

文章编号 1001-7410(2008)02-354-09

# 2006 年 4 月 17 日北京降尘的粒度分布与磁学特征\*

张崧<sup>①</sup> F. Heller<sup>②</sup> 斯春胜<sup>①</sup> 刘平<sup>①</sup> 秦小光<sup>①</sup> 刘东生<sup>①</sup>

(①中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; ②Institute of Geophysics, ETH Zurich, Switzerland)

**摘要** 对 2006 年 4 月 17 日北京降尘的粒度和磁学性质进行深入分析, 提出降尘磁化率相对黄土样品较高是现代降尘磁化率的特点, 源区表土磁化率普遍较高是本次降尘磁化率值高的主要原因, 污染产生的磁性物质对其也有一定的影响。同时通过对比几次降尘的粒度特征和传输方式提出粒度可以有效地指示源区的变化。结合降尘的粒度、磁化率分析与沙尘暴的监测信息和卫星云图, 认为此次降尘粒度为 0.8~20.0 μm 的组分可能是来自内蒙古西部的物质; 20~70 μm 与 >70 μm 的组分可能是来自距离北京较近的河北北部和内蒙古中部发生强烈沙尘暴的地区。

**主题词** 降尘 粒度 磁化率 磁学特征

**中图分类号** P425.55      **文献标识码** A

近年来, 沙尘暴因影响范围的广泛性和显著的环境效应而受到越来越多的重视。人们习惯把沙尘暴看作是近期环境恶化和人为活动的结果, 实际上它是一种长期存在的自然现象。黄土高原巨厚的黄土沉积就是由无数次的沙尘暴和非尘暴堆积而成的, 沙尘暴可视为黄土沉积的现代过程。因此, 我们更倾向于以研究黄土的方法对其进行研究。

2006 年 4 月 17 日, 北京发生了近年来最为严重的一次降尘事件, 降尘量达  $30 \times 10^4$  吨。此次沙尘暴事件起源于蒙古国中东部和我国内蒙古中部地区, 沙尘暴的极值出现在海力素、四子王旗、临河、朱日和、乌兰察布。在蒙古气旋的作用下, 沿西北路径向下游传输, 影响了我国华北大部分地区<sup>[1]</sup>。

本次工作以北京城区采集的 27 个点的降尘样品进行研究, 其分布位置及样品采集方法参见刘东生等研究成果<sup>[2]</sup>。基于黄土与降尘的紧密关系, 本文应用磁化率和粒度这两个黄土中最基本的指标来讨论它们在这次降尘中所反映的源区和环境信息, 同时对降尘的磁性特征进行了初步的讨论。

## 1 实验方法

降尘与沉积物地质体不同, 不存在成壤过程中有机质胶结的问题, 而碳酸盐颗粒也是由风力搬运而来, 是粉尘物质的一个组成部分。因此对降尘的粒度测试采用了 3 种不同的前处理方法进行对比,

以检验前处理方法对降尘粒度的影响。

(1) 常规前处理: 在沉积物中加入 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 HCl 以消除碳酸盐和有机质胶结对粒度测量的影响, 加入分散剂并静置 24 小时, 超声波振荡 10 分钟后上机测试<sup>[3]</sup>。

(2) 超声波处理: 对样品不做去除有机质和碳酸盐的处理, 将其溶解在去离子水中直接用超声波振荡 10 分钟, 然后上机测试。

(3) 无前处理: 将样品溶解在去离子水中后直接上机测试。

粒度分析测试采用英国 Marvern 仪器有限公司的 Mastersizer 2000, 重复测量相对误差 <1%。样品的磁化率应用 Bartington MS2 磁化率仪进行低频 (470Hz) 磁化率和高频 (4700Hz) 磁化率的测量。频率磁化率 ( $\chi_{\text{fd}}$ ) 的计算公式为:

$$\chi_{\text{fd}} = (\chi_{\text{lf}} - \chi_{\text{hf}}) / \chi_{\text{lf}} \times 100\%$$

式中  $\chi_{\text{lf}}$  为低频磁化率,  $\chi_{\text{hf}}$  为高频磁化率。

以上所有分析均在中国科学院地质与地球物理研究所完成。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 粒度分析

#### 2.1.1 前处理对比

图 1 是 3 种前处理方法的对比, 可以看出不同

第一作者简介: 张崧女 28岁 博士研究生 第四纪地质专业 E-mail: zhangsong@mail.igcas.ac.cn

\* 2003 年度刘东生国家最高科技成就奖专项项目资助

2007-09-20 收稿, 2007-12-12 收修改稿

前处理方法对研究样品的细粒部分有明显的影响: 无前处理的样品细粒含量最少, 超声波处理的样品细粒含量最多, 常规方法则介于二者之间。这一结果与鹿化煜等<sup>[4]</sup>对黄土样品采取不同前处理方法得到的结果一致。无前处理的样品细粒最少是因为其没有经过充分的分散, 细粒部分还是以集合体的形式存在; 常规前处理的样品中强氧化剂和盐酸的加入可能对细小颗粒有溶蚀或分解的作用, 导致其细粒物质的含量相对于超声波处理方法偏少; 超声波处理方法既分散了样品又没有化学作用的影响, 因此细粒的含量最多。在本次降尘中超声波前处理与常规前处理的差异较小, 但当细粒级颗粒含量增加时, 这种差异无疑将扩大, 因此建议对降尘的粒度分析仅采用超声波的前处理步骤即可。

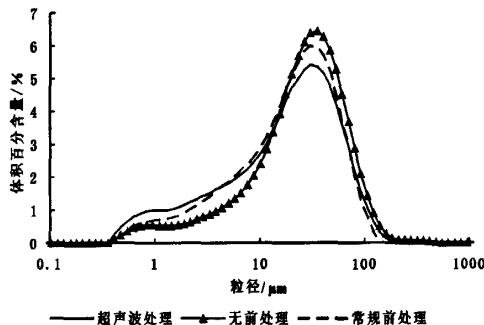


图 1 3种前处理方法的粒度分布对比

Fig. 1 Comparison of three pretreatment methods  
of grain size distribution

静电作用、盐分或者有机物质胶结, 会导致降尘样品中细颗粒附着在大颗粒的表面<sup>[5-7]</sup>。由于在大气中只有  $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-1} \mu\text{m}$  的超细粒子才能通过布朗碰撞转变为大粒子<sup>[8]</sup>, 因此粉尘颗粒赋存状态在大气传输中不会发生明显变化, 降尘中大量存在的集合体主要代表了起沙时的颗粒结构。无前处理对颗粒的分散作用非常有限, 因此它所得到的结果应该最接近起沙过程中颗粒的赋存形态。

