北京市区尘土与表土的磁学性质及其环境意义

郑 妍 张世红

(中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092.
E-mail: zy99413@163.com; shzhang@cugb.edu.cn)

摘要 对北京市区主要交通干道收集的尘土和表土样品进行详细的环境磁学测量, 包括磁化率、非磁滞剩磁、等温剩磁以及典型样品的磁化率随温度变化特征和磁滞参数等。结果表明, 尘土和表土样品颗粒磁学特征存在明显差异, 主要表现在: 尘土样品中磁性矿物的含量和高矫顽力组分均高于同一采点的表土样品; 磁性颗粒粒度较表土样的偏粗。尘土和表土样品中剩磁载体均为亚铁磁性矿物, 部分尘土样品中含有少量单质铁。尘土样品反映了城市工业和交通产生的磁颗粒特征, 表土样品反映了自然和人为两个来源的磁颗粒特征。磁参数空间分布特征受采点周围工业区、车流量及道路状况等多种环境因素的影响, 其中HIRM的分布可能指示了道路交通来源的磁颗粒特征。2006年4月采集的北京市区沙尘暴样品的磁性特征与自然来源的黄土、古土壤和尘土样品存在差异, 可能是运移过程中混入了途经地区和/或北京市区近地表人为来源的颗粒物。

关键词 尘土 表土 沙尘暴 环境磁学 北京市

随着城市化进程的不断加快, 城市土壤和大气环境质量日益引起广泛重视。工业生产^[1,2]和机动车辆^[3-8]产生的磁性颗粒以某种方式沉积到地表或物体表面, 大部分混入到尘土和表土之中。对尘土^[5-7,9,10]和表土^[11-17]等沉积物中磁性颗粒物的研究是环境磁学研究的重要内容之一^[18-20]。例如, Shilton等人^[10]曾发现英国West Midlands市区尘土样品的磁化率高于英国表土磁化率的平均值, 但未对市区的尘土和表土进行详细的对比研究。

北京市城市环境中的颗粒物成分复杂, 许多学者对道路交通^[21]、工业活动^[22-24]以及沙尘暴^[25,26]等不同来源的颗粒曾进行过多学科的研究, 显示出环境磁学方法在颗粒物分类和来源分析等方面的应用潜力。本文对北京市区及近郊区公路边的尘土和表土样品进行了系统的环境磁学参数测量, 发现尘土与表土样品的磁学特征存在显著差异, 进一步将其与自然来源的沙尘暴样品进行对比, 揭示不同样品的磁学特征及环境意义。

1 样品采集与实验室分析

在北京市区六环路以内沿主要交通干道呈“米”字型(W-E, N-S, NW-SE和NE-SW 4个方向)共布置了63个采点, 采样间距为2~2.5 km(图1)。每个采点分

别收集尘土和表土两种样品。“米”字形剖面样品采集于非扬尘天气(2005年4月25、26日两天)。尘土样品使用尼龙刷扫取机动车道及人行道表面的颗粒物, 每个样品分布面积约5 m²。在尘土采样区内采集1和5 cm深处两种表土样品。

2006年4月17、18两日, 在中国地质大学(北京)校园内收集了当日降落到相对洁净物体表面、来源单一的沙尘暴样品12件。

所有样品在实验室晾干后, 用20目(0.9 mm)标准分样筛进行干筛, 装入8 cm³无磁性样品盒中, 压实, 称重, 进行高精度的环境磁学测量。()利用KLY-4S磁化率仪测量样品的低场体积磁化率。()使用Molspin交变退磁仪和PARM系统获得非磁滞剩磁(ARM)(90 mT交变场叠加0.04 mT的直流偏置场)。()样品经99 mT交变场退磁后, 利用IM10-30脉冲磁化仪获得外场为1 T条件下的等温剩磁(一般环境磁学文献中做饱和等温剩磁(SIRM)使用), 之后将样品在300 mT反向磁场中磁化, 得到等温剩磁IRM₋₃₀₀, 定义S-ratio = -IRM₋₃₀₀/SIRM, HIRM = (SIRM + IRM₋₃₀₀)/2^[20,27,28]。()在JR-6A旋转磁力仪上完成所有剩磁的测量。()利用KLY-4S磁化率仪和CS-3温度控制系统在氩气环境下完成所有尘土样品及部分表土样品的磁化率随温度变化(κ -T)曲线测量。()

