

兰州市大气降尘磁学特征及其环境意义

丰 华¹, 刘秀铭^{2,3}, 吕 镔¹, 马明明¹, 李平原¹, 刘 植¹, 赵国永¹, 毛学刚¹

(1. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000;

2. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007;

3. Department of Environment and Geography, Macquarie University, Sydney NSW 2109, Australia)

摘要:对兰州市大气降尘进行系统的环境磁学测量及分析。结果表明,兰州市大气降尘中磁性矿物总体含量较高,以假单畴磁铁矿为主,并伴有少量的磁赤铁矿、纤铁矿及赤铁矿,而且它们主要是来自人类活动产生的污染。过去研究表明,磁性矿物含量年内变化特征显著,冬季污染值高是由于供暖所致,但3月份虽然处于供暖期,它的污染值却明显低于其它供暖期,我们认为主要是兰州市特有的逆温现象:3月份贴地逆温强度低,利于污染物扩散所致。4、5月份污染值全年最低,除了逆温层的作用以外,还与该月份频发的沙尘暴带来的低 χ_{ir} 值的稀释作用有关。近年来,随着污染防治工作的开展,兰州市大气污染状况有了较大改善,2010年 χ_{ir} 值比2007年降低了38%,证明环境磁学方法可以有效地监测城市污染。

关键词:环境磁学;大气降尘;逆温强度;污染检测;兰州市

随着经济发展和城市化进程的不断推进,城市环境问题日益突出,城市大气颗粒污染物对人类健康的影响受到国内外的高度重视,已成为国内外环境科学研究的热点之一,降尘作为大气颗粒污染物的主要载体而备受关注。降尘具有不稳定性,在风力作用下可能再次扬起、飘移及沉降,由于受工业废气、工业尘埃、机动车尾气及其他污染源的影响而对城市土壤、水体、大气等环境系统造成潜在的威胁,直接危害人体健康甚至威胁人类的生命^[1-3]。因此,对降尘性质及变化规律的研究尤为重要,近几年来,有关城市颗粒污染物的研究取得了许多值得借鉴的成果^[1-13],其中运用传统的化学分析方法对降尘中的元素含量、重金属污染^[1,3-7]、有机物^[4-15]等的浓度及来源的研究较为广泛,随着研究的深入,环境磁学由于其简单、经济、快速且无破坏性的特点而被引入到城市颗粒污染物的研究中,成为污染监测方面一个新的生长点并成长迅速^[8-13,16-23]。许多学者借助不同的载体,如树叶表面富集颗粒物^[11,22-23]、河道表层沉积物^[12]、工业区土壤^[19-21]、城市街道尘埃^[10,17-18]及城市降尘^[8]等,研究了大气降尘中磁性颗粒的磁学参数和污染物组成元素浓度之间的关系及其时空变化特征。利用树叶作为磁载体收集并监测市区大气沉降颗粒可获得当前大气的环境质量状况,但后续处理较为复杂;河道表层沉积物、工业区土壤、城市街道尘埃等都含有非大气沉降的较大的颗粒,而自然降尘能够最直观、最有效地反映大气环境质量状况。Xia等^[8]用环境磁学方法对兰州市大气降尘做过初步研究,表明磁化率对污染物来源具有指示作用,并阐释了冬季由于处于供暖期而磁化率值高的原因,但并没有解释为什么3月份虽处于供暖期,而它的值却低于其他供暖期,以及4、5月份磁化率值在全年最低的原因。

本文以降尘为载体,应用环境磁学的方法,系统地研究了兰州市区大气自然降尘中磁性矿物的类型、粒度和含量,详细地分析了兰州市大气降尘样品相关磁学参数的年内及年际变化规律,并结合兰州市特有的逆温现象,重点分析3月份及4、5月份的特殊性。

收稿日期: 2011-09-08; 修订日期: 2011-10-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41072124; 40830105; 40721061) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41072124; No.40830105; No.40721061]

作者简介: 丰华 (1988-), 女, 硕士研究生, 主要从事黄土与环境磁学研究。E-mail: fengh05@163.com

通讯作者: 刘秀铭 (1956-), 博士生导师, 第四纪地质专业。E-mail: xliu@fjnu.edu.cn

1 样品采集与实验方法

1.1 样品采集

为系统地研究兰州市大气降尘的磁性特征,自2007年开始在兰州大学逸夫科学馆顶部(YFD)设置了固定的采样点,距地面约18 m,可排除地面灰尘的干扰,且采样点不受局部污染源影响。采用人工设计的两个长方体玻璃缸采样器,其中一个长宽高分别为100 cm、50 cm、30 cm,另一个为100 cm、30 cm、50 cm,采样时间以月为单位,在月中或月末用毛刷集中收集,直到刷干净为止,将样品装入事先准备好的密封塑料袋内,以备使用。另外有2008年2月29日的沙尘暴(SCB)样品,是沙尘暴当天在逸夫科学馆楼下的车辆表面用毛刷清扫收集的。