表 1 中  $< 10 \mu\text{m}$  的组分, 超声波处理的样品比无前处理的样品含量高近 12%。根据以上分析, 可以认为这一含量上的差异基本代表了起沙时附着在大颗粒表面的细粒级物质的大体含量, 即至少有 12% 的小颗粒是通过附着在大颗粒的表面上脱离地表并以这种集合体的形式进行搬运和沉降的。

## 2.1.2 降尘概率累积曲线分析

此次降尘粒径较粗, 中值粒径平均为  $20 \mu\text{m}$ <sup>[2]</sup>。降尘表现为双峰型的分布(图 2), 与黄土-古土壤的

表 1 3种粒度前处理方法的组分对比 (%)

Table 1 Comparison of three pretreatment methods  
of grain size component

前处理 方法	$< 0.8 \mu\text{m}$	0.8 ~ $20.0 \mu\text{m}$	20 ~ $70 \mu\text{m}$	$> 70 \mu\text{m}$	$< 10 \mu\text{m}$	$< 2 \mu\text{m}$
无前处理	1.7	39.2	50.2	8.9	21.0	5.5
常规前处理	1.8	48.2	45.3	4.6	29.4	7.2
超声波处理	3.2	48.9	41.8	6.2	32.7	10.4

频率分布曲线基本一致, 在  $30 \mu\text{m}$  处为含量较高的主峰, 在  $1 \mu\text{m}$  处还存在一个小峰。 $< 1 \mu\text{m}$  颗粒组成的小峰在黄土-古土壤中广泛存在, 认为其主要是细小颗粒附着在大颗粒上搬运而来<sup>[9]</sup>。降尘的粒度参数与洛川的黄土-古土壤<sup>[10]</sup>对比(表 2), 降尘分选程度较好, 偏度在古土壤和黄土之间, 更接近于黄土, 表现为明显的窄峰但小于黄土的峰度。表明此次降尘的强度较大仅略小于冰期时粉尘的沉降。

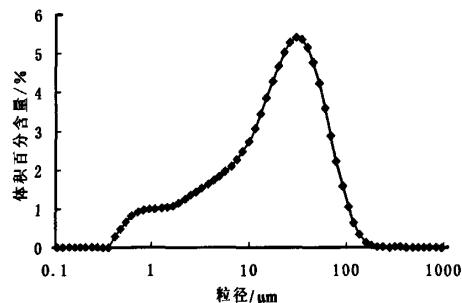


图 2 降尘粒度平均值的频率分布曲线

Fig. 2 Grain size frequency distribution curve  
of Beijing dust fall

表 2 降尘的粒度参数与洛川黄土-古土壤<sup>[10]</sup>的对比

Table 2 Grain size parameter of Beijing dust fall compared  
with that of loess and paleosol in Luochuan

	均值/ $\phi$	分选系数	偏度	峰度
北京降尘(2006年)	5.93	1.68	0.90	0.31
洛川黄土 <sup>[10]</sup>	5.85	1.75	1.00	0.54
洛川古土壤 <sup>[10]</sup>	6.67	1.78	0.61	-0.30

沉积物粒度的概率累积曲线是判断沉积环境的典型模式<sup>[11]</sup>, 本文应用其对降尘的粒径进行分析。概率累积曲线的纵坐标采用概率百分数概率标度, 它是按单峰正态曲线的分布规律刻化的。这一坐标体系一方面放大了粗、细尾部的特点, 同时还使得每一个正态分布的总体在图上成一直线段<sup>[11]</sup>。结合派伊<sup>[12]</sup>的风力搬运颗粒模式, 对降尘粒度的概率累积曲线进行分析, 如图 3 所示。此次降尘的概率累积曲线大致可以分为 4 段直线: 第 1

段A为粗颗粒组分即大于 $70\mu\text{m}$ 的颗粒,占全岩4.6%。派伊<sup>[12]</sup>的研究认为这一粒径之上的颗粒在风力搬运过程中以跃移为主。第2段B为较细的颗粒组分在约 $20\sim70\mu\text{m}$ 之间,是降尘的一个主体部分,占全岩的45%,以短距离搬运为主。第3段C为 $0.8\sim20.0\mu\text{m}$ 的细颗粒,是此次降尘的另一个主体部分,占全岩的48%,在派伊<sup>[12]</sup>的研究中认为主要以悬浮方式进行长距离搬运。第4段D为极细组分,小于 $0.8\mu\text{m}$ ,占全岩的1.8%。这一组分可能是附着在大颗粒表面的细小颗粒。

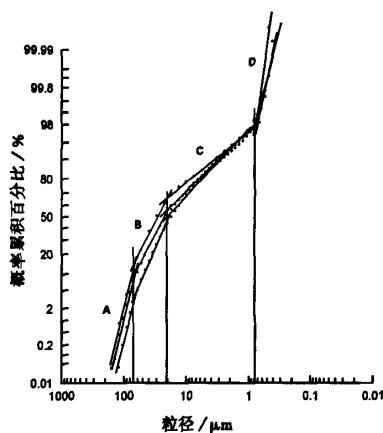


图3 降尘的概率累积曲线

Fig. 3 Cumulative probability curves of dust samples

## 2.2 磁学特征

此次降尘磁化率高(平均值为 $111.1 \times 10^{-8}\text{ m}^3/\text{kg}$ ),频率磁化率低(平均值为2.5%)<sup>[2]</sup>。为了进一步了解此次降尘的磁学性质,对降尘样品No.6, No.8, No.10, No.12, No.15和No.27分别进行了非磁滞剩磁(ARM)、等温剩磁(IRM)的测量,样品具体地点参见文献[2]。实验由Friedrich Heller教授在苏黎世地球物理研究所完成。Day图是确定磁性矿物粒度的理想方法<sup>[13]</sup>,以剩余磁化强度与饱和磁化强度的比值( $M_n/M_s$ )为纵坐标,以剩磁矫顽力与矫顽力的比值( $H_{cr}/H_c$ )为横坐标绘制Day图(图4)。对比降尘样品与黄土高原中部后庄剖面、西部下高塬剖面的样品<sup>[14]</sup>可以看出,所有样品均位于似单畴(PSD)区域内,但分布位置有明显的差异。其中黄土高原中部后庄剖面的样品位于左上方,表明其磁性矿物颗粒最细。黄土高原西部下高塬剖面的样品位于右下方,表明其磁性矿物颗粒最粗。北京降尘的磁性矿物粒度接近于西部地