图1 北京市区采样点分布图

图中采用高斯-克吕格投影

用 Bartinton MS2 型双频磁化率仪测量低频(0.47 kHz)和 高频(4.7 kHz)磁化率, 记为 χ_{LF} 和 χ_{HF} , 然后计算频率磁化率百分数 $\chi_{fd}\% = (\chi_{LF} - \chi_{HF}) / \chi_{LF} \times 100\%$. () 在 Micromag 2900 磁力仪上完成典型样品的磁滞参数(饱和磁化强度 M_s , 饱和剩余磁化强度 M_{TS} , 矫顽力 B_c 和剩磁矫顽力 B_{CT})测量. 磁化率、 κ - T 曲线、非磁滞剩磁及等温剩磁测量在中国地质大学(北京)古地磁与环境磁学实验室完成, 频率磁化率在北京大学环境磁学实验室完成, 磁滞参数测量在北京大学物理学院磁学实验室完成.

所测量的磁化率、非磁滞剩磁、等温剩磁结果均用质量进行校正, 获得质量磁化率(χ)、等温剩磁($SIRM$ 和 IRM_{300})和非磁滞剩磁(ARM)等.

2 环境磁学实验结果

2.1 主要磁参数分布特征

磁学参数主要用于了解磁性矿物的类型、含量、

磁畴状态等 [18,29], 其中质量磁化率(χ)和饱和等温剩磁($SIRM$)主要反映磁性颗粒物的含量变化, $HIRM$ 则反映样品中高矫顽力组分的特征, S -ratio 通常反映样品中低矫顽力颗粒(如磁铁矿、磁赤铁矿)与高矫顽力颗粒(如赤铁矿、针铁矿)的相对含量变化特征 [18,27]. 当亚铁磁性矿物主导样品的磁性特征时, 非磁滞剩磁(ARM)可以衡量样品中单畴(SD)磁颗粒的含量, 一般常用 $ARM/SIRM$ 来指示样品中磁性颗粒粒度的变化.

图2为尘土和表土样品的 χ , $SIRM$, $HIRM$, S -ratio 和 $ARM/SIRM$ 在各剖面分布特征及各参数的总体分布图. 所有样品的磁参数基本呈正态分布, 尘土样品的 χ , $SIRM$ 和 $HIRM$ 高于表土样品, 而 $ARM/SIRM$ 小于表土样品, 说明尘土样品中磁性矿物含量和高矫顽力成分含量较表土样品高, 粒度较表土样品偏粗. 尘土和表土样品磁学参数存在明显差异, 剖面上每个采点都表现出这种磁性差异, 而 1, 5 cm 两种表土样品的磁学差异不显著.

图 2 尘土和表土样品 χ , $SIRM$, $HIRM$, $S\text{-ratio}$ 和 $ARM/SIRM$ 在各剖面分布特征及总体分布特征

剖面分布图中空心圆/十字代表尘土/表土样品, 其中大/小十字代表 1/5 cm 的表土样品, 横坐标为东-西, 南-北, 北东-南西, 北西-南东 4 个剖面采点编号, 采点位置见图 1. 磁参数总体分布特征图中实线、虚线和点划线分别代表尘土、5 和 1 cm 表土样品

尘土和表土样品的S-ratio值介于92%~98%之间,平均值约为95%,说明所有样品中低矫顽力矿物主导了样品的磁性特征^[30,31]. 尘土样品的S-ratio总体分布特征较表土样品偏向低值分布,表明尘土样品中高矫顽力成分较表土样品偏多,与HIRM结果一致.