1.2 实验方法

所有采集的样品都在样品库内自然晾干,称重后用塑料保鲜膜包紧后装入10 cm³的磁学专用样品盒内并压实。用Bartington MS2B测量样品的低频(470HZ)磁化率 χ_{lf} 及高频(4700HZ)磁化率 χ_{hf} ,并计算求得百分频率磁化率的值($\chi_{rd}\% = (\chi_{lf} - \chi_{hf})/\chi_{lf} \times 100\%$);使用AF demagnetizer交变退磁仪和Molspin Minispin小旋转磁力仪获得无磁滞剩磁(ARM)(100 mT交变场叠加0.1 mT的直流偏置场),并计算求得无磁滞磁化率(χ_{ARM});用IM-10-30强磁仪和小旋转磁力仪测量样品的等温剩磁(IRM)(所加最大外场为1T,将该条件下获得的等温剩磁设定为饱和等温剩磁(SIRM)使用);反向磁场包括-20 mT、-30 mT,直到样品剩磁磁化强度变为负值,然后样品在-300 mT的反向磁场中磁化,得等温剩磁IRM₋₃₀₀;由线性内插获得样品在剩磁值为零时的反向磁场大小,称之为剩磁矫顽力B_r;定义S-ratio = -IRM₋₃₀₀/SIRM, HIRM = (SIRM + IRM₋₃₀₀)/2;用MMVFTB测量样品的磁滞回线及居里点;用KLY-3S磁化率仪和CS-3温度控制系统在氩气环境下测量样品的磁化率随温度变化(κ -T)曲线。

磁学指标如磁化率、非磁滞剩磁、等温剩磁均用质量进行校正获得单位质量的值,获得质量磁化率(χ_{lf} 及 χ_{hf})、等温剩磁(SIRM和IRM₋₃₀₀)和非磁滞剩磁磁化率(χ_{ARM})等。以上实验均在兰州大学西部环境教育部重点实验室完成。

2 结果与分析

2.1 降尘的基本磁学参数变化

磁化率(χ_{lf})与样品中磁性矿物的种类、粒度和含量有直接关系,常用作磁性矿物含量的估计,主要体现在样品中亚铁磁性矿物的富集程度^[16, 24]。测量结果表明(表1,图1a),YFD样品的 χ_{lf} 值总体较高,变化范围为 $250.3 \times 10^{-8} \sim 1155.2 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值为

表1 兰州市大气降尘(YFD)与沙尘暴(SCB)环境磁学基本参数统计

Tab. 1 Magnetic parameter values of dustfall (YFD) and dust storm (SCB) in Lanzhou

	2007.06 - 2008.05		2008.06 - 2009.05		2010.06 - 2011.05		SCB
	数值范围	均值	数值范围	均值	数值范围	均值	
$\chi_{lf} (10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	250.3-1155.2	655.6	329.5-1053.0	609.18	281.3-716.5	501.1	197
$\chi_{rd}\%$	1.39-1.95	1.56	1.08-2.94	1.84	0.45-1.61	1.07	1.70
SIRM ($10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	3312.5-15632.6	8871.2	4022.9-13997.3	8003.7	3088.2-8808.9	5886.8	2613.7
$\chi_{ARM} (10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	454.5-2102.0	1218.7	529.2-1756.9	1055.4	328.5-1195.9	699.7	383.3
$\chi_{ARM}/\text{SIRM} (10^{-3} \text{ mA}^{-1})$	0.13-0.15	0.14	0.13-0.15	0.15	0.09-0.14	0.12	0.15
$\text{SIRM}/\chi_{lf} (10^3 \text{ Am}^{-1})$	12.2-14.08	13.38	11.50-14.07	12.90	9.24-12.74	11.46	13.68
χ_{ARM}/χ_{lf}	1.71-2.05	1.85	1.51-1.86	1.74	1.14-1.80	1.37	2.01
HIRM ($10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	114.86-390.2	222.94	1.69-390.47	183.54	96.14-294.32	182.88	103.02
S-ratio	0.92-0.97	0.95	0.93-0.99	0.95	0.91-0.96	0.94	0.92

