

环境磁学理论、方法和研究进展

姜月华^{1 2)} 殷鸿福¹⁾ 王润华²⁾

1) 中国地质大学, 湖北 武汉 430074; 2) 南京地质矿产研究所, 江苏 南京 210016

摘 要 环境磁学是一门介于地球科学、环境科学和磁学之间的边缘科学。环境磁学可提供大量有关区域或全球环境变化及人类活动对环境影响等的重要信息, 其研究范围迅速扩大, 已成为当今地学前沿学科之一。本文在简述了环境磁学的理论和方法的基础上, 介绍了环境磁学中几个主要研究领域如古气候与古环境变化、土壤学 and 环境污染研究等方面所取得的进展, 指出了环境磁学研究中存在的不足之处, 并提出了近年来环境磁学的一些新的发展趋势: ①加强磁信息与地质记录之间的定量研究; ②利用磁信息加强应用研究; ③环境磁学与地球化学方法密切相结合; ④建立全球磁数据库。

关键词 环境磁学 磁性矿物 沉积物 土壤 环境变化

The Theory, Method and Research Progress of Environmental Magnetism

JIANG Yuehua^{1 2)} YIN Hongfu¹⁾ WANG Runhua²⁾

1) China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074;

2) Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources, Nanjing, Jiangsu, 210016

Abstract Environmental magnetism is a frontier science among earth science, environmental science and magnetism. Environmental magnetism has been developing into one of the most active fields because it is capable of providing important information for studying the past regional or global environmental changes and the impact of human activity on environment. Based on summarizing the theory and method of environmental magnetism, this paper recounts the main advances made in such fields as paleoclimatic and paleoenvironmental changes, pedology and environmental pollution, and points out some problems in the study of environmental magnetism as well as some new development tendencies, such as the strengthening of quantitative research between magnetic information and geological record, the intensification of the application study based on magnetic information, the combination of environmental magnetism with geochemistry, and the construction of global magnetic databases.

Key words environmental magnetism magnetic characteristics sediment soil environmental change

环境磁学是一门介于地球科学、环境科学和磁学之间的应用岩石磁学和矿物磁学技术去恢复环境过程、重塑环境演化历史的一门边缘科学。其原理是测量土壤、沉积物和岩石等自然物质和人类活动产生的物质在人工磁场中的磁性响应, 提取地质-地理环境的信息。Thompson 等(1986)系统地论述了如何将矿物的磁学性质应用于环境研究, 出版了《Environmental Magnetism》一书, 标志着环境磁学作为一个相对独立的分支学科而正式建立。环境磁

学的重要特征是简单、快速、无破坏、成本低廉, 可解决许多物理和化学方法无法解决的问题。现今, 环境磁学技术已被广泛应用于第四纪地质学、沉积学、气候学、土壤学、环境科学、湖泊科学和海洋科学等很多领域, 从而在全球范围内迅速开展起来。

1 环境磁学基本理论

1.1 环境物质的磁效应

任何环境物质都有一定的磁性特征, 通常可分

本文为中国地质调查局地质调查项目(编号: 0299203003)的部分成果。

改回日期: 2003-11-4, 责任编辑: 宫月萱。

第一作者: 姜月华, 1963年生, 博士研究生, 第四纪地质和环境地质学专业, E-mail: jiangyuehua01@sina.com.cn。

为顺磁性、抗磁性、亚铁磁性(如磁铁矿、磁赤铁矿、磁黄铁矿)和不完整反铁磁性(如赤铁矿、针铁矿)等几种类型。环境物质的磁效应都可以用电流来解释。就原子范畴来说,电子自旋是自然界物质产生磁现象最重要的原因。大多数物质的电子自旋成对出现或不断地被热骚动所扰乱,因而它们只能产生微弱的逆磁效应和顺磁效应。然而,在某些物质中,由于存在“交换作用”可以使原子磁矩定向排列,从而出现自发磁化现象,因此,它们可以产生很强的磁效应,并且可以具有剩磁,还可以显示磁滞特性,这些物质被称之为铁磁性或亚铁磁性物质。