区的黄土,但较之稍细,明显比中部黄土高原地区的磁性矿物粒度粗。研究表明黄土高原北部沙漠—黄土过渡带的黄土沉积物由于含有较多的近源物质,磁性矿物颗粒明显比黄土高原中东部的沉积物要粗<sup>[15]</sup>,暗示本次降尘相对于黄土高原中部黄土距离源区更近,含有较多的近源物质。

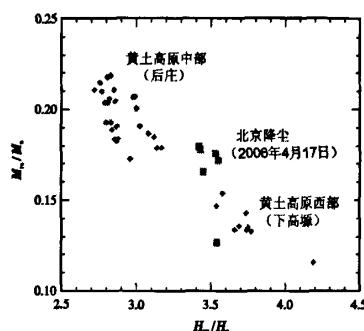


图4 降尘与黄土的Day图

Fig. 4 Day-plot of dust and loess

样品的磁性物质常常是由几个不同源的磁性组分构成,区分这些不同源的磁性物质是环境磁学研究的重点之一。本文应用Egli<sup>[16]</sup>提出的组分分析方法对4个降尘样品No.8, No.10, No.15和No.27的等温剩磁矫顽力谱进行组分分析(图5)。样品的IRM矫顽力(C)均可以分解成3个组分,分别命名为C1, C2和C3。组分C1在4个样品中的矫顽力都相当稳定,基本保持相同的强度。组分C2有较大的变化,与样品的磁性强度显著相关即磁性较强的样品中C2组分的强度也较大。组分C3在样品中的贡献很小,不予考虑。降尘矫顽力谱分析的4个样品分别来自降尘第一天和第二天的4个不同地点。组分C1在样品中的稳定性表明其来源于自然物质。组分C2的大幅度变化显然是受到了人为污染物的影响,第二天的样品(No.8)C2组分明显高于第一天的2个样品(No.10和No.27)。汽车排放的尾气、机动车刹车和轮胎磨损的释放物是城市磁学污染的主要源<sup>[17]</sup>,可能是第二天样品C2组分增高的源。样品No.15的磁化率是所采集样品中的最高值<sup>[2]</sup>,与其他样品不同,该样品采于楼顶的水泥地面,这或许是导致其磁化率异常高值的原因。

## 3 讨论

### 3.1 降尘磁化率的环境意义

磁化率是黄土研究的基本指标之一,反映黄土

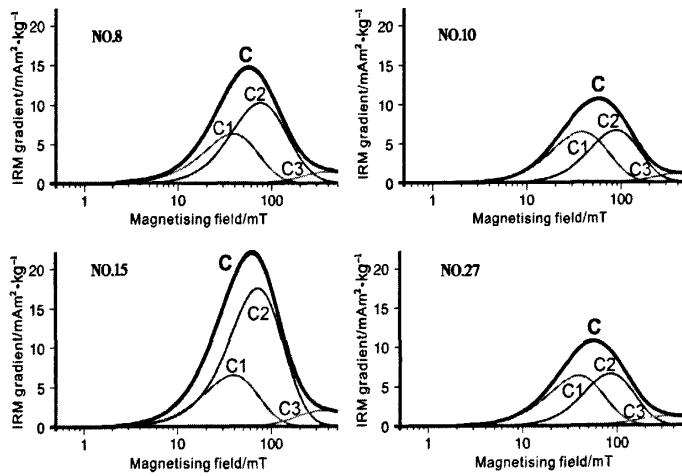


图5 等温剩磁的矫顽力组分分析

Fig. 5 Component analysis of IRM coercivity

成土作用的强弱,是夏季风强度的替代性指标<sup>[18~22]</sup>。前人研究表明中国西部地区非尘暴降尘的磁化率普遍高于黄土地层中黄土的磁化率值,且具有季节性的变化<sup>[23,24]</sup>,但对现代降尘磁化率意义的认识并不一致。Meng等<sup>[23]</sup>提出植物的分解作用对磁化率有重要的贡献,同时也是造成降尘季节性变化的原因。Maher<sup>[25]</sup>反对这一观点,认为磁化率季节性变化反映的是因风向改变导致的物源改变。农业活动导致的土壤严重侵蚀是夏季粉尘的源。孙东怀等<sup>[24]</sup>则认为降水是夏季磁化率明显高于其他季节的主要原因。同时认为现代污染可能不是磁化率高的主要原因,而是原始的粉尘磁化率已经受到了原地气候条件的影响。

对比本次降尘和前人研究结果<sup>[23,24,26]</sup>(图6),可以看到除黄土高原地区的礼泉外降尘间磁化率和频率磁化率值都较为接近,表明现代降尘磁化率值相对黄土层(斋堂马兰 L<sub>1-1</sub>)较高的特征具有普遍性。本文测量了沿2006年沙尘暴途径地区采集表土样品的磁化率值,结果普遍较高(图7),表明源区磁化率值较高是此次降尘磁化率值较高的主要原因。不同类型的表土磁化率值有很大的差异,狼山西部的荒漠区磁化率值最低,乌力吉盆地的样品则为最高值。河北北部农田区、阴山北麓农牧区和内蒙古中部平原地区及阿拉善<sup>[27]</sup>的表土磁化率与此次沙尘暴磁化率的平均值( $111.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ )较为接近。结合卫星云图记录的沙尘暴的运移路径<sup>[28]</sup>,上述与此次降尘磁化率值接近的地区本身也是此次沙尘暴途径的地区,可能为本次降尘提供了

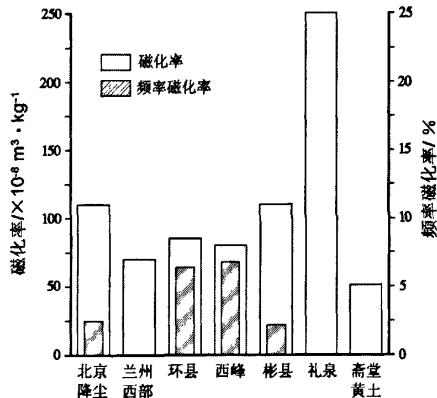


图6 北京降尘与黄土高原地区天然降尘磁化率对比  
兰州西部数据引自文献[23];环县、西峰、彬县和礼泉数据引用文献[24]中2月、3月和4月的平均值;斋堂黄土引自文献[26]