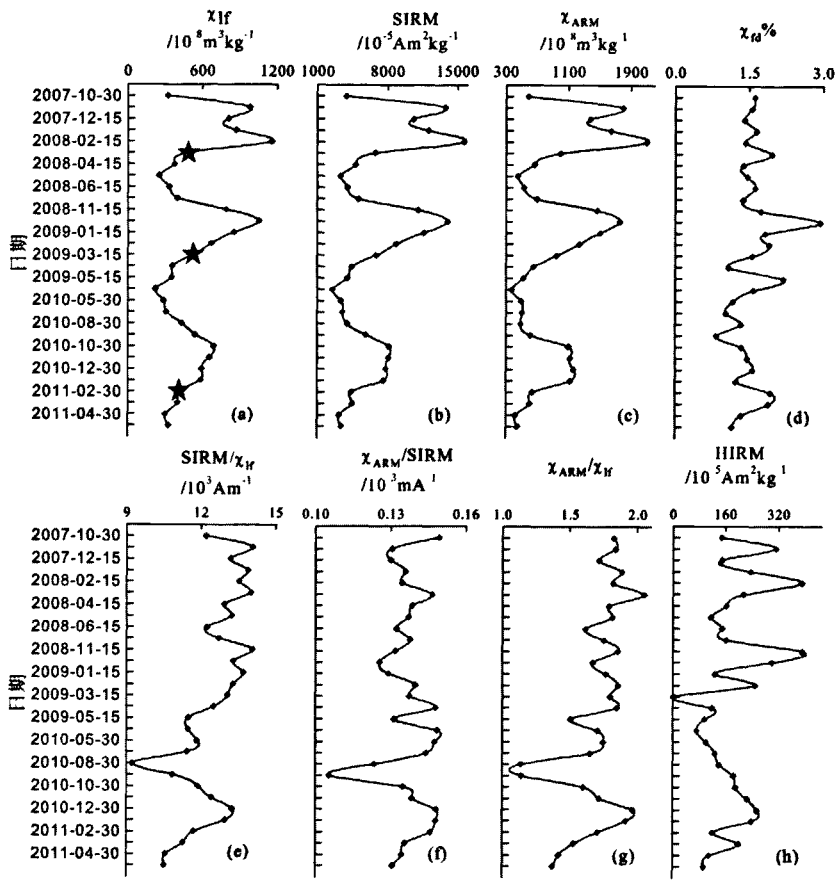


图1 兰州市大气降尘 (YFD) 环境磁学参数变化 (星型标注为3月份)
Fig. 1 Variation of magnetic parameters of dustfall (YFD) in Lanzhou (March with star)

$655.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 表明兰州市降尘样品的亚铁磁性矿物含量较高。在年内 χ_{ir} 值有很好的周期变化规律, 具体表现为样品 χ_{ir} 值在每年11月份突然升高, 然后一直到次年2月份维持在一个较高的范围内, 3月份开始突然下降, 但其值仍然较高, 而4月份至10月份的整体 χ_{ir} 值偏低, 其中4、5月份为全年的最低值。冬春季节 χ_{ir} 值形成鲜明的对比, χ_{ir} 值的最高值是最低值的5倍多。研究期内降尘YFD样品的 χ_{ir} 值存在一定的年际变化规律, 冬季的最高值从2007年的 $1155.2 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 到2008年的 $1053 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 及2010年的 $716.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 呈逐年下降趋势, 而春季 χ_{ir} 最低值从2007-2010年依次为 250.3×10^{-8} 、 329.5×10^{-8} 和 $281.3 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 无明显的年际变化规律。(2009-06~2010-03 由于该楼顶进行维修, 故样品采集中断)

SIRM不受顺磁性和抗磁性物质的影响, 主要反映样品中亚铁磁性及不完全反铁磁性矿物的贡献^[16,25]。YFD样品的SIRM总体较高(表1, 图1b), 变化范围为 $3088.2 \sim 15632.6 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $7587.2 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, 表明兰州大气降尘中的亚铁磁性和不完全反铁磁性矿物含量较高。SIRM和 χ_{ir} 呈线性相关, 相关系数达到 $R^2 = 0.983$ (图2a), SIRM也有很好的年内及年际变化。具体表现为样品SIRM值在每年11月份突然升高, 一直到次年2月份保持一个较高的值, 3月份开始下降, 但值仍较高, 而4-10月份整体偏低, 其中4、5月份为全年的最低值, SIRM最大值为最小值的6倍多。SIRM的冬季最大值呈逐年下降趋势。

S-ratio通常反映样品中高矫顽力颗粒(如赤铁矿、针铁矿)与低矫顽力(如磁铁矿、磁

赤铁矿) 剩磁物质的相对含量变化特征^[16, 26], 兰州市降尘样品的 S-ratio 变化范围为 0.91~0.99, 平均值为 0.94, 整体较高, 反映样品以亚铁磁性矿物为主。 $\chi_{fd}\%$ 主要反映样品中超顺磁 (SP) 性颗粒物的含量^[16], 兰州市降尘样品 $\chi_{fd}\%$ 平均值较低为 1.55, 表明样品中超顺磁性颗粒物含量低, 几乎没有。 χ_{ARM} 反映单畴 (SD) 亚铁磁性颗粒的含量^[16], χ_{ARM} 与 χ_{if} 变化趋势相同, 相关系数 $R^2 = 0.956$

(图 2b), 也有明显的季节与年际变化规律。 $\chi_{ARM}/SIRM$, χ_{ARM}/χ_{if} 及 $SIRM/\chi_{if}$ 与样品中磁性矿物的颗粒大小和种类有关。HIRM 反映样品中高矫顽力组分的特征。

2.2 热磁曲线 (κ -T 曲线)

