

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.S1.002

## 古地磁学在矿床研究中的应用

黄玺<sup>1</sup>, 郑义<sup>1,2,3,4</sup>, 陈炳辉<sup>1,4</sup>, 王成明<sup>1</sup>, 虞鹏鹏<sup>1</sup>

- (1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 广州 510275;
2. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275;
3. 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广东 广州 510275;
4. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广东 珠海 519000)

**摘要:** 古地磁学是研究地质历史上地球磁场强度及其变化的一门学科, 其核心是岩石中富含若干的磁性矿物。通过测定其保存的剩磁强度和方向等, 可计算获得岩石形成时的初始磁性强度和方向, 从而为约束岩石形成时的古磁极位置、形成时代和地球动力学背景等研究提供证据。矿石作为地球演化过程中形成的一类特殊的岩石, 对其进行古地磁研究可为矿床的“源—运—储—保—变”等过程提供强有力的证据。现有关于矿床古地磁学的研究主要集中在两方面, 一是通过矿物的退磁参数限定其形成时的磁化年龄(矿床定年), 二是通过磁组构信息获取矿床形成后的构造应力场变化(矿床保存变化)。需要指出的是, 矿床古地磁学的研究一定要立足于地质事实。由于地质产状和围岩蚀变对磁性参数的影响极大, 在进行矿床地磁数据处理时一定要慎重, 并与磁性地层学互相印证, 才有可能获得有价值的磁性参数, 从而为约束矿床成因提供有效证据。

**关键词:** 古地磁; 矿床; 磁组构; 磁性地层学

**中图分类号:** P318.44

**文献标识码:** A

## APPLICATION OF PALEOMAGNETISM IN ORE DEPOSIT STUDY

HUANG Xi<sup>1</sup>, ZHENG Yi<sup>1,2,3,4</sup>, CHEN Binghui<sup>1,4</sup>, WANG Chengming<sup>1</sup>, YU Pengpeng<sup>1</sup>

- (1. School of Earth Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China;
2. Guangdong Provincial Key Lab of Geological Processes and Mineral Resource Survey, Guangzhou 510275, Guangdong, China;
3. Guangdong Provincial Key Lab of Geodynamic and Geohazards, School of Earth Science and Engineering, Guangzhou 510275, Guangdong, China;
4. Southern Laboratory of Ocean Science and Engineering, Zhuhai 519000, Guangdong, China)

**Abstract:** Paleomagnetism is a geological methodology focusing on the magnetic parameters and their variation regulation of geomagnetic field during the Earth history. The core is several magnetic minerals in rocks. By measuring preserved remanence and direction, the initial magnetic strength and direction in rock-forming process can be calculated. It constrains paleomagnetic pole position, rock-forming age and geodynamics background. Ore, a special kind of rock in earth evolution, determines source-transport-storage-preserve-change in deposit-forming process by paleomagnetism study. The present study on

**基金项目:** 广东省自然科学基金杰出青年基金(2018B030306021)

**作者简介:** 黄玺(1996-), 男, 在读硕士, 地球化学专业。E-mail: huangx276@mail2.sysu.edu.cn

**通讯作者:** 郑义(1984-), 男, 博士, 副教授, 矿床学。E-mail: zhengy43@mail.sysu.edu.cn

**引用格式:** 黄玺, 郑义, 陈炳辉, 等. 古地磁学在矿床研究中的应用 [J]. 地质力学学报, 2019, 25 (S1): 005-009 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.S1.002

HUANG Xi, ZHENG Yi, CHEN Binghui, et al. Application of paleomagnetism in ore deposit study [J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25 (S1): 005-009 DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2019.25.S1.002

paleomagnetism of ore deposits mainly focuses on two aspects: (1) Demagnetization parameters of minerals are used to determine the age of magnetization at the time of formation (dating of the ore deposit) (2) Tectonic stress field changes after the formation of the ore deposit are obtained through magnetic fabric data (Ore deposit preservation changes). More importantly, geological facts are the foundation of paleomagnetism of ore deposits. Due to the great influence of geological occurrence and wall-rock alteration on magnetic parameters, caution must be taken in the processing of geomagnetic data of mineral deposits, and the mutual verification with magnetic stratigraphy can make it possible to obtain valuable magnetic parameters, thus providing effective evidence for restricting the genesis of mineral deposits.