2.2 等温剩磁

等温剩磁获得曲线及其反向场退磁特征有助于识别磁性矿物类型. 尘土和表土样品在最大场强为2 T(图中最大选取1 T)的脉冲磁场下得到的等温剩磁获得曲线及反向场退磁曲线(图3)表明,所有样品在100 mT下可达饱和值的70%~80%,在300 mT可达90%以上,在1 T时已基本达到饱和,并且剩磁矫顽力均小于50 mT,表明亚铁磁性矿物主导了尘土和表土样品的剩磁特征^[20]. 其中表土样品的剩磁矫顽力(35~46 mT)系统地高于尘土样品(30~33 mT)(图3(a)).

图3 等温剩磁获得曲线及剩磁矫顽力曲线
图中实线/虚线代表尘土/表土样品

所有样品的SIRM与 χ 呈良好的线性相关,拟合曲线指向原点(图4),说明样品中剩磁载体也是磁化率的主要贡献者,顺磁性矿物的贡献很小^[20].

2.3 κ -T 曲线特征

κ -T曲线特征可以识别样品中赋存的磁性矿物类型,也可以分析磁性矿物在加热过程中的转变规律^[32~34]. 图5为典型的尘土、表土和沙尘暴样品的 κ -T曲线. 所有样品的加热曲线均在575附近显示了一个快速降低,与磁铁矿的居里温度一致,说明这些样品中磁铁矿对磁化率的贡献较大. 此外,尘土和表土样品在280~300左右,加热曲线出现的小峰值,可能与加热过程中铁的氢氧化物(如纤铁矿)向磁赤铁矿($\gamma\text{FeOOH} \rightarrow \gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$)的转变有关. 样品在350~450之间,磁化率随温度增加而降低,可能是亚稳定的、

图4 尘土、表土和沙尘暴样品的SIRM和 χ 相关图

强磁性的磁赤铁矿受热转化为稳定的、弱磁性的赤铁矿($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$)^[32,35]. 沙尘暴样品在加热到450之前, κ -T曲线几乎没有变化,说明沙尘暴中含有较少或不含铁的氢氧化物.

当加热温度超过450后,所有样品的磁化率都急剧增加,并在510左右达到峰值(图5),这个磁化率峰值在第四纪中国风成沉积物样品的 κ -T曲线中也比较常见^[33,34,36]. 由于所有样品加热过程和冷却过程显示了不可逆特征,冷却后的磁化率值是加热前的数倍,指示了样品在加热过程中生成了新的亚铁磁性矿物. 这些新生成的磁铁矿可能是由含铁硅酸盐矿物或黏土矿物(如绿泥石)、含水水合物(褐铁矿)、针铁矿、有机化合物中的铁等受热转化而成^[31,32,34].

部分尘土样品加热到580后磁化率继续降低(图5(a)). 将600~800之间放大,反映出加热曲线在600后持续下降(670~680前后的磁化率下降趋势有很小的变化),至780左右达到最低值(图5(a)小图),说明尘土样品中可能含有赤铁矿和居里点更高的磁性物质,可能为单质铁^[20,32]. 所有样品中,共34个尘土样品的 κ -T曲线结果显示单质铁的特征,这些尘土样品主要分布在市区中心,即车流量较高的区域,因此尘土中的单质铁可能为交通来源的颗粒物. Hopke等人^[37]认为城区的铁颗粒可能是车体内部排气系统摩擦产生的, Muxworthy等人^[38]提出城市道路尘中的单质铁主要来自电车摩擦. 北京市尘土中的单质铁可能与机动车摩擦(刹车、轮胎等)有关.

2.4 非磁滞剩磁与频率磁化率

当样品中的磁性颗粒以磁铁矿为主时,可以利用

图 5 EW06 的尘土(a)和表土样品(b)及沙尘暴样品(c)的 κ - T 曲线

实/虚线为加热/冷却曲线, 磁化率经初始磁化率值 κ_0 校正

非磁滞剩磁磁化率(χ_{ARM})与 χ 相关图(King图)快速分析样品中磁性颗粒的粒度特征^[39](图 6). 尘土和表土样品的 χ_{ARM} 和 χ 存在很大差异, 表土和沙尘暴样品主要落在 0.1~1 μm 之间, 而尘土样品位于 1~5 μm 之间.