κ -T 曲线特征, 即磁性矿物在超过某一临界温度 (居里点) 时表现为顺磁的特征, 能够用来识别样品中赋存的磁性矿物类型^[27-29]。兰州市降尘与沙尘暴的磁化率随温度变化曲线的趋势大致相同(图 3)。兰州市大气降尘的加热曲线在 280 °C 左右出现一个小的峰值, 可能是由于加热过程中铁的氢氧化物 (如纤铁矿) 向磁赤铁矿 ($\gamma\text{FeOOH} \rightarrow \gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$) 转变^[16, 30]。在 300~400 °C 之间, 磁化率随温度的升高而降低, 可能是由于亚稳定的、磁性较强的磁赤铁矿受热转化成了稳定的、磁性较弱的赤铁矿 ($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$)^[16, 30]。温度继续升高, 当超过 400 °C 后, 样品的磁化率迅速增加 a 较 b 和 c 更明显, 并在 500 °C 左右达到峰值, 可能是有机化合物中的铁转化成磁铁矿^[31]。前人研究表明, 兰州市大气降尘样品中含有一定的有机质^[15]。样品加热到 500 °C 以后, 磁化率急剧下降, 并在 580 °C 左右几乎降低到零, 与磁铁矿的居里温度一致, 表明降尘样品中的磁性矿物以磁铁矿为主^[16]。当温度超过 600 °C 时磁化率仍少许降低, 直至接近 700 °C, 表明样品中可能含有少量的赤铁矿^[16, 30]。兰州大气降尘样品的 κ -T 曲线加热与冷却曲线 (氩气环境中) 不具有可逆性且冷却曲线位于加热曲线上方, 表明样品在加热过程中生成了新的亚铁磁性矿物。

通过磁学分析的方法, 我们知道样品的主要磁性矿物为磁铁矿, 磁性矿物的饱和剩磁与饱和磁化强度之比 (M_r/M_s) 和剩磁矫顽力与矫顽力之比 (B_{cr}/B_c) 的关系 (即 Day 图) 是最为理想的用来指示磁性矿物粒度的方法^[32]。兰州大气降尘样品正好落在 Day 图的 PSD 区域

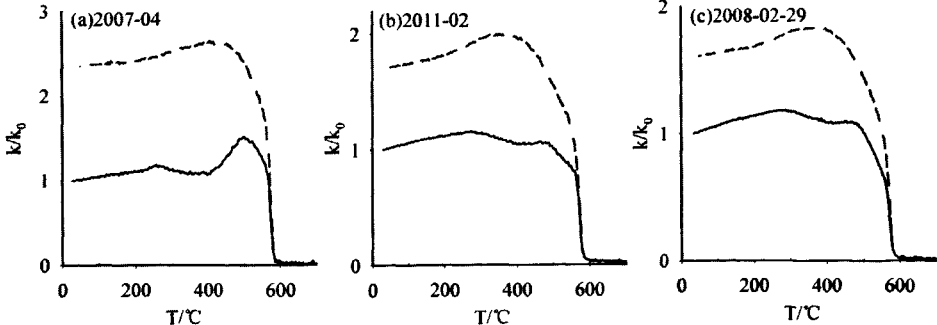


图 3 兰州市大气降尘 (a) (b) 及沙尘暴 (c) 的 κ -T 曲线
(实线/虚线表示加热/冷却曲线, 磁化率经初始值 κ_0 校正)

Fig. 3 κ -T curves of representative samples of Lanzhou dustfall (a), (b) and dust storm (c)
Solid (dash) line represent heating (cooling) curve, susceptibility (κ) is normalized to room temperature values (κ_0)

内(图4a),表明降尘样品中亚铁磁性矿物为粒度较粗的准单畴颗粒。 $\chi_{fd}\%$ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 的关系(即Dearing图)也可以半定量的指示磁性矿物颗粒的大小^[33]。兰州大气降尘样品落入MD+PSD区域与粗粒SSD区域的边界处(图4b),与Day图一致,进一步说明兰州大气降尘样品以粗粒PSD磁性矿物为主。样品的 $\chi_{fd}\%$ 值很低,指示降尘样品中SP颗粒含量很低。

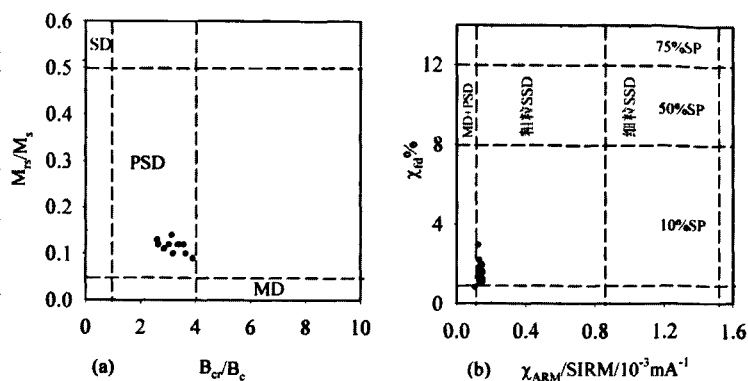


图4 Day图和Dearing图

Fig. 4 Day plot & Dearing plot

2.3 磁滞回线

磁滞现象是指磁性矿物在随磁场消失而产生的剩余磁化强度的变化滞后于磁场变化的现象。不同的磁性矿物,磁滞特征大不相同,并可以用来鉴别磁性矿物的种类^[16]。图5为兰州市大气降尘样品的磁滞回线及磁滞参数,磁滞回线闭合处的场强可以指示主导磁滞行为的磁性矿物^[26],样品基本在250 mT左右形成闭合的磁滞回线且接近饱和, B_c 较低,在30~40 mT之间,表明兰州大气降尘主要以低矫顽力(主要为磁铁矿)的磁性矿物为主。在大于300 mT以上,曲线闭合且随着磁场的增加磁化强度仍有增加,表明样品中含有一定的顺磁性矿物。

