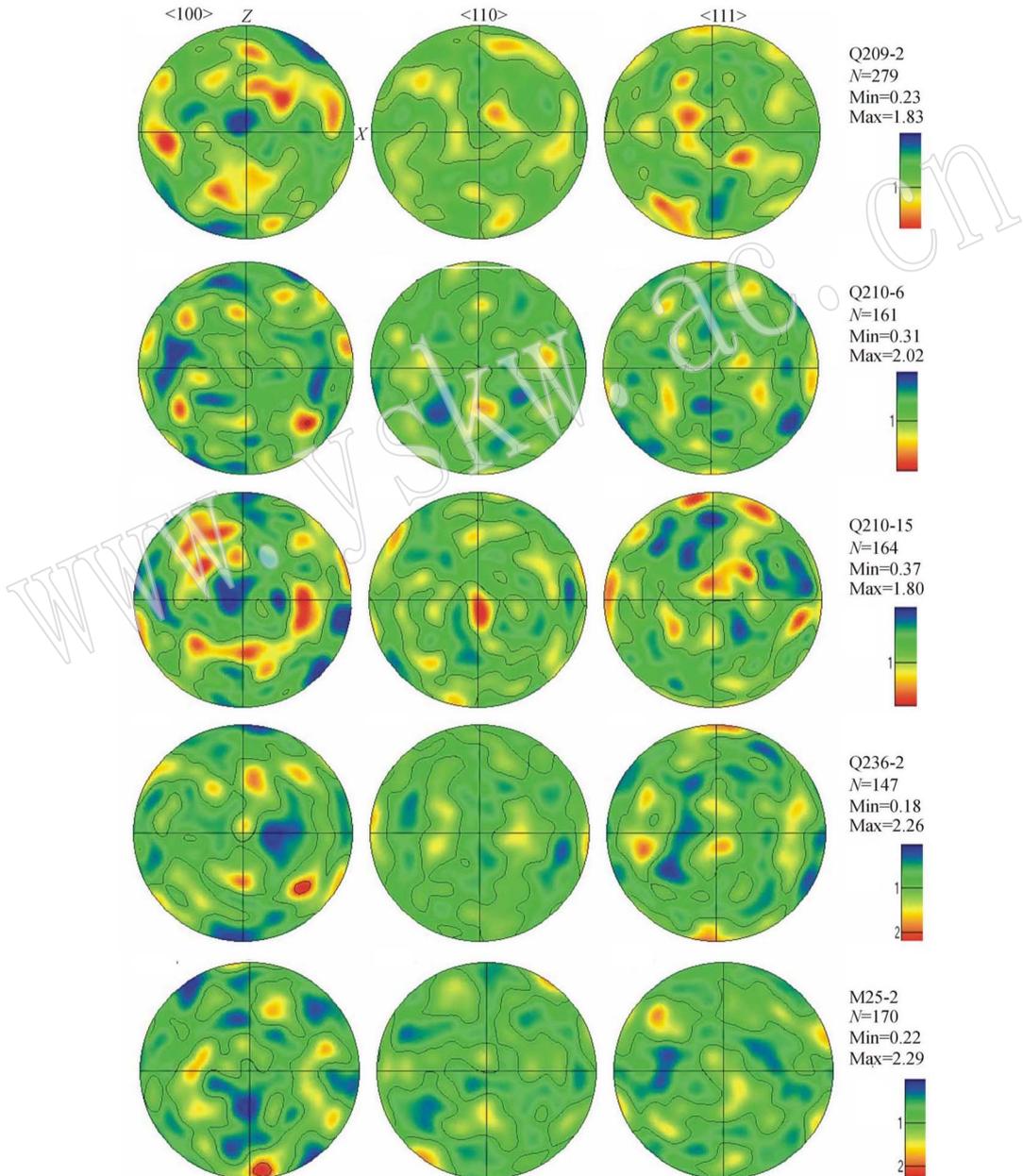


图 3 磁铁矿结晶学优选方位极点密度图等面积下半球投影(N 表示打点数)