图 6 χ_{ARM} 与 χ 相关图(King 图)

图中 0.1, 1, 5 μm 界限引自King等人^[39]

$ARM/SIRM$ 与 $\chi_{fd}\%$ 和 χ 的相关图中表土和沙尘暴样品与尘土样品分成 2 个区域(图 7). 表土和沙尘暴样品的 $\chi_{fd}\%$ 介于 1%~6%之间, 大部分尘土样品的 $\chi_{fd}\%$ 小于 2%, 说明表土和沙尘暴样品比尘土样品含有较多的超顺磁颗粒, 而尘土中几乎不含超顺磁颗粒^[40](图 7(a)). 表土样品 χ 低、 χ_{fd} 高、 $ARM/SIRM$ 高, 而尘土样品的 χ 高、 χ_{fd} 低、 $ARM/SIRM$ 低, 说明表土样品的磁性矿物含量比尘土样品低, 粒度比尘土样品偏细. 沙尘暴样品中磁性颗粒的粒度特征与表土比较相似.

所有样品的磁滞回线在高场部分均表现出顺磁性矿物的特征, 图 8 为去除顺磁性矿物贡献后尘土、表土和沙尘暴样品的磁滞回线. 磁滞回线在 300 mT 左右闭合, 表明低矫顽力的磁性矿物(主要为磁铁矿)主导了样品的磁滞行为^[41].

2.5 磁滞参数特征

尘土样品的 M_s 和 M_{rs} 均高于同一采点的表土样品, 说明尘土样品中磁颗粒的含量高于表土. 尘土、

图 7 $ARM/SIRM$ 与 $\chi_{fd}\%$ (a)及 χ (b)相关图

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2007-52-20-2399>

图8 NS07 尘土(a)、表土(b)和沙尘暴(c)样品的磁滞回线(去除顺磁性矿物贡献)

采用最大磁感应强度为 ± 1.5 T, M 为磁化强度, M_s 为饱和磁化强度, M_{rs} 为饱和剩磁, B_c 为矫顽力, B_{cr} 为剩磁矫顽力

表土和沙尘暴样品的矫顽力(B_c)分布范围分别为 3.8~11, 8.9~14.8, 9.7~11.3 mT, 剩磁矫顽力(B_{cr})值分别为 22~35, 26~52 和 35~40 mT, B_c 和 B_{cr} 结果表明尘土样品中磁颗粒较表土和沙尘暴样品偏粗。

研究表明, 沙尘暴主要来自北京西部和北部干旱半干旱地区 [42,43]。本文将所测得的尘土、表土和沙尘暴样品的磁滞参数比值(M_{rs}/M_s 与 B_{cr}/B_c)与岩石磁学研究比较成熟的黄土、古土壤结果(西峰 [44]、洛川 [45]、靖边和交道 [33]剖面)进行对比分析(图 9)。磁滞参数结果表明, 北京市区尘土样品沿单畴和多畴颗粒(SD+MD)趋势线分布并向多畴端元(MD)延伸, 与中国西部的黄土和古土壤等自然来源的磁性颗粒有很大差异, 磁性颗粒偏粗。表土样品的投点比较分散, 在SD+MD趋势线 70%~90%左右分布, 介于尘土样品与自然来源的颗粒物(古土壤)之间。2006 年 4 月