1.2 天然磁性矿物与磁性特征

岩石和沉积物中分布最广的天然磁性矿物是铁的氧化物(如磁铁矿、磁赤铁矿等),此外,还有铁的硫化物、铁的氢氧化物以及铁锰的氧化物和氢氧化物。其他含铁或含锰的矿物往往都是顺磁质,它们虽然不可能载有剩磁,但是,对像磁化率这样的磁性特征可以有较大的贡献。

天然物质的磁性特征主要由磁参数来反映。天然样品磁性矿物特征和晶粒度的主要磁参数有:磁化率(k)、饱和等温剩磁(SIRM)、剩磁矫顽力(B_0)、 c_r 、磁化率频率系数(kfd %)、“软”剩磁(IRMS)、“硬”剩磁(IRMh)、天然剩磁(NRM)、饱和磁化强度(M_r)及饱和剩磁与磁化率比值(SIRM/ k)比值等等。对环境研究来说,最有用的矿物磁性特征已证明是磁化率和等温剩磁。

磁化率为外磁场作用下物质磁化的能力,是指在弱磁场中(0.1 mT)样品的磁化强度与磁场强度之比。磁化率与样品中所含磁性矿物的种类、粒度和含量直接有关,常用作磁性矿物含量的粗略估量。通常磁化率的范围从石英岩之类逆磁性岩石的微弱负值(约为 $-1 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$)直到铁矿石的高值(约 $-10\,000 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{kg}$)。饱和等温剩磁为样品能够获得的最大剩磁,是样品在1 T磁场中磁化后所保留的剩磁,它主要取决于铁磁性矿物的含量和类型,但也依赖于晶粒度。饱和剩磁值的范围可以从不含铁、锰矿物的物质实际为零一直到细粒浸染状氧化铁矿石或重矿物夹层矿石 $100 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ 以上。而饱和剩磁与磁化率的比值(SIRM/ k)可用于识别磁性的类型,也可用来粗略估计大于几十纳米的磁性晶体的晶粒数据。

用于天然样品分类的磁参数和比值在某种程度上还得依赖于具体设备的有效性,尽管这些比值可能只容许对矿物磁性变化的原因作粗略的定性估计,但是它们对土壤和沉积物组合样品的辨别还是很灵敏的。

1.3 环境中磁性矿物的来源及其变化

环境物质中磁性矿物的来源可分外源和内源两类。外源磁性矿物主要由流水和大气搬运作用从外界而来,如岩石风化产物、表土、工业“三废”、城镇生活垃圾、风蚀物、火山灰和宇宙尘等。内源磁性矿物主要由“原生”铁通过化学或生物化学作用形成的次生磁性矿物。磁性矿物的外源组分可以反映流域周围的自然条件及人类活动影响,通过物质磁性特征的变化常常可以追溯环境变迁过程。土壤风化成土和沉积物早期成岩作用是内源磁性矿物形成的两个主要过程。不同环境过程下,外源和内源磁性矿物对物质磁性特征的影响是不一样的。

磁性矿物在环境中的变化可分为物理变化和生物化学变化。物理过程虽然不能改变磁性矿物的性质,但是通过影响磁性矿物在环境物质中的赋存方式,却对环境物质的磁性产生重要的影响。搬运和沉积分异过程也会引起物质磁性特征的差异,原生的磁性矿物往往富集在粗粒级之中,而次生磁性矿物则主要集中在细粒级中,不同动力条件下所沉积的物质,其粒级组成是不一样的,反映在磁性特征上也是不同的。粒级分离基础上的磁性测试很好地说明了这一点。生物化学作用对环境物质的磁性特征具有重要影响,这是由于微生物活动及环境化学因子,如有机质、pH值、氧化-还原电位等变化,使得磁性矿物和非磁性矿物发生溶解、水解、吸附等作用,从而影响环境物质的磁性。