3 讨论

3.1 兰州市大气降尘样品的磁学参数分析

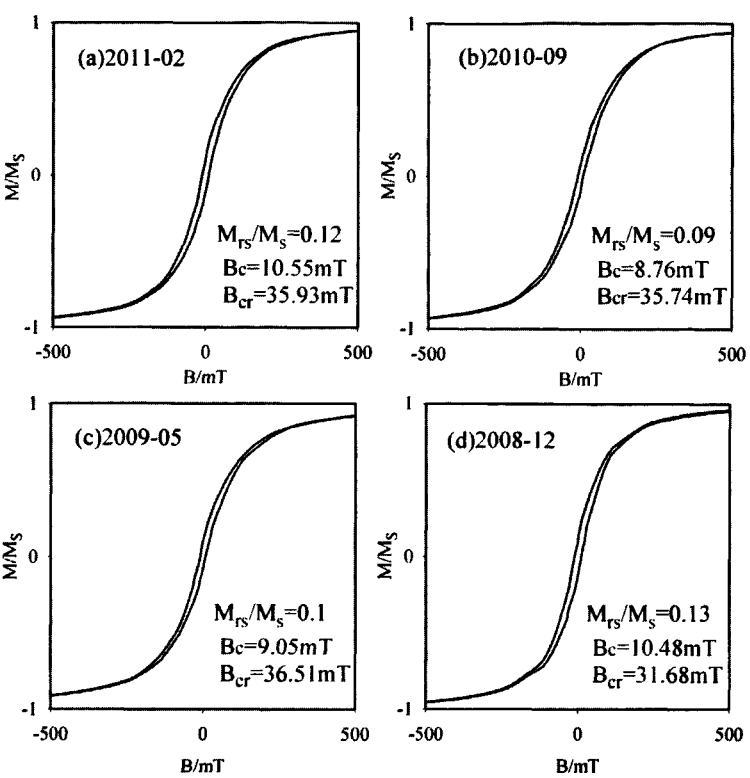
综上所述,S-ratio值, κ -T曲线及磁滞回线特征均表明兰州市大气降尘的磁性矿物以亚铁磁性矿物为主。样品的剩磁矫顽力 B_c 较低,介于30~40 mT之间,表明低矫顽力的亚铁磁性矿物主导样品的磁性特征。从 κ -T曲线特征中可以看出,降尘样品中含有小量的铁的氢氧化物及高矫顽力的赤铁矿,且样品主要以磁铁矿为主。 χ_{ir} 与SIRM及 χ_{ir} 与 χ_{ARM} 呈高度线性相关,相关系数分别为0.984和0.956(图2),他们的值总体偏高,在研究期内, χ_{ir} 的最低值为 $250.3 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,最高值为 $1155.2 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值为 $655.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (表1);而位于兰州市郊区的九州台剖面厚度约320米,顶层的 S_0 在整个剖面中磁化率 χ_{ir} 较高,变化范围也仅为 $40 \times 10^{-8} \sim 60 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[34]。对比分析可知兰州市区的 χ_{ir} 值远远高于兰州郊区的 χ_{ir} 值,揭示了兰州市区由于受燃煤、工业生产和交通等人类活动的干扰、以及地形和气象条件的影响,大气降尘中污染物磁性矿物含量很高, χ_{ir} 能有效指示大气降尘中污染物磁性矿物的变化。

3.2 兰州市3~5月份污染低值原因分析

兰州市大气降尘的 χ_{ir} 、SIRM和 χ_{ARM} 等反映样品磁性矿物含量的参数有明显的季节变化规律,表明降尘样品的磁性矿物含量有明显的随季节变化的规律。这些磁学参数在11月份开始突然升高,到次年2月份维持在较高的数值内,3月份开始下降,但仍然较高,4、5月份为全年的最低值,6~10月份整体偏低,其中最高值比最低值高出5~6倍(图1,表1)。兰州市每年从11月份到次年3月份集中供暖,供暖期间,燃煤量增加,释放到大气中的烟煤等粉尘的量就相应的增加, χ_{ir} 等反映样品磁性矿物含量的参数与供暖期有良好的相关关系,说明供暖期间燃煤产物对大气降尘的贡献,指示兰州市区冬季大气降尘主要来

源为人类活动的产物,进一步验证了 Xia^[8]的观点。但是供暖期间燃煤产物对大气降尘的贡献解释不了为什么3月份虽然也处于供暖期,而 χ_{ir} 、SIRM和 χ_{ARM} 等参数的值却明显低于其他供暖期,说明兰州市大气降尘磁性矿物含量并不是受供暖单一因素控制的,主要与逆温现象有关。

