

# 磁化率各向异性测量在沉积学中的应用

许峰宇

(徐州师范学院地理系)

王力波

(南京地质矿产研究所)

**提 要** 本文利用磁化率各向异性来研究南京下蜀土的沉积组构。根据南京下蜀土的磁组构特征及其与华北黄土的对比分析,探讨了下蜀土的成因,并进而指出了磁化率各向异性测量对于沉积学的重要意义。

**关键词** 下蜀土 磁化率各向异性 沉积组构

**第一作者简介** 许峰宇 男 28岁 硕士 第四纪地质学

磁化率各向异性测量是通过对沉积物不同方向上磁化率的测量,根据它们的磁化率差异来研究沉积物的磁组构特征。华北黄土磁化率各向异性测量的结果表明,原生风成黄土和水成次生黄土这两种不同介质中沉积下来的沉积物,它们的磁组构特征不同,据此差异可将二者区分开来<sup>[1]</sup>。

下蜀土是广泛分布于长江中下游特别是宁镇山脉地区的第四纪松散土状堆积物(属中国黄土系列,是黄土在长江中下游地区的反映)。对它的研究虽已有 100 多年的历史<sup>[2]</sup>,但对其成因一直存在着不同的意见,主要有以风成为主和水成为主两种不同的观点<sup>[3,4]</sup>。本文尝试通过对下蜀土磁化率各向异性的测量,来说明它的磁组构特征进而探求其成因。

## 1 磁化率各向异性测量的原理及方法

### 1.1 磁化率各向异性测量的基本原理及主要参数的物理意义

据测定,黄土类沉积物中的磁性矿物主要是磁铁矿和磁赤铁矿,对黄土的磁化率作出主要贡献的也是这些强磁性的磁铁矿型矿物,引起黄土磁化率各向异性的主要因素是这些矿物颗粒形状的定向排列。这种磁化率各向异性就是形状各向异性<sup>[1]</sup>。

形状各向异性是由于非等轴颗粒不同方向的退磁系数不同而产生的。自然界中沉积物颗粒多为不规则形状。可以用三轴椭球( $a \geq b \geq c$ )近似表示。可以证明,沿  $a$ 、 $b$  和  $c$  三轴方向的退磁系数分别为  $N_a$ 、 $N_b$  和  $N_c$  的磁铁矿型磁颗粒,具有  $N_c \geq N_b \geq N_a$  的关系,即沿颗粒长轴方向的退磁系数最小,沿短轴方向的退磁系数最大。

实验中,人们观测到的磁化率是视磁化率  $K_0$ ,它与真磁化率  $K_{in}$  具有下列关系:

$$k_0 = k_{in} / (1 + N_i \cdot K_{in})$$

式中  $N_i$  为  $i$  方向的退磁系数,对于同一磁颗粒  $K_{in}$  为常数。由于  $N_c \geq N_b \geq N_a$ ,故有

$$K_a \geq K_b \geq K_c$$

即沿  $a$ 、 $b$  和  $c$  方向的磁化率  $K_a$ 、 $K_b$  和  $K_c$  分别为该磁颗粒磁化率椭球三主轴:长轴  $K_1$ ,中轴  $K_2$  和短轴  $K_3$ ,并且

$$K_1 // a, \quad K_2 // b, \quad K_3 // c$$

上式表明,可以用磁化率三主轴代替(磁)颗粒形状三主轴进行岩石组构的研究,宏观观察和岩石组构研究也证实了这一点。

磁化率各向异性研究主要采用各向异性度,磁线理度,磁面理度等参数进行描述。其表达式和物理意义如下:

(1)各向异性度  $P=K_1/K_3$ ,表示岩石中的铁磁性矿物优势定向程度。一块样品  $P$  值越高,即  $K_1$  与  $K_3$  差值越大,说明样品中的磁颗粒优势定向程度越高。