Fig. 3 Stereographic projections (lower hemisphere equal area) of crystal preferred orientations(N: dot number)

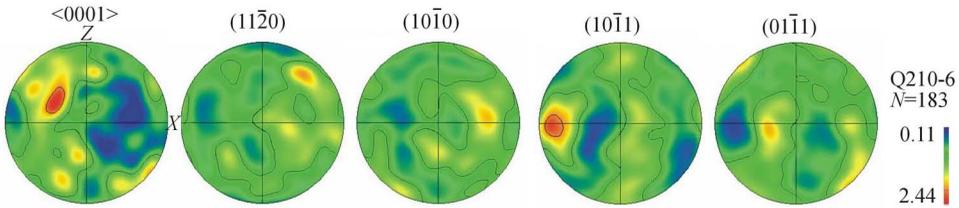


图 4 Q210-6 结晶学优选方位极点密度图等面积下半球投影

Fig. 4 Stereographic projections (lower hemisphere equal area) of crystal preferred orientations of Q210-6 determined by EBSD

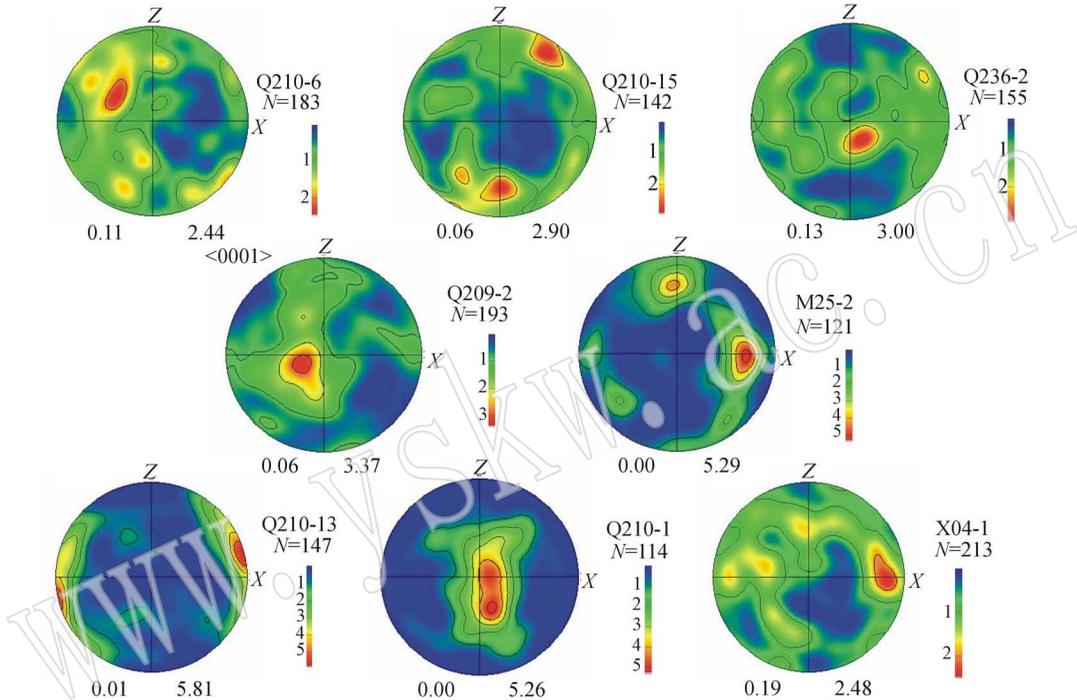


图 5 石英<0001>轴结晶学优选方位极点密度图等面积下半球投影

Fig. 5 Stereographic projections (lower hemisphere equal area) of crystal preferred orientations of quartz determined by EBSD

## 4 结果分析

### 4.1 磁铁矿极密图

对 5 个样品中的磁铁矿进行打点测试。对所测磁铁矿结晶学优选方位极点密度图来说，图件并没有显示明显的优选方位，4 个样品的最大极密值变化范围为 1.8~2.26(图 3)。图上显示磁铁矿<100>轴向的极点分布较均匀，最大极密值分布也较为分散，<111>、<110>轴的极点密度较之要弱，近于随机分布；而薄片的镜下观察显示石英与磁铁矿分别呈条带状分布，这说明在岩石变形时，磁铁矿发生了分带集中，即磁铁矿有变化。