2 环境磁测仪器设备和方法技术

磁测仪器由于其对环境工程中的应用(尤其是现场勘测阶段作为一种踏勘工具)有着重大意义,因此,磁测仪器设备已引起许多地质学家和环境学家注意,而不再是为古地磁学家所专用。目前环境磁测中常用的磁测仪器有磁化率仪和磁通门磁力仪。

2.1 磁通门磁力仪

磁通门磁力仪由于灵敏度高、适应性强和操作简便,已经成为现代剩磁研究的主要工具。磁通门

探头是一个长约 50 mm,以一条高导磁率的坡莫合金为心子、外面绕有初级线圈和次级线圈,形成的一个互感器。在常规测量中磁通门探头可以测定的磁场强度为 1 nT,由于实际要求的噪声水平很低,所以在测量天然样品的剩磁时一般受样品盒的清洁度限制。使用双探头的梯度装置可以提高仪器设备的灵敏度,并大大减小样品不均匀性的影响。用这种方法可以在 5 min 内测出小到 10^{-4} A/m 的湖泊沉积物、土壤等剩磁强度以及饱和剩磁和剩磁矫顽力。目前剩磁的测定可用交变退磁仪、旋转磁力仪和脉冲磁化仪来测量,如美国 Schonstedt 仪器公司 DSM-2 数字旋转磁力仪、GSD-5 交流退磁仪、SSM-1A 旋转磁力仪、DSM-1 旋转磁力仪、GSD-1 交变退磁仪、Molspin 脉冲磁化仪、磁力仪和交变退磁仪等。

2.2 磁化率仪

磁化率仪是所有用到的磁测仪器中最简单的一种。在用交流方法测量时,将样品轻轻放到磁化率仪里面,然后从计数器或刻度盘上读数,或者通过按钮由电传打字机打印。用这种仪器测量,100 块样品不到 1 h 就可以很容易地测完。便携式磁化率桥由各种不同形状、不同大小的传感元件组成,因此,可以测量全岩心、土壤断面以及基岩露头的磁化率,也可以测量一般常用的直径 25 mm 的岩心样品或者体积 10 mL 的塑料盒装样品的磁化率。磁化率可用磁化率仪来测量,如捷克产的 KLY-1 型磁化率仪、Bartingto 公司产的 MS2 型双频磁化率仪、南京所研制的 HKB-1 型数字卡帕桥(可精密测定沉积物、土壤、岩石等物质磁化率及各向异性,灵敏度达 5×10^{-13} m³)等。

3 环境磁学研究进展

环境磁学研究涉及大气圈、水圈和岩石圈中的磁性颗粒,能为全球环境变化、气候过程和人类活动对环境的影响等研究提供有价值的资料,其研究范围迅速扩大,已成为当前国际全球变化研究的热点。下面仅对环境磁学的几个主要领域(古气候与古环境变化、土壤学研究、环境污染)的一些进展作简要阐述。

3.1 古气候与古环境变化

从整体上看,环境磁学应用于古气候与古环境变化方面的研究应该是最广泛和最多的,迄今为止

发表的文献和专著几乎绝大多数得到佐证,而且研究内容也主要集中在湖泊沉积物、海洋沉积物和黄土等的研究上。这是因为利用磁参数变化曲线可以进行地层划分、样心对比、突发事件(火山喷发事件、洪水事件、火灾事件)指示、沉积速率和沉积量估算以及物源判别,并极好地指示气候的变迁与环境的演化过程,且能与其他气候指标、分析数据(氧同位素、生物化石等)互相印证。

