

兰州市街道尘埃磁学特征及其环境意义

夏敦胜^{1,2}, 余晔¹, 马剑英^{1,2}, 王冠², 杨丽萍², 金明², 刘秀铭², 陈发虎²

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000; 2. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 兰州市是全球大气污染最为严重的城市之一, 为城市颗粒物污染研究的理想场所. 分析了兰州市街道尘埃样品的磁学参数(包括磁化率、无磁滞磁化率、等温剩磁、磁滞回线和热磁曲线)变化特征. 结果表明, 兰州市街道尘埃中磁性矿物含量较高, 主要磁性矿物是铁磁矿、磁赤铁矿和赤铁矿, 并伴有少量顺磁性矿物; 磁性矿物粒度主要是准单畴(PSD); 市区污染春季较夏季严重, 春季高频率的强沙尘暴可能带来了更多的磁性矿物; 兰州市污染物的沉积和分布在很大程度上受到气象条件和地形地貌格局的影响, 市区每个盆地东端高于其它地区; 兰州市污染以人为活动产物为主, 人为活动贡献约为 81.9%, 其中包含交通约 22.6% 的贡献, 自然降尘贡献约为 18.1%; 特殊的地形和气象条件, 使得兰州市区的大气环境容量比平原城市的环境容量小得多, 进而导致严重的大气污染.

关键词: 环境磁学; 街道尘埃; 城市污染; 兰州市

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)05-0937-08

Magnetic Characteristics of Street Dust in Lanzhou and Its Environmental Significance

XIA Dun-sheng^{1,2}, YU Ye¹, MA Jian-ying^{1,2}, WANG Guan², Yang Li-ping², JIN Ming², LIU Xiu-ming², CHEN Fa-hu²

(1. Key Laboratory of Desert and Desertification, Institute of Cold and Arid Regions Environmental and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of West China's Environmental System (Ministry of Education), Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Lanzhou has been one of the most seriously polluted cities in the world due to its special geographical location and weather conditions, which make it an ideal place for urban pollution studies. A set of environmental magnetic parameters (χ_{lf} , χ_{rl} %, χ_{ARM} , SIRM, HIRM, SOFT and back field IRM) of the street dust sampled in Lanzhou during spring and summer 2005 were analyzed. These samples were collected along a main street across the urban area and a mountain route from foot to the top. Results demonstrate that the main magnetic minerals in the street dust are magnetite, maghaemite and haematite with some paramagnetic minerals. Plots of Mrs/Ms vs. Bcr/Bc and χ_{rl} % vs. χ_{ARM} /SIRM indicate that the main grain size of magnetic minerals in the street dust are pseudo single domain (PSD). The results reveal that the Lanzhou city is more polluted in spring than in summer. The main pollution sources are anthropogenic activities (81.9%) and natural dust (18.1%), especially the former. The spatial distribution of pollution is controlled by the topography and weather conditions.

Key words: environmental magnetism; street dust; pollution; Lanzhou

城市颗粒物污染是全球性的重要环境问题之一, 已严重地威胁到城市居民的健康和生存以及城市的发展. 街道尘埃是室内尘埃污染和城市大气颗粒物的主要来源^[1~3], 对儿童的健康具有潜在的危害, 并可能污染城市水源^[4]. 在过去的 20a 中, 世界上很多国家对城市街道尘埃进行了深入研究, 取得了许多重要的成果^[5~8]. 地球化学方法已被广泛应用于城市大气降尘和街道尘埃的研究中^[9~13], 但该方法分析周期较长, 费用较高. 相对而言, 环境磁学^[14~16]具有快速、灵敏、经济、无破坏性、信息量大等显著优点, 可用来作为传统的大量耗费人力、物力和时间分析技术的预研究^[17,18]. 自然环境物质(如大气尘埃等)和人类活动所产生的物质(如车辆的排放

物、工厂等排放的烟尘、废物、废水和生活垃圾等)都有可能成为城市污染源, 这些物质中伴生着大量亚铁磁性颗粒. 污染物沉降到街道等城市地面, 使城市街道成为环境污染物的天然汇集处. 城市街道尘埃的磁学特征能够指示其含有的磁性颗粒物特征, 进而可作为城市污染的替代指标. 应用环境磁学方法研究大气降尘或街道尘埃的一些探索性工作已初步取得了成功^[6~8,19~23]. 有关街道尘埃磁学特性的研究多数是在发达国家进行的, 发展中国家在这方面