综合来看：一方面磁铁矿有变化，另一方面 EBSD 显示未见明显的优选方位。结合矿物的结晶学特点，磁铁矿为等轴晶系，六八面体晶类，晶体常呈八面体和菱形十二面体。结合磁铁矿的晶体结构和形态分析，本文推测产生该结果的原因应该是磁铁矿在受力变形产生分带集中时依靠粒间滑动而非颗粒自身旋转来平衡所受外力，故其内部晶体颗粒不会表现出某个方向上的优选。

### 4.2 石英极密图

由于石英(一般指的是低温石英)属三方晶系，光轴<0001>为 Z 轴方向，光轴<0001>组构图与(1120)极图、<0001>与(1010)极图呈法线关系，而(1120)面与(1010)面之间的夹角为 30°(图 4)。

事实上,虽然 3 个方位的等值线图图形有差异,但它们之间是相互一致的,反映的是岩片中矿物优选方位的同一个特点,故本文只将 Q210-6 的 5 个极图展现于图 4,而图 5 则综合截取了 8 个薄片中的  $\langle 0001 \rangle$  轴的极图,本文将仅对该轴极密图做分析和解释。

#### 4.2.1 石英极密图类型及机制

根据石英光轴与岩组坐标轴的相对位置,前人将石英的方位图划分为以下 8 种主要类型(郑伯让等,1989):①极密 I 型:与岩组坐标轴  $a$  重合;②极密 II 型:在  $ac$  面内,在  $a$  轴两侧各约  $42^\circ$  的两个极密;③极密 III 型:在  $bc$  面内,在  $b$  轴两侧各约  $38^\circ$  的两个极密;④极密 IV 型:数个极密,沿以  $b$  轴为环带约轴约  $70^\circ$  的小圆分布,但并不一定连续为环带;⑤极密 V 型:与岩组坐标轴  $c$  重合;⑥极密 VI 型:数个极密,沿以  $b$  轴为环带约轴约  $50^\circ$  的小圆分布,但并不一定连续为环带,部分研究者认为 IV 型极密与 VI 型极密相伴产生,属同一成因,不宜再分;⑦极密 VII 型:在  $ab$  面内,在  $b$  轴两侧各约  $50^\circ$  的两个极密;⑧极密 VIII 型:与岩组轴  $b$  轴重合。

对于上述 8 种类型的解释,前人也提出了相关的看法:如将石英的优选方位认为是粒内运动结果的平移滑动解说(郑伯让等,1989),根据石英的晶体结构提出的针状破裂假说(Griggs *et al.*, 1960; Sander, 1930),等等,但是这些假说将问题简单化了,并带有很大的臆测性,存在着诸多缺点与不足。事实上,综合这 8 种类型来看,其分类可以简化为两种:点极密和环带极密。上述类型中除了极密 IV 型和极密 VI 型外,其他均为点极密型。本文的极密类型则是按照点与环带极密来分析。

#### 4.2.2 石英极密图特征

本文图 5 中各个样品的石英极密图特征如下:

Q210-6 极图显示近于平行于  $Z$  轴的环带,环带上在靠近  $S$  面处有密度较大的极值分布,最大极密值为  $2.44\%$ ; Q210-15 极图显示为两个圆环带的复合,一个为近于平行垂直面理面的大圆环,另一个与  $Z$  轴呈大角度相交,在环带的靠近  $Z$  轴处有两个极密点出现,最大极密值为  $2.9\%$ ; Q236-2 极图显示为一个近于平行于面理面的带状,另有一个不是很清楚的近于垂直面里面的大圆环,在  $XZ$  之间有极值点出现,最大极密值为  $3\%$ ; Q209-2 极图显示为一个不完整的大圆,在环带上位于临近  $X$  和  $Z$  轴处有最大极值点出现,形成点极密,最大极密值为  $3.37\%$ ;