3.1.1 湖泊沉积物 湖泊沉积记录的环境演变是环境磁学的重要研究领域之一。大量研究证明,湖泊沉积物磁化率可作为一个环境代用指标。湖泊沉积物的矿物磁性特征一般与特定的源区及其作用过程有关,人们常用磁化率的变化来对比同一湖泊汇水区的地层。湖泊沉积物磁化率变化的直接原因是湖泊流域带入湖内的磁性颗粒数量和成分发生变化。湖泊中大部分沉积物来自其周边流域,周边环境的变化如河流袭夺、滑坡引起的基岩裸露、燃烧引起的地表剥蚀、气候变化引起的风化作用等,都可以引起湖泊沉积物磁化率值的升高。如森林、草场火灾会导致表土层磁性明显增强,这些物质由径流带入湖泊,在沉积序列中保留了火灾事件的“痕迹”。Oldfield 等(1980)等推广磁性测量鉴别出巴布亚新几内亚高原 4 次火山喷发事件。Ngobi 等(1998)研究了东非 Victoria 湖泊晚更新世和全新世沉积物的矿物磁性特征,进行了地层对比和划分。Crockford 等(1998)提出矿物磁性特征的变化可以判别河流和湖泊沉积物的来源。Lanci 等(1999)利用矿物磁性记录讨论了晚第四纪气候的变化。

湖泊沉积物沉积后,其中细菌成因的磁铁矿及其磁性特征研究也倍受关注(Snowball 等,1994),此外,成岩过程中自生成因的亚铁磁性铁硫化物,如胶黄铁矿很常见,其磁学特征同样可以用来指示环境变化。胡守云等(1998)对呼伦湖沉积物的环境磁学研究揭示,磁化率的高(低)相应地指示湿润(干旱)的气候及较高(低)的湖面,在高湖面、高有机碳含量的情况下,沉积环境相对还原,自生的亚铁磁性铁硫化物成为导致呼伦湖沉积物磁化率增强的主要磁性矿物。

3.1.2 海洋沉积物 海洋沉积物也是环境磁学的理想场所之一,深海钻探计划(DSDP)和海洋钻探计划(ODP)已做了很多工作,如运用磁化率曲线进行

沉积物对比和测年,识别气候循环周期和变迁特征;陆源物质注入量及沉积后的还原作用等。Robinson (1986)通过研究北大西洋晚更新世深海沉积物岩心,首次令人信服地证明了海洋沉积的某些磁学性质和古气候之间确实相互关联。他发现冰期沉积物磁性矿物含量高、 CaCO_3 含量低、冰筏沉积增多,间冰期沉积则与之相反。这种富含冰筏碎屑的周期性深海沉积(Heinrich层),是晚更新世北大西洋沉积的典型特征,可以通过磁化率测量识别出来(Kissel等,1999)。

浅海陆架和陆坡海洋沉积物中磁性矿物主要来自陆源,而深海盆地沉积物中的磁性矿物则往往来自火山喷发(Nowaczyk,2003)。海洋沉积物中细菌成因的磁铁矿一般是在缺氧条件下形成,磁铁矿多为单畴,是剩磁的良好载体(Thompson等,1986)。与湖泊沉积物沉积后一样,海洋沉积物沉积后,磁性矿物可发生还原溶解(Robinson等,2000),成岩过程中自生成因的亚铁磁性铁硫化物,如胶黄铁矿及磁黄铁矿也常见,此外,海洋沉积物中自生作用形成的磁赤铁矿和细菌成因的胶黄铁矿也有报道(Roberts等,1993)。

3.1.3 黄土 黄土及其中的古土壤研究在中国开展较早,取得的成果也最多。中国黄土高原黄土层由多层黄土和古土壤叠覆而成,是一种记录第四纪气候波动历史的十分理想的信息载体。

由于黄土的沉积环境变化不大,磁化率的高低主要决定于成土作用及其细小磁性物质产生的多少,所以,开展黄土磁性矿物研究可揭示古气候的变化规律(朱日祥等,1994)。李华梅等(1974)最早进行了中国黄土磁化率测量,并注意到了古土壤与黄土磁化率的明显差异。Mullins(1977)认为黄土堆积时期气候干冷,古土壤形成时期气候暖湿,黄土的磁化率低,古土壤的磁化率高。Heller等(1982)在研究陕西洛川黄土后,指出天然剩磁(NRM)和磁化率的强度变化对黄土沉积期间的气候变化具指示性,中国黄土-古土壤磁化率曲线与深海沉积物氧同位素曲线能很好地进行对比(Liu,1996),意味着中国风尘堆积、大陆冰量与全球气候之间存在密切的内在联系,表明中国黄土是全球气候变化最好的陆相记录之一。