兰州市地处青藏高原东北侧狭长的河谷盆地,四周群山环绕,特殊的地形地貌阻挡了气流的流通,常年盛行偏东风,静风频率年均约为55%;另外,白天强烈的山顶加热效应在山谷形成大气逆温层,逆温现象严重,不利于污染物的扩散。贴地逆温强度从春季至冬季渐次增大(图6)^[35],冬季逆温强度大,不利于污染物的扩



(采用外加磁场为1T,但为了凸显低场特征,绘图只画到500 mT。M为磁化强度, M_s 为饱和剩磁, M_r 为饱和磁化强度, B_c 为矫顽力, B_{cr} 为剩磁矫顽力)
图5 兰州市大气降尘样品磁滞回线

Fig. 5 Magnetic hysteresis loops for selected samples of dustfall in Lanzhou

散,就加强了污染物在大气中的浓度,相应的降尘中的磁性矿物含量就会增加。兰州市3月份逆温强度低,相对有利于污染物的扩散,使得3月份虽然也处于供暖期,但是其 χ_{ir} 等参数的值低于其他供暖期。4、5月份的贴地逆温强度处于全年最低值,这是导致4、5月份 χ_{ir} 等参数的值在全年最低的重要原因。另外,频繁的沙尘暴活动对4、5月份大气降尘量会产生影响,但相对而言,沙尘暴 χ_{ir} 值比城市污染降尘 χ_{ir} 值低得多(约为1/5,表1),实际上对市区人类活动所产生的污染物起到稀释作用,这是使得4、5月份兰州市大气降尘 χ_{ir} 等参数的值在全年最低的另一原因。6-10月份,地面植被较好,随着降雨的发生,气

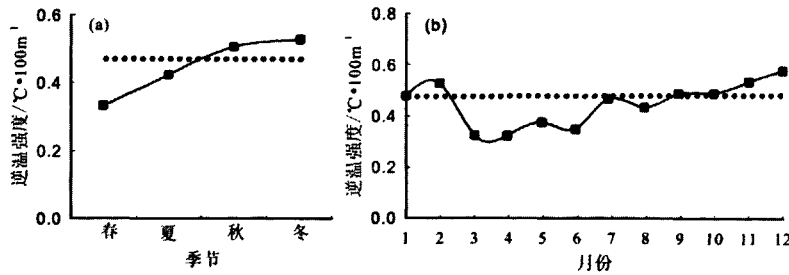


图6 兰州市区季 (a)/月(b) 平均贴地逆温层强度的年变化曲线^[35]

Fig. 6 The annual variation of seasonal (a) and monthly (b) mean intensity of ground-hugging inversion layers in Lanzhou^[35]

① <http://gsrb.gansudaily.com.cn/system/2010/12/14/011810814.shtml>

候比较湿润, 虽然也有静风及逆温现象, 但较之冬季频率较低、强度较小, 外界低的磁化率的磁性矿物的输入也较4、5月份低, 因此其 χ_{ir} 等参数的值居中, 且整体较低。

3.3 2007年以来降尘污染年际变化及其原因分析

反映兰州市大气降尘磁性矿物含量的磁学参数(如 χ_{ir} 、SIRM和 χ_{ARM})的冬季最大值在研究期内呈现逐年线性明显降低的趋势(表1, 图1a, b, c), 具体表现在, 2010年比2007年冬季 χ_{ir} 值低了38%, 这主要是因为这几年来兰州市政府采取措施, 加大了燃煤锅炉改造监督力度, 推广清洁能源所取得的成效。据兰州市环保局提供的资料显示^①, 截止2009年底, 兰州市累计完成锅炉、窑炉、茶炉、饮食灶清洁能源改造9287台眼, 整体消减燃煤79万t, 消减烟尘排放6131t, 二氧化硫1.22万t。而2010年力度更大, 截止11月底, 全市燃煤锅炉清洁能源改造完成126台, 年可消减燃煤14.29万t, 二氧化硫1806t, 这与我们研究结果一致, 兰州市空气污染综合指数2007-2010呈现逐年下降的势头, 大气降尘的 χ_{ir} 值降低, 环境空气质量有了明显的改善。环境磁学研究因其简单, 有效, 经济且无破坏性的特点, 能够用于监测城市降尘环境污染状况。

4 结论

(1) 兰州市大气降尘中磁性矿物总体含量较高, 以假单畴磁铁矿为主, 并伴有少量的磁赤铁矿、纤铁矿及赤铁矿, 而且, 他们主要来自人类活动造成的污染。

(2) 前人研究发现, 兰州市大气降尘中磁性矿物含量的年内变化特征显著, 供暖期磁性矿物含量高于非供暖期, 但没有解释为什么3月份虽处于供暖期, 而含量却明显低于其他供暖期。我们以兰州市特有的逆温现象展开讨论, 认为是由于3月份贴地逆温强度低, 利于污染扩散所造成。

(3) 4、5月份污染程度全年最低, 除了逆温强度低, 有利于污染扩散之外, 低 χ 值的沙尘暴在该月频繁发生, 使其得到稀释也是另外一个原因。

(4) 2010年 χ_{ir} 值比2007年降低了38%, 证明环境磁学方法可以有效地监测城市污染。

参考文献 (References)