(2)磁线理度  $L=K_1/K_2$ ,表示样品中磁颗粒线状平行排列程度。

(3)磁面理度  $F=K_2/K_3$ ,表示样品中磁颗粒面状平行排列程度。

(4)扁率  $E=K_2^2/(K_1 \cdot K_3)$ , $E$  大于 1,磁化率椭球为压扁型, $E$  小于 1 为拉长型。

因此,只要获得一个样品三轴磁化率及其方向,就可了解样品中上述特征的总趋势。

## 1.2 磁化率各向异性测量的基本方法

各向异性磁化率可由下面张量形式表示:

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{bmatrix}$$

$K$  是一个三维二阶实对称矩阵,其中  $K_{12}=K_{21}$ , $K_{13}=K_{31}$ , $K_{23}=K_{32}$ , $K_{11}$ 、 $K_{22}$ 、 $K_{33}$  是样品三个正交坐标轴上的方向磁化率, $K_{12}$ 、 $K_{21}$ 、 $K_{13}$ 、 $K_{31}$ 、 $K_{23}$  和  $K_{32}$  为交叉磁化率。

要求出各向异性磁化率三个主磁化率值( $K_1$ 、 $K_2$  和  $K_3$ )以及它们的分布方向,只需求上述矩阵的特征值及特征向量即可。

样品的方向磁化率是磁化率 6 个独立分量的函数,要求得这 6 个独立分量,只要分别测出 6 个互不相关的方向磁化率就可以联立方程解出这 6 个未知量。但是,为了提高测量精度,减小测量误差,我们在实际测量时使用了 15 个位置的测量方法,得到 15 个位置的方向磁化率后,利用最小 2 乘原理中的多元线性回归方法,得出 6 个独立分量的统计平均值。15 个测量位置如图 1 所示。求解形式见下式,有关的具体推导,这里不再赘述。

$$\begin{bmatrix} K_{11} \\ K_{22} \\ K_{33} \\ K_{12} \\ K_{23} \\ K_{13} \end{bmatrix} = \frac{1}{20} \begin{bmatrix} 3 & 3 & 8 & 3 & 3 & -2 & -2 & -2 & -2 & -2 & 3 & 3 & -2 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & -2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 8 & 3 & 3 & -2 & -2 & -2 & -2 & -2 \\ -2 & -2 & -2 & -2 & -2 & 3 & 3 & -2 & 3 & 3 & 3 & 3 & 8 & 3 & 3 \\ \vdots & & & & & & & & & & & & & & \\ -5 & 5 & 0 & -5 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5 & 5 & 0 & -5 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5 & 5 & 0 & -5 & 5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ \vdots \\ K_{13} \\ K_{14} \\ K_{15} \end{bmatrix}$$

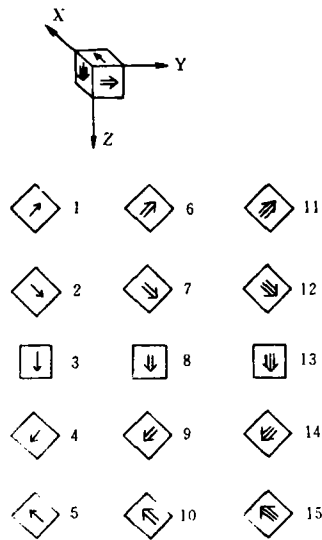


图1 样品各向异性测量之15位置  
Fig. 1 The sample's 15 position of measurement of anisotropy

## 2 下蜀土磁化率各向异性测量及结果

基于上述的基本原理和方法,为了说明下蜀土磁组构特征,我们在南京新生圩李家岗剖面、杨梅塘剖面、燕子矶剖面和老虎山剖面选取了两块古土壤样和12个黄土样作为下蜀土的代表,做了磁化率各向异性测量,其过程及结果如下:

### 2.1 样品制备及测量

首先在新鲜剖面上选一块较为致密的下蜀土,用不锈钢刀削一近水平面,接着用玻璃修成水平面,标出真北方向,然后再削成样品盒容体大小的圆柱体,标出上、下方向,将样品套入样品盒,再轻轻地使样品与土块分离,修掉多余部分,合上盖,务必使样品在盒内不晃动,立即用乳胶封口,这样就可进行磁化率各向异性的测量。