采集的沙尘暴样品磁滞参数介于尘土和自然来源样品之间, 位于SD+MD趋势线 80%~90%范围内, 与中国黄土和古土壤的磁畴状态存在差异。

3 讨论

3.1 尘土样品与其他样品的磁性差异及环境意义

等温剩磁获得曲线(图 3)、S-ratio(图 2)、 κ - T 曲线(图 5)和磁滞回线(图 8)特征均表明所有样品中剩磁载体均为亚铁磁性矿物, 如磁铁矿。 κ - T 曲线结果进一步发现尘土和表土样品中还含有少量铁的氢氧化物, 且部分尘土样品中含有少量单质铁。本次研究中含铁的尘土样品主要分布在市区中心, 即北京市的车流量较大的区域, 因此认为北京市尘土中单质铁可能与交通活动有关。所有表土样品中未发现单质铁, 可能是单质铁在土壤中发生氧化作用或与土壤中的有机溶剂等发生化学反应, 转化成为其他磁性矿物。

Day图(图 9)中尘土样品位于单畴和多畴混合趋势线 80%~100%范围及多畴颗粒的范围, 表土样品主要分布在单畴和多畴混合趋势线 70%~85%左右, 表明尘土样品中的磁颗粒粒度较表土偏粗。通过King图(图 6)可知, 尘土样品中磁性颗粒物的直径约为 1~5 μm , 而表土样品中磁颗粒的直径约为 0.1~1 μm 。已有研究表明, 土壤中微生物和趋磁细菌等都会形成细粒(单畴或超顺磁)的磁铁矿 [48], 而燃烧和摩擦等人为原因产生的磁颗粒偏粗, 以单畴和多畴为主 [1,2,6]。表土样品的 $\chi_{fd}\%$ 值介于 1%~6%之间, 表明表土中含超顺磁颗粒, 而尘土样品的 $\chi_{fd}\%$ 低于 2%, 说明尘土中几乎不含超顺磁的磁铁矿颗粒 [40](图 7(a))。ARM/SIRM结果表明尘土样品中单畴颗粒的含量比表土样品低(图 2 和 7)。由于尘土和表土样品中顺磁成

图9 尘土、表土和沙尘暴样品的磁滞参数比值分布图 (Day图 [46])

图中磁畴边界及单畴(SD)和多畴(MD)颗粒混合物趋势线引自 Dunlop [47], 百分数代表SD和MD混合物中MD的百分含量

分含量较低(图 4), 高场部分的磁滞曲线表明样品中顺磁性矿物含量较少, 扣除顺磁成分后, 尘土样品的磁化率仍高于表土样品。综合以上磁学参数的分析, 认为尘土样品中磁颗粒的含量高于表土样品。表土磁性相对于尘土较弱的原因可能有两种: 一为土壤中有机的化学溶解作用, 二为土壤中顺磁性和/或逆磁性物质的稀释作用^[48]。磁学参数结果表明, 尘土样品反映了工业和交通等人为活动产生的磁颗粒的特征, 表土样品反映了自然和人为两种来源的磁颗粒的特征。

沙尘暴样品的磁学特征总体与表土样品类似, 剩磁载体为亚铁磁性矿物, 如磁铁矿。沙尘暴样品的 κ - T 曲线结果未见铁的氢氧化物的特征, 可能是铁的氢氧化物在运移过程中发生氧化反应, 转化为其他磁性矿物。沙尘暴样品的磁畴状态介于黄土-古土壤和尘土样品之间(图 9), 表明沙尘暴样品的磁颗粒较自然来源的磁颗粒偏粗, 可能是由于沙尘暴样品在运移和沉降过程中混入少量途经地区和/或北京市区近地表的人为来源的磁性颗粒。

3.2 磁性参数空间分布特征

以上的磁学结果表明, 尘土样品较表土样品更好地反映了工业和交通等人为来源的磁颗粒的特征, 因此可以进一步区分磁颗粒的来源。

工业区周围颗粒物的磁学研究表明工业区产生的颗粒物的含量由厂区向外逐渐降低^[1,2]。本次研究中北京市西部工业区内(EW14-16)的 χ 和 $SIRM$ 较高, 且由西向东呈递减趋势(图 2, χ 和 $SIRM$, E-W剖面), 反映了工业来源的磁性颗粒物的特征^[1,2,13]。 $HIRM$ 由西部至市中心, 与 χ 和 $SIRM$ 变化特征一致, 表明随着离开工业区距离的增加, 磁性矿物含量和高矫顽力组分均逐渐减小。 $HIRM$ 由市中心向东逐渐增加, 与 χ 和 $SIRM$ 趋势相反(图 2, $HIRM$, EW1-6), 说明工业活动等产生的磁颗粒的含量减小, 道路交通活动产生的磁颗粒含量相对增加。

