

环境磁学在古气候环境研究中的回顾与展望

符超峰^{1,2}, 宋友桂², 强小科², 安芷生²

(1. 长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054;

2. 中国科学院地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710075)

摘要: 基于磁性矿物的性质变化能敏感记录现在和地质历史时期的气候环境变化信息, 环境磁学方法能鉴别环境演化过程中磁性物质在大气圈、水圈和岩石圈中运移、沉积和转化的过程。系统介绍了沉积物中磁性矿物的特征和鉴别方法以及主要的环境磁学参数和意义, 着重回顾了环境磁学在以黄土、湖泊和海洋沉积物为载体的古气候环境研究中的应用及其取得的重要进展, 指出了环境磁学在古气候环境研究过程中要加强多磁学参数综合应用, 促进地质记录和磁学指标之间的定量研究, 有利于理解不同沉积物的磁性矿物特征和环境变化过程的相关关系。同时强调沉积物还原成岩作用过程的环境磁学研究是目前以至今后发展的一个重要方向。

关键词: 环境磁学; 磁性特征; 沉积物; 古气候环境

中图分类号: P534.63 文献标志码: A 文章编号: 1672-6561(2009)03-0312-11

Environmental Magnetism and Its Application Progress in Paleoclimatic and Paleoenvironmental Changes

FU Chao-feng^{1,2}, SONG You-gui², QIAN Xiao-ke², AN Zhi-sheng²

(1. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an, 710054, Shaanxi, China; 2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary

Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, 710075, Shaanxi, China)

Abstract Magnetic properties can act as sensitive recorders of environmental and climatic information, both for the present day and through geological time. Environmental magnetism involves the application of rock and mineral magnetic techniques to situations in which the transport, deposition, or transformation of magnetic grains is influenced by environmental processes in the atmosphere, hydrosphere, and lithosphere. And environmental magnetism is capable of providing important data for studies of global environmental change, climatic processes, and the impact of humans on the environment. Loess, oceanic and lake sediment are study objects which can be applied to understand global and region environmental climate change. This paper sums up the characteristics and identification methods of the magnetic minerals in environmental studies and the main parameters of environmental magnetism, and casts back the main advances made in paleoclimatic and paleoenvironmental changes fields. Magnetism methods have been made important achievements in the paleoenvironmental and paleoclimate researches by measuring loess, lacustrine and marine sediment. The authors point out the comprehensive application of more magnetic parameters should be strengthened in paleoenvironmental studies, and reinforcing of quantitative research between magnetic information and geological record can understand further the relationship between magnetic minerals character of different kinds of sediments and environmental change process. Meanwhile, it is emphasized that environmental magnetism studies of reductive diagenesis process is an important study direction at present and in the future.

Key words: environmental magnetism; magnetic property; sediment; paleoclimate and paleoenvironment

收稿日期: 2008-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40872114; 40772116; 40599420); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目 (SKLLQG 0806)

作者简介: 符超峰 (1969-) 男, 陕西兴平人, 讲师, 理学博士, 从事第四纪地质与全球变化教学与研究。E-mail: fu.chaofeng@126.com

© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0 引言

岩石磁学是运用各种磁学技术手段研究岩石(包括沉积物)中的磁性行为和特征的一门技术科学,它最终的目的就是获取岩石中磁性矿物的有关信息如矿物种类、含量、粒径大小、粒径排列方向。岩石磁学技术应用于环境研究中就形成了环境磁学。环境磁学兴起于20世纪80年代,是一门介于地球科学、环境科学和磁学之间新兴的边缘学科,其研究涉及大气圈、水圈和岩石圈甚至生物圈中的环境变化中磁性矿物的搬运、沉积和转化过程,是一门交叉性学科。环境磁学研究的对象主要有岩石、沉积物、土壤、大气颗粒、生物物质等。环境磁学方法具有样品用量少,一般仅需几十毫克到几克,灵敏度高、方法简单快速、非破坏性、低费用等优点,已在气候学、生态学、地貌学、水文学、土地利用研究、湖泊学、气象学、海洋学、沉积学和土壤学等各个领域中得到广泛应用^[1-9]。更为重要的是,由于大多数沉积物中磁性矿物含量很低,常规的物理化学方法对阐明磁性矿物的性质无能为力,于是磁学方法高灵敏度的优点便显现出来。铁的氧化物、氢氧化物和硫化物等磁性物质广泛分布于土壤、沉积物、大气颗粒和生物物质中,随着源区和沉积环境的变化,磁性矿物组合特征也随之发生变化。大量研究表明,矿物的磁学性质可作为环境变化和气候过程的代用指标,这是由于磁性矿物颗粒的搬运、沉积和转化与沉积环境的变化和古气候的演化密切相关^[3,5]。因此通过对地质记录中的磁性矿物性质的研究可为重建古环境、恢复古气候提供可靠的依据,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,环境磁学在环境变化研究中发挥着越来越重要的作用^[1-9]。笔者在介绍环境磁学研究基本理论与研究方法的基础上,回顾了环境磁学在古环境研究中尤其在黄土、湖泊和海洋中的应用进展,并讨论了环境磁学在古气候、古环境研究过程中存在的问题,指出了未来的研究方向。

1 环境磁学的基本理论与方法

1.1 环境物质的磁性行为特征

任何环境物质都有一定的磁性,自然界中颗粒物的磁性主要是由矿物产生的,矿物的磁性行为通常分为顺磁性、抗磁性和铁磁性矿物等几种基本类

型。环境磁学中主要研究的几种天然矿物的磁性,是铁磁性的特殊变种,包括亚铁磁性和不完整反铁磁性。亚铁磁性矿物(如磁铁矿、磁赤铁矿、磁黄铁矿)和不完整反铁磁性矿物(如赤铁矿、针铁矿)是环境磁学最为关注的矿物类型。磁性矿物的识别和矿物磁学性质的认识是应用磁学方法进行环境研究的基础^[7]。这些磁性行为主要与磁性矿物数量和类型、铁磁性结晶晶粒大小及其配比有关。环境磁学研究的基础就是通过系统磁性测量,揭示沉积物中磁性矿物的种类、粒径、含量及其组合特征,从中提取环境及其演变的信息。沉积物中比较常见的磁性矿物包括磁铁矿、磁赤铁矿、钛磁铁矿、赤铁矿、钛赤铁矿、铁的氢氧化物、铁的硫化物及其他的磁性矿物,几种常见磁性矿物的磁学性质见表1^[2,89]。磁性矿物是岩石或沉积物记录地球磁场和环境变化信息的载体,磁性矿物的组成和粒度的分布,决定了岩石或沉积物的基本磁学性质及其所携带的天然剩磁在地质历史时期的稳定性。岩石磁学是识别磁性矿物的种类、含量、粒径等信息的有效手段之一。随着各种高端磁测仪器的发明和不断更新,多种岩石磁学方法(如磁滞回线、K-T曲线、J-T曲线、等温剩磁(M_r)特征、三轴等温剩磁、Day图、FORC图、非磁滞剩磁(M_{ar})及居里温度等)被提出^[10-14],比如,可以用磁性矿物随温度或磁场强度变化的性质来推断沉积物中所赋存的磁性矿物种类及其颗粒的大小;逐步的热退磁方法有助于判识磁性矿物种类,这种方法对于揭示针铁矿、磁铁矿及赤铁矿很有效,这3种矿物所载剩余磁性分别在120、580、680℃左右解阻,对于湖相沉积物中常见的磁黄铁矿、胶黄铁矿、钛磁铁矿和磁赤铁矿用热磁分析的方法不易区分开来,因为其解阻温度基本都在300~350℃,且在加热过程中不稳定易转变,可以将磁滞回线与三轴等温剩磁结合起来分析,精确判断不同环境中磁性矿物的种类及含量。大多数磁性参数及其比率图如Day图、FORC图都能反应磁性矿物颗粒的相对大小等。