Fig. 6 Comparison of Beijing dust fall and present aeolian dust over the Loess Plateau of China

主要物质。

降尘磁化率值显然主要受控于源区表土磁化率的强度,兰州西部、黄土高原北部地区和北京三地降尘的粉尘源区范围明显不同,如何解释大范围内地表磁化率都有增强的现象需要进一步工作。现代表土中含有大量由燃烧、成土或铁细菌等生物作用新生成的磁性矿物可能是导致表层土壤磁性特征明显增强的原因之一<sup>[28]</sup>。

频率磁化率是反映超顺磁颗粒(SP)浓度的可信指标<sup>[29]</sup>,在黄土中与成土作用有关,可以反映成壤强度。本次降尘频率磁化率值低(平均值为2.5%)表明样品的磁性矿物组合中SP颗粒不占主

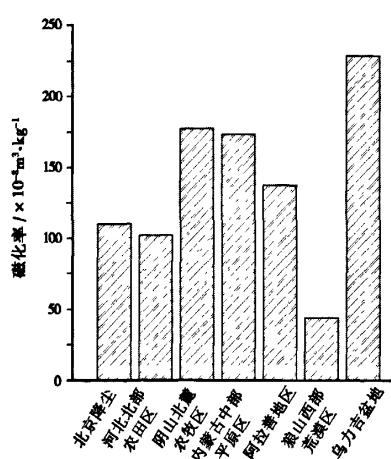


图7 降尘途径地区表土的磁化率  
阿拉善数据引自文献[27]

Fig. 7 Magnetic susceptibility value of topsoil on the dust transporting path

导地位<sup>[28]</sup>,源区的成土作用较弱。中国西北现代表土的研究也表明SP含量较低<sup>[27]</sup>,显然成土作用形成的新磁性物质不是降尘磁化率较高的主要原因。旺罗等<sup>[30]</sup>通过对黄土和污染土壤的磁化率研究提出当样品的磁化率大于 $100 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ 和频率磁化率小于3%时基本可以判定已被污染。根据这一观点,污染可能对此次降尘磁化率值也有一定的影响。前文降尘矫顽力组分分析也表明含有污染成分的C2组分是影响样品磁化率高值的主要原因,因此探明C2的源是揭示现代降尘磁化率环境意义的关键所在。这需要研究工作的进一步深入。

### 3.2 降尘的粒度分布与粉尘传输

在沙尘暴的形成发展过程中,地表物质在风力作用下被扬起带入空中,颗粒在搬运过程中因重力作用发生沉降,随着搬运距离的增加,粒级逐渐减小。Tsoar 和 Pye<sup>[31]</sup>计算了平均风速为 $15 \text{m/s}$ ,紊流交换系数为 $10^4 \sim 10^7 \text{cm}^2/\text{s}$ 时不同粒级的石英球体可能被搬运移动的最大距离,被广泛应用。

在相同的气象条件下,粉尘的输送距离一方面与粒度大小有关,另一方面还与沙尘暴的传输方式有关。沙尘暴的传输主要在大气边界层中,但上升气流的存在常常将扬起的颗粒输入到自由对流层中进行高空输送。因此沙尘暴水平输送时常具有分层现象,上层传输一般都为远距离输送<sup>[32,33]</sup>。国家环境测试分析中心提出北京的沙尘天气可分为4种类型<sup>[34]</sup>,即1)高空传输、地面扬尘混合型;2)高空传输沉降

型;3)地面扬尘型;4)高空传输过境型。

表3 北京几次降尘粒度的对比

Table 3 Compared grain size with other dust falls in Beijing

降尘时间	类型	中值粒径/ $\mu\text{m}$
1958年(张淑媛 <sup>[35]</sup> )	浮尘	12.7
1980年(Liu等 <sup>[36]</sup> )	浮尘	7.8
1998年(Sun等 <sup>[37]</sup> )	浮尘	7.6(湿沉降)
2000年(时少英等 <sup>[38]</sup> )	沙尘暴	30.0(估计值)
2002年(王赞红 <sup>[39]</sup> )	沙尘暴	25.2
2006年(刘东生等 <sup>[2]</sup> )	浮尘	20.1

本文选取北京几次大的可对比的降尘事件分析其粒度特点和粉尘搬运方式(即降尘类型)(表3)。不同的降尘类型,其粒度有很大差异,几次降尘的中值粒径分布在 $7.6 \sim 30.0 \mu\text{m}$ 之间。气象资料分析表明1958年、1980年和1998年的降尘均以高空气流输送的方式到达北京,没有地面扬尘的混入,对应的粉尘颗粒较细<sup>[35~37,40,41]</sup>。周秀骥等<sup>[42]</sup>应用空气动力学分析北京2000年4月的沙尘暴是内蒙古中部地区有上升气流使得沙尘通过远距离高层输送在北京沉降。李令军等<sup>[43]</sup>对比卫星资料中的沙尘云系演变过程发现,2000年4月沙尘暴移入北京后多有加强,提出这是来自北京近周边沙尘暴源的贡献。以上分析表明2000年的沙尘暴是高空传输和地面扬尘混合型,近源物质的加入使得沙尘暴的整体粒级较粗,降尘粒度很好地反映出了源区的变化<sup>[38]</sup>。2002年降尘量和风速很好的对应关系也反映了地表扬尘的存在<sup>[44]</sup>,此次沙尘暴的粒度相应较粗<sup>[39]</sup>。

在本次降尘中,雷达观测到2006年4月16日北京的粉尘层高度为740m,可以很好的与本地污染区分开,在降尘强烈时期,粉尘从大约6km的高空沉降到地面<sup>[45]</sup>。因此此次降尘存在有高空传输,没有本地源物质的加入。前文降尘的概率累积曲线分析表明,此次降尘具有短距离( $20 \sim 70 \mu\text{m}$ 颗粒)搬运和长距离( $0.8 \sim 20.0 \mu\text{m}$ 的细颗粒)搬运两个组分,各占全岩的近50%。粉尘740m的高度说明,在这次强沙尘暴过程中短距离搬运的组分不可能来自北京局地。强沙尘暴的极值地区如乌兰察布、四子王旗、朱日和等地内蒙古中部地区及其邻近的地区可能是这次北京短距离搬运组分的源区。内蒙古西部的沙尘暴极值点临河和海力素等邻近地区可能是远距离搬运组分的源区。