研究表明,磁铁矿、磁赤铁矿、赤铁矿和针铁矿

是黄土-古土壤中主要的磁性矿物,但是磁铁矿是导致古土壤磁化率增强的主要矿物,磁赤铁矿对古土壤磁化率增强有一定的贡献,而赤铁矿和针铁矿却对磁化率的贡献可忽略,它们不是黄土-古土壤层序中古气候磁性记录的良好载体。中国黄土是一种典型的风成沉积,Thistlewood(1991)的研究表明,黄土中磁性矿物颗粒的长轴方向与黄土沉积时的主导风向呈一致的趋势,肖华国等(1998)也发现黄土-古土壤序列中粗颗粒含量和磁化率曲线与冬、夏季风变迁存在相互关联,从而可用来恢复古风场。

3.2 土壤学研究

用磁信息对土壤形成过程、土壤分层、土壤结构、土壤侵蚀状况、土壤诊断鉴定及土壤分类等方面的研究已成为一种有效的方法,并已形成了一门新的学科——土壤磁学(俞劲炎等,1991),这主要是由于土壤中的铁能够改变价态、形成与环境有关的多氧化相或与土壤中其他成分一起形成络合物的缘故。在风化层内部由基岩风化过程中析出的铁已经转变成化学性质稳定的磁性氧化物(磁铁矿、磁赤铁矿、赤铁矿等),铁的氢氧化物(针铁矿)和铁的硫化物(黄铁矿)等,故它们完全有可能继续存在于土壤或者河流悬浮物和大气尘埃中,这样也就完全有可能作为一种新的历史记载被保存在沉积物、泥炭或冰块样心中。因此,用磁化率检测方法对土壤进行测量、研究和分析便成为可能。土壤中铁的化合物的状态常常指示土壤水分状况、形成过程和土壤类型,各种土壤磁测表明,在土壤环境类型和磁学性质之间存在着清楚的关系(Mather,1985)。

3.3 环境污染研究

在以城市为中心的环境污染和以农村为中心的生态破坏等问题中,许多与人类活动密切相关的资源开发、利用和建设等,已成为人类影响环境的最重要和最经常的形式,是环境地质灾害问题产生的主要根源。

土壤是人类生存环境的重要组成部分,在人类的生产和生活中起着极为重要的作用。然而,土壤环境质量目前总体上却呈现出下降的趋势,主要是土壤环境的重金属污染、农药污染、化肥污染及放射性元素污染等。车辆等交通工具的排放物、电厂、水泥厂、冶炼厂等排放的烟尘、废物、废水和生活垃圾等中往往也含有Ni、Co、Cr、Ti、Al、Mg等近铁元素,

检测这些磁性矿物的磁化率,可用来圈定受污染的地区,还可对土壤进行深层取样,检验污染物垂向变化状况。

应用环境磁学方法来研究因人类活动而产生的环境污染状况变化,目前所做的工作还很少,主要涉及一部分现代沉积物和土壤重金属的污染探讨(Carador等,1996),研究力度和深度尚远远不足。如 Beckwith 等(1986)完成了城市来源沉积物重金属和磁性关系研究;Williams(1991)采用磁化率曲线对比沉积物中重金属的化学分析和1820年以来欧洲煤炭燃烧的资料,得出磁化率与Pb、Zn、Cu高度相关,并与欧洲煤炭消耗有相同趋势的结论;俞立中等(1993)在研究长江口潮滩沉积物磁性后,认为沉积物磁参数值与重金属元素含量有关;Crook等(2002)利用磁信息特征确定了碳酸盐沉积物中污染状况。显然,环境磁学在监测现代环境污染、重建污染历史以及典型地区的污染分析等方面是今后工作的一个重要方向。