收稿日期: 2006-07-12; 修订日期: 2006-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(40401064, 40571147, 90502008); 科技部国际合作重点项目(2002CB714004)

作者简介: 夏敦胜(1971~), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为环境磁学与干旱区环境, E-mail: dsxia@lzb.ac.cn

的研究还较少.本文通过对兰州市街道尘埃环境磁学性质的研究,确定其磁性矿物特征,分析了兰州市街道尘埃的来源、时空分布规律及传播途径,探索了环境磁学参数在开展我国北方城市颗粒污染物研究的可行性.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

兰州市是中国西北地区的交通枢纽,深居大陆腹地,黄河穿城而过,南北群山环抱,为串珠状河谷城市,东西长约 35 km,南北最宽为 8 km,最窄处仅 2 km,面积 $1.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,人口近 300 万(图 1).兰州市属中温带大陆性气候,年均气温 11.2°C ,年均降水量 327 mm.兰州是 1 个以石油化工、冶金和机械工业为主的新兴工业城市,随着经济的发展,工业污染、燃煤和汽车尾气排放等人为污染加剧了兰州市颗粒物污染的

程度.特殊的地理位置、气象条件和盆地地形及不尽合理的工业布局使兰州市大气污染形势十分严峻,尤其是冬季,大气层结稳定,逆温层厚,静风频率高,大气中主要污染物总悬浮颗粒物严重超标^[9].

1.2 样品采集

在 2005 年春季(04-21)和夏季(09-22),2 次沿贯穿兰州市区 3 个盆地(城关区、七里河区和西固区)的东西交通主干道采集了 78 个街道尘埃样品(图 1).采样点分布于市区的公园、商业街、工厂及各交通要道等处.夏季采集样品时,在兰州市南端高出市区约 600m 的皋兰山,沿盘山阶梯从山底到山顶采集了 6 个尘埃样品.采集城市街道尘埃有多种方法,本研究采用毛刷和塑料畚箕来采集^[6,23].在选定的采样点,用刷子将街道尘埃扫入簸箕中,装入自封袋密封,编号并记录采样点交通状况和建筑布局等环境特征.

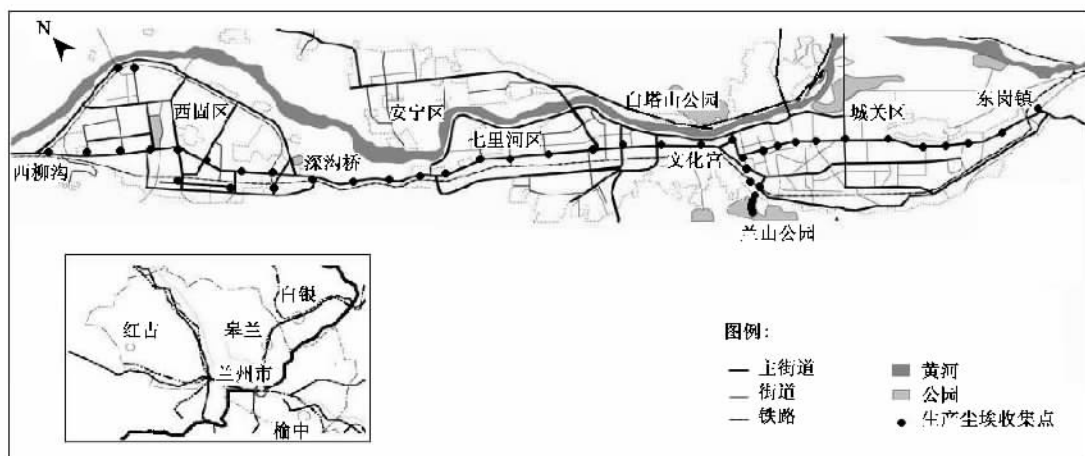


图 1 兰州市街道尘埃样品收集点示意

Fig.1 Schematic map showing the sampling sites in the Lanzhou main street

1.3 样品的处理与分析

样品晾干,剔除树枝、石子等杂物,过筛,分成 2 个亚样品 ($> 63 \mu\text{m}$ 和 $< 63 \mu\text{m}$).取 $< 63 \mu\text{m}$ 亚样 7 ~ 8 g,称重后用塑料薄膜包紧,装入 8 cm^3 的磁学专用样品盒,并压实.用 Bartington MS2B 测量样品的磁化率(χ_{ir}),包括高频(4 700 Hz)和低频(470 Hz),并计算出频率磁化率(χ_{fd})^[16].用交流退磁仪(AF demagnetizer)和 Minispin 旋转磁力仪测量无磁滞剩磁(ARM),并计算出无磁滞磁化率(χ_{ARM})^[6,16,21].用 MMPM5 磁化仪和旋转磁力仪测量样品的等温剩磁(IRM)和饱和等温剩磁(SIRM);反向磁场包括 -20 mT , -100 mT 和 -300 mT ,计算退磁参数 $S_{-20 \text{ mT}}$,