工业活动产生的磁颗粒主要影响西部工业区附近的几个样品的磁学性质, 其他样品的磁学性质受采点周围的道路状况、车流量等环境因素影响较大, 因此需要结合采点周围的环境分析讨论。不同采点的尘土样品的 $HIRM$ 值变化较大, 利用 $HIRM$ 可以更有效地对比不同区域的磁颗粒的特征。环路和交通干道交叉口附近的采点(如 NS11, NESW09, 11 和 NWSE06, 08)的 $HIRM$ 较高, 二环路内车流量较高的

采点(NS08 和 09)的 $HIRM$ 明显高于邻近的车流量稍低的几个采点(EW07 和 08), 说明尘土样品的 $HIRM$ 可能反映了市区车流量的特征, 车流量越大, $HIRM$ 越高。五环路外的汽车流量相对市区较小、路面相对较老、道路上行驶的货车和重型车辆相对增多, 位于五环路外的 EW01, 02 和 NESW01~03 五个样品的 $HIRM$ 高值可能反映了采点周围行驶的货车和重型车数量增多的特征。NWSE03 和 NWSE13 的 χ 和 $SIRM$ 异常与采点周围的特殊环境(如加油站)有关。

4 结 论

对北京市区及近郊区的尘土、表土以及 2006 年沙尘暴样品的综合磁学参数对比表明: () 尘土样品中磁性矿物的含量和高矫顽力组分均高于同一采点的表土样品; 磁颗粒粒度较表土样品偏粗。尘土和表土样品中主要的剩磁载体均为亚铁磁性矿物, 部分尘土样品中含有少量单质铁。尘土样品反映了城市工业和交通污染产生的磁颗粒的特征, 表土样品反映了自然和人为两种来源的磁颗粒特征。() 磁参数空间分布特征受采点周围工业区、车流量及道路状况等多种环境因素的影响, 其中 $HIRM$ 的分布可能指示了道路交通来源的磁颗粒特征。() 沙尘暴样品的磁性特征与自然来源的黄土、古土壤和尘土样品存在差异, 可能是运移过程中混入途经地区和/或北京市区近地表人为来源的颗粒物。

致谢 感谢岑况、周力平教授、朱艳明博士和陈海英高级工程师在样品采集和实验过程中提供的帮助, 以及李海燕、吴怀春和王红强博士等与作者进行的有益讨论, 感谢匿名审稿人提出的修改建议。

参 考 文 献

- 1 Flanders P J. Identifying fly ash at a distance from fossil fuel power stations. *Environ Sci Technol*, 1999, 33: 528—532[DOI]
- 2 Kapička A, Petrovský E, Ustjak S, et al. Proxy mapping of fly-ash pollution of soils around a coal-burning power plant: A case study in Czech Republic. *J Geochem Explor*, 1999, 66: 291—297[DOI]
- 3 Hunt A, Jones J, Oldfield F. Magnetic measurements and heavy metals in atmospheric particulates of anthropogenic origin. *Sci Total Environ*, 1984, 33: 129—139[DOI]
- 4 Spassov S, Egli R, Heller F, et al. Magnetic quantification of urban pollution sources in atmospheric particulate matter. *Geophys J Int*, 2004, 159: 555—564[DOI]
- 5 Xie S, Dearing J A, Boyle J F, et al. The organic matter content of street dust in Liverpool, UK, and its association with dust magnetic properties. *Atmos Environ*, 2000, 34: 269—275[DOI]
- 6 Hoffmann V, Knab M, Appel E. Magnetic susceptibility mapping of roadside pollution. *J Geochem Explor*, 1999, 66: 313—326[DOI]

