

胶东大磨曲家金矿床岩石磁组构、构造变形与金矿化

江少卿^{1,2,3}, 郝梓国^{2,3}, 高帮飞⁴, 周应华⁵

JIANG Shao-qing^{1,2,3}, HAO Zi-guo^{2,3}, GAO Bang-fei⁴, ZHOU Ying-hua⁵

1. 中铝矿产资源有限公司, 北京 100082;

2. 中国地质科学院, 北京 100037;

3. 中国地质大学/地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

4. 中铁资源地质勘查有限公司, 北京 100039;

5. 中国有色矿业集团公司, 北京 100029

1. Chinalco Resources Corporation, Beijing 100082, China;

2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

3. State Key Laboratory of Geological Process and Mineral Resources/China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

4. China Railway Resources Group Co., LTD, Beijing 100039, China;

5. China Nonferrous Metal Mining (Group) Co., LTD., Beijing 100029, China

摘要:在胶东地区招远-平度断裂带上的大磨曲家金矿区选取了典型的构造区域进行岩石磁组构研究。沿着断裂带在不同构造部位的 36 个采样点钻取了 112 个定向岩心样品, 所有样品均沿勘探线布置。磁组构研究显示, 研究区以弱磁性岩石为主, 总体上, 胶东群变质岩的磁化率值较高, 而玲珑黑云母花岗岩的磁化率值较低, 尤以碎裂程度高的强蚀变岩的磁化率值最低; 磁化率各向异性方位主要为 NE 向挤压, 磁组构所指示的构造应力场与大磨曲家矿区的区域挤压应力方向是相同的; 对具不同程度矿化的 81 线的 Au 含量与 80 线磁组构各向异性度(P 值)进行对比研究发现, P 值与金品位呈负相关关系; 弱矿化糜棱岩中的金矿化在磁面理发育的岩石中较为发育, 成矿晚期, Au 元素含量随着岩石磁性的减弱而增加, 特别是在强应变后弛豫阶段矿液充填于相对张性的石英脉中 Au 含量最高。

关键词:磁组构; 金品位; 构造应力场; 大磨曲家金矿床

中图分类号: P618.51; P631.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2011)09-1418-11

Jiang S Q, Hao Z G, Gao B F, Zhou Y H. Rock magnetic fabric, structural deformation and mineralization of the Damoqujia gold deposit, Shandong Province. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(9): 1418-1428

Abstract: In order to study the Damoqujia gold deposit located in the Zhaoyuan - Pingdu fault zone in eastern Shandong Province, the authors selected an area with typical structural characteristics to conduct magnetic fabric investigation. 112 core samples with direction signals were collected at 36 sampling points in different structural parts of the fault zone, and all samples were arranged along the exploration lines. Magnetic fabric studies show that the study area is dominated generally by weakly magnetic rocks. Magnetic susceptibility has a higher value in metamorphic rocks of the Jiaodong Group; nevertheless, the magnetic susceptibility seems to be lower in biotite granite, especially in strongly altered rocks subjected to high extent of fragmentation. Magnetic anisotropy shows that the rocks extruded in NE direction, and the regional compressive stress direction of the tectonic stress field indicated by the magnetic fabrics is

收稿日期: 2011-03-17; 修订日期: 2011-07-25

资助项目: 地质过程与矿产资源国家重点实验室开放课题《河北承德地区钒钛磁铁矿成矿作用研究》(编号: GPMR0738), 科技部、财政部中央级公益性科研院所基本科研业务费项目《地科院地质科技期刊数据库建设》(编号: Ywf060705) 和《网络环境下的地学学术交流平台建设》(编号: Ywf1003)

作者简介: 江少卿(1983-), 男, 硕士, 工程师, 从事矿床学研究。E-mail: jiangshaoqing83@163.com

通讯作者: 郝梓国(1957-), 男, 博士, 研究员, 从事岩石学研究。E-mail: haoziguo@126.com

similar to that of the Damoqujia ore deposit. A comparison between the magnetic fabric anisotropy (P value) along No. 80–81 lines and the Au content of rocks subjected to different degrees of mineralization reveals that the P value is negatively correlated to gold grades. Gold mineralization of weakly mineralized mylonite is comparatively hosted in magnetic–foliation–developed rocks. At the late stage of mineralization, gold content changed negatively with the values of rock magnetism; especially the relative tension quartz vein, which had the highest gold content due to the filling of ore fluids during the relaxation phase of the strong strain area.

Key words: magnetic fabric; gold grade; tectonic stress field; Damoqujia gold deposit

大陆地壳岩石的磁化率各向异性与沉积作用、岩浆流动、构造运动(如水流向、断裂、褶皱和构造应力)、变质作用和矿物蚀变引起的岩石内磁性矿物的定向重结晶、定向排列、韧性变形等密切相关^[1–4],利用岩石磁化率各向异性特征蕴涵的丰富地质和地球物理信息^[5–9],有助于了解这些地质作用的过程。大磨曲家金矿床地处胶东金矿区,胶东金矿区受北东向断裂控制明显,三山岛断裂带、焦家断裂带和招平断裂带是胶东矿集区中的重要成矿带。其中,在长近 100km 的招平构造–成矿带内已发现众多大型—超大型和中型金矿床,探明储量已超过 500t,而招平断裂严格控制了大磨曲家金矿床的形成、演化与总体展布^[10–15]。因此,深入探讨招平断裂带多期活动、古构造应力场演化及其成矿效应,对正确认识大磨曲家金矿床的形成过程及演化机理具有重要指导意义。Graham^[16]首先提出磁组构可以作为研究构造地质的有效手段,Kligfield 等^[17]和 Borradaile 等^[18]则将其应用到岩石应变研究中。此后,磁化率各向异性技术就被运用到不同尺度形变地质体的研究中,以对其岩石应变和构造应力进行恢复研究。本文主要利用岩石磁化率各向异性进行岩石变形分析,并探讨其与热液蚀变、成矿作用的关系。

1 矿床地质背景

大磨曲家金矿位于招平断裂带北段,招平断裂带及其次级断裂为主要的控矿构造。招平断裂带在区内走向 NE30~40°、倾向 SE、倾角 31~45°,沿玲珑岩体与胶东岩群的接触带曲折延伸,纵贯矿区中部,宽约 20~240m。该断裂带严格控制着主矿脉 302 号脉的形态与规模。次级断裂在招平断裂上、下盘均有发育,走向 NE—NNE,倾向 SE、少数 NW,倾角 60~80°,主要控制区内 10、291、293、294、295、296、298、301、305、307 号脉的产出(图 1)。

区内含矿岩石建造主要为胶东岩群、玲珑型花岗岩和郭家岭型花岗岩。胶东岩群分布在矿区中部,为厚层状、斑点状斜长角闪岩、黑云变粒岩、黑云斜

长片麻岩。玲珑花岗岩分布于矿区西部,内部胶东岩群残留体较多,与变质岩呈渐变过渡接触,为金矿的主要赋矿岩体。郭家岭似斑状花岗闪长岩分布于矿区东部,与胶东岩群变质岩和玲珑花岗岩呈渐变接触^[19–20](图 1)。矿区内共发现含金矿脉 30 余条,主矿脉为 302 号脉。根据矿石的结构构造、矿物交代、矿物组合及共生关系可分为 4 个成矿阶段:黄铁矿–石英、石英–黄铁矿、多金属硫化物和碳酸盐阶段,其中石英–黄铁矿阶段发育,多金属硫化物阶段不发育。

2 磁组构样品和数据处理

本次研究的岩样取自大磨曲家金矿区,沿 70 勘探线至 112 勘探线共布设 36 个采样点,各采样点尽可能均匀分布(图 2)。在野外对每块岩样均用与古地磁研究相同的方法进行定向,并保证样品新鲜未风化和具有地质代表性。室内从每块岩样上沿不同方位切下不少于 3 个高 2.2cm、直径 2.5cm 的小圆柱体(共计 112 个),并磨制了相应的定向构造薄片。