M25-2 极图显示为与  $Z$  轴小角度相交的环带,在环带靠近  $X$  轴和  $Z$  轴处形成明显的点极密,最大极密值为  $5.29\%$ ; Q210-13 极图显示在临近面理方向出现点极密,最大极密值为  $5.81\%$ ; Q210-1 极图显示为沿  $Z$  方向略有拉长的环带,其上于靠近  $Y$  轴处有两个密度大的区域,形成点极密,最大极密值为  $5.25\%$ ; X04-1 极图显示为两个圆环带的复合,在两个圆环带上显示 3 个较高的极密值,均位于面理面上,最大极密值为  $2.48\%$ 。

#### 4.2.3 石英极密图特征分析

从上述石英极密图特点分析 8 个图件总的可以分为点极密和环带极密两种类型,其中 Q210-1、Q210-13 和 M25-2 为高值点极密,其余为环带+弱点极密。

在点极密与变形运动学坐标轴的关系上看,8 个样品中有 6 个样品点极密的极大极值点均出现在临近面理面处(与面理小或微角度相交),反映石英光轴优选取向表现为近于平行面理。这是中高温石英变形组构类型。M25-2 样品表现为两个点极密,分别与运动学  $X$  轴和  $Z$  轴接近,说明该样品同时存在中高温和中低温两种类型组构。Q210-15 样品表现为弱环带中的弱点极密,点极密位置与运动学  $Z$  轴接近,为中低温组构类型(徐海军,2008)。

##### (1) 石英极密图特点与岩性的关系

8 个测试样品可分为磁铁石英岩、片麻岩和麻粒岩三类岩性,磁铁石英岩包括 Q209-2、Q210-6、Q210-15、Q236-2 和 M25-2,其中 Q209-2 和 M25-2 为含磁铁石英岩,磁铁矿含量分别为  $25\%$  和  $20\% \sim 25\%$ 。片麻岩包括 Q210-1 和 X04-1,而麻粒岩只有 Q210-13。结合岩性类型可以发现石英极密图特点与岩性存在一定的关系,麻粒岩(Q210-13)、片麻岩(Q210-1)和磁铁矿含量较低的含磁铁石英岩(Q209-2 和 M25-2)石英组构图普遍表现为高值点极密,极值分别达到  $5.81\%$ 、 $5.25\%$ 、 $3.37\%$  和  $5.29\%$ 。仅有个别样品的片麻岩(X04-1)为低极密。相反磁铁矿含量高的磁铁石英岩(Q210-6、Q210-15 和 Q236-2)均表现为低极密,极值分别为  $2.44\%$ 、 $2.9\%$  和  $3.0\%$ 。

造成上述不同岩性的石英组构图极值大小不同的原因可能是不同岩性发生构造变形的机制有差异。变形麻粒岩、片麻岩的主要矿物为石英和长石,在变形过程中,应变主要由石英来承担,因而石英组构明显。而磁铁石英岩中主要矿物为石英和磁铁

矿,由于磁铁矿性脆,同时又是属于等轴晶系,并以各向等长的八面体为最常见,因此在变形过程中,可能很容易发生粒间滑动,应变很可能主要发生在磁铁矿条带内,因而石英组构不太明显。对于磁铁矿含量不太高的含磁铁矿石英岩,则由于磁铁矿含量低,不能承担太多的应变量,故其中的石英还需要承担较大的应变,因而石英组构仍然明显。

#### (2) 石英组构优选取向与微观变形特点的关系

结合前期镜下观察发现,麻粒岩、片麻岩和磁铁矿含量较低的含磁铁矿石英岩中的石英颗粒微观变形背景明显,可见明显波状消光,或者有一定的拉长(图2),这与石英组构优选取向明显相一致。而磁铁矿石英岩类薄片石英为等粒状或是粒度均匀,少见或是未见波状消光,在极图上表现为极密或环带较弱,两者吻合。事实上,石英的微观变形差异可能与岩性差异所导致的应变机制不同有关。