4 环境磁学存在问题与发展趋势

环境磁学是一门新兴的学科,其中有许多问题仍处于探索阶段,尚存在不足,如磁细菌引起磁性矿物含量变化,沉积后还原性成岩作用改造先存的磁性矿物,削弱甚至破坏环境磁信号,引起磁参数解释的多义性;对于不同粒径和类型磁性矿物的磁参数贡献等(Kelso等,2002),还有待于进一步研究;此外,有关磁性的定量化及新型磁参数和磁测仪器的开发等亦尚待深入做工作。但是,实践证明环境磁学是一门富有生命力和广阔应用前景的学科(Uchida等,2003;刘育燕等,2003)。近些年来,环境磁学有以下几个发展趋势。

(1)利用磁信息加强湖泊和海洋沉积物沉积速率、气候周期和记录可靠性之间关系的定量研究,以探讨区域气候变化及全球环境变迁。

(2)利用磁信息加强应用研究。特别是地质环境的污染监测、污染研究,以及灾害事件研究、环境考古和油气勘探等。

(3)环境磁学与地球化学方法密切相结合,探索环境变化对磁性质的影响及相关机理。

(4)建立全球磁数据库和相关数学模型,用以进行区域或全球磁数据的对比,为今后进一步全面合

理地分析区域或全球气候变化及环境变迁提供条件。

参考文献

- 胡守云,王苏民,Appel E等.1998.呼伦湖湖泊沉积物磁化率变化的环境磁学机制.中国科学(D辑),28(4):334~339.
- 李华梅,安芷生,王俊达.1974.午城黄土剖面古地磁学研究初步结果.地球化学(2):93~104.
- 刘育燕,林文娇,朱宗敏等.2003.南方红土中的磁极倒转以及磁化率变动记录.地质科技情报,22(3):33~36.
- 肖华国,吴锡浩,蒋复初等.1998.中原末次冰期间冰阶以来古季风水气候变迁.地球学报,19(1):84~89.
- 俞劲炎,卢升高.1991.土壤磁学.南昌:江西科学技术出版社,1~6.
- 俞立中,张卫国.1993.利用磁信息研究潮滩重金属污染的探讨.环境科学进展,1(5):37~43.
- 朱日祥,李春景,吴汗宁等.1994.中国黄土磁学性质与古气候意义.中国科学(B辑),24(9):992~997.

References

- Beckwith P R, Ellis J B, Revitt D M. 1986. Heavy metal and magnetic relationships for urban source sediments. *Physics Earth Planet. Int.* 42: 67~75.
- Carador I, Vale C, Catarino F. 1996. Accumulation of Zn, Pb, Cu, Cr and Ni in sediments between roots of the Tagus estuary salt marshes, Portugal. *Estuaries, Coast and Shelf Sci* 42: 393~403.
- Crockford R H, Fleming P M. 1998. Environmental magnetism as a stream sediment tracer: an interpretation of the methodology and some case studies. *Australian Journal of Soil Research* 36(1): 167.
- Crook N P, Hoon S R, Taylor K G et al. 2002. Electron spin resonance as a high sensitivity technique for environmental magnetism: determination of contamination in carbonate sediments. *Geophysical Journal International* 149(2): 328~337.
- Heller F, LIU T S. 1982. Magnetostratigraphical dating of loess deposits in China. *Nature* 300: 431~433.
- Hu Shouyun, Wang Suming, Appel E et al. 1998. Environmental magnetic mechanism of susceptibility changes in Hulunhu lake sediments. *Science in China(D)* 28(4): 2175~2192 (in Chinese with English abstract).
- Kelso P R, Tikoff B, Jackson M et al. 2002. A new method for the separation of paramagnetic and ferromagnetic susceptibility anisotropy using low field and high field methods. *Geophysical Journal International* 151(2): 345~359.
- Kissel C, Laj C, Labeyrie L et al. 1999. Rapid climatic variations during marine isotopic stage 3: magnetic analysis of sediments from