岩石的磁化率及其各向异性测量在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室古地磁实验室进行。磁化率各向异性用捷克产的卡帕桥 HKB–1 型磁化率仪测量,其测量灵敏度最高为 5×10^{-8} SI,精度优于 10^{-7} SI。通过磁化率各向异性测量可以求得其椭球体 3 个主轴磁化率的大小、方向和总磁化率值。磁化率各向异性(AMS)所得的磁组构可以用一个磁化率量值椭球来表示,它的 3 个相互垂直的主轴($K_1 \geq K_2 \geq K_3$)分别为岩石的最大、中间和最小磁化率主轴。磁化率椭球的基本要素有磁线理($L = K_1/K_2$)和磁面理($F = K_2/K_3$),它们与岩石组构有着密切的关系^[21–23]。 K_m :平均磁化率(10^{-5} SI);磁线理 $L = K_1/K_2$;磁面理 $F = K_2/K_3$;形态参数 $T = (2\eta_2 - \eta_1 - \eta_3)/(\eta_1 - \eta_3)$;各向异性度: $P = \exp\{\sqrt{2 \times ((\eta_1 - \eta_m)^2 + (\eta_2 - \eta_m)^2 + (\eta_3 - \eta_m)^2)}\}$,其中 $\eta_1 = \ln K_1$, $\eta_2 = \ln K_2$, $\eta_3 = \ln K_3$, $\eta_m = (\eta_1 + \eta_2 + \eta_3)/3$ 。

同时,根据手标本和镜下鉴定特征对岩样进行了系统的构造–蚀变(–矿化)岩石组合分类,并选择

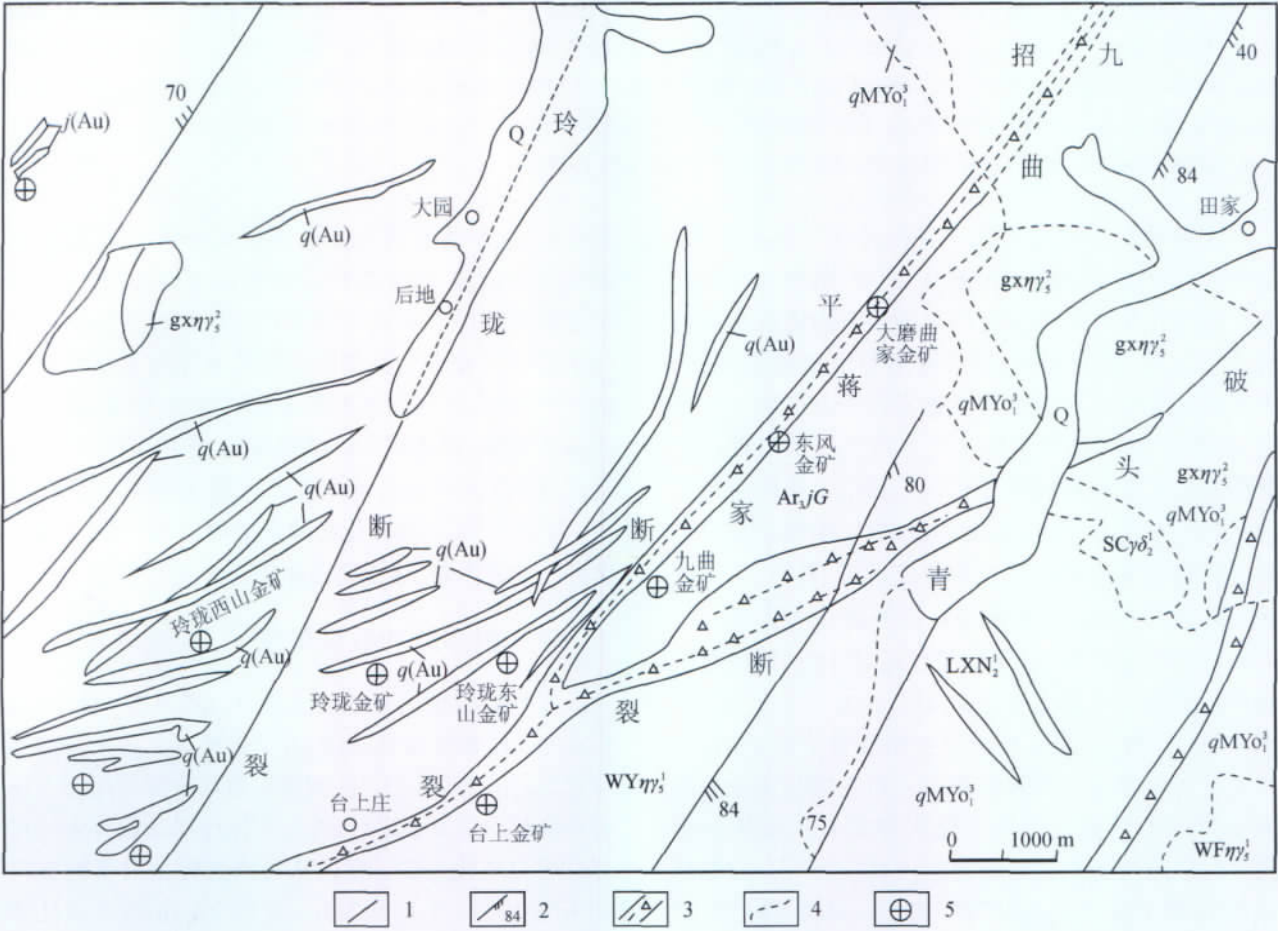


图 1 大磨曲家金矿床区域地质图①

Fig. 1 Regional geological map of the Damoqujia gold deposit

ArjG—郭格庄岩组;gxηγ₂—斑状中粒二长花岗岩;WYηγ₁—似斑状中粒二长花岗岩;WFηγ₁—中粗粒二长花岗岩;
SCγδ₂—磁山片麻状细粒花岗岩;qMYo₁—片麻状含黑云斜长片麻岩;LXN₂—斜长角闪岩;Q—第四系;
j(Au)—(含金)蚀变岩;q(Au)—含金石英脉;1—断裂;2—韧性剪切糜棱面理;3—破碎带;4—推测断层线;5—金矿床

具有代表性的样品进行了相应的显微构造观测、岩矿分析和应力-应变测量。

3 磁组构特征分析

3.1 磁化率特征

本次研究首先计算出每个采样点多个样品磁化率的算术平均值(K_m , 单位为 SI)(表 1)。整个研究区的平均磁化率值 $K_m=4.14\times 10^{-4}SI$ 。将磁化率表示为频率直方图(图 3)。研究区所有岩心的平均磁化率值大小均低于 $1.0\times 10^{-3}SI$ 。其中,22 个测点的平均磁化率值为 $10^{-5}SI$ 量级, 占有所有测点的 61.1%;11 个测点的平均磁化率值为 $10^{-4}SI$ 量级, 占有所有测点的 30.6%;3 个测点的平均磁化率值略大(2 个测点为

$10^{-3}SI$ 、1 个测点为 $10^{-2}SI$ 量级, 占有所有测点的 0.1%)。显示以弱磁性岩石为主。

整个研究区内磁化率值变化幅度较大, 存在一定的变化规律(表 1, 图 4)。各岩性磁化率的平均值由大到小的变化顺序为: 硅化碎裂花岗岩 $3.457\times 10^{-4}SI(1.14\times 10^{-4}\sim 9.1\times 10^{-4}SI)<$ 硅化糜棱岩化花岗岩 $3.505\times 10^{-4}SI(1.95\times 10^{-4}\sim 5.06\times 10^{-4}SI)<$ 糜棱岩化花岗岩 $3.79\times 10^{-4}SI<$ 绢英岩化碎裂花岗岩 $5.243\times 10^{-4}SI(1.9\times 10^{-4}\sim 13\times 10^{-4}SI)<$ 碎裂花岗岩 $18.18\times 10^{-4}SI(1.9\times 10^{-4}\sim 49.5\times 10^{-4}SI)<$ 石英脉体 $27.5\times 10^{-4}SI<$ 硅化花岗岩 $60.13\times 10^{-4}SI(1.57\times 10^{-4}\sim 227\times 10^{-4}SI)<$ 钾化糜棱岩化花岗岩 $11.73\times 10^{-4}SI(1.76\times 10^{-4}\sim 21.7\times 10^{-4}SI)<$ 黑云母花岗岩 $42.91\times 10^{-4}SI(2.91\times 10^{-4}\sim$