1.2 主要的环境磁学参数与理论意义

环境磁学参数综合分析能反映环境中磁性矿物组成、含量和颗粒大小。通过这些参数的变化探索磁性颗粒转化受环境变化影响的过程,为气候变化过程和全球环境变化研究提供代用指标,重建过去气候环境的变化过程。通常用磁化率(体积磁化率(κ),质量磁化率(χ)),饱和等温剩磁(M_{sr})和饱

表 1 常见磁性矿物环境磁学性质

Tab. 1 Environmental Magnetic Properties of Some Minerals

常见磁性矿物	英文名	分子式	磁化率/ ($10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	饱和磁化强度/ ($\text{em u} \cdot \text{g}^{-1}$)	居里点/ $^{\circ}\text{C}$	低温转变 点/ K	矫顽力/ T	M_{sr}/χ	剩磁获得矫 顽力/ mT
磁铁矿	Magnetite	Fe_3O_4	4.5×10^4	90 ~ 93	575 ~ 585	120	0.3	1.5 ~ 50	< 50
磁赤铁矿	Magnetite	$\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$	$(4.1 \sim 4.4) \times 10^4$	80 ~ 85	600		0.3 ~ 1		30 ~ 40
赤铁矿	Hematite	$\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$	60	0.2 ~ 0.4	675	253	1 ~ 2	> 200	> 200
针铁矿	Goethite	αFeOOH	3.5 ~ 125	< 1	120		< 5		
磁黄铁矿	Pyrrhotite	Fe_2S_8	5.3×10^3	20	320	34	0.4		15 ~ 20
钛铁矿	Ilmenite	FeTiO_3	170		233				
纤铁矿	Lepidocrocite	γFeOOH	50 ~ 69		196				
锰铁矿	Jacobsonite	MnFe_2O_4		77	300 ~ 310				
胶黄铁矿	Greigite	Fe_3S_4		20 ~ 30	333		0.4		

注: 据 Thompson 等^[2]、Torri 等^[8]、Maher 等^[9] 综合; M_{sr}/χ 单位为 kAm^{-1}

和磁化强度(M_s)来表征沉积物中磁性矿物的总含量;用参数频率磁化率(χ_{fd})、 $M_{\text{ar}}/M_{\text{sr}}$ 、 $M_{\text{sr}}/\kappa_{\text{f}}$ 、 M_{sr}/χ 和 χ_{ARM}/χ 等来表征磁性矿物颗粒的粒径大小;用 S 比值和居里温度等来区分磁性矿物的矿物组成特征;用磁化率各向异性(Anisotropy of Magnetic Susceptibility, AMS)来研究古水流方向、古风向、岩石形变和沉积环境分析。现将各主要参数及比值做一简介:

磁化率: 为外场作用下物质被磁化难易的量度, 一般用体积磁化率和质量磁化率表示。体积磁化率指在弱磁场中样品的感应磁化强度与磁场强度之比;质量磁化率为单位体积样品的质量与体积磁化率之比, 单位是 m^3/kg 。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度量, 主要反映了样品中亚铁磁性矿物的富集程度^[15]。

低场磁化率($\chi_{\text{L}} < 1 \text{ mT}$)和高场磁化率($\chi_{\text{H}} > 100 \text{ mT}$): 高场磁化率一般用于识别是否存在顺磁性矿物和反铁磁性矿物。铁磁性磁化率(Ferromagnetic minerals, $\chi_{\text{f}} - \chi_{\text{af}}$)一般用于识别铁磁性矿物。

频率磁化率(χ_{fd}): 低频磁化率与高频磁化率的相对差值, 即: $\chi_{\text{fd}} = (\chi_{\text{f}} - \chi_{\text{af}}) / \chi_{\text{f}} \times 100\%$ 。细小的超顺磁矿物颗粒具有较高的频率磁化率, 往往指示了灼烧或成土作用的效应^[15]。

非磁滞剩磁(M_{ar}): 是样品在由强度逐渐衰减的交变磁场(800 ~ 0 mT)与恒定的弱磁场(0.05 mT)相叠加的磁场中磁化获得的等温剩磁。该参数主要反映样品中亚铁磁性矿物的富集程度。 χ_{ARM} 是单

位偏转场下的单位质量非磁滞剩磁, 它一般提供铁磁晶粒的磁畴信息, 与单畴晶粒有着正相关联系^[15]。它主要反映了样品中亚铁磁性和不完全反铁磁性矿物的含量和颗粒大小, 对小颗粒(单磁畴和小的假单畴颗粒)特别敏感, 而质量磁化率对大颗粒(例如多磁畴和大的假单畴颗粒)相对敏感些。 χ_{ARM}/χ 反映了样品中矿物磁性质的总体效应^[16], 对粒径在 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 的磁性矿物颗粒反映尤其敏感。如果样品中磁性颗粒以磁铁矿为主, 可用 χ_{ARM}/χ 的比值反映其颗粒大小, 其大小与颗粒物粒径大小成反比^[9, 17]。

等温剩磁(M_{r})和饱和等温剩磁(M_{sr}): 等温剩磁指样品在某一温度(最一般的是室温)条件下受稳定磁场作用而获得的剩余磁化强度, 其大小依赖于所加稳定磁场的强度;饱和等温剩磁是样品能够获得的最大剩磁, 通常指样品在 1 T 磁场中磁化后所保留的剩磁, 主要取决于样品中铁磁性矿物的含量和类型, 同时也依赖于矿物晶粒大小。当样品中含有大量亚铁磁性矿物单磁畴时, 饱和等温剩磁最高, 且随着磁性矿物颗粒粒径的增加, 饱和等温剩磁值减小。在反向磁场为 20 mT 中获得的等温剩磁(即 Soft)经常用来指示样品中“软”磁性矿物(通常指多磁畴亚铁磁性矿物)的含量;而饱和等温剩磁和在反向磁场为 -300 mT 获得的剩磁差值则反映了“硬”磁性矿物, 即不完全反铁磁性矿物的含量, 这是因为亚铁磁性矿物在磁场强度为 200 ~ 300 mT 时已经达到饱和状态从而对剩磁差值没有贡献^[9]。

M_{sr}/χ 是 2 个最基本磁学参数 M_{sr} 和 χ 的比率, 可直接用于识别磁性矿物类型和磁性粒径大

小。稳定单畴磁性颗粒的 M_{sr}/χ 和 χ_{ARM}/χ 值都很高,而超顺磁畴和多磁畴磁性矿物的 M_{sr}/χ 和 χ_{ARM}/χ 值较低^[5]。由于 χ_{ARM} 和 M_{sr} 同为剩磁参数,顺磁性矿物对它们没有贡献,所以 $\chi_{\text{ARM}}/M_{\text{sr}}$ 则能分辨亚铁磁性矿物的颗粒大小^[18]。同时 $M_{\text{sr}}/M_{\text{ar}}$ 可以很好地反映粗颗粒磁性矿物的变化,特别是当磁性颗粒的粒径大于 $10 \mu\text{m}$ 时更是如此。该比值对较细颗粒反映不太灵敏,但仍比 M_{sr}/χ 灵敏^[9]。 $\chi_{\text{ARM}}/\chi_{\text{f}}$ 和 $\chi_{\text{ARM}}/M_{\text{sr}}$ 不同值可能指示了样品中含有大量超顺磁畴颗粒^[9]。