#### 4.2.4 石英组构特点反映的构造变形条件分析

从石英组构特点能够反映本区岩石的构造变形的条件,按照石英组构类型和活动滑移系与变形温压条件的关系(稽少丞,1988;Hirth and Tullis,1992;Heidelbach *et al.*,2000;徐海军,2008)在韧性变形过程中,在中低温条件(250~350℃)下,主要通过底面(0001)⟨1120⟩位错滑移系蠕变;在中温条件(350~450℃)下,主要通过柱面(1010)⟨1210⟩位错滑移系蠕变;在中高温条件(450~550℃)下,主要通过柱面(1010)⟨0001⟩位错滑移系蠕变,而在高温条件(>600℃)下,则主要通过快速重结晶和恢复过程变形。本区的石英光轴组构图以平行于面理或与面理小角度相交为主,代表石英的变形滑移系主要为柱面(1010)⟨1210⟩和(1010)⟨0001⟩位错滑移系,反映出构造变形时主要为中温-中高温的变形温度条件。少量光轴组构图点极密与运动学Z轴接近,代表石英的变形少量为底面(0001)⟨1120⟩位错滑移系,反映出构造变形有部分后期中低温变形的叠加。

另外值得一提的是,在变形研究领域,变形分解这一概念对解释地壳熔体在中下地壳的迁移有着重要意义。在部分熔融程度较高的区域(>10%),浅色体相互连接而成网结状构造,熔融体(浅色体)表现为弱相而承载大部分的应变,导致应变的集中和局部化。相反地,在部分熔融程度较低的区域(<5%),浅色体孤立地出现,应变主要由机械强度高的固态基质来承担(曾令森等,2004)。这种过程与韧

性剪切变形的样式相似(曾令森等,2008)。在固相岩石中,由于不同矿物(如石英、长石、石榴石)之间的力学强度和发生韧性剪切变形的条件不一样,也可发生变形分解的现象,这与文中现象(浅色的变形石英与机械强度高的磁铁矿)相类似。

## 5 结论

将 EBSD 技术应用于我国大型沉积变质型铁矿——迁安铁矿区的岩石样品组构分析中,并得到较好的结果:片麻岩和麻粒岩中,石英光轴方向可以与手标本的面理方向基本一致,与石英镜下的拉长方向、波状消光方向一致或是小角度相交,而含磁铁矿较多的磁铁矿石英岩则未有该现象的出现;石英的滑移系主要为柱面(1010)⟨1210⟩和(1010)⟨0001⟩位错滑移系,反映出构造变形时主要为中温-中高温的变形温度条件,同时存在少量的低温环境。

致谢 实验得到中国地质大学(武汉)徐海军老师、彭松柏老师的大力帮助与支持,在此向他们表示衷心的感谢!

## References

- Cao Shuyun and Liu Junlai. 2006. Modern Techniques for the analysis of rock microstructure: EBSD and its application [J]. *Advances in Earth Science*, 21(10): 1091~1095 in Chinese with English abstract.
- Ding Wenjun, Chen Zhengle, Chen Bailin, *et al.* 2009. Geochemical characters of band iron formations from Xingshan iron deposit in Qian'an area, Hebei Province: implication for their origin [J]. *Journal of Geomechanics*, 15(4): 363~373.
- Griggs D T, Turner F J and Heard H C. 1960. Deformation of rocks at 500 to 800 m rock deformation [J]. *Griggs and Handinet.*, *Geol. Soc. Am. Mem.*, 79: 39~104.
- Heidelbach F, Kunze K and Wenk H R. 2000. Texture analysis of a recrystallized quartzite using electron diffraction in the scanning electron microscope [J]. *Journal of Structural Geology*, 22(1): 91~104.
- Hirth G and Tullis J. 1992. Dislocation creep regimes in quartz aggregates [J]. *Journal of Structural Geology*, 14(2): 145~159.
- Ji Shaocheng. 1988. Tectonical implication of partial melting: an experimental study of deformation mechanism transition [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 4: 347~356 (in Chinese).
- Lan Yuqi, Shi Xingming, Li Zhande, *et al.* 1990. Metamorphic geology in archaean, Qian'an, East Hebei [M]. President of the Jilin Technology and Science Publishing House (in Chinese).
- Liu D Y, Shen Q H, Zhang Z Q, *et al.* 1990. Archean crustal evolution in China: U-Pb Geochronology of the Qianxi Complex [J]. *Precam-*