$82.9 \times 10^{-4} \text{SI}$) < 钾化花岗岩 $59.7 \times 10^{-4} \text{SI}$ ($28.7 \times 10^{-4} \sim 90.7 \times 10^{-4} \text{SI}$) < 斜长角闪片麻岩 $658.5 \times 10^{-4} \text{SI}$ ($67 \times 10^{-4} \sim 1250 \times 10^{-4} \text{SI}$)。其中,硅化碎裂花岗岩的磁化率最小,而磁化率最高值点位于胶东岩群变质岩内部,远离构造蚀变带,其磁化率值达 $1.25 \times 10^{-2} \text{SI}$ 。总体上,胶东岩群变质岩的磁化率值较高,而玲珑黑云母花岗岩的磁化率值较低,尤以碎裂程度高的强蚀变岩的磁化率值最低。这种变化趋势既与原岩中所含磁性矿物有关,也可能与岩石破碎、蚀变过程中的退磁作用有关。

3.2 磁化率各向异性特征

表 2 列出了 36 个采样点磁化率各向异性参数测量值,表 3 列出了各点的磁化率各向异性参数平均值。岩体总体磁化率各向异性度 P 值较小,36 个测点的 P 平均值为 1.13,表明岩体的磁组构后期构造变形作用较明显。其中, P 值最大为 2.257(78 号勘探线 12G1 测点,斜长角闪片麻岩),最小为 1.014(94 号勘探线 11G1 测点,硅化碎裂花岗岩)。

研究表明, P 值较大的点表示构造形变比较强烈。把大磨曲家金矿床 P 值大于 1.2 的 8 个取样点(即 18G6、18G7、25G3、15G7、12G1、29G7、29G8 和 29G9)连结起来,可见其走向沿 $N60^\circ\text{E}$ 方向,与招平断裂带的走向一致,而且其空间分布大致与招平断裂带主裂面吻合(15G7 除外)(图 5)。

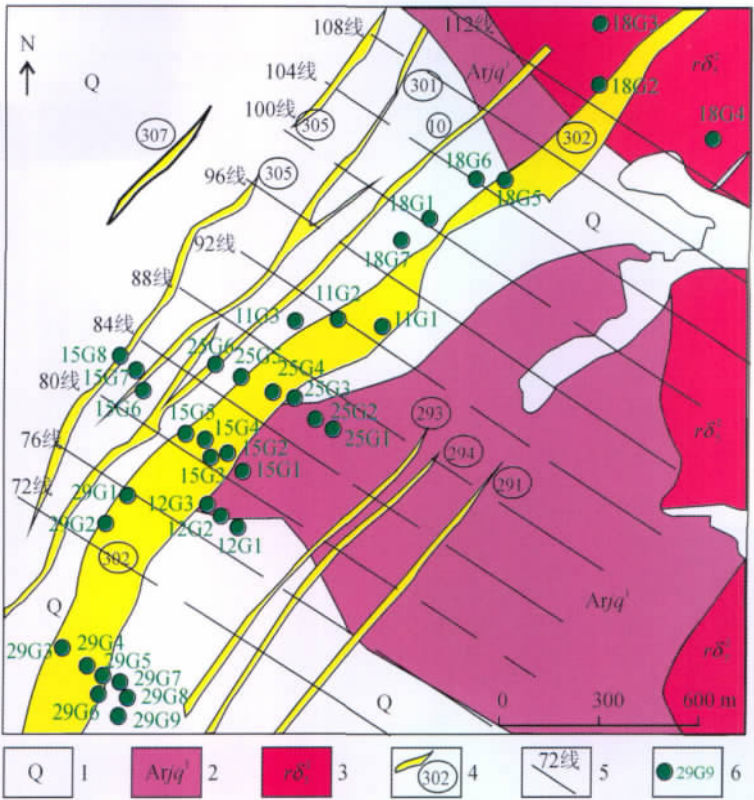


图 2 大磨曲家金矿区磁组构取样点分布

Fig. 2 Sampling points of magnetic fabrics in the Damoqujia gold deposit
1—第四系;2—胶东群变质岩;3—花岗闪长岩;4—黄铁绢英岩脉及编号;5—勘探线及编号;6—取样点及编号

根据磁化率各向异性方位资料分析了 36 个采样点的方位特征,指示出 K_1 和 K_3 单个测量值的大小。主要特征归纳如下:①21 个采样点内,单个值之间非常相近,可给出有效的地段平均值。②15 个采

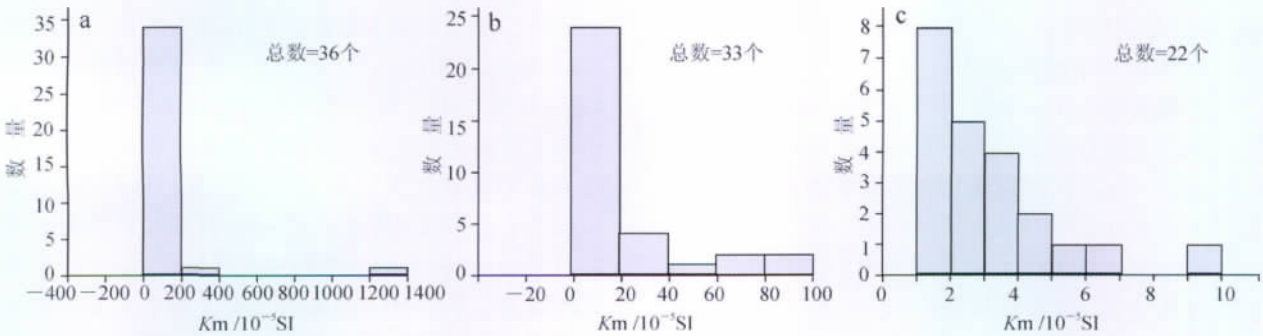


图 3 各取样点磁化率的频率直方图

Fig. 3 Frequency diagrams of magnetic susceptibilities in sampling points
a—全部取样点;b—剔除磁化率大于 $1 \times 10^{-3} \text{SI}$ 的点;c—剔除磁化率大于 $1 \times 10^{-3} \text{SI}$ 的点

表 1 各取样点的磁化率及其各向异性参数值

Table 1 Magnetic susceptibility of sampling points and their anisotropy parameters