本文实验仪器为王力波研制的HKB-1型高精度磁化率仪。每个样品均在三维坐标内测量了15个方向的磁化率。该磁化率仪可与微机联机,因此,15个方向的

磁化率值除可直接显示外,也可自动输入计算机,应用事先配备的软件,计算出磁化率张量的6个独立分量和各向异性参数,并连同15个位置的测量读数一并打印出来或根据需要作图输出。

### 2.2 测量结果分析

所测下蜀土样品的磁化率各向异性度  $1.004 < P < 1.02$ , 平均为 1.0105。最大值 1.0181 为燕子矶剖面中含斑点状粘土薄膜的黄土层的样品,最小值 1.0045 为李家岗剖面底部古土壤层的样品。一般水成岩的各向异性度  $P > 1.02$ , 下蜀土不具此特征,它的各向异性很不明显。

磁线理度  $L$  很不发育(图2-a),  $1.0005 \leq L \leq 1.0031$ , 平均为 1.0017, 最大值 1.0031 为新生圩剖面第三层黄土上部的样品,最小值 1.0005 为该剖面最后一层黄土上部的样品。

磁面理度  $1.004 < F < 1.016$  (图 2-a), 平均为 1.0087, 最大值 1.0159 为燕子矶剖面中风化黄土层的样品, 最小值 1.0033 为新生圩剖面底部占土壤层的样品。磁面理的发育程度相对线理要好。

各向异性椭球的扁率  $E > 1$ , 说明磁化率椭球以压扁型占优势或近于旋转压扁椭球。

近年来, 刘秀铭等对华北黄土磁化率各向异性的测量表明, 风成黄土和水成黄土在 L-F 图中有各自不同的分布区域 [1]。我们把所有下蜀土样品在 L-F 图中的分布均投映在华北黄土的 L-F 图中得到图 2-b, 发现所有下蜀土样品的分布均落在华北风成黄土的分布范围内, 且比华北黄土的分布更为集中。

为了研究下蜀土各向异性磁化率椭球形状变化的内在关系, 分别作磁化率各向异性度 P 与磁面理度 F、线理度 L 的相关图 (图 3), 并用统计方法求得相关系数 r 和拟合直线方程  $y = a + bx$ , 结果表明, P 与 F 密切相关, 相关系数  $r = 0.98$ , 拟合直线方程为  $y = 0.0771 + 0.9219x$ ; P 与 L 相关不明显, 相关系数  $r = 0.40$ , 拟合直线方程为  $y = 0.9218 + 0.0791x$ 。下蜀土的 P-F 及 P-L 相关特点与华北风成黄土极为相似 (图 4)。

从图 3 与图 4 的对比中还可看出, 图 3 中 14 块下蜀土样品测量结果的分布要比图 4 中 27 块样品的分布更集中,

这主要是由于所用仪器为新研制的高精度、高灵敏度磁化率仪。因此, 虽然下蜀土的各项异性非常微弱, 也能测出其可靠的磁化率三主轴方向 (图 5), 最小磁化率主轴 K3 的方向总是近于垂直于层面,  $f$  角小于  $15^\circ$ , 长轴  $K_1$  的方向以西北-东南向为主。这一方向与沉积物的搬运方向有无联系还有待今后进一步的研究。

### 2.3 结论与反正

综上以磁化率各向异性测量结果为基础的分析, 下蜀土的沉积组构特征完全在华北风成黄土的变化范围内, 具有风成黄土的特征, 因此, 其成因也似应属风成堆积。

为了更进一步说明下蜀土的成因, 我们对比测量了秦淮河阶地上具明显水平层理的两个冲积黄土样品的磁化率各向异性, 结果表明: 它们的磁化率各向异性非常明显, 各向异性度 P 均大于 1.02 (图 2. a), 各向异性椭球扁率一个大于 1, 一个小于 1, 说明椭球形状有拉长形, 磁面理的倾角也相差很大, 有一个高达  $30^\circ$ , 而所测下蜀土样品均无此特征, 磁组构研究的初步结果表明下蜀土无水成沉积组构特征, 其成因应主要为风成。