$M_{\text{ar}}/M_{\text{sr}}$ 和 $M_{\text{sr}}/\kappa_{\text{f}}$: 这2个比值指示磁性矿物的粒度大小,粒度越小比值越高。 $M_{\text{ar}}/M_{\text{sr}}$ 可判断单畴和假单畴物质的含量,比值越大单畴和假单畴物质含量越高。 $M_{\text{sr}}/\kappa_{\text{f}}$ 比值反映了磁性矿物的类型、颗粒和形状的变化,当比值较小时,则表明有顺磁性矿物存在^[15]。

S 比值: 指示了铁磁性物质与反铁磁性物质相对含量的多少,比值较小的表示高矫顽力的硬磁成分含量较高;其中“Soft” M_{ir} (低矫顽力物质如磁铁矿)是样品在 300 mT 磁场中磁化后所获得的等温剩磁,指示亚铁磁性矿物的含量;“Hard” M_{ir} (高矫顽力物质如赤铁矿)是样品在 300 mT 磁场中磁化后所获得的等温剩磁与饱和等温剩磁的差值,指示不完全反铁磁性的含量^[15]。

剩磁矫顽力 (H_{cr}): 是指将样品的饱和等温剩磁减小到零时所需要的反向磁场强度,该参数既能反映磁性矿物种类的不同,也能反映磁性矿物颗粒大小的变化。某种磁性矿物具有其特定的 H_{cr} 值,据此可以快速地区分磁性矿物。实验证实: 赤铁矿 H_{cr} 约为 0.2 T, 磁铁矿 H_{cr} 小于 0.05 T^[2]。达到饱和等温剩磁一半时的磁场强度称为剩磁获得矫顽力 H_{cr} , 一般而言,磁铁矿 H_{cr} 较小,而赤铁矿和针铁矿的 H_{cr} 一般较大,据此可以识别磁性矿物的类别或组合。

$M_{\text{rs}}/M_{\text{s}}$ 与 $H_{\text{cr}}/H_{\text{c}}$ 和 Day 图: 样品中磁铁矿占主导成分的情况,饱和剩磁与饱和磁化强度之比是一种灵敏的磁化状态指示量。理论计算表明^[15]: 对单畴磁性晶粒的组合体来说, $M_{\text{rs}}/M_{\text{s}}$ 大于等于 0.5, 多畴磁性晶粒还不到 0.1, 超顺磁晶粒则更低; 矫顽力比是使剩磁矫顽力与饱和矫顽力相联系的比值。Dunlop 认为: 单畴磁性晶粒 $H_{\text{cr}}/H_{\text{c}}$ 小于等于 1.5; 多畴磁性晶粒大于等于 5; 1.5~5.0 为准单畴磁性晶粒^[15]。

H_{u} 与 H_{c} 和 FORC 图: 将样品在一个正向磁场中饱和磁化后接着朝相反方向施加一系列的场强值,每到一负方向的场强值 (H_{a}) 时就接着又将磁场反向,使样品又被正向饱和磁化,这样就会获得一系列的部分磁滞回线,这些部分磁滞回线被命名为 First-order Reversal Curves (FORC)。一外加磁场 H_{b} 在 H_{a} 的 FORC 曲线上的点被表示成 FORC 点 ($H_{\text{a}}, H_{\text{b}}$), 其中 $H_{\text{b}} \geq H_{\text{a}}$, 一系列连续的 FORC 点就决定了 FORC 分布。 H_{u} 和 H_{c} 是 H_{a} 和 H_{b} 经过坐标转换得到的垂直和水平的坐标,做出 FORC 分布的等值线,就构成 FORC 图。 H_{u} 是颗粒间相互作用的反映, H_{u} 越大颗粒间相互作用越剧烈; H_{c} 是样品矫顽力的反映,峰值处的矫顽力通常能在一定程度上反映样品中磁性矿物的平均矫顽力, FORC 图是估计磁性矿物颗粒大小非常有效的方法。它提供了关于矿物中磁成分的大量信息,如 H_{c} 、 M_{rs} 和 M_{s} 等磁性参数都能直接从 FORC 测量中获得,能很好的鉴定磁性矿物和判别其磁畴状态及颗粒间的相互作用。通过 FORC 图,可以很好地区分不相互作用的单磁畴、相互作用的单磁畴、超顺磁畴和多磁畴以及鉴别多种磁性颗粒复杂混合的样品的磁成分^[14-15, 19-20]。

磁化率各向异性: 岩石内部磁性矿物的定向排列方式,称为磁组构。它决定了岩石磁化率在各个方向上的差异性,被称为磁化率的各向异性,其特征可由一个定向的具 3 个相互垂直的椭球体予以表征。椭球体的长轴、中间轴和短轴分别与磁化率的最大、中间和最小值相对应,三轴的大小以及它们相对于水平面和北极的方位,就组成描述岩石磁组构的基本要素。在研究古流向时,常只考虑不同方向上的相对磁化率,并使用椭球体各轴比值来描述磁化率各向异性的基本性质^[21]。岩石的磁化率各向异性是进行古流动方向和沉积环境分析的有效方法。

2 环境磁学方法在古气候环境研究中的应用回顾

气候环境的变化对黄土、海洋和湖泊沉积物物源的变化以及成岩、成土过程产生重要影响,进而影响到沉积物中磁性矿物颗粒的种类、大小和浓度。因此,利用这些沉积物的磁性参数随深度的变化曲线,可以提取气候变化的信息。由于物源和沉积物环境的差异,不同的沉积物磁性参数变化各有

其独特的支配机制和特征。利用磁性参数随深度变化曲线可以进行地层划分、样芯对比、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化和环境的演化过程,且能与其他气候指标和分析数据互相印证。

2.1 黄土

中国的陆相风成沉积序列蕴含了晚新生代以来丰富的古气候信息。第四纪黄土—古土壤序列的岩石磁学性质可以揭示第四纪亚洲内陆干旱化过程和东亚古季风演化历史以及末次冰期—间冰期旋回的气候不稳定性特征^[22]。自 20 世纪 80 年代 Thompson 和 Oldfield 创立环境磁学以来,中国的黄土环境磁学最为重要的成就是发现在黄土—古土壤序列中,磁化率可以与深海氧同位素曲线进行对比,进一步研究表明磁化率可作为夏季风强弱变化的替代性指标,并将之用于黄土地层的划分、对比及古环境序列的重建,加深了对成壤作用、东亚季风、亚洲内陆干旱化以及青藏高原隆升等重大科学问题的理解^[23-39]。一系列研究认为,中国黄土沉积物中有亚铁磁性矿物,包括磁铁矿(Fe_3O_4),磁赤铁矿($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$)以及反铁磁性矿物(即赤铁矿($\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$)和针铁矿(αFeOOH))等 4 种。磁铁矿和磁赤铁矿是黄土沉积物最主要的磁性载体,对磁化率和剩磁贡献最大。从成因看,黄土沉积物中的亚铁磁性矿物既包含原生生成成因的粗颗粒磁铁矿,又包含次生成因的较细颗粒的磁赤铁矿,磁赤铁矿也可在粉尘携带的粗粒磁铁矿沉积后经低温氧化形成^[37-41]。磁赤铁矿在土壤磁学的研究中尤为重要,它了解土壤形成时的环境提供了重要信息,它的含量可以作为黄土沉积物土壤化作用强弱的重要替代指标^[42-44]。成土作用导致亚磁性矿物含量的增加是黄土/古土壤磁化率增强的主导因素^[39-41, 45-49]; Deng 等^[34]利用靖边黄土—古土壤序列的岩石磁学性质研究了第四纪以来亚洲内陆干旱化的发展过程,由于黄土沉积物中的赤铁矿是在粉尘源区或粉尘沉积后化学风化作用的产物,对于靖边剖面,黄土层或古土壤层中赤铁矿相对含量的高低就指示了粉尘源区或沉积区化学风化作用的相对强弱,进而指示黄土层或古土壤层形成时亚洲内陆地区干旱化程度的相对强弱。 $M_{\text{sr}}(100\text{ mT})/M_{\text{sr}}, M_{\text{sr}}(100\text{ mT})/M_{\text{sr}}(30\text{ mT})$ 和 $M_{\text{sr}}(100\text{ mT})/M_{\text{sr}}(60\text{ mT})$ 显示出长尺度相对含量逐渐降低,指