采点号	岩性	Km/10 ⁻⁵ SI	L	F	P	采点号	岩性	Km/10 ⁻⁵ SI	L	F	P
15G1	A	2.76×10	1.013	1.006	1.019	15G7	E	2.87×10	1.079	1.139	1.24
15G2	A	3.07	1.012	1.036	1.049	29G9	E	9.07×10	1.079	1.118	1.206
15G4	A	3.41	1.015	1.034	1.049	12G3	F	1.76	1.032	1.04	1.073
18G1	A	1.57	1.04	1.059	1.102	29G3	F	2.17×10	1.092	1.077	1.175
18G6	A	6.47×10	1.151	1.138	1.311	18G5	G	1.9	1.037	1.081	1.12
18G7	A	2.27×100	1.077	1.231	1.326	15G3	G	3.15	1.017	1.03	1.048
25G6	A	2.68	1.035	1.029	1.064	25G1	G	6.5	1.016	1.009	1.025
29G8	A	1.51×100	1.085	1.216	1.321	29G5	G	4.01	1.022	1.051	1.073
15G5	B	1.95	1.034	1.042	1.078	29G6	G	1.30×10	1.05	1.042	1.095
15G6	B	5.06	1.064	1.057	1.125	29G7	G	2.9	1.091	1.107	1.204
11G1	C	9.1	1.008	1.007	1.014	29G2	H	3.79	1.027	1.017	1.044
11G2	C	2.86	1.015	1.037	1.052	18G4	I	2.75×10	1.11	1.046	1.161
18G2	C	4.72	1.004	1.062	1.066	25G2	J	1.9	1.018	1.02	1.038
18G3	C	1.42	1.084	1.1	1.192	25G3	J	4.95×10	1.128	1.118	1.264
25G5	C	1.5	1.043	1.038	1.083	25G4	J	2.64	1.008	1.022	1.03
29G4	C	1.14	1.038	1.052	1.092	29G1	J	1.87×10	1.029	1.05	1.08
11G3	D	8.29×10	1.039	1.124	1.168	12G1	K	1.25×1000	1.309	1.724	2.257
15G8	D	2.91	1.016	1.052	1.069	12G2	K	6.70×10	1.016	1.016	1.033

注:A—硅化花岗岩;B—硅化糜棱岩化花岗岩;C—硅化碎裂花岗岩;D—黑云母花岗岩;E—钾化花岗岩;F—钾化糜棱岩化花岗岩;G—绢英岩化碎裂花岗岩;H—糜棱岩化花岗岩;I—石英脉体;J—碎裂花岗岩;K—斜长角闪片麻岩

样点的单个磁线理趋向于分成成对的测量值，它们是由同一岩心的 2 个样品形成的。计算出了这些采样点的 2 组平均值，其中一组为每对测量值的平均值。③总体上,磁化率各向异性方位显示出 NE 向挤压的特征，而破碎程度高的强蚀变矿化带可显示 NE 向的拉张特征。

3.3 磁面理与磁线理特征

大磨曲家金矿床磁面理方向总体垂直于构造—蚀变带的延伸方向，但由 NE 向 SW 这种趋势逐渐模糊,在 84 号勘探线以南和 104 勘探线附近地段出现与构造带近于平行的现象。

磁线理大致平行于构造带的走向，而与磁面理近于垂直,但在 84 号勘探线以南和 104 勘探线附近地段其方向较为混乱。

将测区所有取样点 F/L 参数投入测区弗林图(图 6)中。其结果显示,大部分投点落在下半区,表明岩体的磁化率各向异性椭球以压扁为主。

4 讨 论

4.1 磁组构特征反映的构造变形

金矿化集中在应变较弱的区域内，强应变岩石中 Au 含量一般较低。金矿化表现出 2 个阶段的演化趋势。对于初期的金矿化，随着变形作用的加强 Au 含量有增加的趋势(趋势 1),说明了韧性变形对 Au 的萃取作用。根据强应变岩石的镜下观察,认为趋势 1 可能主要是通过压溶作用来实现的，这一阶段为金的成矿准备了物质条件。另一种趋势(趋势 2)代表了金矿化的后期阶段,Au 含量随着应变的减弱而增加,代表了韧性变形的弛豫阶段,是金矿体形成的阶段。具有开采价值的金矿体基本上表现为非常弱的应变。最大磁化率最高的岩石样品中 Au 含量较低(图 7-a、c)。金矿化随着岩石磁性的变化而具有 2 个变化趋势，在金矿化的初期阶段,Au 含量随着岩石磁性的加强而增加。一般来说,磁化率(K