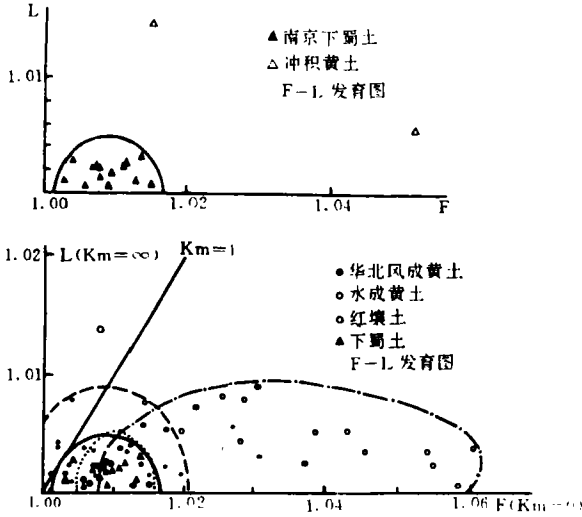


图 2 磁性线理 L, 面理 F 发育图 (b 经文献 1 改绘)  
 Fig. 2 The development of Lamination (L) and foliation (F) A. The development of F-L of Xiashu, loess and alluvial loess in Nanjing  
 b. The development of F-L of aeolian loess, aqueous loess in Central China red loam and Xiashu loess (after Liuxiuming 1989, Modified)

### 3 问题与展望

对沉积物的沉积组构研究,一般是先把样品做成切片,然后在镜下直接观察、统计矿物颗粒的定向排列情况。要说明样品在三维空间的沉积组构特征,需做多个切片,这种方法费时、费力,主观统计不够准确,且主要应用于固结岩石的研究,对松散沉积物的研究更为困难。

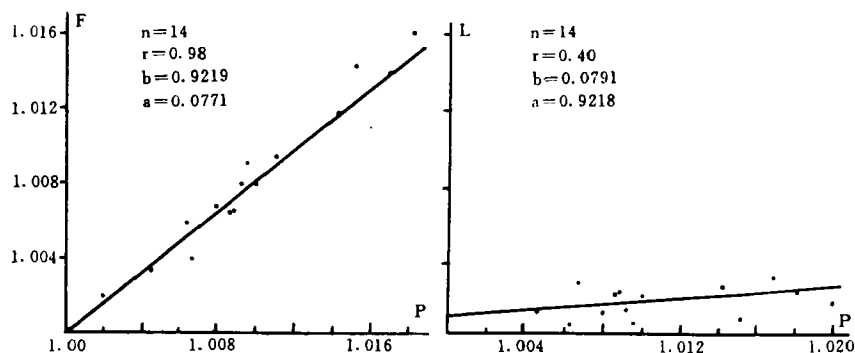


图3 下蜀土磁化率各向异性度 P 与磁性面理 F、线理 L 相关图

Fig. 3 The relationship between percent (P) and foliation (F), Lineation (L) of susceptibility of Xiashu loess

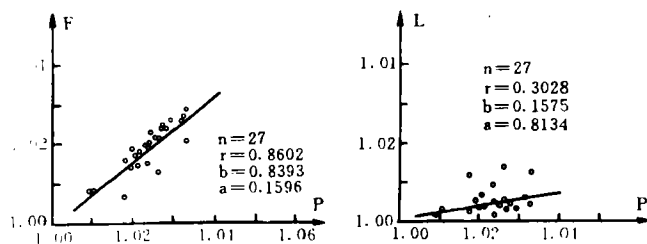


图4 华北风成黄土磁化率各向异性度 P 与磁性面理 F、线理 L 相关图(据刘秀铭,1989)

Fig. 4 The relationship between percent (P) and foliation (F), Lineation (L) of susceptibility of aeolian loess in Central China (after Liuxiuming, 1989)