- Nordic Seas and North Atlantic. *Earth Planet. Sci. Lett.* ,171 :489~502.
- Lanci L , Hirt A M , Lowrie W et al. 1999. Mineral-magnetic record of Late Quaternary climatic changes in a high Alpine lake. *Earth Planet. Sci. Lett.* ,170 :49~59.
- Li Huamei , An Zhisheng , Wang Junda. 1974. The preliminary results of paleomagnetic research in Wucheng loess section. *Geochemistry* , (2):93~104 (in Chinese).
- Liu Yuyan , Lin Wenjiao , Zhu Zongmin et al. 2003. Geomagnetic polarity reversal records and susceptibility variations of the laterite in south China. *Geological Science and Technology Information* ,22 (3):33~36 (in Chinese with English abstract).
- Liu T S. 1996. Geological environments in China and global change. 30th Geological Congress. Beijing :Geological Publishing House ,1~15.
- Mather B A. 1985. Characteristic of soils mineral magnetic measurements. *Phys. Earth Planet. Int.* 42 :76~92.
- Mullins C E. 1997. Magnetism susceptibility of the soil and its significance in soil science : a review. *J. Soil Sci.* 28 :223~246.
- Ngobi G N , Kelts K , Johnson T C et al. 1998. Environmental magnetism of Late Pleistocene/Holocene sequences from lake victoria , east Africa. *Mono Graphiae Biologicae* ,79 :59.
- Nowaczyk N R. 2003. Detailed study on the anisotropy of magnetic susceptibility of arctic marine sediments. *Geophysical Journal International* , 152 (2):302~317.
- Oldfield F , Appleby P G , Thompson R. 1980. Palaeoecological studies of three lakes in the highlands of Papua New Guinea. 1. The chronology of sedimentation. *J. Ecol.* 68 :457~477.
- Roberts A P , Turner G M. 1993. Diagenetic formation of ferrimagnetic iron sulphide minerals in rapidly deposited marine sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.* 115 :257~273.
- Robinson S G. 1986. The late Pleistocene palaeoclimatic record of North Atlantic deep - sea sediments revealed by mineral magnetic measurements. *Phys. Earth Planet. Inter.* 42 :22~57.
- Robinson S G , John T. 2000. Rock-magnetic characterization of early , redoxomorphic diagenesis in turbiditic sediments from the Madeira Abyssal plain. *Sedimentology* 47 :367~394.
- Snowball I. 1994. Bacterial magnetite and the magnetic properties of sediments in a Swedish lake. *Earth Pla. Sci Lett* ,126 :129~141.
- Thistlewood L , Sun J. 1991. A paleomagnetic and mineral magnetic study of the loess sequence at Liujiapo , Xian , China. *J. Quat. Sci.* , 6 (1):13~26.
- Thompson R. 1986. Oldfield F. environmental magnetism. London : Allen & Unwin.
- Uchida E , Cunin O , Shimoda I et al. 2003. The construction process of the Angkor Monuments elucidated by the magnetic susceptibility of sandstone. *Archaeometry* , 45 (2):221~232.
- Williams T M. 1991. A sedimentary record of the deposition heavy metals and magnetic oxides in the Loch Dee basin. Galloway , Scotland , Since c. 1500. *The Holocene* ,1 :142~150.
- Xiao Huaguo , Wu Xihao , Jiang Fuchu et al. 1998. The paleoclimate variations in the China central plains since the interstage of the last glacial stage. *Acta Geoscientia Sinica* ,19 (1):84~89 (in Chinese with English abstract).
- Yu Jingyan , Lu Shenggao. 1991. Soil magnetism. Nanchang : Jiangxi Scientific and Technological Press ,1~6 (in Chinese).
- Yu Lizhong , Zhang Weiguo. 1993. Discussion on the pollution research of heavy metal of the tidal beach using magnetic information. *Advance in Environmental Science* ,1 (5):37~43 (in Chinese).
- Zhu Rixiang , Li Chunjing , Wu Hanning et al. 1994. Magnetic features and paleoclimatic significance of the Chinese loess. *Science in China (B)* 24 (9):992~997 (in Chinese).