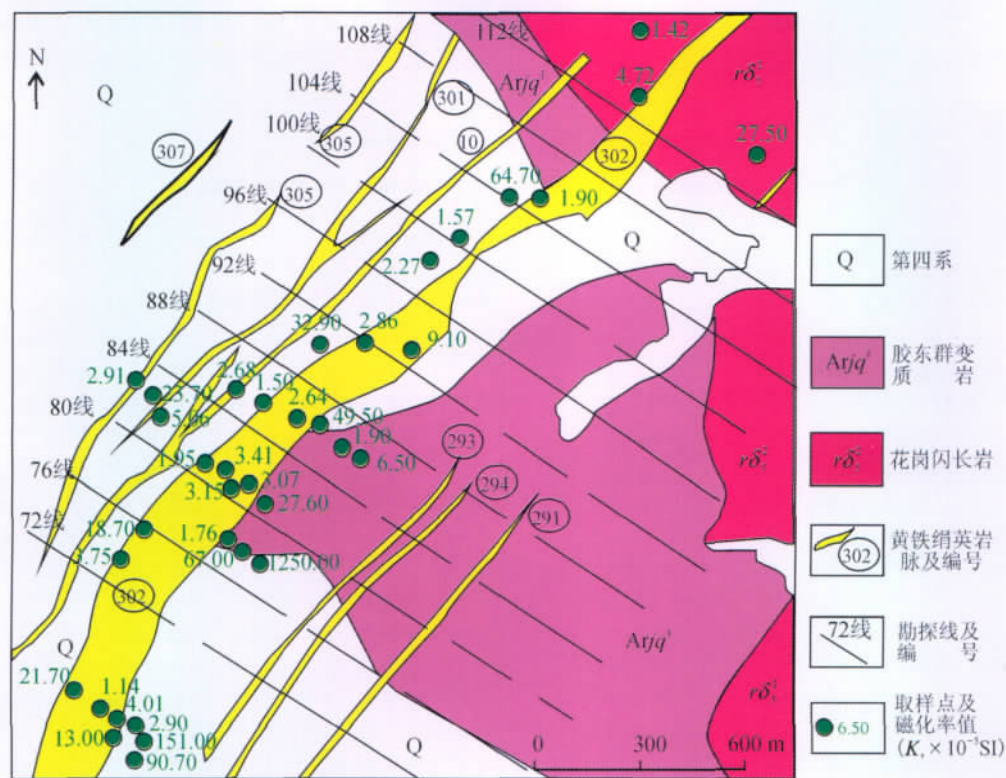


图 4 各取样点磁化率的算术平均值

Fig. 4 Arithmetic mean values of magnetic susceptibilities in sampling points

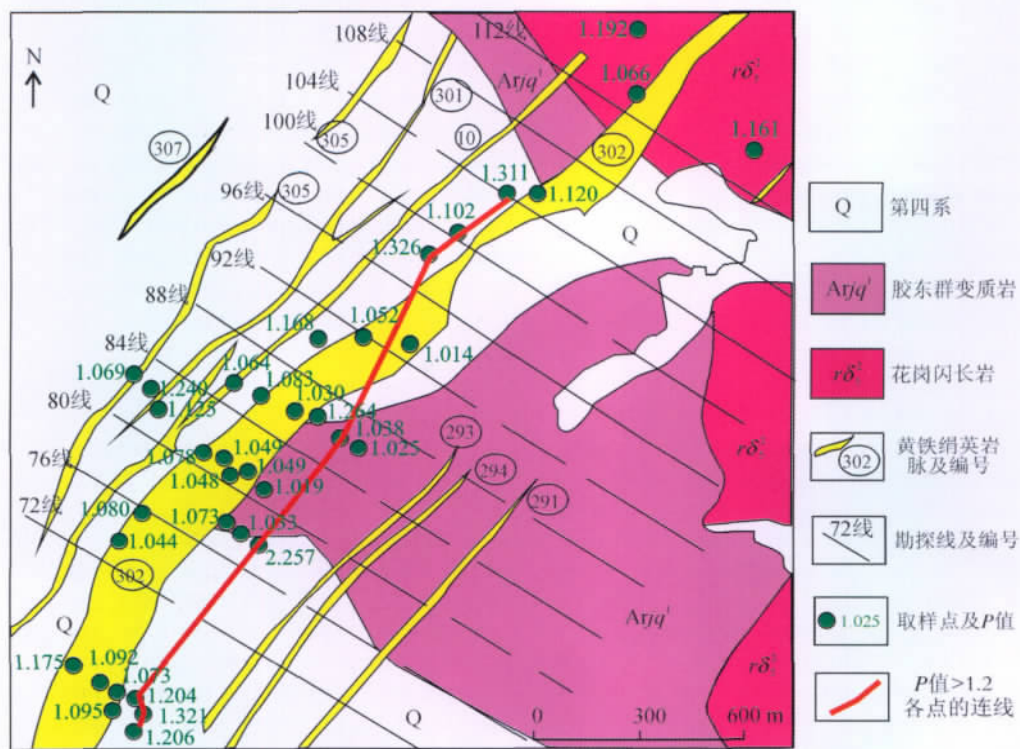


图 5 各取样点的 P 参数图解

Fig. 5 Diagram of P values in sampling points

值)说明了样品中磁性矿物的含量,而磁性矿物主要为黄铁矿类等,因此岩石中 Au 最初是与磁性矿物有关的。但是,在成矿的后期,Au 含量随着岩石磁性的减弱而增加,特别是在石英脉(磁化率有时为负值)中 Au 含量最高。由此可知,该金矿床中金矿体的分布与磁性矿物无关,而与石英的关系非常密切。

表 2 磁化率及其各向异性参数值
Table 2 Magnetic susceptibilities and their anisotropy parameters

样号	Km/10 ⁻⁸ SI	L	F	P	T	D _{K1}	I _{K1}	样号	Km/10 ⁻⁸ SI	L	F	P	T	D _{K1}	I _{K1}
11G1-1	9.34E-05	1.003	1.007	1.01	0.472	6.3	52.1	18G6-2	6.37E-04	1.176	1.204	1.415	0.068	150.1	4.5
11G1-2	8.90E-05	1.007	1.007	1.014	-0.044	283.7	40.5	18G6-3	1.24E-03	1.167	1.130	1.319	-0.115	149.5	2.3
11G1-3	9.06E-05	1.013	1.007	1.019	-0.294	297.9	24.9	18G6-4	4.25E-04	1.126	1.116	1.257	-0.038	147.9	6.5
11G2-1	1.65E-05	1.016	1.031	1.047	0.321	206.5	35.0	18G7-1	1.16E-03	1.038	1.209	1.255	0.67	299.1	13.1
11G2-2	3.00E-05	1.020	1.042	1.062	0.352	207.4	30.6	18G7-2	2.20E-03	1.08	1.224	1.322	0.449	317.7	16.2
11G2-3	3.94E-05	1.010	1.038	1.048	0.598	289.0	29.1	18G7-3	2.53E-03	1.097	1.237	1.357	0.394	321.8	18.5
11G3-1	2.49E-04	1.008	1.064	1.073	0.764	2.3	56.7	18G7-4	3.20E-03	1.091	1.254	1.369	0.444	325.1	8.6
11G3-2	1.37E-03	1.040	1.137	1.182	0.536	359.8	18.7	25G1-1	6.43E-05	1.021	1.007	1.028	-0.501	41.9	22.6
11G3-3	4.14E-04	1.046	1.152	1.205	0.521	183.0	13.8	25G1-2	6.57E-05	1.021	1.004	1.025	-0.698	228.9	3.3
11G3-4	1.28E-03	1.060	1.144	1.213	0.398	174.5	13.1	25G1-3	6.50E-05	1.006	1.017	1.023	0.488	332.6	3.5
12G1-1	1.25E-02	1.309	1.724	2.257	0.338	119.7	3.8	25G2-1	2.08E-05	1.014	1.034	1.049	0.406	326.1	50.2
12G2-1	6.97E-04	1.014	1.015	1.03	0.032	315.4	7.8	25G2-2	1.80E-05	1.017	1.016	1.032	-0.033	317.0	21.3
12G2-2	6.65E-04	1.016	1.017	1.033	0.033	318.8	2.0	25G2-3	1.76E-05	1.009	1.020	1.029	0.372	289.3	8.9
12G2-3	6.49E-04	1.019	1.017	1.036	-0.048	321.9	5.6	25G2-4	1.97E-05	1.031	1.009	1.04	-0.549	319.7	8.9
12G3-1	2.00E-05	1.032	1.026	1.058	-0.106	143.5	63.0	25G3-1	8.28E-04	1.171	1.161	1.359	-0.027	338.0	11.4
12G3-2	1.53E-05	1.032	1.053	1.087	0.237	237.3	84.2	25G3-2	5.87E-04	1.167	1.134	1.324	-0.103	335.6	14.5
15G1-1	3.22E-04	1.016	1.004	1.02	-0.637	128.2	17.4	25G3-3	6.88E-05	1.047	1.058	1.108	0.102	350.5	7.6
15G1-2	2.68E-04	1.008	1.015	1.023	0.287	122.1	23.7	25G4-1	3.47E-05	1.013	1.037	1.05	0.489	298.4	3.6
15G1-3	2.46E-04	1.015	1.001	1.017	-0.839	120.7	25.6	25G4-2	2.50E-05	1.008	1.017	1.026	0.341	29.7	61.2
15G1-4	2.67E-04	1.011	1.005	1.017	-0.349	124.1	12.8	25G4-3	1.94E-05	1.002	1.012	1.014	0.7	325.4	66.9
15G2-1	3.21E-05	1.019	1.056	1.077	0.486	242.7	2.8	25G5-1	1.23E-05	1.034	1.042	1.078	0.109	146.5	18.1
15G2-2	3.28E-05	1.005	1.028	1.033	0.722	243.5	16.8	25G5-2	1.80E-05	1.01	1.015	1.025	0.213	315.3	11.5
15G2-3	2.72E-05	1.012	1.025	1.037	0.36	266.6	16.9	25G5-3	1.48E-05	1.086	1.056	1.147	-0.206	294.3	41.9
15G3-1	1.03E-05	1.038	1.063	1.104	0.236	132.5	11.4	25G6-1	2.37E-05	1.069	1.020	1.09	-0.55	71.6	11.3
15G3-2	4.00E-05	1.010	1.012	1.022	0.127	130.0	2.1	25G6-2	2.71E-05	1.028	1.031	1.06	0.054	72.1	8.3
15G3-3	4.43E-05	1.002	1.015	1.017	0.787	357.3	15.5	25G6-3	2.48E-05	1.033	1.016	1.05	-0.34	77.8	21.5
15G4-1	3.26E-05	1.009	1.02	1.029	0.381	122.4	13.2	25G6-4	3.16E-05	1.009	1.048	1.057	0.671	73.3	27.2
15G4-2	3.77E-05	1.019	1.031	1.05	0.245	9.6	44.3	29G1-1	5.43E-05	1.046	1.013	1.06	-0.568	27.8	12.0
15G4-3	3.19E-05	1.017	1.05	1.068	0.484	115.9	14.4	29G1-2	1.55E-04	1.011	1.061	1.072	0.692	39.4	27.4
15G5-1	2.17E-05	1.041	1.039	1.082	-0.026	263.4	40.5	29G1-3	3.51E-04	1.03	1.075	1.107	0.414	141.7	32.6
15G5-2	1.73E-05	1.039	1.058	1.1	0.195	271.1	18.3	29G2-1	3.41E-05	1.008	1.015	1.023	0.27	111.3	59.2
15G5-3	1.96E-05	1.023	1.028	1.052	0.101	229.7	17.9	29G2-2	3.93E-05	1.016	1.025	1.042	0.206	88.0	46.3
15G6-1	6.07E-05	1.089	1.034	1.126	-0.432	357.9	20.7	29G2-3	4.02E-05	1.056	1.010	1.067	-0.681	228.1	58.9
15G6-2	4.61E-05	1.093	1.071	1.17	-0.127	167.4	0.8	29G3-1	3.08E-04	1.058	1.146	1.212	0.417	165.2	19.0
15G6-3	5.89E-05	1.050	1.061	1.114	0.091	301.0	89.1	29G3-2	2.59E-04	1.086	1.050	1.14	-0.259	170.5	2.6
15G6-4	3.66E-05	1.024	1.063	1.089	0.436	20.3	44.5	29G3-3	8.44E-05	1.132	1.035	1.172	-0.57	0.9	1.2
15G7-1	2.39E-05	1.027	1.068	1.096	0.428	179.8	15.7	29G4-1	7.26E-06	1.013	1.059	1.074	0.627	219.8	9.0
15G7-2	2.32E-05	1.010	1.034	1.044	0.557	162.0	45.1	29G4-2	1.55E-05	1.063	1.044	1.109	-0.171	204.3	2.3
15G7-3	8.14E-04	1.200	1.315	1.579	0.2	6.4	22.5	29G5-1	5.70E-05	1.016	1.074	1.091	0.632	222.3	22.2
15G8-1	3.07E-05	1.015	1.028	1.043	0.287	197.3	67.0	29G5-2	3.55E-05	1.022	1.036	1.059	0.235	174.8	34.7
15G8-2	3.59E-05	1.010	1.092	1.103	0.797	249.2	14.2	29G5-3	2.80E-05	1.027	1.042	1.07	0.223	178.5	33.9
15G8-3	2.08E-05	1.024	1.036	1.06	0.203	166.5	80.0	29G6-1	9.00E-05	1.08	1.080	1.167	0	101.9	7.5
18G1-1	2.33E-05	1.025	1.039	1.065	0.223	333.9	17.5	29G6-2	1.12E-04	1.012	1.065	1.078	0.682	242.3	7.5
18G1-2	1.47E-05	1.023	1.053	1.077	0.385	198.0	37.9	29G6-3	2.03E-04	1.045	1.009	1.055	-0.668	102.8	6.1
18G1-3	9.27E-06	1.071	1.086	1.163	0.094	150.8	1.8	29G6-4	1.15E-04	1.064	1.014	1.079	-0.635	83.5	21.0
18G2-1	4.38E-05	1.005	1.053	1.058	0.828	257.9	83.7	29G7-1	4.71E-05	1.046	1.239	1.296	0.654	342.2	5.1