示了赤铁矿自 2.6 Ma 以来无论在冰期或间冰期都呈现减少的趋势,说明了第四纪以来,不论是黄土沉积区(即中国西北黄土高原地区)还是粉尘源区(即亚洲内陆沙漠、戈壁)的干旱化发展趋势总体上是增强的。这些特征与粒度^[50]以及 $N(^{87}\text{Sr})/N(^{86}\text{Sr})$ 比值^[51-53]和 $w(\text{Fe})/w(\text{Al})$ 、 $w(\text{Na})/w(\text{Al})$ 、 $w(\text{Fe}^{2+})/w(\text{Fe}^{3+})$ 比值^[54]等地球化学指标所反映的第四纪东亚冬季风演化和亚洲内陆干旱化过程是一致的。因此,这些多参数的环境磁学成果丰富了对黄土—古土壤序列蕴含的中国受东亚季风和青藏高原隆升共同影响的干旱—半干旱区环境演变规律的认识。

在黄土古气候定量研究方面,主要做的工作是恢复古温度和古降雨量。定量化的前提条件是黄土高原干旱—半干旱的西部和北部相同层位黄土磁化率低于较湿润的东部和南部同层位黄土,这种变化趋势受控于古土壤的成壤强度。成壤作用越强,磁化率越大,可将磁化率视为古温度和古降雨量的函数。Heller 等^[55-56]通过与 ^{10}Be 浓度的对比分析认为,后生的磁铁矿与当地当时的降雨量有直接的关系,古降雨量可以计算出来。吕厚远等^[57]研究认为,现代土壤磁化率随气候条件(温度、降水量)的增加而增大,但当年平均温度超过 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 、年降水量超过 $1\ 100\text{ mm}$ 时,随温度和降水量的继续增加,土壤磁化率反而减少。Banerjee 等^[58]以黄土高原地区表土磁化率数据定量估算洛川地区末次间冰期时的年平均温度为 $11\sim 13\text{ }^\circ\text{C}$ 、年平均降水量 $600\sim 700\text{ mm}$ 。全新世降水量与末次间冰期类似,年平均温度比末次间冰期低 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 、末次冰期的年平均温度 $4\sim 5\text{ }^\circ\text{C}$ 、年降水量约 350 mm 。Liu 等^[59]根据黄土和古土壤低温实验中剩磁的变化规律,即低温热退磁和时间的关系,算出超顺磁的含量,进一步计算出超顺磁的磁化率。另外测量了黄土高原 S_0 超顺磁的磁化率,建立了磁化率与当地降雨量的关系,估算了 S_1 以来的降雨量,认为末次冰期的降雨量为 $300\sim 500\text{ mm/a}$ 、末次间冰期为 $550\sim 700\text{ mm/a}$ 。Maher 等^[60]根据现代黄土高原表土的磁化率—降雨量关系由古土壤成因磁化率计算古降雨量,认为末次间冰期黄土高原整体降雨量比目前增加了 40% 、末次冰期时的降雨量下降了近 50% 、早、中全新世时的降雨量比现今高,黄土高原西部地区,当时的降雨量比现今高 $20\%\sim 80\%$ 、黄土高原东南部当时的降雨量比目前高 $5\%\sim 25\%$ 。

虽然黄土高原表土磁化率与降雨量成线性相关,但影响成壤化作用的因素很多,如气候、地形、植被、粉尘来源和时间等,成壤作用与磁化率并不总是线性相关,这就表明直接用磁化率反映古温度和古降雨量的可信度降低,而随着土壤磁化率增强机制的明了化,磁赤铁矿的含量和土壤化程度的相关性,有可能为恢复古温度和古降雨提供新的途径。

2.2 湖泊沉积物

湖泊沉积物作为气候与环境演化的忠实记录者,存储了大量区域甚至全球环境变化信息,因其连续性好、分辨率高以及对气候与环境变化的高敏感性而成为研究古气候与环境变迁的理想材料。岩石磁学和环境磁学方法作为一项重要的研究手段,在湖泊沉积物的气候环境演化研究方面发挥了重要作用。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。Thompson等^[61]首先发现湖泊沉积物的磁化率变化曲线与无机物总量有着良好的对应关系。磁学参数(例如磁化率)能够用来计算流域内进入湖泊沉积物的沉积速率^[62-68]。多环境磁学参数,可以用来评估湖泊沉积物中磁性矿物浓度、种类和颗粒大小,进而获得湖泊及周围流域内的侵蚀强度、成土过程、还原潜力和铁细菌活动变化信息等,这些变化都直接或间接地受到气候变化或人类活动的影响。Kodama等^[69]通过分析过去250年的资料发现,降雨量和湖相沉积物中磁性碎屑的浓度间有着很强的相关性。Zolitschka等^[66]则论证了在14000年的湖相沉积物中碎屑沉积速率和磁化率间有着很强的相关性。Snowball等^[67-68]报道在极地地区湖相沉积物顺磁磁化率能反映受春季融雪控制的碎屑矿物含量,而磁铁矿浓度与来源于本流域的有机碳含量存在正相关。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备受关注^[69],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^[70]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。舒小辛等^[71]对东营凹陷第三纪湖相沉积物磁性特征研究认为,沉积物磁化率值的变化,与水体的含氧量有直接关系,是沉积物早期成岩过程中活化铁稳定性的反映。一般来讲,当水体富氧时,沉积物中的活化铁稳定,磁化率值高。反之,则活化铁易向黄铁矿转化,造成磁化率值的降低。杨小强等^[72]通过对泥河湾湖相沉积物的研究得出,磁化率值和粒度参数在一定程度上反映了沉积环境的变化,磁化率值的高峰和细粒物质含量的低值代表相对较为寒冷干燥的气候或盆地的相对抬升,反之亦然。陈萍等^[73]对取自洪湖沉积物样芯的环境磁学研究指出,以质量磁化率、饱和等温剩磁等磁性参数较大值对应着冷干的气候条件;水热条件增强时,该系列磁性参数值下降,较好地记录了湖泊随气候的扩张和缩小过程,同时也反映了人类活动的影响。舒强等^[74-75]通过对中国东部典型季风区域对苏北盆地的研究,认为质量磁化率的大小变化与沉积物一定粒级组分之间存在着很好的相关性,质量磁化率的大小波动能很好地指示气候的波动,且沉积速率较高层段的质量磁化率与深海氧同位素之间吻合较好,沉积物磁化率的变化也可能指示物源的变化。