- [1] Han Yongming, Du Peixuan, Cao Junji et al. Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China. *Science of the Total Environment*, 2006, 355: 176-186.
- [2] Fergusson J E. Dust in the environment. *Science of Global Change*, American Chemical Society, 1992, 34: 117-133.
- [3] Al-Chalabi A S, Hawker D. Response of vehicular lead to the presence of street dust in the atmospheric environment of major roads. *Science of the Total Environment*, 1997, 206: 195-202.
- [4] Wei Binggan, Yang Linsheng. A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. *Microchemical Journal*, 2010, 94: 99-107.
- [5] Harrison R M, Smith D J T, Piou C A et al. Comparative receptor modelling study of airborne particulate pollutants in Birmingham (UK), Coimbra (Portugal) and Lahore (Pakistan). *Atmospheric Environment*, 1997, 31(20): 3309-3321.
- [6] Lu Xinwei, Wang Lijun, Lei Kai et al. Contamination assessment of copper, lead, zinc, manganese and nickel in street dust of Baoji, NW China. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161: 1058-1062.
- [7] Harrison R M, Yin Jianxin. Particulate matter in the atmosphere: Which particle properties are important for its effects on health? *Science of the Total Environment*, 2000, 249: 85-101.
- [8] Xia Dunsheng, Yang Liping, Ma Jianying et al. Magnetic characteristics of dustfall in urban area of north China and its environmental significance. *Science in China: Series D*, 2007, 50(11): 1724-1732. [夏敦胜, 杨丽萍, 马剑英等. 中国北方城市大气降尘磁学特征及其环境意义. *中国科学: D辑*, 2007, 37(8): 1073-1080.]
- [9] Zheng Yan, Zhang Shihong. Magnetic properties of street dust and topsoil in Beijing and its environmental implications. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 53(3): 408-417. [郑妍, 张世红. 北京市区尘土与表土的磁学性质及其环境意义. *科学通报*, 2007, 52(20): 2399-2406.]
- [10] Wang Guan, Xia Dunsheng, Liu Xiuming et al. Spatial and temporal variation in magnetic properties of street dust in

- Lanzhou City, China. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(12): 446-455. [王冠, 夏敦胜, 刘秀铭 等. 兰州市城市街道尘埃磁学特征时空变化规律. 科学通报, 2008, 53(4): 446-455.]
- [11] Zhang Chunxia, Huang Baochun, Li Zhenyu et al. Magnetic properties of high-road-side pine tree leaves in Beijing and their environmental significance. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(24): 3041-3052. [张春霞, 黄宝春, 李震宇 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.]
- [12] Zhang Chunxia, Huang Baochun. The application and research progress of environmental magnetism in monitoring urban environment pollution. Progress in Geophysics, 2005, 20(3): 705-711. [张春霞, 黄宝春. 环境磁学在城市环境污染监测中的应用和进展. 地球物理学进展, 2005, 20(3): 705-711.]
- [13] Xie Shanju, Dearing J A, Bloemendal J et al. Association between the organic matter content and magnetic properties in street dust, Liverpool, UK. Science of the Total Environment, 1999, 241(1-3): 205-214.
- [14] Liu Enlian, Wang Fanghua. Analysis on source of the polycyclic aromatic hydrocarbons in Jinan's atmosphere. Environmental Monitoring in China, 2007, 23(1): 58-62. [刘恩莲, 王方华. 济南市环境空气中多环芳烃的来源识别和解析. 中国环境监测, 2007, 23(1): 58-62.]
- [15] Deng Zuqin, Zhang Chengjun, Hu Yixin. Characters of PAHs in dust deposition and their relationships to the topography and climatic factors in Lanzhou. Journal of Arid Land Resources & Environment, 2004, 18(8): 48-51. [邓祖琴, 张成君, 胡铁鑫. 兰州市大气降尘中的多环芳烃特征及其与地形和气候因素之间的关系. 干旱区资源与环境, 2004, 18(8): 48-51.]
- [16] Thompson R, Oldfield F. Environmental Magnetism. London: Allen & Unwin, 1986: 1-227
- [17] Heller F, Strzyszcza Z, Magiera T et al. Magnetic record of industrial pollution in forest soils of Upper Silesia, Poland. Journal of Geophysical Research, 1998, 103: 17767-17774.
- [18] Xie S, Dearing J A, Bloemendal J. A partial susceptibility approach to analysing the magnetic properties of environmental materials: A case study. Geophysical Journal International, 1999, 38(3): 851-856.
- [19] Wang Luo, Liu Tongsheng, Lü Houyuan. Magnetic susceptibility properties of polluted soils. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(18): 1723-1725. [旺罗, 刘东生, 吕厚远. 污染土壤的磁化率特征. 科学通报, 1999, 4(10): 1091-1094.]
- [20] Hay K L, Dearing J A, Baban S M J et al. A preliminary attempt to identify atmospherically-derived pollution particles in English topsoils from magnetic susceptibility measurements. Physics and Chemistry of the Earth, 1997, 22 (1-2): 207-210.
- [21] Yang Tao, Liu Qingsheng, Chan Lungsang et al. Magnetic investigation of heavy metals contamination in urban topsoils around the East Lake, Wuhan, China. Geophysical Journal International, 2007, 171: 603-612.
- [22] Matzka J, Maher B A. Magnetic biomonitoring of roadside tree leaves: Identification of spatial and temporal variations in vehicle-derived particulates. Atmospheric Environment, 1999, 33: 4565-4569.
- [23] Schadlich G, Weissflog L, Schuurmann G. Magnetic susceptibility in conifer needles as indicator of fly ash deposition. Fresenius Environmental Bulletin, 1995, 4: 7-12.
- [24] Oldfield F, Yu L. The influence of particle size variations on the magnetic properties of sediments from the north-eastern Irish Sea. Sedimentology, 1994, 41: 1093-1108.
- [25] Thompson R, Bloemendal J, Dearing J A et al. Environmental applications of magnetic measurements. Science, 1980, 20: 481-486
- [26] Evans M E, Heller F. Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics. Oxford (UK): Academic Press, 2003: 211-229.
- [27] 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. Geophysical Journal International, 1994, 118: 604-612.
- [28] Deng Chenglong, Zhu Rixiang, 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. Journal of Geophysical Research: B, 2004, 109, doi: 10.1029/2003JB002532.
- [29] Liu Qingsong, Deng Chenglong, Yu Y et al. Temperature dependence of magnetic susceptibility in argon environment: Implications for pedogenesis of Chinese loess/paleosols. Geophysical Journal International, 2005, 161: 102-112.
- [30] Özdemir Ö, Dunlop D J. Chemical remanent magnetization during gamma-FeOOH phase transformations. Journal of Geophysical Research (B), 1993, 98: 4191-4198.
- [31] Hanesch M, Stanjek H, Petersen N. Thermomagnetic measurements of soil iron minerals: The role of organic carbon. Geophysical Journal International, 2006, 165: 53-61.
- [32] Day R, Fuller M, Schmidt V A. Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence. Phys Earth Planet Inter, 1977, 13: 260-267.
- [33] Dearing J A, Bird P M, Dann R J L et al. Secondary ferrimagnetic minerals in Welsh soils: A comparison of mineral magnetic detection methods and implications for mineral formation. Geophysical Journal International, 1997, 130:

727-736.

- [34] Liu Xiuming, Mao Xuegang, Ding Zhongli et al. Study on the relation between loess paleoclimate trend and uplift of Tibetan Plateau. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(5): 985-996. [刘秀铭, 毛学刚, 丁仲礼 等. 黄土古气候变化趋势与青藏高原隆升关系初探. *第四纪研究*, 2009, 29(5): 985-996.]
- [35] Jiang Dabang, Wang Shigong, Lang Xianmei. The characteristics of stratification of lower-layer atmospheric temperature and their relations with air pollution in Lanzhou Proper. *Journal of Lanzhou University*, 2001, 37(4): 133-139. [姜大膀, 王式功, 郎咸梅. 兰州市区低空大气温度层结特征及其与空气污染的关系. *兰州大学学报*, 2001, 37(4): 133-139.]

Magnetic Properties of Dustfall in Lanzhou City and Its Environmental Significance

FENG Hua¹, LIU Xiuming^{2,3}, LV Bin¹, MA Mingming¹, LI Pingyuan¹,
LIU Zhi¹, ZHAO Guoyong¹, MAO Xuegang¹

(1. Key Laboratory of Western China's Environmental System (Ministry of Education), Lanzhou University,
Lanzhou 730000, China;

2. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

3. Department of Environment and Geography, Macquarie University, Sydney NSW 2109, Australia)

Abstract: Environmental magnetic measurements were carried out on the samples of Lanzhou dustfall. These samples were collected monthly during April 2007 to June 2011 at Lanzhou University. The magnetic parameters (χ_{lf} , SIRM, χ_{ARM} , κ -T curves and magnetic hysteresis parameters) indicate a high concentration of magnetic minerals in Lanzhou, dominated by pseudo-single domain (PSD) magnetite, but also contain maghemite, lepidocrocite and hematite. They mainly come from pollution of human activities. The parameter χ_{lf} can effectively denote the concentration variations of magnetic mineralogy of polluted dustfall. Previous studies have shown that χ_{lf} value in Lanzhou dustfall has significant variations during the year. The value of χ_{lf} is distinctly high in the heating months, while low in other months. Although March is also in the heating period, its χ_{lf} value is obviously lower than other that of heating months, which might be due to the unique inversion phenomenon of Lanzhou basin: low intensity of ground inversion being conducive to the diffusion of pollutants. April and May have the lowest values throughout the year, and the reasons could be 1) low intensity of ground inversion, and 2) dilution effect of frequent occurrence of dust storms (with low χ_{lf}) in these months. The air quality of Lanzhou has been greatly improved in winter for the last four years. In 2010, the χ_{lf} value is 38% lower than that in 2007, indicating that environmental magnetism can effectively monitor urban pollution.

Key words: environmental magnetism; dustfall; intensity of ground inversion; pollution monitoring; Lanzhou