续表 2

样号	$Km/10^{-5}SI$	L	F	P	T	D_{K1}	I_{K1}	样号	$Km/10^{-5}SI$	L	F	P	T	D_{K1}	I_{K1}
18G2-2	4.96E-05	1.005	1.066	1.071	0.864	299.3	50.3	29G7-2	1.66E-06	1.245	1.037	1.291	-0.714	21.4	5.1
18G2-3	4.82E-05	1.001	1.067	1.068	0.978	278.7	74.2	29G7-3	4.29E-05	1.046	1.140	1.192	0.487	3.7	5.6
18G3-1	1.42E-05	1.084	1.1	1.192	0.087	30.7	14.0	29G7-4	2.45E-05	1.027	1.010	1.037	-0.457	18.5	5.5
18G4-1	2.44E-04	1.083	1.063	1.152	-0.13	280.9	12.5	29G8-1	2.25E-03	1.098	1.277	1.402	0.447	108.2	1.4
18G4-2	3.81E-04	1.147	1.036	1.188	-0.595	92.8	10.7	29G8-2	2.18E-03	1.122	1.230	1.379	0.285	111.4	1.9
18G4-3	2.02E-04	1.100	1.039	1.142	-0.428	87.6	10.5	29G8-3	1.30E-03	1.075	1.245	1.339	0.501	120.0	4.0
18G5-1	2.55E-05	1.054	1.04	1.096	-0.153	333.0	13.6	29G8-4	3.09E-04	1.045	1.113	1.163	0.42	103.8	3.0
18G5-2	1.69E-05	1.029	1.109	1.141	0.567	68.7	11.9	29G9-1	7.51E-04	1.08	1.110	1.198	0.152	315.4	10.9
18G5-3	1.46E-05	1.027	1.095	1.124	0.55	8.8	14.2	29G9-2	1.61E-03	1.112	1.119	1.244	0.03	321.2	11.4
18G6-1	2.81E-04	1.136	1.103	1.254	-0.132	142.8	5.4	29G9-3	3.62E-04	1.045	1.124	1.175	0.449	326.1	19.2

注: D_{K1} —磁化率最大轴倾向, I_{K1} —磁化率最大轴倾角(°)

表 3 36 个取样点的磁化率及其各向异性参数值

Table 3 Magnetic susceptibilities of 36 sampling points and their anisotropy parameters

采点号	$Km/10^{-5}SI$	L	F	P	采点号	$Km/10^{-5}SI$	L	F	P
11G1	9.10E-05	1.008	1.007	1.014	18G5	1.90E-05	1.037	1.081	1.120
11G2	2.86E-05	1.015	1.037	1.052	18G6	6.47E-04	1.151	1.138	1.311
11G3	8.29E-04	1.039	1.124	1.168	18G7	2.27E-03	1.077	1.231	1.326
12G1	1.25E-02	1.309	1.724	2.257	25G1	6.50E-05	1.016	1.009	1.025
12G2	6.70E-04	1.016	1.016	1.033	25G2	1.90E-05	1.018	1.020	1.038
12G3	1.76E-05	1.032	1.040	1.073	25G3	4.95E-04	1.128	1.118	1.264
15G1	2.76E-04	1.013	1.006	1.019	25G4	2.64E-05	1.008	1.022	1.030
15G2	3.07E-05	1.012	1.036	1.049	25G5	1.50E-05	1.043	1.038	1.083
15G3	3.15E-05	1.017	1.030	1.048	25G6	2.68E-05	1.035	1.029	1.064
15G4	3.41E-05	1.015	1.034	1.049	29G1	1.87E-04	1.029	1.050	1.080
15G5	1.95E-05	1.034	1.042	1.078	29G2	3.79E-05	1.027	1.017	1.044
15G6	5.06E-05	1.064	1.057	1.125	29G3	2.17E-04	1.092	1.077	1.175
15G7	2.87E-04	1.079	1.139	1.240	29G4	1.14E-05	1.038	1.052	1.092
15G8	2.91E-05	1.016	1.052	1.069	29G5	4.01E-05	1.022	1.051	1.073
18G1	1.57E-05	1.040	1.059	1.102	29G6	1.30E-04	1.050	1.042	1.095
18G2	4.72E-05	1.004	1.062	1.066	29G7	2.90E-05	1.091	1.107	1.204
18G3	1.42E-05	1.084	1.100	1.192	29G8	1.51E-03	1.085	1.216	1.321
18G4	2.75E-04	1.110	1.046	1.161	29G9	9.07E-04	1.079	1.118	1.206

根据显微镜下观察,石英脉多为细脉状,为强应变后弛豫阶段矿液充填的结果,形成于相对张性的环境。

4.2 磁组构特征与金矿化的关系

对韧性剪切带的成矿机制一直争议较大。如对于构造变形与金矿成矿的关系,一些学者认为,韧性剪切变形越强、构造差应力越大,Au 丰度越高^[24-26];而另一些学者则认为,韧性剪切作用本身导致成矿的可能性不大,在强烈韧性变形的条件下,Au 内能升高,是不稳定的,因而不会富集成矿,并且是岩石变形越强,Au 含量越低^[27-28]。笔者认为,韧性变形与金矿化的时序关系的确定是解决成矿机制的重要问题之一。对大磨曲家金矿床中宏观和显微变形组构

非常相似的具不同程度矿化的 81 线进行的 Au 含量与 80 线磁组构各向异性度(P 值)的对比研究发现; P 值与金品位呈负相关关系(表 4、表 5)。

由于 P 值可以代表岩石的变形强度,而热事件是导致磁组构各向异性弱化(均一化)的主要因素,所以上述关系说明糜棱岩韧性变形稍早于蚀变矿化,成矿后没有强烈的韧性变形,弱矿化糜棱岩中的金矿化在磁面理发育为主的岩石中较为发育,金的成矿作用主要集中在 P 值接近 1 的平面应变域附近的压扁和收缩应变域内,当应变减弱时金矿化和成矿作用会加强。金矿脉处在强应变的收缩应变带的旁侧,矿脉内部应变极不发育。这也说明成矿物质