目前磁化率已广泛应用于湖泊沉积物的研究中,作为古气候环境替代性指标对不同湖泊环境演化的解释方面还存在相互矛盾的情况,但对湖泊面积较大、沉积环境变化相对单一、沉积物连续的大湖研究中,作为一种重要的环境代用指标取得了非常显著的进展。对俄国Baikal湖5Ma以来的环境磁学研究以及对法国Maar湖140ka以来湖泊沉积物磁学性质对环境的响应过程研究都是一些比较成功的例子^[76-78]。关键的问题是把湖泊沉积物磁性矿物特征和引起磁化率变化的环境磁学机制搞清楚,并进而应用到古环境和古气候的重建中。

2.3 海洋沉积物

海洋沉积物也是应用磁学方法进行气候环境研究的理想场所,深海钻探计划和海洋钻探计划及其他项目已做了很多工作,取得了许多重要的研究成果^[79-86]。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^[84]通过研究北大西洋晚更新世深海沉积物岩芯,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互相关联。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^[87]。Bloemendal 等^[81] 认为磁学参数和沉积物的矿物来源、地层岩性及成岩过程相关的海洋沉积物所含磁性矿物主要来源于陆地、生物或化学作用的产物。Kent 等^[83-84] 报道在海洋沉积物中气候变化与深海沉积物中磁性矿物种类和磁性颗粒大小组合之间的密切联系。Mead 等^[85] 通过对深海沉积物磁化率数据进行波谱分析, 首次得到了古气候轨道变化周期。Bloemendal 等^[80] 利用深海沉积物的磁学参数成功代替了其氧同位素变化。Doh 等^[86] 通过磁学方法判别了大气飘尘对太平洋沉积物的贡献率。Bloemendal 等^[82] 和 Demenocal 等^[88] 在阿拉伯海底沉积物研究中发现磁化率和地球轨道参数变化密切相关, 后续工作证明, 这是由于环境磁学参数 (例如磁化率) 与沉积物中陆相物质浓度关系密切^[80]。然而在相距不远的索马里海盆, 尽管气候发生了明显变化, 磁铁矿和赤铁矿的比率基本保持恒量。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^[89]。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。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^[90], 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赤铁矿和细菌成因胶黄铁矿也有报道^[91]。总之, 早期成岩作用能改变沉积物的原始磁学性质, 不仅使沉积物的原始载磁矿物发生溶解和再沉淀, 而且未知滞后时间的新矿物剩磁叠加在特征剩磁上, 是古地磁结果和磁学参数的解释变得困难。刘健等^[92-93] 先后对南黄海东南部和朝鲜海峡 3 个钻孔冰消期和冰后期的泥质沉积物进行了岩石磁学和地球化学研究, 揭示了较高分辨率的早期成岩作用过程, 并且证明这种沉积物的磁学特征不再是气候变化的响应。早期成岩中发生铁、锰、硫化物的溶解和再沉淀, 将影响正常沉积作用下地球化学指标对古气候环境变化的记录。

3 环境磁学在古气候环境研究方面的展望

以黄土、湖泊和海洋沉积物为研究对象的环境磁学在古气候环境和全球变化研究方面已取得了重要进展, 但还有许多问题亟待解决和需要深入研究。

由于黄土在沉积过程中涉及物源、搬运、沉积以及后期成土作用改造等诸多过程, 受气候条件控制的土壤化作用普遍存在, 因此目前并不清楚黄土沉积物磁性增强的确切机制、磁性参数与气候的定量化关系、黄土的沉积剩磁是否存在较大的锁定深度以及成土作用对沉积剩磁的改造等。要深入理解这些问题, 不仅需要获得黄土沉积物中各种磁性矿物的来源、粒度和含量等基本岩石磁学参数, 而且应确定不同成因磁性矿物对古环境和古地磁信息的贡献和改造过程。其中, 深入研究黄土沉积物的土壤化过程对磁性矿物的影响是理解这些问题的关键。中国黄土沉积物的磁气候学记录灵敏地反映了第四纪内陆地区干旱化过程和东亚古季风演化及青藏高原的隆升历史^[22]。下一步的工作方向应该是进一步定量化提取磁气候记录, 既要区分粉尘源区和沉积区的磁信号, 又要区分不同土壤化作用阶段的磁信号, 同时还需要开展微生物对磁性矿物改造方面等问题的深入研究。

湖泊的大小、地理位置及流域特征对气候环境变化的磁响应存在较大差异, 有的能较好地反映气候的长期变化, 有的仅能反映区域气候变化。已有研究表明, 一般湖泊面积有限, 受流域大小的影响显著, 水下沉积物所处物理、化学及生物条件复杂多变, 同一指标的测试结果存在多解性, 指标之间存在相互矛盾的情况, 解释起来比较困难, 这就要求加强湖泊沉积的区域性与物源的多样性研究。但对湖泊面积较大、沉积环境变化相对单一、沉积物连续的大湖研究中, 磁学参数作为重要的环境代用指标取得了非常显著的进展, 关键问题是把湖泊沉积物磁性矿物组成特征和引起磁性参数变化的环境磁学机制搞清楚, 进而应用到古环境和古气候的重建中; 诸如 Baikal 湖湖泊沉积物的磁化率在温暖多雨的阶段高, 而干旱阶段低, 因为温暖多雨时湖泊的硅藻生长旺盛稀释了磁性矿物的浓度导致磁化率降低, 而寒冷干燥时风力强携带到湖泊中的磁性矿物含量增加, 导致磁化率值增加^[76]。青海湖

是中国最大的内陆干旱湖泊, 其巨厚的沉积物记录了丰富的东亚以至全球气候环境演化信息。青海湖环境科学钻探计划的成功实施, 为环境磁学在气候环境研究方面创造了良好的发展机遇, 通过高分辨率、多参数的岩石磁学、环境磁学指标的系统分析, 分析成岩作用过程对沉积物磁性的影响过程, 深入研究青海湖钻孔沉积岩芯, 有望获得高水平的研究成果。

相对湖泊而言, 海洋沉积环境稳定, 能很好地反映全球和气候环境信息。海洋沉积物的气候环境研究最重要的成就是磁学参数与古气候指标的对应, 在深海钻探计划和海洋钻探计划中, 环境磁学在地层对比、成岩过程中磁性矿物转变; 全球气候变化特征的研究中发挥了重要的作用^[79-89]。加强成岩作用过程对磁性矿物形成转化过程的研究, 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是环境磁学在湖泊海洋沉积气候环境研究方面的前沿领域和重要发展方向。

总之, 利用环境磁学多参数综合分析的优势, 加强对不同类型沉积物磁性矿物组成特征、迁移转化机制的研究, 分析磁性参数组合在不同区域随时间变化的原因, 揭示磁性参数的气候环境指示意义, 强化半定量—定量研究, 是环境磁学在古气候环境研究方面发展的必由之路。湖泊和海洋沉积物的早期成岩作用严重影响着沉积物的原始特征剩磁, 磁学参数值无特征变化, 给磁性地层学和利用磁学参数开展古气候环境研究带来负面的影响, 如何解决这个问题, 是目前面临的挑战和机遇。随着对成岩作用研究的进一步深化, 其对特征沉积环境指示意义的揭示, 将为环境磁学的发展开辟一片崭新的天地。

参考文献:

- [1] Thompson R, Stober J C, Turner G M, et al. Environmental Applications of Magnetic Measurements[J]. Science, 1980, 207: 481-486.
- [2] Thompson R, Oldfield F. Environmental Magnetism[M]. London: Allen and Unwin, 1986.
- [3] King J W, Channell J E T. Sedimentary Magnetism, Environmental Magnetism and Magnetostratigraphy[J]. Reviews of Geophysics, 1991, 29(Supp): 358-370.
- [4] Verosub K L, Roberts A P. Environmental Magnetism: Past, Present, and Future[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, 100(B2): 2175-2192.
- [5] Dekkers M J. Environmental Magnetism: an Introduction[J]. Geologie en Mijnbouw, 1997, 76(1/2): 163-182.
- [6] Courtillot V. Recent Progress in Rock Magnetism[J]. Geophysical Research Letters, 1996, 23(20): 2801.
- [7] 田莉丽, 邓成龙. 岩石的磁学性质[J]. 地球物理学进展, 2001, 16(2): 109-117.
- [8] Toni M, Fukuma K, Horng C S, et al. Magnetic Discrimination of Pyrrhotite- and Greigite-bearing Sediment Samples[J]. Geophysical Research Letters, 1996, 23(14): 1813-1816.
- [9] Maher B A, Thompson R. Quaternary Climates, Environments and Magnetism[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [10] Hrouda F. A Technique for the Measurement of Thermal Changes of Magnetic Susceptibility of Weakly Magnetic Rocks by the CS-2 Apparatus and KLY-2 Kappabridge[J]. Geophysical Journal International, 1994, 118(3): 604-612.
- [11] Van Velzen A J, Dekkers M J. The Incorporation of Thermal Methods in Mineral Magnetism of Loess-paleosol Sequence: a Brief Overview[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(Supp1): 53-63.
- [12] Lowrie W. Identification of Ferromagnetic Minerals in a Rock by Coercivity and Unblocking Temperature Properties[J]. Geophysical Research Letters, 1990, 17(2): 159-162.
- [13] Day R, Fuller M D, Schmidt V A. Hysteresis Properties of Titanomagnetites: Grain-size and Composition Dependence[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1977, 13(4): 260-267.
- [14] Roberts A P, Pike C R, Verosub K L. First-order Reversal Curve Diagrams: a New Tool for Characterizing the Magnetic Properties of Natural Samples[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(B12): 28461-28475.
- [15] Evans M E, Heller F. Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics[M]. Oxford: Academic Press, 2003.
- [16] 潘永信, 朱日祥. 环境磁学研究现状和进展[J]. 地球物理学进展, 1996, 11(4): 87-99.
- [17] King J, Banerjee S K, Marvin J, et al. A Comparison of Different Magnetic Methods for Determining the Relative Grain Size of Magnetite in Natural Materials: Some Results From Lake Sediments[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1982, 59(2): 404-419.
- [18] Maher B A. Magnetic Properties of Some Synthetic Sub-micron Magnetites[J]. Geophysical Journal, 1988, 94(1): 83-96.
- [19] Pike C R, Roberts A P, Verosub K L. Characterizing Interactions in Fine Magnetic Particle Systems Using First Order Reversal Curves[J]. Journal of Applied Physics, 1999, 85(9): 6660-6667.
- [20] 敖红, 邓成龙. 磁性矿物的磁学鉴别方法回顾[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 432-442.
- [21] Hrouda F. Magnetic Anisotropy of Rocks and Its Application

- tion in Geology and Geophysics[J]. *Surveys in Geophysical*, 1982, 5(1): 37-82.
- [22] 邓成龙, 刘青松, 潘永信, 等. 中国黄土环境磁学[J]. 第四纪研究, 2007, 27(2): 193-209.
- [23] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [24] Heller F, Liu T S. Palaeoclimate and Sedimentary History from Magnetic Susceptibility of Loess in China[J]. *Geophysical Research Letters*, 1986, 13(11): 1169-1172.
- [25] An Z S, Kukla G J, Porter S C, et al. Magnetic Susceptibility Evidence of Monsoon Variation on the Loess Plateau of Central China During the Last 130 000 Years[J]. *Quaternary Research*, 1991, 36(1): 29-36.
- [26] Zhou L P, Oldfield F, Wintle A G, et al. Partly Pedogenic Origin of Magnetic Variations in Chinese Loess[J]. *Nature*, 1990, 346: 737-739.
- [27] Rea D K, Snoeckx H, Joseph L H. Late Cenozoic Eolian Deposition in the North Pacific: Asian Drying, Tibetan Uplift, and Cooling of the Northern Hemisphere[J]. *Paleoceanography*, 1998, 13(3): 215-224.
- [28] An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, et al. Evolution of Asian Monsoons and Phased Uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau Since Late Miocene Times[J]. *Nature*, 2001, 411: 62-66.
- [29] An Z S. The History and Variability of the East Asian Paleomonsoon Climate[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(1/5): 171-187.
- [30] 安芷生, 张培震, 王二七, 等. 中新世以来我国季风-干旱环境演化与青藏高原的生长[J]. 第四纪研究, 2006, 26(5): 678-693.
- [31] Sun D H, Shaw J, An Z S, et al. Magnetostratigraphy and Paleoclimatic Interpretation of a Continuous 7.2 Ma Late Cenozoic Eolian Sediments from the Chinese Loess Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(1): 85-88.
- [32] Ding Z L, Xiong S F, Sun J M, et al. Pedostratigraphy and Paleomagnetism of a ~7.0 Ma Eolian Loess-red Clay Sequence at Lingtai, Loess Plateau, North-central China and the Implications for Paleomonsoon Evolution[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 152(1): 49-66.
- [33] Guo Z T, Ruddiman W F, Hao Q Z, et al. Onset of Asian Desertification by 22 Myr Ago Inferred from Loess Deposits in China[J]. *Nature*, 2002, 416: 159-163.
- [34] Deng C L, Shaw J, Liu Q S, et al. Mineral Magnetic Variation of the Jingbian Loess/Paleosol Sequence in the Northern Loess Plateau of China: Implications for Quaternary Development of Asian Aridification and Cooling[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 241(1/2): 248-259.
- [35] 方小敏, 徐先海, 宋春晖, 等. 临夏盆地新生代沉积物高分辨率岩石磁学记录与亚洲内陆干旱化过程及原因[J]. 第四纪研究, 2007, 27(6): 989-1000.
- [36] 刘秀铭, 夏敦胜, 刘东生, 等. 中国黄土和阿拉斯加黄土磁化率气候记录的两种模式探讨[J]. 第四纪研究, 2007, 27(2): 210-220.
- [37] Liu Q S, Jackson M J, Banerjee S K, et al. Mechanism of the Magnetic Susceptibility Enhancements of the Chinese Loess[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(B12): B12107. 1-B12107. 16.
- [38] 刘青松, Banerjee S K, Jackson M J, 等. 低温氧化作用对中国黄土记录剩磁的影响[J]. 科学通报, 2003, 48(2): 193-198.
- [39] Liu Q S, Banerjee S K, Jackson M J, et al. New Insights into Partial Oxidation Model of Magnetites and Thermal Alteration of Magnetic Mineralogy of the Chinese Loess in Air[J]. *Geophysical Journal International*, 2004, 158(2): 506-514.
- [40] Deng C L, Vidic N J, Verosub K L, et al. Mineral Magnetic Variation of the Jiaodao Chinese Loess/Paleosol Sequence and its Bearing on Long-term Climatic Variability[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(B3): B03103. 1-B03103. 17.
- [41] Liu Q S, Deng C L, Torrent J, et al. Review of Recent Developments in Mineral Magnetism of the Chinese Loess[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(3/4): 368-385.
- [42] Deng C L, Zhu R X, Verosub K L, et al. Paleoclimatic Significance of the Temperature-dependent Susceptibility of Holocene Loess Along a NW-SE Transect in the Chinese Loess Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(22): 3715-3718.
- [43] Deng C L, Zhu R X, Jackson M J, et al. Variability of the Temperature-dependent Susceptibility of the Holocene Eolian Deposits in the Chinese Loess Plateau: a Pedogenesis Indicator[J]. *Physics and Chemistry of the Earth Part A: Solid Earth and Geodesy*, 2001, 26(11/12): 873-878.
- [44] Guo B, Zhu R X, Roberts A P, et al. Lack of Correlation Between Paleoprecipitation and Magnetic Susceptibility of Chinese Loess/Paleosol Sequences[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(22): 4259-4262.
- [45] Deng C L, Zhu R X, Verosub K L, et al. Mineral Magnetic Properties of Loess/Paleosol Couplets of the Central Loess Plateau of China over the Last 1.2 Myr[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(B1): B01103. 1-B01103. 13.
- [46] Florindo F, Zhu R X, Guo B, et al. Magnetic Proxy Climate Results from the Duanjiapo Loess Section, Southernmost Extremity of the Chinese Loess Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(B1): 645-659.
- [47] 王喜生, 杨振宇, Løvlie R, 等. 黄土高原东南缘黄土-古土壤序列的环境磁学结果及其古气候意义[J]. 科学通报, 2006, 51(13): 1575-1582.
- [48] Eyre J K, Shaw J. Magnetic Enhancement of Chinese Loess: the Role of $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$? [J]. *Geophysical Journal International*, 1994, 117(1): 265-271.
- [49] Forster T, Heller F. Magnetic Enhancement Paths in Loess Sediments from Tajikistan, China and Hungary[J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24(1): 17-20.
- [50] Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, et al. Stacked 2.6 Ma Grain Size Record from the Chinese Loess Based on Five Sec-