近年来,电子学和计算机技术的发展使磁信息的记录和应用变得非常迅速简便。利用灵敏度高,稳定性好的磁测仪器从事一系列快速、安全、非破坏性的测量,往往可以相当经济且便利地分辨出样品在矿物磁性类型、铁磁质含量和晶粒构成上的差异<sup>(5)</sup>。作为矿物磁性测量进一步发展的磁化率各向异性测量,避开了对全岩样品沉积组构的直接统计,通过对具代表性的沉积组构的研究,来达到揭示样品的沉积组构特征的目的,不仅能定量地说明样品中

矿物颗粒的定向排列程度,甚至能经济且便利地分辨出沉积物的沉积条件、搬运介质及方向。

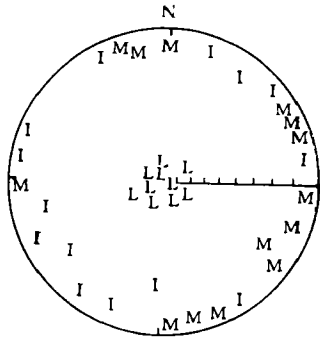


图5 磁化率各向异性  
椭球体三主轴投影图

(M, I 和 L 分别代表  $K_1$ ,  $K_2$  和  $K_3$  轴的方向,地层水平,下半球投影)

Fig. 5 The projection of the three  
AMS Principal axes

研究表明<sup>[6]</sup>,通过对侵入岩和变质岩的磁化率各向异性测量来分析和追溯区域应力场是一项相当经济简便、有效可行的尝试;对水成岩沉积物的磁化率各向异性测量,则可以用来确定沉积物的来源及水流运动方向、速度等<sup>[7]</sup>。对黄土类沉积物的磁化率各向异性测量,则可以区分原生风成黄土和水成次生黄土。

对南京下蜀土的磁化率测量表明:虽然对中国东部亚热带地区第四纪时期是否有冰川的直接作用尚难定论,但磁化率各向异性测量却提供了该地区有风成黄土堆积的证据。总之,沉积物的磁化率各向异性测量是沉积物的成因分析,沉积类型划分及沉积环境重建的有效手段之一,其较之切片目视、地化、生物等方法更为经济、简便、准确。在对某些地区有争议的沉积物(尤其是第四纪松散堆积物)的成因分析中将发挥重要作用。

### 参 考 文 献

- [1] 刘秀铭,许同春,刘东生,1989,中国科学院B辑,(4):441~447。
- [2] 宋达泉,1950,中国土壤学会会志,1(3-4)。
- [3] 吴标云,1985,海洋地质与第四纪地质,5(2):113~120。
- [4] 方鸿琪,1961,地质学报,41(3-4):354~366。
- [5] 俞立中,1987,青年地理学家,3(3):5~29。
- [6] B. B. Ellwood,1987,Reviews of Geophysics, V. 25,p. 905~909。
- [7] B. B. Ellwood, 1979,Earth and Planetary Science Letters, V. 43,p. 309~314。

## Measurement of Anisotropy of Magnetic Susceptibility on Xiashu Loess and It's Implication to Sedimentology

*Xu Fengyu*

(Department of Geography, Xuzhou Teacher's college)

*Wang Lipo*

(Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources)

### Abstract

The measurement of anisotropy of magnetic susceptibility (AMS) is a newly developed method that is used to investigate the sedimentary fabric of the sediments. The measurement of AMS on the loess in Central China showed that the primary eolian loess and the secondary aqueous loess are different sediments which deposited in different medium—air or water, and there is distinct fabric from each other, so according to the difference we could distinguish the two sorts of sediments.

On the basis of analysis on the theory and method to investigate the sedimentary fabric of loess—like sediment by the measurement of AMS, the paper attempts to use the method on the study of Xiashu loess in Nanjing. The results of the measurement show that the AMS of Xiashu loess is not clear, the percent age of anisotropy (P) is  $1.004 < P < 1.02$ , and it is relevant to foliation (F) closely, to lineation (L) hardly. Such a feature highly resembles with that of eolian loess in Central China.

The measurement of AMS was initially used in the investigation of the sedimentary fabric of the solidified rocks. It is more simple, economical and accurate than the traditional method of slice analysis. As used in loess study, the measurement of AMS should have an important effect on the analysis of formation for some dispute sediments especially for the Quaternary sediments.