从上面的几个例子可以看出,粒度是粉尘源区距离、风力搬运能力、粉尘传输方式的集中体现。

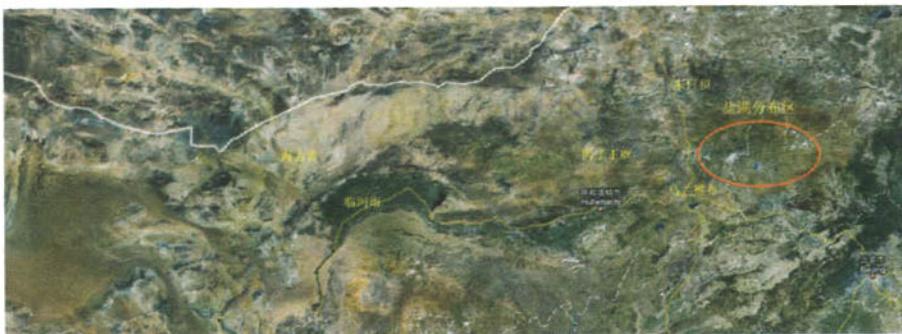


图 8 沙尘源区地貌特征

(来源于 <http://maps.google.com/>)Fig. 8 The terrain characteristics of dust source (from <http://maps.google.com/>)

在黄土研究中正是根据粒度的这一特点,认为它可以反映冬季风强度的变化和源区的远近<sup>[46,47]</sup>,但在现代粉尘的研究中应用却较少。在本文的研究中认为粉尘粒度分析结合卫星图片<sup>[2]</sup>、沙尘暴监测站资料<sup>[1,45]</sup>可以很好地反映源区的信息。

### 3.3 降尘源区的讨论

关于沙尘暴的源区,前人做了大量的工作<sup>[48~57]</sup>。一般的观点认为沙尘暴沙尘的主要提供地为产生沙尘暴的中心和过往路径,一部分漂尘来自更远的内陆沙漠<sup>[48]</sup>。我国塔里木盆地、河西走廊、阿拉善地区以及鄂尔多斯高原区、浑善达克沙漠区是沙尘暴的多发区<sup>[50,51]</sup>。因此一些学者认为北京地区的沙尘暴物质是来自西北地区的沙漠。但越来越多的研究者提出沙漠中细粒径物质很少,无法进行远距离搬运,西北干旱地区的干涸湖泊、农田、荒漠含有较多的细粒级物质应是华北地区沙尘暴物质的源区<sup>[52,53]</sup>。另外也有观点认为干涸盐湖是北京沙尘暴的主要源区<sup>[54,55]</sup>。

粉尘是大面积地表物质的充分混合,因此对于粉尘物质的供给,一方面要考虑源区的物质组成及含量,同时也应考虑到不同类型的地表所占面积。以2006年4月17日沙尘暴为例,粉尘传输的途径中干涸湖泊和盐湖的面积非常有限,仅在河北和内蒙古交界地区有大面积出露(图8),不可能提供如此大量的物质。粉尘途径地区分布了大量土质松散的农田,旱作耕地则占到了32.19%<sup>[53]</sup>。在对不同下垫面的研究发现,裸露农田的可悬浮颗粒排放量远大于沙地和草地<sup>[58]</sup>。同时在对不同地表类型的沙尘暴的统计中也显示农牧区的沙尘暴较多<sup>[59]</sup>。因此我们认为内蒙古中部、河北北部的农田才是此

次沙尘暴的主要源区,也是通常影响华北地区沙尘暴的主要源区。

## 4 结论

本文通过对2006年4月17日降尘的磁学特征和粒度分析,结合降尘发生过程的监测资料得出以下结论:

(1)降尘磁化率较高是现代降尘磁化率的普遍特点。本次降尘的磁性矿物颗粒较粗,IRM矫顽力可以分为C1和C2两个组分,组分C1在样品中的稳定性表明其来源于自然物质。组分C2随着磁化率增强而增强的,变化幅度较大,显然是受到了人为污染物的影响。

(2)降尘粒径可以很好的反映粉尘的传输方式。此次降尘粒度的两个主要组分:0.8~20.0 μm的组分可能是来自以海力素和临河两个沙尘暴极值点为中心的地区;20~70 μm的组分可能是来自以沙尘暴极值点乌兰察布与四子王旗、朱日和为中心的距离北京较近的地区。

(3)内蒙古中部、河北北部的农田通常是影响华北地区沙尘暴的主要源区。

**致谢** 野外采样得到了熊尚发研究员的指导。本文撰写过程中,韩家懋研究员和李玉梅副教授提出了宝贵的意见,姜文玲硕士协助收集文献,在此一并表示衷心的感谢。

## 参考文献(References)

- 1 张小曳主编. 2006年春季的东北亚沙尘暴. 北京:气象出版社, 2006. 15~20  
Zhang Xiaoye ed. Dust Storm of Northeast Asia in Spring, 2006. Beijing: China Meteorological Press, 2006. 15~20