- tions and Correlation with the Deep-sea $\delta^{18}\text{O}$ Record[J]. *Paleoceanography*, 2002, 17(3): 1033.
- [51] 陈 骏, 安芷生, 刘连文, 等. 最近 2.5 Ma 以来黄土高原风尘化学组成的变化与亚洲内陆的化学风化[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2001, 31(2): 136-145.
- [52] Sun J M. Nd and Sr Isotopic Variations in Chinese Eolian Deposits During the Past 8 Ma: Implications for Provenance Change[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 240(2): 454-466.
- [53] 饶文波, 杨杰东, 陈 骏, 等. 中国干旱一半干旱区风尘物质的 Sr, Nd 同位素地球化学: 对黄土来源和季风演变的指示[J]. *科学通报*, 2006, 51(4): 378-386.
- [54] 顾兆炎, 韩家懋, 刘东生. 中国第四纪黄土地球化学研究进展[J]. *第四纪研究*, 2000, 20(1): 41-55.
- [55] Heller F, Shen C D, Beer J, et al. Quantitative Estimates of Pedogenic Ferromagnetic Mineral Formation in Chinese Loess and Palaeoclimatic Implications[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 114(2/3): 385-390.
- [56] Sartori M, Evans M E, Heller F, et al. The Last Glacial/Interglacial Cycle at Two Sites in the Chinese Loess Plateau: Mineral Magnetic Grain-size and ^{10}Be Measurements and Estimates of Palaeoprecipitation[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 222(1/2): 145-160.
- [57] 吕厚远, 韩家懋, 吴乃琴, 等. 中国现代土壤磁化率分析及其古气候意义[J]. *中国科学 B 辑: 化学*, 1994, 24(12): 1290-1297.
- [58] Banerjee S K, Hunt C P, Liu X M. Separation of Local Signals from the Regional Paleomonsoon Record of the Chinese Loess Plateau: a Rock Magnetic Approach[J]. *Geophysical Research Letters*, 1993, 20(9): 843-846.
- [59] Liu X M, Rolph T, Bloemendal J, et al. Quantitative Estimates of Palaeoprecipitation at Xifeng, in the Loess Plateau of China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1995, 113(2): 243-248.
- [60] Maher B A, Thompson R. Paleorainfall Reconstructions from Pedogenic Magnetic Susceptibility Variations in the Chinese Loess and Paleosols[J]. *Quaternary Research*, 1995, 44(3): 383-391.
- [61] Thompson R, Batterbee R W, Sullivan P E, et al. Magnetic Susceptibility of Lake Sediments[J]. *Limnology and Oceanography*, 1975, 20(5): 687-698.
- [62] Bloemendal J, Oldfield F, Thompson R. Magnetic Measurements Used to Assess Sediment Influx at Llyn Goddionduon[J]. *Nature*, 1979, 280: 50-53.
- [63] Oldfield F, Thompson R, Barber K E. Changing Atmospheric Fallout of Magnetic Particles Recorded in Recent Ombrotrophic Peat Section[J]. *Science*, 1978, 199: 679-690.
- [64] Oldfield F, Hunt A, Jones M D H, et al. Magnetic Differentiation of Atmospheric Dusts[J]. *Nature*, 1985, 317: 516-518.
- [65] Kodama K P, Lyons J C, Siver P A, et al. A Mineral Magnetic and Scaled-chrysophyte Paleolimnological Study of Two Northeastern Pennsylvania Lakes: Records of Fly Ash Deposition, Land-use Change, and Paleorainfall Variation[J]. *Journal of Paleolimnology*, 1997, 17(2): 173-189.
- [66] Zolitschka B. A 14 000 Year Sediment Yield Record from Western Germany Based on Annually Laminated Lake Sediments[J]. *Geomorphology*, 1998, 22(1): 1-17.
- [67] Snowball I, Sandgren P, Petterson G. The Mineral Magnetic Properties of an Annually Laminated Holocene Lake-sediment Sequence in Northern Sweden[J]. *The Holocene*, 1999, 9(3): 353-362.
- [68] Snowball I, Zillen L, Gaillard M J. Rapid Early Holocene Environmental Changes in Northern Sweden Based on Studies of Two Varved Lake-sediment Sequences[J]. *The Holocene*, 2002, 12(1): 7-16.
- [69] Snowball I. Bacterial Magnetite and the Magnetic Properties of Sediments in a Swedish Lake[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 126(1/3): 129-142.
- [70] 胡守云, 王苏民, Appel E, 等. 呼伦湖湖泊沉积物磁化率变化的环境磁学机制[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1998, 28(4): 334-339.
- [71] 舒小辛, 刘志伟, 王惠中, 等. 东营凹陷第三纪湖泊沉积物磁性特征及其与环境变化的关系[J]. *沉积学报*, 1995, 13(增刊): 96-101.
- [72] 杨小强, 李华梅. 泥河湾盆地沉积物粒度组分与磁化率变化相关性研究[J]. *沉积学报*, 2002, 20(4): 675-679.
- [73] 陈 萍, 何报寅, 杜 耘, 等. 1200 a 来洪湖演变的环境磁学记录[J]. *沉积学报*, 2005, 23(1): 138-142.
- [74] 舒 强, 卫 艳, 李吉均, 等. 苏北盆地兴华 1[#]钻孔沉积物磁化率特征及其古气候环境意义[J]. *地质科技情报*, 2005, 24(4): 31-36.
- [75] 舒 强, 李吉均, 赵志军, 等. 苏北盆地 XH-1[#]钻孔沉积物磁化率与粒度组分相关性变化特征及其意义研究[J]. *沉积学报*, 2006, 24(2): 276-281.
- [76] Peck J A, King J W, Colman S M, et al. A Rock-magnetic Record from Lake Baikal, Siberia: Evidence for Late Quaternary Climate Change[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 122(1/2): 221-238.
- [77] Peck J A, King J W, Williams D F, et al. A 5 Ma Climate Proxy Record from Central Asia: Rock-magnetic Results from the 1996 Lake Baikal Drilling Project[J]. *Geological Society of America*, 1997, 29(6): 374.
- [78] Thouveny N, Beaulieu J L, Bonifay E, et al. Climate Variations in Europe over the Past 140 kyr Deduced from Rock Magnetism[J]. *Nature*, 1994, 371: 503-506.
- [79] Frederichs T, Bleil U, Daumler K, et al. The Magnetic View on the Marine Paleoenvironment: Parameters, Techniques and Potentials of Rock Magnetic Studies as a Key to Paleoclimatic and Paleoceanographic Changes[C] // Fischer G, Wefer G. *Use of Proxies in Paleoceanography: Examples from the South Atlantic*. Berlin: Springer-Verlag, 1999: 575-599.
- [80] Bloemendal J, DeMenocal P. Evidence for a Change in the Pe-