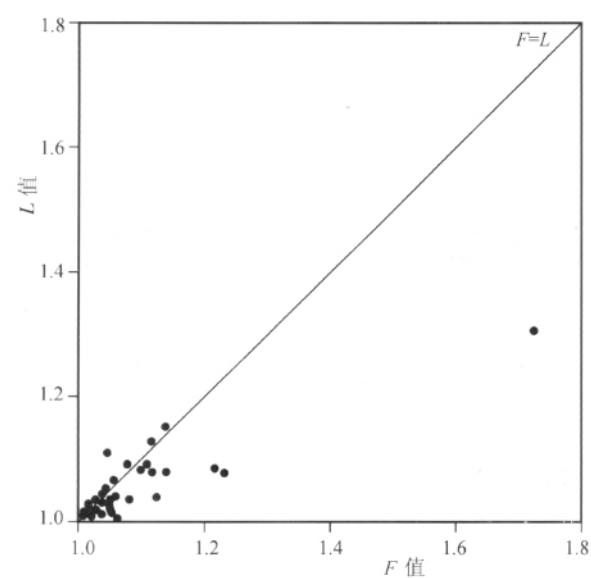


图 6 大磨曲家金矿床岩石磁组构弗林图解
Fig. 6 F - L diagram of magnetic fabric
in the Damoqujia gold deposit

表 4 大磨曲家金矿区 81 线各取样点的磁化率
及其各向异性参数值

Table 4 Magnetic susceptibilities and their
anisotropy parameters along No. 81 exploration
line in the Damoqujia gold deposit

采点号	岩性	Km	L	F	P
15G8	D	2.91	1.016	1.052	1.069
15G7	E	28.7	1.079	1.139	1.24
15G6	B	5.06	1.064	1.057	1.125
15G5	B	1.95	1.034	1.042	1.078
15G4	A	3.41	1.015	1.034	1.049
15G3	G	3.15	1.017	1.03	1.048

注:A—硅化花岗岩;B—硅化糜棱岩化花岗岩;
D—黑云母花岗岩;E—钾化花岗岩;G—绢
英岩化碎裂花岗岩;磁化率单位为 $10^{-6}SI$

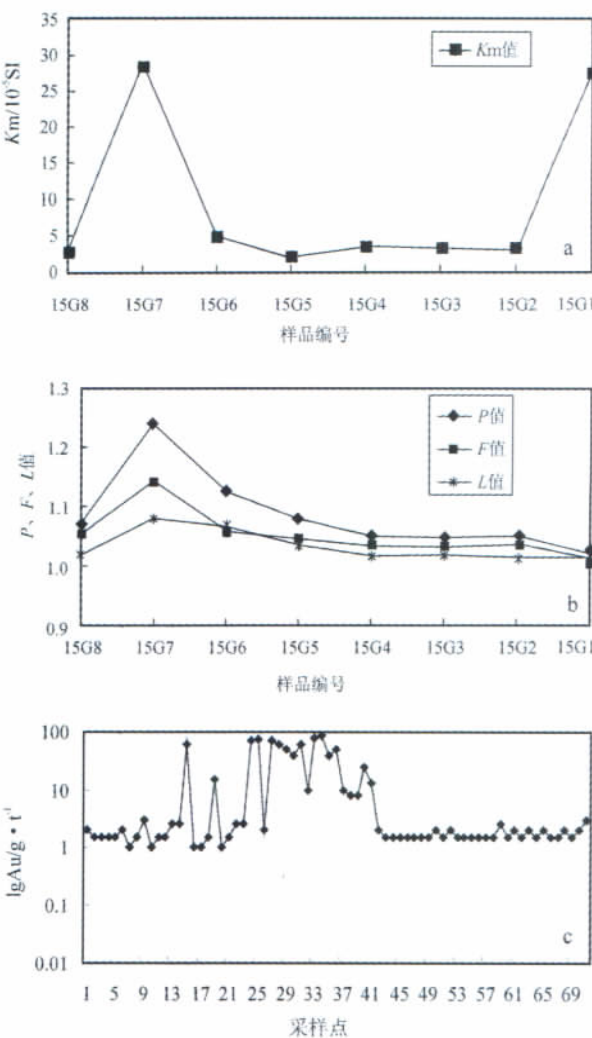


图 7 大磨曲家金矿床 80 勘探线(由西向东)
磁组构参数和金品位相关性图解
Fig. 7 Correlation of parameters of magnetic fabrics
and gold grades along No. 80 exploration
line
(from west to east) of the Damoqujia gold deposit
a—平均磁化率(Km)变化曲线;b—磁各向异性率(P 值)、
磁面理(F 值)、磁线理(L 值);c— Au 含量变化曲线

的沉淀是在强烈的变形作用之后发生的。

5 结 论

(1)沿着断层相关构造剖面的磁组构实例分析表明,磁组构特征可以有效地反映弱变形花岗岩地区的有限应变状态。按照断裂带的发育方向,相应地建立和鉴别了大磨曲家地区岩石基本的磁组构类型,岩石的应变组构与磁组构的对应关系是可以确

定的。但是,磁组构所显示的有限应变现象,在野外和手标本上不一定能够观察到,说明磁组构对有限应变的显示具有较高的灵敏度。

(2)36 个采样点中 33 个测点的平均磁化率值不超过 $10^{-4}SI$ 量级,显示研究区以弱磁性岩石为主。整个研究区内磁化率值的变化规律为:硅化碎裂花岗岩<硅化糜棱岩化花岗岩<糜棱岩化花岗岩<绢英岩化碎裂花岗岩<碎裂花岗岩<石英脉体<硅化花岗岩<钾化糜棱岩化花岗岩<黑云母花岗岩<钾化花岗

表 5 大磨曲家金矿床 80 勘探线多元素分析结果

Table 5 Element analyses of No. 80 exploration line in the Damoqujia gold deposit

样号	采样位置 /m	岩性	Au /10 ⁻⁹	样号	采样位置 /m	岩性	Au /10 ⁻⁹	样号	采样位置 /m	岩性	Au /10 ⁻⁹
Y81-1-1	0~8	D	2	Y81-1-25	215~225	D	75	Y81-1-49	444~450	J	1.5
Y81-1-2	8~14	D	1.5	Y81-1-26	225~235	D	2	Y81-1-50	450~460	J	2
Y81-1-3	14~24	D	1.5	Y81-1-27	235~246	D	70	Y81-1-51	460~470	J	1.5
Y81-1-4	24~40	D	1.5	Y81-1-28	246~250	G	60	Y81-1-52	470~480	J	2
Y81-1-5	40~52	D	1.5	Y81-1-29	250~260	D	50	Y81-1-53	480~490	J	1.5
Y81-1-6	52~56	D	2	Y81-1-30	260~265	D	40	Y81-1-54	490~495	J	1.5
Y81-1-7	56~64	D	1	Y81-1-31	265~275	J	60	Y81-1-55	495~516	J	1.5
Y81-1-8	64~74	D	1.5	Y81-1-32	275~280	J	10	Y81-1-56	516~522	J	1.5
Y81-1-9	74~84	G	3	Y81-1-33	280~290	J	80	Y81-1-57	522~530	J	1.5
Y81-1-10	84~94	D	1	Y81-1-34	290~304	J	85	Y81-1-58	530~538	J	1.5
Y81-1-11	94~100	J	1.5	Y81-1-35	304~312	J	40	Y81-1-59	538~546	K	2.5
Y81-1-12	100~104	J	1.5	Y81-1-36	312~320	J	50	Y81-1-60	546~556	K	1.5
Y81-1-13	104~110	G	2.5	Y81-1-37	320~330	J	10	Y81-1-61	556~566	D	2
Y81-1-14	110~116	G	2.5	Y81-1-38	330~340	J	8	Y81-1-62	566~568	D	1.5
Y81-1-15	116~125	D	60	Y81-1-39	340~354	J	8	Y81-1-63	568~578	D	2
Y81-1-16	125~134	D	1	Y81-1-40	354~364	J	25	Y81-1-64	578~595	D	1.5
Y81-1-17	134~142	D	1	Y81-1-41	364~374	J	13	Y81-1-65	595~604	D	2
Y81-1-18	142~155	D	1.5	Y81-1-42	374~392	J	2	Y81-1-66	604~614	D	1.5
Y81-1-19	155~165	D	15	Y81-1-43	392~402	J	1.5	Y81-1-67	614~622	D	1.5
Y81-1-20	165~175	G	1	Y81-1-44	402~410	J	1.5	Y81-1-68	622~630	K	2
Y81-1-21	175~185	D	1.5	Y81-1-45	410~417	J	1.5	Y81-1-69	630~640	K	1.5
Y81-1-22	185~195	G	2.5	Y81-1-46	417~428	J	1.5	Y81-1-70	640~650	K	2
Y81-1-23	195~205	D	2.5	Y81-1-47	428~436	J	1.5	Y81-1-71	650~660	K	3
Y81-1-24	205~215	G	70	Y81-1-48	436~444	J	1.5	Y81-1-49	444~450	J	1.5