- 2 刘东生,韩家懋,张德二等. 降尘与人类世沉积——I:北京2006年4月16~17日降尘初步分析. 第四纪研究,2006,26(4):628~633  
*Liu Tungsheng, Han Jiamao, Zhang De'er et al. Falling dust and deposits in anthropocene——I: Preliminary analyses of the dust fall in Beijing on April 16~17, 2006. Quaternary Sciences, 2006, 26(4):628~633*
- 3 麋化煜,苗晓东,孙有斌. 前处理步骤与方法对风成红粘土粒度测量的影响. 海洋地质与第四纪地质,2002,22(3):129~135  
*Lu Huayu, Miao Xiaodong, Sun Youbin. Pretreatment methods and their influences on grain-size measurement of aeolian "Red Clay" in North China. Marine Geology & Quaternary Geology, 2002, 22(3):129~135*
- 4 麋化煜,安芷生. 前处理方法对黄土沉积物粒度测量影响的实验研究. 科学通报,1997,42(23):2535~2538  
*Lu Huayu, An Zhisheng. Pretreatment methods influences on grain size measurement of loess. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(23):2535~2538*
- 5 Derbyshire E, Meng X, Kemp R A. Provenance, transport and characteristics of modern aeolian dust in western Gansu Province, China, and interpretation of the Quaternary loess record. *Journal of Arid Environments*, 1998,39(3):497~516
- 6 朱显莫,祝一志. 中国黄尘初探. 第四纪研究,1990,(3):244~250  
*Zhu Xianmo, Zhu Yizhi. A preliminary study on the loess dust in China. Quaternary Sciences, 1990, (3):244~250*
- 7 Pye K. The nature, origin and accumulation of loess. *Quaternary Science Reviews*, 1995,14(7~8):653~667
- 8 王明星著. 大气化学(第二版). 北京:气象出版社,1999. 168~169  
*Wang Mingxing. Atmospheric Chemistry. Beijing: China Meteorological Press, 1999. 168~169*
- 9 孙东怀. 黄土粒度分布中的超细粒组分及其成因. 第四纪研究,2006,26(6):928~936  
*Sun Donghuai. Supper-fine grain size components in Chinese loess and their palaeoclimatic implication. Quaternary Sciences, 2006, 26(6):928~936*
- 10 麋化煜,安芷生. 黄土高原红粘土与黄土古土壤粒度特征对比——红粘土风成成因的新证据. 沉积学报,1999,17(2):226~232  
*Lu Huayu, An Zhisheng. Comparison of grain-size distribution of red clay and loess-paleosol deposits in Chinese Loess Plateau. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17(2):226~232*
- 11 冯增昭主编. 沉积岩石学(第二版). 北京:石油工业出版社,1993. 108~126  
*Feng Zengzhao ed. Sedimentary Rocks (2nd). Beijing: Petroleum Industry Press, 1993. 108~126*
- 12 肯尼思·派伊. 风飑粉尘及粉尘沉积物. 北京:海洋出版社,1991. 27~34  
*Pye K. Aeolian Dust and Dust Deposits. Beijing: China Ocean Press, 1991. 27~34*
- 13 Day R, Fuller M, Schmidt V A. Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1977,13(4):260~267
- 14 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  $^{10}\text{Be}$  measurements and estimates of palaeoprecipitation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005,222(1~2):145~160
- 15 邓成龙,刘青松,潘永信等. 中国黄土环境磁学. 第四纪研究,2007,27(2):193~209  
*Deng Chenglong, Liu Qingsong, Pan Yongxin et al. Environmental magnetism of Chinese loess-paleosol sequences. Quaternary Sciences, 2007,27(2): 193~209*
- 16 Egli R. Analysis of the field dependence of remanent magnetization curves. *Journal of Geophysical Research*, 2003,108(B2):2081, doi:10.1029/2002JB002023
- 17 Spassov S, Egli R, Heller F et al. Magnetic quantification of urban pollution sources in atmospheric particulate matter. *Geophysical Journal International*, 2004,159(2):555~564
- 18 刘秀铭,刘东生, Heller F等. 黄土频率磁化率与古气候冷暖变换. 第四纪研究,1990,(1):42~50  
*Liu Xiuming, Liu Tungsheng, Heller F et al. Frequency-dependent susceptibility of loess and Quaternary paleoclimate. Quaternary Sciences, 1990, (1):42~50*
- 19 朱日祥,岳乐平,白立新. 中国第四纪古地磁学研究进展. 第四纪研究,1995,(2):162~173  
*Zhu Rixiang, Yue Leping, Bai Lixin. Progress of Quaternary paleomagnetism in China. Quaternary Sciences, 1995, (2): 162~173*
- 20 韩家懋,姜文英,褚骏. 黄土和古土壤中磁性矿物的粒度分布. 第四纪研究,1997,(3):281~287  
*Han Jiamao, Jiang Wenying, Chu Jun. Grain size distribution of magnetic minerals in loess and paleosol. Quaternary Sciences, 1997, (3): 281~287*
- 21 乔彦松,赵志中,王燕等. 川西甘孜黄土磁性地层学研究及其古气候意义. 第四纪研究,2006,26(2): 250~256  
*Qiao YanSong, Zhao Zhizhong, Wang Yan et al. Magnetostratigraphy and its paleoclimatic significance of a loess-soil sequence from Ganzi area, West Sichuan Plateau. Quaternary Sciences, 2006, 26 (2): 250~256*
- 22 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. 第四纪研究,2007,27(2): 210~220  
*Liu Xiuming, Xia Dunsheng, Liu Tungsheng et al. Discussion on two models of paleoclimatic records of magnetic susceptibility of Alaskan and Chinese loess. Quaternary Sciences, 2007,27(2): 210~220*
- 23 Meng Xingmin, Derbyshire E, Kemp R A. Origin of the magnetic susceptibility signal in Chinese Loess. *Quaternary Science Reviews*, 1997,16(8):833~839
- 24 孙东怀,苏瑞侠,陈发虎等. 黄土高原现代天然降尘的组成、通量和磁化率. 地理学报,2001,56(2):171~180  
*Sun Donghuai, Su Rixia, Chen Fahu et al. Composition, susceptibility and input flux of present aeolian dust over Loess Plateau of China. *Acta Geographica Sinica*, 2001, 56 (2): 171~180*
- 25 Maher B A. Comments on "Origin of the magnetic susceptibility signal in Chinese loess". *Quaternary Science Reviews*, 1999, 18(6):865~869
- 26 熊尚发,刘东生,丁仲礼. 两个冰期-间冰期旋回的黄土记录及其古气候意义. 地理科学,2002,22(1):18~23  
*Xiong Shangfa, Liu Tungsheng, Ding Zhongli. Paleoclimatic records of the loess in the vicinity of Beijing region during the last two glacial-interglacial cycles and its implications. *Scientia Geographica Sinica*, 2002,22(1):18~23*
- 27 夏敦胜,陈发虎,马剑英等. 黄土高原-阿拉善高原典型断面表土磁学特征研究. 第四纪研究,2007,27(6):1001~1008  
*Xia Dunsheng, Chen Fahu, Ma Jianying et al. Environmental magnetic investigations of surface soils along a NW-SE transect from the Chinese Loess Plateau to the Alxa Plateau. Quaternary Sciences, 2007,27(6):1001~1008*
- 28 夏敦胜,马剑英,王冠等. 环境磁学及其在西北干旱区环境研究中的问题. 地学前缘,2006,13(3):168~179  
*Xia Dunsheng, Ma Jianying, Wang Guan et al. Environmental*