**Key words:** paleomagnetism; ore deposit; magnetic fabric; magnetostratigraphy

古地磁学是研究在地磁场中岩石矿物、沉积物等的记录,这一记录反映了地质历史时期的磁场变化以及板块构造运动。古地磁方法应用于地质研究是基于矿物中的铁磁性颗粒能够克服各向异性,在外界地磁场的环境下,磁性颗粒从自身低的能量状态转换为与地磁场相同的高能平衡状态。地史时期,未被重磁化的岩石矿物会保存当时古地磁场的特征,运用它的古地磁特征可解决相关地质问题<sup>[1]</sup>。矿床研究中,火山岩和沉积岩中保存的地磁反转记录可作为地质年代学的一个工具,主要通过古地磁退磁曲线来限定矿床年龄,如对爱尔兰的 Navan Zn-Pb 矿床<sup>[2]</sup>中矿石、碳酸盐岩样品采用交变退磁和热退磁的方法测试退磁曲线,经过地层古地磁褶皱检验和砾岩检验以及岩体接触检验,反映磁化是在碎屑沉积后和岩脉侵入前形成,将磁极与极移路径对比,反映矿石的化学剩磁和围岩的二次磁化时间应为  $(333 \pm 4)$  Ma 左右。也能通过磁组构参数,如磁化率各向异性特征,来反映区域构造应力场的特征。如对晚泥盆世 Barrington Passage 英云闪长岩进行磁化率各向异性研究,得出该地区首先形成了类似于 Laccolith 岩体的水平构造,接着形成于水平叶理和带状的同岩浆期次的褶皱,对应区域上的 Acadian 造山运动<sup>[3]</sup>。值得注意的是,古地磁方法应用到矿床学研究仍须注意数据的可靠性和应用前提等关键问题。

## 1 成矿时代

获取成矿作用精确时代一直是矿床研究中的重点。通过古地磁极翻转对比岩层时代,运用磁性地层学方法可以获取岩层精确年龄。因此,在缺少化石或不能使用放射性测量地层年代时,古

地磁方法获取成岩年代凸显优势。类似于磁铁矿这一类的含铁矿物可以记录地磁场过去的方向,可分为热退磁、碎屑剩磁、化学剩磁等,针对不同特征的剩磁选用退磁手段,如交变退磁和热退磁技术获取磁性矿物的剩磁强度与方向,与磁性地层表进行对比,便可还原当时地磁场古地磁极的位置,从而得出磁性矿物矿化的年龄。古地磁方法限定矿床的年龄的前提是获知矿床所在地的地磁极或地体的视极移曲线(APWP),通过围岩或矿物的剩磁方向对应当时古地磁极的位置从而得出年龄;需要清楚的是,矿床的围岩和矿体在主成矿期要有磁化事件。但古地磁场是长期变化的,在很短的地质时间中磁极也会有所偏移,故所研究矿床须有一段长的持续时间来平均古地磁场的长期变化的影响。所研究矿床中的磁性矿物要具有各向同性的磁组构来精确记录磁场方向<sup>[4]</sup>。如对金顶铅锌矿床矿体进行剩磁测量,获得矿体当时的古地磁极位,精确获得成矿时代为 26 ~ 20 Ma 之间<sup>[1]</sup>。已往研究表明,古地磁方法的适用性与很多外部因素都有关,也与样品自身的磁性特征有很大的关联。运用古地磁方法进行矿床定年便是要得到岩石或矿物良好的退磁曲线,所以在应用中要针对样品特性采取不同的退磁方法和测试手段,一般来说交变退磁适用于磁性矿物矫顽力不大的样品,如磁铁矿为载磁矿物的岩石;而热退磁的原理则是环境温度升高,温度达到居里点温度之后而消磁,沉积岩的样品多使用热退磁。