注:D—黑云母花岗岩;G—绢英岩化碎裂花岗岩;J—花岗质碎裂岩;K—片麻岩

岩<斜长角闪片麻岩。硅化碎裂花岗岩的磁化率最小,而磁化率最高值点位于胶东岩群变质岩内部,远离构造蚀变带。总体上,胶东岩群变质岩的磁化率值较高,而玲珑黑云母花岗岩的磁化率值较低,尤以碎裂程度高的强蚀变岩的磁化率值最低。

(3)磁组构所指示的构造应力场在整个矿区基本是一致的,磁化率各向异性方位主要为 NE 向挤压。这与大磨曲家矿区的区域挤压应力方向是相同的。

(4)对大磨曲家金矿床中宏观和显微变形组构非常相似的具不同程度矿化的 81 线进行的 Au 含量与 80 线磁组构各向异性度(*P* 值)的对比研究发现:*P* 值与金品位呈负相关关系。弱矿化糜棱岩中的金矿化在磁面理发育为主的岩石中较为发育,金的成矿作用主要集中在 *P* 值接近 1 的平面应变域附近的压扁和收缩应变域内,当应变减弱时金矿化和成矿作用会加强。成矿晚期,Au 含量随着

岩石磁性的减弱而增加,特别是在强应变后弛豫阶段矿液充填形成于相对张性的石英脉中 Au 含量最高,该金矿床中金矿体的分布与石英的关系非常密切。

致谢:研究过程中得到中国地质大学(北京)杨立强、龚庆杰教授的指导及徐浩、郭春影博士有价值的建议。野外工作期间,得到中国武警黄金部队七支队的热情接待,他们为野外工作的完成提供了很大的帮助。在此一并深表谢意。

参考文献

[1]Jelinek V. Characterization of the magnetic fabric of rocks [J]. Tectonophysics, 1981, 79: 63~67.
[2]Rathore J S. The magnetic fabrics of some slates from the borrow dale volcanic group in the English Lake rocks[J]. Tectonophysics, 1981, 77: 151~168.
[3]Scott R G, Spray J G. Magnetic fabric constraints on friction melt flow regimes and ore emplacement direction within the south Range

Breccia Belt, Sudbury Impact structure[J]. Tectonophysics, 1999, 307: 163–189.

[4]余钦范, 郑敏. 岩石磁组构分析及其在地学中的应用[M]. 北京: 地质出版社, 1992: 1–2.

[5]Tarling D H, Hrouda F. The Magnetic Anisotropy of Rocks [M]. London: Chapman and Hall, 1993: 217.

[6]Petronis M S, Hacker K B, Holm D K, et al. Magmatic flow paths and palaeomagnetism of the Miocene Stoddard Mountain laccolith, Iron Axis region, Southwestern Utah, USA [C]//Magnetic Fabric: Methods and Applications. London: The Geological Society, 2004: 251–284.

[7]潘永信, 朱日祥. 磁组构研究现状[J]. 地球物理学进展, 1998, 13 (1): 52–59.

[8]阎桂林. 岩石磁化率各向异性在地学中的应用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996: 11–13.

[9]周伟新, 万天丰. 玲珑花岗岩体的变形磁组构特征及其与金矿的关系[J]. 地质科学, 2000, 35(4): 385–395.

[10]毛景文, 华仁民, 李晓波. 浅议大规模成矿作用与大型矿集区[J]. 矿床地质, 1999, 18(4): 291–299.

[11]万天丰, Teyssier C, 曾华霖, 等. 山东玲珑花岗质岩体侵位机制[J]. 中国科学(D 辑), 2000, 30(4): 337–344.

[12]徐兵. 中国山东半岛大尹格庄金矿床的地质与地球化学特征[D]. 东京: 东京大学博士学位论文, 1999: 1–139.

[13]翟裕生, 邓军, 崔彬, 等. 成矿系统及综合地质异常[J]. 现代地质, 1999, 13(1): 99–104.

[14]邓军, 杨立强, 刘伟, 等. 胶东招掖矿集区巨量金质来源和流体成矿效应[J]. 地质科学, 2001, 36(3): 257–268.

[15]杨立强, 张中杰, 邓军. 深浅构造耦合成矿效应——以胶东招掖金矿带为例[J]. 地学前缘, 2004, 11(1): 56.

[16]Graham J W. Magnetic susceptibility anisotropy, an unexploited petrofabric element[J]. Bull. Geol. Soc. Am., 1954, 65: 1257–1258.

[17]Kligfield R W, Lowrie W, Dalziel W D. Magnetic susceptibility anisotropy as a strain indicator in the subbury basin Ontrario [J]. Tectonophysics, 1977, 40: 287–305.

[18]Borradaile G J, Tartning D H. The influence of deformations on magnetic fabric in weakly deformed rocks[J]. Tectonophysics, 1981, 77: 151–168.

[19]刘晓煌, 孙兴丽, 徐志清. 山东龙口市大磨曲家金矿地质、地球化学模型浅析[J]. 地质与勘探, 2003, 39(2): 30–33.

[20]中国人民武装警察部队黄金第七支队. 大磨曲家金矿区 1:200000 地质图[M]. 2003.

[21]Hrouda F. Magnetic anisotropy of rocks and its application in geology and geophysics[J]. Geophysical Surveys, 1982, 5: 37–82.

[22]Rochette P, Jackson J, Aubourg C. Rock magnetism and the interpretation of anisotropy of magnetic susceptibility[J]. Rev. Geophys., 1992, 30: 209–226.

[23]Boriadaile G J, Henry E. Tectonic applications of magnetic susceptibility and its anisotropy[J]. Earth Science Reviews, 1997, 42: 49–93.

[24]刘劲鸿. 论太古宙含金剪切带的成矿机制[J]. 长春地质学院学报, 1991, 21(2): 157–166.

[25]杨开渠. 构造古应力估算与金的富集[J]. 广东地质, 1990, 5(1): 31–41.

[26]许顺山, 杨农, 孙青. 山东文登金矿成矿动力学研究[J]. 矿床地质, 1997, 16(3): 272–277.

[27]邵世才, 汪东坡. 河南熊耳山蚀变断层岩型金矿床成因的地球化学特征[J]. 地质论评, 1994, 40 (6): 520–525.

[28]邵世才. 试论韧性剪切作用与金的成矿[J]. 贵金属地质, 1996, 5 (2): 142–145.