$S_{-100 \text{ mT}}$ 和 $S_{-300 \text{ mT}}$;并根据 $\text{SOFT} = [(S_{\text{IRM}} - \text{IRM}_{-20}) / 2] / \text{Mass}$ (Mass 代表质量)和 $\text{HIRM} = [(S_{\text{IRM}} + \text{IRM}_{-300}) / 2] / \text{Mass}$ 分别计算出 SOFT(软磁)和 HIRM(硬磁)^[6,16,21].选择部分代表样品,用 VSM 测量其磁滞回线;用 MMVFTB 测量样品的居里点.样品磁化率在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙漠与沙漠化重点实验室测量,其它磁学参数在英国利物浦大学环境磁学实验室和岩石磁学实验室测试.在常温下, χ_{ir} 值变化反映了样品磁性矿物总含量分布特征, χ_{fd} 反映了超顺磁性颗粒含量变化, χ_{ARM} 常用来指示细颗粒亚铁磁性矿物含量, SIRM 不受顺磁和抗磁性矿物的影响,主要指示来自亚铁磁性矿物

和不完全反铁磁性矿物的贡献^[14,16].

2 结果与分析

2.1 磁化率变化特征

兰州街道尘埃样品的 χ_{if} 的变化范围为 $1\ 685.5 \times 10^{-8} \sim 50.0 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 平均值为 $399.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, χ_{if} 值总体偏高(表 1 和图 2), 指示了兰州街道尘埃样品中磁性矿物含量总体较高. 在空间上, 东岗镇、文化宫和深沟桥的 χ_{if} 值较高, 兰山公园、旧车市场附近和西固公园 χ_{if} 值较低外, 其它城区地点在平

均值附近波动. 季节对比上, 春季和夏季数值基本接近, 春季 χ_{if} 平均值为 $432.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$, 略高于夏季 χ_{if} 平均值 $376.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$. 兰州街道尘埃样品 χ_{fd} 的变化范围为 $14.6\% \sim 1.25\%$, 平均值为 2.4% (表 1 和图 2), 接近西北干旱地区表土样品^[24,25], 指示街道尘埃中超顺磁性颗粒含量较低. 除位于西固区东端的深沟桥样品异常高(达到 14.6%), 其它地点变化平缓, 在平均值附近波动. 季节对比上, 春季和夏季数值基本接近, 春季 χ_{fd} 平均值为 2.3% , 略低于夏季 χ_{fd} 平均值 2.5% .