## 2 成矿年代测定方法对比

目前对于矿床年龄测定的方法十分多样,有通过对赋矿围岩以及侵入岩体的同位素年龄测定来进行间接限定的<sup>[5]</sup>,也有选取适合硫化物中同

位素测定来进行直接限定的<sup>[6]</sup>, 以上两种方法均统称为同位素年龄测定法。在一些缺乏适合放射年代测定的矿物的地区, 我们会考虑古地磁定年法<sup>[7]</sup>。而古地磁定年则与同位素年龄测定方法大不相同, 主要体现在几个方面: ①测定对象要求不一致。同位素年龄测定法首先要选用具有适当半衰期的岩石矿物系统来进行测定, 且选定的测定对象必须处于封闭体系中, 如一般含钾矿物一般使用 Rb-Sr 法定年, 锆石、楣石等矿物选用 U-Pb 法定年。古地磁方法对测定对象要求则更加严苛, 首先测定对象必须含有磁性矿物且磁性强度较强, 且不含一些难以退磁或矫顽力较大的磁性矿物, 再者测定对象必须完整保存沉积下来的原生剩磁, 且受后期岩浆构造事件扰动较小; ②测定方法不一样。同位素测定方法是通过同一元素的同位素比值进行测定, 选取子体元素的其他稳定同位素进行参照, 进行同位素比值的测定。如测定石碌铁矿的成矿年龄, 由于成矿作用与岩浆侵入体可能是同时期的, 可以通过测定花岗闪长岩侵入体的 Rb-Sr 年龄来进行限定<sup>[8]</sup>。也有通过对黄铁矿的 Re-Os 年龄来限定准确的成矿年龄<sup>[6]</sup>。而古地磁测定矿床年龄并没有同位素定年那么直接, 其需要分离岩性的特征剩磁化方向, 来确定采样位置的地球偶极磁场的磁极位置, 并将磁极位置与已知极移路径进行标定<sup>[9]</sup>, 得到该地区磁化的时间。如对 Lisheen 矿区中围岩和矿石进行剩磁测定, 结合视极移曲线明确其落到劳伦大陆旋转欧洲大陆坐标, 得出其古地磁年龄为  $(277 \pm 7)$  Ma (图 1)。

在对研究区域进行古地磁定年之前, 首先要对研究区域的几期磁化事件进行区分, 如测定 Sherman 型的 Zn-Pb-Ag 矿床的年龄<sup>[9]</sup>时, 作者将研究区域分为第一期 Leadville 碳酸盐地层沉积时形成的化学剩磁, 第二期岩浆侵入事件进行重磁化。第三期发生在成矿阶段中发生白云岩化, 次生白云岩与其他后生矿物如 (方铅矿、闪锌矿等) 发生置换产生剩磁, 这也是矿床形成的最终特征剩磁。在对各地区进行矿石采样时, 首先要了解矿石主要组成的磁性矿物种类, 以及与地层之间的关系, 如对 Black Cloud 矿区进行研究时, 矿石主要由黄铁矿、白铁矿、磁黄铁矿以及少量闪锌矿、黝铜矿等。接着对应得到的退磁曲线来分析主要的磁性矿物以及判定剩磁是代表哪一个磁化事件。如在测定 Black Cloud 矿区中发现有样品在 15 ~ 130 mT 交变磁场消磁以及 250 ~ 450 °C 热退磁

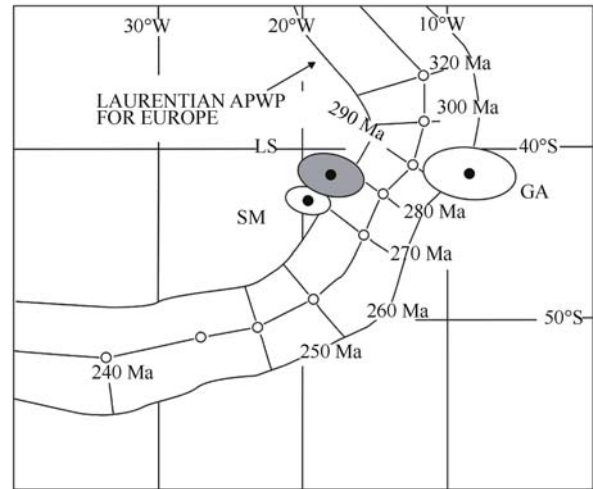


图 1 劳伦大陆到欧洲晚古生代部分视极移路径图 (APWP) (据文献 [7])

Fig. 1 Partial apparent polar wander path (APWP) of late Paleozoic from Laurentia to Europe (Figure from [7])