riodicity of Tropical Climate Cycles at 2.4 Myr from Whole-core Magnetic Susceptibility Measurements [J] . *Nature*, 1989, 342: 897-900.

[81] Bloemendal J, King J W, Hall F R, et al. Rock Magnetism of Late Neogene and Pleistocene Deep-sea Sediments: Relationship to Sediment Source, Diagenetic Processes and Sediment Lithology [J] . *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97 (B4): 4361-4375.

[82] Bloemendal J, King J W, Hunt A, et al. Origin of the Sedimentary Magnetic Record at Ocean Drilling Program Sites on the Owen Ridge, Western Arabian Sea [J] . *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98(B3): 4199-4219.

[83] Kent D V. Apparent Correlation of Paleomagnetic Intensity and Climatic Records in Deep-sea Sediments [J] . *Nature*, 1982, 299: 538-539.

[84] Robinson S G. The Late Pleistocene Palaeoclimatic Record of North Atlantic Deep-sea Sediments Revealed by Mineral-magnetic Measurements [J] . *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1986, 42(1/2): 22-47.

[85] Mead G A, Tauxe L, Labrecque J L. Oligocene Paleooceanography of the South Atlantic: Palaeoclimatic Implications of Sediment Accumulation Rates and Magnetic Susceptibility Measurements [J] . *Paleoceanography*, 1986, 1(3): 273-284.

[86] Doh S J, King J W, Leinen M. A Rock-magnetic Study of Giant Piston Core LL44-GPC3 from the Central North Pacific and Its Paleooceanographic Implications [J] . *Paleoceanography*, 1988, 3(1): 89-111.

[87] Kissel C, Laj C, Labeyrie L, et al. Rapid Climatic Variations During Marine Isotopic Stage 3: Magnetic Analysis of Sediments from Nordic Seas and North Atlantic [J] . *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 171(3): 489-502.

[88] Demenocal P B, Bloemendal J, King J. A Rock-magnetic Record of Monsoonal Dust Deposition to the Arabian Sea: Evidence for a Shift in the Mode of Deposition at 2.4 Ma [J] . *Proceedings of the Ocean Drilling Program*, 1991, 117: 389-407.

[89] Nowaczyk N R. Detailed Study on the Anisotropy of Magnetic Susceptibility of Arctic Marine Sediments [J] . *Geophysical Journal International*, 2003, 152(2): 302-317.

[90] Robinson S G, Sahota J T S. Rock-magnetic Characterization of Early, Redoxomorphic Diagenesis in Turbiditic Sediments from the Madeira Abyssal Plain [J] . *Sedimentology*, 2000, 47 (2): 367-394.

[91] Roberts A P, Toner G M. Diagenetic Formation of Ferri-magnetic Iron Sulphide Minerals in Rapidly Deposited Marine Sediments, South Island, New Zealand [J] . *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 115(1/4): 257-273.

[92] 刘健, 朱日祥, 李绍全, 等. 南海海东南部冰后期泥质沉积物中磁性矿物的成岩变化及其对环境变化的响应 [J] . *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 33(6): 583-592.

[93] Liu J, Zhu R X, Roberts A P, et al. High-resolution Analysis of Early Diagenetic Effects on Magnetic Minerals in Post-middle-holocene Continental Shelf Sediments from the Korea Strait [J] . *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109(B3): B03103. 1-B03103. 15.

(上接第 301 页)

(2)用固定基准面作图和浮动基准面作图的方法可以消除由于填充速度带来构造假像, 反映地下真实构造形态, 解决复杂地区构造保真问题, 提高勘探精度, 保证勘探质量。

参考文献:

[1] 李桂花, 朱光明, 张文波. 剩余静校正异常对叠加结果的影响与采集参数和反射特征的关系 [J] . *地球科学与环境学报*, 2004, 26(4): 75-80.

[2] 潘宏勋, 方伍宝, 武永山, 等. 改进的相对折射静校正方法 [J] . *石油物探*, 2003, 42(2): 208-211.

[3] 井西利. 大剩余静校正量求解的两步法 [J] . *石油地球物理勘探*, 2003, 38(1): 22-26.

[4] Anderson R G, Mcmechan G A. Automatic Editing of Noisy Seismic Data [J] . *Geophysical Prospecting*, 1989, 37 (1): 875-892.

[5] 李庆忠. 走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析 [M] . 北京: 石油工业出版社, 1993.

[6] 姜岩, 李文艳, 叶萍. 基于正演模拟的地震反射特征主要影响因素分析 [J] . *大庆石油地质与开发*, 2006, 25(5): 100-102.

[7] White D J. Two-dimensional Seismic Refraction Tomography [J] . *Geophysical Journal International*, 1989, 97(2): 223-245.

[8] Zhang J, Toksoz M N. Nonlinear Refraction Traveltime Tomography [J] . *Geophysics*, 1998, 63(5): 1726-1737.

[9] 祝伟业, 张权. 二维叠偏剖面作图中值得注意的问题 [J] . *石油物探*, 2000, 39(3): 100-107.

[10] 姜修道, 朱光明, 朱龙生, 等. 中国大陆科学钻探先导孔零偏 VSP 资料解释 [J] . *地球科学与环境学报*, 2004, 26(1): 55-60.

[11] Stewart R R, Gaiser J E, Brown R J, et al. Converted-wave Seismic Exploration: Applications [J] . *Geophysics*, 2003, 68(1): 40-57.

[12] 杨子川. 波形分析在塔河油田勘探开发中的应用 [J] . *新疆石油地质*, 2005, 26(3): 310-312.

[13] 赵峰, 郑鸿明, 杨晓海, 等. 地震数据处理中静校正对动校正速度的影响 [J] . *新疆石油地质*, 2004, 25(4): 390-393.

[14] Haldorsen H H, Damsleth E. Challenges in Reservoir Characterization [J] . *AAPG Bulletin*, 1993, 77(4): 541-551.

[15] 云美厚, 丁伟. 地震分辨率新认识 [J] . *石油地球物理勘探*, 2005, 40(5): 603-608.