- magnetism concepts and their applications to environmental studies in arid regions, Northwest China. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13 (3): 168~179
- 29 Liu Qingsong, Deng Chenglong, Torrent J et al. Review of recent developments in mineral magnetism of the Chinese loess. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(3~4): 368~385
- 30 旺 罗, 刘东生, 吕厚远. 污染土壤的磁化率特征. 科学通报, 2000, 45(10): 1091~1094  
Wang Luo, Liu Tungsheng, Lu Houyuan. Magnetic characteristics of pollution soil. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45 (10): 1091~1094
- 31 Tsoar H, Pye K. Dust transport and the question of desert loess formation. *Sedimentology*, 1987, 34: 139~153
- 32 邱金桓, 孙金辉. 沙尘暴的光学遥感及分析. 大气科学, 1994, 18 (1): 1~10  
Qiu Jinhuan, Sun Jinhui. Optically remote sensing of the dust storm and result analysis. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1994, 18(1): 1~10
- 33 刘 穗, 任丽新, 周乐义. 一次黄沙输送过程的数值模拟研究. 大气科学, 1998, 22(6): 905~912  
Liu Yi, Ren Lixin, Zhou Leyi. Numerical analyses of a dust storm and dust transportation. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1998, 22 (6): 905~912
- 34 国家环境分析测试中心. 沙尘暴研究项目的总体思路和技术路线 (<http://www.cneac.com>)  
National Research Center for Environmental Analysis and Measurements. The main idea and technology method of the dust research (<http://www.cneac.com>)
- 35 张淑媛. 北京地区风尘的研究. 见: 中国第四纪研究委员会编. 中国第四纪研究委员会第二届学术会议论文摘要汇编. 北京, 1964. 78~79  
Zhang Shuyuan. The study of Aeolian dust in Beijing. In: Chinese Society of Quaternary Sciences ed. The Collection of Second Academic Session Papers. Beijing, 1964. 78~79
- 36 Liu Tungsheng, Gu Xiongfei, An Zhisheng et al. The dust fall in Beijing, China on April 18, 1980. *Special Paper of Geological Society of America*, 1981, 186: 149~157
- 37 Sun Jimin, Liu Tungsheng. Sources of heavy dust fall in Beijing, China on April 16, 1998. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27 (14): 2105~2108
- 38 时少英, 张明英, 丁德平等. 北京市近50年春季沙尘天气分析及预报. 见: 中国气象局预测减灾司编. 沙尘暴监测预警服务研究. 北京: 气象出版社, 2002. 80~86  
Shi Shaoying, Zhang Mingying, Ding Deping et al. Analysis and forecast on Beijing Spring dust in recent 50 years. In: Department of Forecasting Services and Disaster Mitigation of China Meteorological Administration ed. Monitoring and Forecasting Service Research on dust. Beijing: China Meteorological Press, 2002. 80~86
- 39 王赞红. 现代尘暴降尘与非尘暴降尘的粒度特征. 地理学报, 2003, 58(4): 606~610  
Wang Zanhong. Particle size analysis of aeolian dust derived from duststorm and none-duststorm. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58 (4): 606~610
- 40 张德二. 我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析. 中国科学(B辑), 1984, 14(3): 278~288  
Zhang De'er. Synoptic-climatic studies of dust fall in China since historic times. *Science in China (Series B)*, 1984, 27 (8): 825~836
- 41 徐建芬, 孙兰东, 许东蔚等. 西北地区一次斜压槽引发的强沙尘暴研究. 见: 中国气象局预测减灾司编. 沙尘暴监测预警服务研究. 北京: 气象出版社, 2002. 166~173  
Xu Jianfen, Sun Landong, Xu Dongpei et al. Study of a dust-devil caused by tilted trough in Northwest China. In: Department of Forecasting Services and Disaster Mitigation of China Meteorological Administration ed. Monitoring and Forecasting Service Research on Dust. Beijing: China Meteorological Press, 2002. 166~173
- 42 周秀骥, 徐祥德, 颜 鹏等. 2000年春季沙尘暴动力学特征. 中国科学(D辑), 2002, 32(4): 327~334  
Zhou Xiiji, Xu Xiangde, Yan Peng et al. Dynamic characteristics of spring sandstorms in 2000. *Science in China (Series D)*, 2002, 45 (10): 921~930
- 43 李令军, 高庆生. 2000年北京沙尘暴源地解析. 环境科学研究, 2001, 14(2): 1~3  
Li Lingjun, Gao Qingsheng. Source analysis of Beijing sand-dust in 2000. *Research of Environmental Sciences*, 2001, 14(2): 1~3
- 44 王赞红, 夏正楷. 北京2002年3月20~21日沙尘暴过程的降尘量与降尘粒度特征. 第四纪研究, 2004, 24(1): 95~99  
Wang Zanhong, Xia Zhengkai. Dust flux and particle size of dustfall of the duststorm on March 20~21, 2002 in Beijing. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(1): 95~99
- 45 Papayannis A, Zhang H Q, Amiridis V et al. Extraordinary dust event over Beijing, China, during April 2006: Lidar, sun photometric, satellite observations and model validation. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L07806, doi:10.1029/2006GL029125
- 46 Ding Zhongli, Sun Jimin, Rutter N W et al. Changes in sand content of loess deposits along on north-south transect of the Chinese Loess Plateau and the implications for desert variations. *Quaternary Research*, 1999, 52: 56~62
- 47 丁仲礼, 任剑璋, 刘东生等. 晚更新世季风-沙漠系统千年尺度的不规则变化及其机制问题. 中国科学(D辑), 1996, 26(5): 385~391  
Ding Zhongli, Ren Jianzhang, Liu Tungsheng et al. Millennial scale disorder change and its mechanism problem of the Late Pleistocene monsoon-desert system. *Science in China (Series D)*, 1996, 26(5): 385~391
- 48 陈广庭. 北京的风沙及其整治. 见: 中国科学院兰州沙漠研究所. 中国科学院兰州沙漠研究所集刊(第4号). 北京: 科学出版社, 1995. 1~69  
Chen Guangting. Blown sand and its control in Beijing. In: Institute of Desert, Academy Sciences, Lanzhou. Memories of Institute of Desert, Chinese Academy Sciences, Lanzhou (No 4). Beijing: Science Press, 1995. 1~69
- 49 陈广庭. 近50年北京的沙尘天气及治理对策. 中国沙漠, 2001, 21(4): 402~407  
Chen Guangting. History of strong dust storms in Beijing and ecological environmental change in nearby regions. *Journal of Desert Research*, 2001, 21(4): 402~407
- 50 周自江. 近45年中国扬沙和沙尘暴天气. 第四纪研究, 2001, 21 (1): 9~17  
Zhou Zijiang. Blowing-sand and sandstorm in China in recent 45 years. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(1): 9~17
- 51 钱正安, 蔡 英, 刘景涛等. 中蒙地区沙尘暴研究的若干进展. 地球物理学报, 2006, 49(1): 83~92  
Qian Zheng'an, Cai Ying, Liu Jingtao et al. Some advances in dust storm research over China-Mongolia areas. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(1): 83~92
- 52 岳乐平, 杨利荣, 李智佩等. 阿拉善高原干涸湖床沉积物与华北地区沙尘暴. 第四纪研究, 2004, 24(3): 311~317  
Yue Leiping, Yang Lirong, Li Zhipei et al. Lacustrine deposit in the Alxa Plateau and the sand-dust storm in Northern China. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(3): 311~317
- 53 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远等. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策. 地理学报, 2000, 55(5): 513~521