- 7 Gautam P, Blaha U, Apple E, et al. Environmental magnetic approach towards the quantification of pollution in Kathmandu urban area, Nepal. *Phys Chem Earth*, 2004, 29: 973—984
- 8 Gautam P, Blaha U, Appel E. Magnetic susceptibility of dust-loaded leaves as a proxy of traffic-related heavy metal pollution in Kathmandu city, Nepal. *Atmos Environ*, 2005, 39: 2201—2211[DOI]
- 9 Goddu S R, Apple E, Jordanova D, et al. Magnetic properties of road dust from Visakhapatnam (India)—relationship to industrial pollution and road traffic. *Phys Chem Earth*, 2004, 29: 985—995
- 10 Shilton V F, Booth C A, Smith J P, et al. Magnetic properties of urban street dust and their relationship with organic matter content in the West Midlands, UK. *Atmos Environ*, 2005, 39: 3651—3659[DOI]
- 11 Boyko T, Scholger R, Stanjek H, et al. Topsoil magnetic susceptibility mapping as a tool for pollution monitoring: Repeatability of in situ measurements. *J Appl Geophys*, 2004, 55: 249—259[DOI]
- 12 Lecoanet H, Lveque F, Ambrosi J P. Combination of magnetic parameters: an efficient way to discriminate soil-contamination sources (south France). *Environ Pollut*, 2003, 122: 229—234[DOI]
- 13 Hanesch M, Scholger R. Mapping of heavy metal loadings in soils by means of magnetic susceptibility measurements. *Environ Geol*, 2002, 42: 857—870[DOI]
- 14 Charlesworth S M, Lees J A. The application of some mineral magnetic measurements and heavy metal analysis for characterizing fine sediments in an urban catchment, Coventry, UK. *J Appl Geophys*, 2001, 48: 113—125[DOI]
- 15 Jelenska M, Agopsowicz A, Kopcewicz B, et al. Magnetic properties of the profiles of polluted and non-polluted soils. A case study from Ukraine. *Geophys J Int*, 2004, 159: 104—116[DOI]
- 16 据宜太, 王少怀, 张庆鹏, 等. 福建三明地区被污染土壤的磁学性质及其环境意义. *地球物理学报*, 2004, 47(2): 282—288
- 17 李晓庆, 胡雪峰, 孙为民, 等. 城市土壤污染的磁学检测研究. *土壤*, 2006, 38(1): 66—74
- 18 Evans M E, Heller F. *Environmental Magnetism: Principles and Applications of Environmagnetics*. California: Academic Press, 2003. 211—229
- 19 Petrovsky E, Ellwood B B. Magnetic monitoring of air-, land-, and water-pollution. In: Maher B A, Thompson R, eds. *Quaternary Climates, Environments and Magnetism*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 279—322
- 20 Thompson R, Oldfield F. *Environmental Magnetism*. London: Allen and Unwin, 1986. 3—38
- 21 张春霞, 黄宝春, 李振宇, 等. 高速公路附近树叶的磁学性质及其对环境污染的指示意义. *科学通报*, 2006, 51(12): 1459—1468
- 22 Cen K, Thomas N, Stefan N, et al. Land use-related chemical composition of street sediments in Beijing. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2004, 11(2): 73—83
- 23 沈明洁, 胡守云, Blaha U, 等. 北京石景山工业区附近一个污染土壤剖面的磁学研究. *地球物理学报*, 2006, 49(6): 1665—1673
- 24 旺罗, 刘东生, 吕厚远. 污染土壤的磁化率特征. *科学通报*, 2000, 45: 1091—1094
- 25 孙业乐, 庄国顺, 袁蕙, 等. 2002年北京特大沙尘暴的理化特性及其组分来源分析. *科学通报*, 2004, 49(4): 340—346
- 26 庄国顺, 郭敬华, 袁蕙, 等. 2000年我国沙尘暴的组成、来源、粒径分布及其对全球环境的影响. *科学通报*, 2001, 46(3): 191—197
- 27 King J W, Channell J E T. Sedimentary magnetism, environmental magnetism, and magnetostratigraphy. *US. Natl Rep Int Union Geod Geophys* 1987—1990. *Rev Geophys*, 1991, 29: 358—370