区间有反极性特征剩磁 (图 2), 反映主要的特征剩磁是由磁黄铁矿和磁铁矿控制。根据三个矿化点的特征剩磁方向为东南偏南方向 (表 1), 通过三个矿化点平均的剩余磁偏角、磁倾角进行反转后从而得到第三纪极点的位置 (表 2), 对照视极移曲线, 从而对矿化事件年龄进行确定。还可以与区域内已测定的其他矿区的剩磁方向进行对比, 来确定是否为同期矿化事件。如对 Black Cloud 矿区以及 Sherman 型矿化和 Leadville 碳酸盐特征剩磁方向进行对比, Black Cloud 矿区的剩磁方向与另外两种特征剩磁方向相反, 反映 Black Cloud 矿化与典型的 Sherman 矿化事件不是同时期的<sup>[9]</sup>。另外, 还有学者通过采集围岩层位以及含矿层位的样品, 勾画地磁剖面剩磁倾角序列表, 与地磁极性表来进行对比。如对安徽庐江龙桥铁矿含矿层位地磁极性研究, 得出与地磁年表对应的时代为 136 ~ 147 Ma 左右, 认为赋矿层位形成时代为晚侏罗世<sup>[14]</sup>。

总的来说, 古地磁方法测年并不是直接限定的成矿时间, 是通过视极移曲线来间接限定成矿时间。在测定古地磁年龄之前, 首先我们要确定层序年龄已知到阶层且具备有古生物标志, 要具有成熟的当地 VGP 纬度、倾角或偏角记录, 要事先测定磁性矿物。在测定古地磁年龄后, 要进行各种野外检验, 分析几期磁化事件, 确定具体的成矿事件是在哪一期磁化事件。而同位素测定方

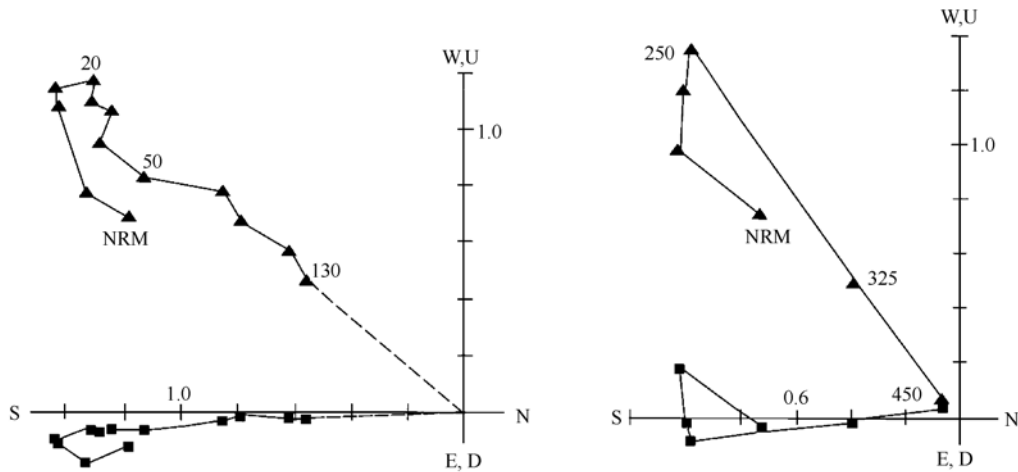


图2 Black Cloud 矿区矿石退磁曲线 (据文献 [9])

Fig. 2 Orthogonal vector plots for the remanence of example specimens on alternating field step demagnetization and thermal step demagnetization (after [9])

法得到的年龄更加直接,成功率较高,而且影响因素较少,实验的关键便是选定在合适的矿物中合适同位素体系来进行测定。

表1 区域平均特征剩余磁化强度

Table 1 Group mean characteristic remanent magnetization (ChRM) directions

采样位置	采样点	特征剩磁方向平均值					
		数量	磁偏角/磁倾角/ (°)	$\alpha_{95}$	$k$	Note <sup>1</sup>	
Black Cloud 矿区	8-10	3	173.1	-56.8	16.2	58.7	$u, R$
		3	185.2	-57.9	16.2	58.7	$c, R$
Pando 斑岩接触带	11, 12,	3	309.4	51.5	13.1	89.5	$u, M$
	26	3	326.2	65.6	17.0	53.8	$c, M$
大陆主要矿区	1, 2,	4	340.0	68.9	15.3	37.0	$u, N$
	4, 5	4	335.5	73.6	27.5	12.1	$c, N$