- Ye Duzheng, Chou Jifan, Liu Jiyuan et al. Causes of sand-stormy weather in Northern China and control measures. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(5): 513~521
- 54 张兴赢,庄国顺,袁慧.北京沙尘暴的干盐湖盐渍土源——单颗粒物分析和XPS表面结构分析.中国环境科学,2004,24(5): 533~537  
Zhang Xingying, Zhuang Guoshun, Yuan Hui. The dried salt-lakes saline soils sources of the dust storm in Beijing——The individual particles analysis and XPS surface structure analysis. *China Environmental Science*, 2004, 24(5): 533~537
- 55 韩同林,林景星,王永等.京津地区“沙尘暴”的性质和治理——以北京2006年4月16日的尘暴为例.地质通报,2007, 26(2): 117~127  
Han Tonglin, Lin Jingxing, Wang Yong et al. Nature and control of “dust storms” in the Beijing-Tianjin region, China——A case study of the dust storm in Beijing on April 16, 2006. *Geological Bulletin of China*, 2007, 26(2): 117~127
- 56 孙继敏.中国黄土的物质来源及其粉尘的产生机制与搬运过程.第四纪研究,2004,24(2): 175~183  
Sun Jimin. Provenance, forming mechanism and transport of loess in China. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(2): 175~183
- 57 强明瑞,陈发虎,周爱锋等.苏干湖沉积物粒度组成记录尘暴事件的初步研究.第四纪研究,2006,26(6): 915~922  
Qiang Mingrui, Chen Fahu, Zhou Aifeng et al. Preliminary study on dust storm events documented by grain size component of Sugan Lake sediments, North Gaidam Basin. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(6): 915~922
- 58 周建忠,路明.不同类型地表沙尘量的比较研究.见:路明,赵明主编.土地沙漠化治理与保护性耕作.北京:中国农业科学技术出版社,2005. 29~34  
Zhou Jianzhong, Lu Ming. Exploration and analysis about small sand source of sandstorm. In: Lu Ming, Zhao Ming eds. *Control of Desertification Land and Conservation Tillage*. Beijing: China Agricultural Sciences Press, 2005. 29~34
- 59 田育红,纪中奎,刘鸿雁.内蒙古高原中部主要气候因子及地表覆盖对沙尘暴影响分析.应用气象学报,2005,16(4): 476~483  
Tian Yuhong, Ji Zhongkui, Liu Hongyan. Main climatic factors and land cover effects on sandstorms in the central part of Inner Mongolia Plateau. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2005, 16(4): 476~483

## GRAIN SIZE DISTRIBUTION AND MAGNETIC CHARACTERISTICS OF DUST FALL IN BEIJING ON APRIL 17, 2006

Zhang Song<sup>①</sup>      F. Heller<sup>②</sup>      Jin Chunsheng<sup>①</sup>      Liu Ping<sup>①</sup>      Qin Xiaoguang<sup>①</sup>      Liu Tungsheng<sup>①</sup>

(①Institute of Geology and Geophysics, Academy of Sciences, Beijing 100029; ②Institute of Geophysics, ETH, Zurich, Switzerland)

### Abstract

Grain size analysis and magnetic method were applied to detect the characteristics of Beijing dust fall on April 17, 2006. Similar to others deposition of modern aerosol, Beijing dust fall magnetic susceptibility is higher than the values of glacial loess. Day-plot, which compares the Beijing dust fall with a number of loess/paleosol samples from the central and west Loess Plateau, shows that Beijing dust fall is close to material from the western loess plateau but a little coarser. The component analysis of IRM coercivity by the method of Egli reveals two main components: The component C1 is always constant and has the same magnitude in all samples; while the magnitude of component C2 varies distinctly and becomes more pronounced in the stronger magnetic samples. It is not clear where it comes from; it might be a pollution component of coarser grain size or an oxidized magnetic mineral phase.

In this paper, three pretreatment methods were used to analyze grain size of dust fall. There is a difference of about 12% in <10 μm component between ultrasonic and non-pretreatment. The difference means that at least 12% fine particles are transported by adhering to coarse particles. In order to clarify the relationship between grain size and transportation, we reviewed the process of several dust falls in Beijing. The result shows that the finer grain sizes usually accord with long and high transportation while the coarser grain sizes usually are components of close and low transportation. Therefore, grain size can be a proxy for the distance of transportation to reflect the change of source. In the cumulative probability curves of dust samples, the grain sizes of dust samples are decomposed to four components. There are two main components: 0.8~20.0 μm, according to Pye's work, are transported in long-term suspension, coming from far sources and 20~70 μm are transported in short-term suspension, from near sources.

In the studied dust fall, grain size is coarse then it should be as the analysis of cumulative probability curves shows that its components include close and low transportation. It is probably that the heaviest dust storm places such as Wulanchabu and Zhurihe and their neighboring areas are the near sources. The heaviest dust storm places in the west of Inner Mongolia should be the far sources. Because magnetic susceptibility of topsoil in farmland of the north of Hebei Province, agro-pastoral ecotone in the north of Yinshan Mountain, and the middle-west of Inner Mongolia are similar to this dust samples, the farmland of agro-pastoral ecotone should have provided most of the dust.

**Key words**      dust fall, grain size, magnetic susceptibility, magnetic characteristics