- brian Res. ,48 :223~244.
- Liu Qing. 2005. EBSD technique and its application in materials science [ J ]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis ,10( 4 ): 205~210( in Chinese with English abstract ).
- Liu Yongxiang. 1990. A discussion on characteristics and origin of the spinel-olivine-marble in the Southren Part of the iron Ore Zone , Qian 'an , Hebei Provinc[ J ]. Jilin Geology , 2 : 58~64( in Chinese with English abstract ).
- Qian Xianglin , Cui Wenyuan , Wang Shiqi , *et al.* 1985. Iron Ore Geology of Eastern Hebei in Precambriar[ M ]. Hebei Science and Technology Press( in Chinese ).
- Qiao Guangsheng , Wang Kaiyi , Guo Qifeng , *et al.* 1987. The measure of Sm-Nd isotope geochronolog in Early Archaean , East Hebe[ J ]. Geological Sciences , ( 1 ): 86~92( in Chinese with English abstract ).
- Sander B. 1930. Gefugekunde der Gestein[ J ]. Springer , Berlin , Vienna.
- Shen Qihan. 2009. The recommendation of a systematic list of mineral abbreviations[ J ]. Acta Petrologica et Mineralogica , 5( 28 ): 495~500( in Chinese with English abstract ).
- Wen Jianlin. 1984. Construction chatacteristics of oringinal rock formation ( of metamorphic rock ) , Qian 'an iron or[ J ]. Journal of Hebei College of Geology , 3 : 46~56( in Chinese ).
- Wu Jiashan , Geng Yuansheng , Shen Qihan , *et al.* 1998. Archean Geological Characteristics and Tectonic Evolution of China-Korea Paleo-continent [ M ]. Beijing : Geological Publishing House , 1~212( in Chinese ).
- Xie Kunyi. 1983. The Discussion of original appearance of volcano-sedimentary iron ore and hollow groove[ J ]. Journal of Changchun College of Geology , 4( 2 ): 9~41( in Chinese ).
- Xu Haijun. 2008. Petrofabric characters of ultrahigh pressure eclogite and gneiss and their relations with the seismic anisotropies of ductile shear zones : A case study from the 0~2 000 m mainhole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project[ D ]. China University of Geosciences :15~34( in Chinese ).
- Xu Haijun , Jin Shuyan and Zheng Borang. 2007. New technique of petrofabric : Electron Backscatter Diffraction( EBSD )[ J ]. Geoscience , 21( 2 ): 213~225( in Chinese with English abstract ).
- Yang Ping. 2007. Electron Backscatter Diffraction and its Application [ M ]. China Metallurgical Industry Press , 5( in Chinese ).
- Yin Qingzhu. 1988. Petrogenesis , geochemistry and isotope geochronolog of charnockites from Shuichang Iron Ore , Qian 'an , Hebei. A dissertation-for the degree of master of geology[ D ]. Chinese Academy of Geological Science( in Chinese ).
- Zeng Lingsen , Gao Li 'e , Jason B , *et al.* 2008. Progressive partial melting of metapelite and its tectonophysical effects[ J ]. Geological Bulletin of China , 27( 12 ): 1 992~2 000( in Chinese with English abstract ).
- Zeng Lingsen , Li Haibing , Xu Zhiqin , *et al.* 2004. Limited of leucosome in a migmatite and effects of progressive partial melting on strain partitioning[ J ]. Acta Geologica Sinica , 6( 78 ): 752~757( in Chinese with English abstract ).
- Zheng Borang and Jin Shuyan. 1989. Petrotectonics[ M ]. China University of Geosciences Press , 79~80( in Chinese ).
- Zheng Min , Yu Qinfan and Tan Chengze. 1993. The analysis of magnetic fabric of rocks from Gongdianzi Fold of Qian 'an Couty , Hebei [ J ]. Seismology and Geology , 15( 2 ): 167~173( in Chinese with English abstract ).