- 28 Robinson S G. The late Pleistocene palaeoclimatic record of North Atlantic deep-sea sediments revealed by mineral-magnetic measurements. *Phys Earth Planet Inter*, 1986, 42: 22—47[DOI]
- 29 Maher B A. Magnetic properties of some synthetic sub-micron magnetites. *Geophys J*, 1988, 94: 83—96
- 30 Moreno E, Sagnotti L, Turell J D, et al. Biomonitoring of traffic air pollution in Rome using magnetic properties of tree leaves. *Atmos Environ*, 2003, 37: 2967—2977[DOI]
- 31 Urbat M, Lehndorff E, Schwark L. Biomonitoring of air quality in the Cologne conurbation using pine needles as a passive sampler—Part I: Magnetic properties. *Atmos Environ*, 2004, 38: 3781—3792[DOI]
- 32 Dunlop D J, zdemir . *Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers*. Cambridge Studies in Magnetism. Cambridge: Cambridge University Press, 1997. 1—573
- 33 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 Geophys Res (B)*, 2004, 109, doi: 10.1029/2003JB002532
- 34 Liu Q S, Deng C L, Yu Y, et al. Temperature dependence of magnetic susceptibility in argon environment: Implications for pedogenesis of Chinese loess/paleosols. *Geophys J Int*, 2005, 161: 102—112[DOI]
- 35 zdemir , Dunlop D J. Chemical remanent magnetization during γ -FeOOH phase transformations. *J Geophys Res (B)*, 1993, 98: 4191—4198
- 36 邓成龙, 朱日祥, 袁宝印. 黄土高原全新世风成沉积的岩石磁学性质及其古气候意义. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22: 37—45
- 37 Hopke P K, Lamb R E, Natusch D F S. Multielemental characterization of urban roadway dust. *Environ Sci Technol*, 1980, 14: 164—172[DOI]
- 38 Muxworthy A R, Schmidbauer E, Petersen N. Magnetic properties and Mssbauer spectra of urban atmospheric particulate matter: A case study from Munich, Germany. *Geophys J Int*, 2002, 50: 558—570[DOI]
- 39 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. *Earth Planet Sci Lett*, 1982, 59: 404—419[DOI]
- 40 Dearing J A, Dann R J L, Hay K L, et al. Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials. *Geophys J Int*, 1996, 124: 228—240[DOI]
- 41 Roberts A P, Cui Y, Verosub K L. Wasp-waisted hysteresis loops: Mineral magnetic characteristics and discrimination of components in mixed magnetic systems. *J Geophys Res*, 1995, 100: 17909—17924[DOI]
- 42 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
- 43 Kim K H, Choi G H, Kang C H, et al. The chemical composition of fine and coarse particles in relation with the Asian Dust events. *Atmos Environ*, 2003, 37: 753—765[DOI]
- 44 Liu X, Shaw J, Liu T, et al. Magnetic mineralogy of Chinese loess and its significance. *Geophys J Int*, 1992, 108: 301—308[DOI]
- 45 Fukuma K, Torii M. Variable shape of magnetic hysteresis loops in the Chinese loess-paleosol sequence. *Earth Planets Space*, 1998, 50: 9—14
- 46 Day R, Fuller M, Schmidt V A. Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence. *Phys Earth Planet Inter*, 1977, 13: 260—267
- 47 Dunlop D J. Theory and application of the Day plot (M_{rs}/M_s versus H_{cr}/H_c) 1. theoretical curves and tests using titanomagnetite data. *J Geophys Res (B)*, 2002, 107, doi:10.1029/2001JB000486
- 48 Maher B A. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: Paleoclimatic implications. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeocol*, 1998, 137: 25—54[DOI]