注: Note<sup>1</sup> 未校正 ( $u$ ) 或校正 ( $c$ ) 的顺层倾斜, 正常极性 ( $N$ ), 反向极性 ( $R$ ), 极性混乱 ( $M$ ), 数字为采样点

表2 各矿区古地磁极位置

Table 2 Pole positions

采样位置	采样点	经度 E/(°)	纬度 N/(°)	$d_p$ /(°)	$d_m$ /(°)
Black Cloud 矿区	1	147.4	84.3	17.1	23.5
大陆主要矿区	5	214.0	71.0	22.0	26.0
第三纪 (所有位置)	11	190.6	78.7	10.2	13.1

### 3 磁组构与矿床构造活动

磁组构是一种岩石矿物的应变指标。所有的磁性矿物都具有各向异性,即磁化率在各个方向

上差异性。但样品中单个晶体取向是随机的,所以岩石一般没有明显的磁各向异性。岩石的磁化率椭球与构造上的应变椭球具有相似性,椭球体的长轴、中间轴和短轴分别对应于磁化率的最大值 ( $K_1$ )、中间值 ( $K_2$ ) 以及最小值 ( $K_3$ )。磁组构可以描述热液系统成矿流体过程。如对 Chaillac 盆地<sup>[15]</sup> 中的 Ba-F-Fe 矿床中热液矿化的针铁矿和水平矿化的烧绿矿进行磁组构测定,发现水平矿化的烧绿矿的磁性线理是水平的,方位角与沉积流一致。靠近矿脉的富针铁矿砂岩表现为强烈的  $K_1$  倾斜,这代表着垂直成矿流体的方向;马天林<sup>[16]</sup> 通过研究新疆东天山土屋铜矿一带韧性变形带中磁组构特征,通过测试 E、T 曲线与 P、F、L 曲线得到南部强变形带为压扁型应变,而远离强变形带为收缩应变,得到该韧性带属共轴压缩成因的韧性挤压带,再结合其矿床成矿点分布特征得出成矿与该区域韧性变形带的时空联系,判定构造运动对矿床形成过程带来的影响。对胶东地区大磨曲家金矿区中构造区域进行岩石磁组构的研究,发现磁化率各向异性方向为 NE 向挤压,这与区域上的挤压方向一致。在使用磁组构的特征反映构造活动时,需要注意的是磁组构的特征只记录了最后一次的构造运动事件,是岩石和矿物最终状态的一个体现。

### 4 结论

古地磁方法作为一种新兴方法已经广泛用于

矿床研究中, 为一般方法难以限定年龄的矿床提供了新的可靠手段。值得注意的是, 矿物的磁性特征是继承成矿前、形成于成矿期、抑或成矿后直接影响到数据解释, 故有时需要借助其他的定年方法 (如同位素法) 加以验证和制约。古地磁方法在矿床学研究的条件极为苛刻, 不仅因为岩石磁性特征的影响因素众多, 地质过程多解性, 而且古地磁数据须进行倒转、褶皱、砾石检验后应用, 同时还须考虑地磁场长期变化。总之, 古地磁方法应用在矿床学研究方兴未艾, 在未来的矿床学研究中不可忽视。