## 附中文参考文献

- 曹淑云 , 刘俊来. 2006. 岩石显微构造分析现代技术-EBSD 技术及应用[ J ]. 地球科学进展 , 21( 10 ): 1 091~1 095.
- 丁文君 , 陈正乐 , 陈柏林 , 等. 2009. 河北迁安杏山铁矿床地球化学特征及其对成矿物质来源的指示[ J ]. 地质力学学报 , 15( 4 ): 363~373.
- 稽少丞. 1988. 部分熔融的构造地质意义 : 变形机制转变的实验研究 [ J ]. 地质科学 , 4 : 347~356.
- 兰玉琦 , 施性明 , 李占德 , 等. 1990. 冀东迁安太古代变质地质[ M ]. 吉林科学技术出版社.
- 刘庆. 2005. 电子背散射衍射技术在材料学中的应用[ J ]. 中国体视学与图像分析 , 10( 4 ): 205~210.
- 刘永祥. 1990. 河北迁安铁矿带南部尖晶石橄榄大理岩的特征及成因探讨[ J ]. 吉林地质 , 2 : 58~64.
- 钱祥麟 , 崔文元 , 王时麒 , 等. 1985. 冀东前寒武纪铁矿地质[ M ]. 河北科学技术出版社.
- 乔广生 , 王凯怡 , 郭起凤 , 等. 1987. 冀东早太古代岩石 Sm-Nd 同位素年龄测定[ J ]. 地质科学 , ( 1 ): 86~92.
- 沈其韩. 2009. 推荐一个系统的矿物缩写表[ J ]. 岩石矿物学杂志 , 5( 28 ): 495~500.
- 温建林. 1984. 迁安铁矿变质岩原岩建造特征[ J ]. 河北地质学院学报 , 3 : 46~56.
- 伍家善 , 耿元生 , 沈其韩 , 等. 1998. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化[ M ]. 北京 : 地质出版社 , 1~212.
- 谢坤一. 1983. 试论陆核凹沟与火山沉积铁矿的原始面貌[ J ]. 长春地质学院学报 , 4( 2 ): 9~41.
- 徐海军. 2008. 超高压榴辉岩和片麻岩的显微构造特征及其与韧性剪切带地震波各向异性的关系 : 以中国大陆科学钻探( CCSD ) 注孔 0~2 000 m 岩心的研究为例[ D ]. 中国地质大学 , 15~34.
- 徐海军 , 金淑燕 , 郑伯让. 2007. 岩石组构学研究的最新技术——电子背散射衍射( EBSD )[ J ]. 现代地质 , 21( 2 ): 213~225.
- 杨平. 2007. 电子背散射衍射技术及其应用[ M ]. 冶金工业出版社 , 5.
- 尹庆柱. 1988. 河北迁安水厂铁矿紫苏花岗岩的岩石学、地球化学、同位素地质年代学研究[ D ]. 中国地质科学院.
- 曾令森 , 高利娥 , Jason B , 等. 2008. 变泥质岩递进部分熔融作用的构造物理学效应[ J ]. 地质通报 , 27( 12 ): 1 992~2 000.
- 曾令森 , 李海兵 , 许志琴 , 等. 2004. 混合岩中浅色体的有限迁移及其对变形分解的影响[ J ]. 地质学报 , 78( 7 ): 752~757.
- 郑伯让 , 金淑燕. 1989. 构造岩组学[ M ]. 中国地质大学出版社 , 79~80.
- 郑敏 , 余钦范 , 谭承泽. 1993. 河北迁安官店子褶皱中岩石的磁组构分析[ J ]. 地震地质 , 15( 2 ): 167~173.