### 参考文献/References

- [ 1 ] 亚夏尔·亚力坤. 沉积岩容矿铅锌矿床的古地磁研究 [D]. 北京: 中国地质大学 (北京), 2017.  
Yachar Yalikun. Paleomagnetic study of Pb-Zn deposits hosted by sedimentary rocks [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2017. (in Chinese with English abstract)
- [ 2 ] SYMONS D T A, SMETHURST M T, ASHTON J H. Paleomagnetism of the Navan Zn - Pb Deposit, Ireland [J]. *Economic Geology*, 2002, 97 (5): 997 - 1012.
- [ 3 ] PIGNOTTA G S, BENN K. Magnetic fabric of the Barrington Passage pluton, Meguma Terrane, Nova Scotia: a two - stage fabric history of syntectonic emplacement [J]. *Tectonophysics*, 1999, 307 (1 - 2): 75 - 92.
- [ 4 ] TRENCH A, 郭友钊. 古地磁测定矿床年代: 简要评述及在西澳大利亚应用的展望 [J]. *物探化探译丛*, 1994, (2): 16 - 21.  
TRENCH A, GUO Youzhao. Paleomagnetic dating of ore deposits: a brief review and prospects for its application in Western Australia [J]. *Geophysical and Geochemical Interpretation Series*, 1994, (2): 16 - 21. (in Chinese)
- [ 5 ] 李金超, 孔会磊, 栗亚芝, 等. 青海东昆仑西藏大沟金矿床花岗闪长斑岩锆石 U - Pb 年龄、地球化学及其成矿意义 [J]. *地质力学学报*, 2018, 24 (2): 188 - 198.  
LI Jinchao, SUN Huilei, LI Yazhi, et al. Zircon U - Pb dating, geochemical characteristics and metallogenic significance of gronodiorite porphyry from the Xizangdagou gold deposit in east Kunlun, Qinghai province [J]. *Journal of Geomechanics*, 2018, 24 (2): 188 - 198. (in Chinese with English abstract)
- [ 6 ] QIU W J, ZHOU M F, LIU Z R. Late Paleozoic SEDEX deposits in South China formed in a carbonate platform at the northern margin of Gondwana [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 156: 41 - 58.
- [ 7 ] PANNALAL S J, SYMONS D T A, SANGSTER D F. Paleomagnetic evidence for an Early Permian age of the Lisheen Zn - Pb deposit, Ireland [J]. *Economic Geology*, 2008, 103 (8): 1641 - 1655.
- [ 8 ] ZHENG W, MAO J W, PIRAJNO F, et al. Geochronology and geochemistry of the Shilu Cu - Mo deposit in the Yunkai area, Guangdong Province, South China and its implication [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 67: 382 - 398.
- [ 9 ] SYMONS D T A, LEWCHUK M T, TAYLOR C D, et al. Age of the Sherman-Type Zn-Pb-Ag Deposits, Mosquito Range, Colorado [J]. *Economic Geology*, 2000, 95 (7): 1489 - 1504.
- [ 10 ] TORSVIK T H, SMETHURST M T, MEERT J G, et al. Continental break-up and collision in the Neoproterozoic and Palaeozoic - a tale of Baltica and Laurentia [J]. *Earth Science Reviews*, 1996, 40 (3 - 4): 229 - 258.
- [ 11 ] TORSVIK T H, VAN DER VOO R, MEERT J G, et al. Reconstructions of the continents around the North Atlantic at about the 60th parallel [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 187 (1 - 2): 55 - 69.
- [ 12 ] SYMONS D T A, PANNALAL S J, KAWASAKI K, et al. Paleomagnetic age of the Magcobar Ba deposit, Silvermines, Ireland [A]. *Mineral Exploration and Research: Digging Deeper* [C]. Dublin: Irish Association for Economic Geology, 2007, 377 - 380.
- [ 13 ] PANNALAL S J, SYMONS D T A, SANGSTER D F. Paleomagnetic dating of Upper Mississippi Valley zinc-lead mineralization, WI, USA [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2004, 56 (2): 135 - 153.
- [ 14 ] 阎桂林, 魏燕平. 安徽庐江龙桥铁矿含矿地层的古地磁学研究 [J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 1994, 19 (5): 695 - 700.  
YAN Guilin, WEI Yanping. Study on paleomagnetism of iron bed of Longqiao iron ore mine in Lujiang, Anhui Province [J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 1994, 19 (5): 695 - 700. (in Chinese with English abstract)
- [ 15 ] SIZARET S, CHEN Y, CHAUVET A, et al. Magnetic fabrics and fluid flow directions in hydrothermal systems. A case study in the Chaillac Ba-F-Fe deposits (France) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 206 (3 - 4): 555 - 570.
- [ 16 ] 马天林, 王连庆, 孙立倩, 等. 磁组构分析在韧性变形带研究中的应用 [J]. *地球学报*, 2003, 24 (5): 449 - 452.  
MA Tianlin, WANG Lianqing, SUN Liqian, et al. Application of magnetic fabric analysis to the ductile deformation belt in the Tuwu Copper Deposit, East Tianshan, Xinjiang [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2003, 24 (5): 449 - 452. (in Chinese with English abstract)
- [ 17 ] SYMONS D T A. Paleomagnetism of the HYC Zn - Pb SEDEX Deposit, Australia: Evidence of an epigenetic origin [J]. *Economic Geology*, 2007, 102 (7): 1295 - 1310.