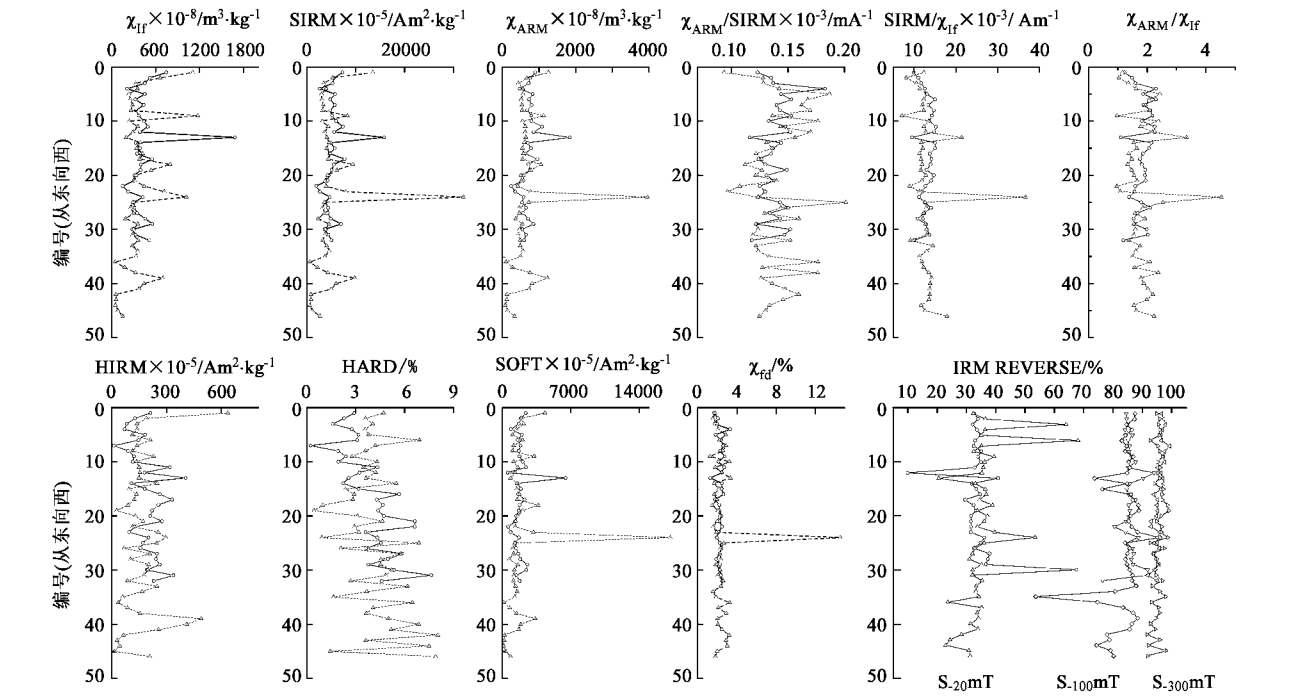


图 2 2005 年春季(实线)和夏季(虚线)兰州市街道尘埃环境磁学参数变化(图中纵坐标为从东向西样品编号)

Fig. 2 Magnetic parameters of Lanzhou street dust, sampled in spring (line) and summer (dash line) of 2005

表 1 2005 年春季和夏季兰州市街道尘埃环境磁学基本参数统计

Table 1 Magnetic parameters of Lanzhou street dust sampled in spring and summer of 2005

项目	2005-04			2005-09			全部样品		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
$\chi_{if} \times 10^{-8}/\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	1 685.47	153.70	432.50	1 178.32	50.03	376.55	1 685.47	50.03	399.51
$\chi_{fd}/\%$	3.32	1.29	2.27	14.60	1.25	2.51	14.60	1.25	2.41
$\text{SOFT} \times 10^{-5}/\text{Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$	6 474.87	556.61	1 828.14	17 173.31	136.51	1 839.72	17 173.31	136.51	1 834.97
$\text{SIRM} \times 10^{-5}/\text{Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$	15 813.77	1 903.86	5 325.19	32 015.33	574.46	4 812.18	32 015.33	574.46	5 022.64
$\chi_{\text{ARM}} \times 10^{-8}/\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	1 840.76	238.67	726.18	3 958.56	79.35	634.67	3 958.56	79.35	672.21
$\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM} \times 10^{-3}/\text{m} \cdot \text{A}^{-1}$	0.18	0.12	0.14	0.20	0.09	0.14	0.20	0.09	0.14
$\text{HIRM} \times 10^{-5}/\text{Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$	404.75	13.06	193.64	634.51	15.80	168.84	634.51	13.06	179.02
$\text{HARD}/\%$	7.65	0.23	3.85	8.04	0.44	4.14	8.04	0.23	4.02
$\text{SIRM}/\chi_{if} \times 10^3/\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	15.26	9.50	13.06	36.63	7.11	12.97	36.63	7.11	13.01
$\chi_{\text{ARM}}/\chi_{if}$	2.30	1.11	1.82	4.53	0.96	1.81	4.53	0.96	1.81
$\text{S}_{-20 \text{ mT}}/\%$	67.80	29.63	35.05	68.38	20.60	35.32	68.38	20.60	35.21
$\text{S}_{-100 \text{ mT}}/\%$	94.35	76.78	86.47	96.44	53.86	84.14	96.44	53.86	85.09
$\text{S}_{-300 \text{ mT}}/\%$	99.77	92.35	96.15	99.56	91.96	95.86	99.77	91.96	95.98

2.2 饱和等温剩磁

兰州街道尘埃 SIRM 的变化范围为 $32\,015.3 \times 10^{-5} \sim 574.5 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$, 平均值为 $5\,022.6 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$ (表 1 和图 2), 总体偏高, 指示了兰州街道尘埃样品中亚铁磁性矿物和不完全反铁磁性矿物含量总体较高. 在空间分布上, SIRM 与 χ_{ir} 的变化趋势相似, 除东岗镇、文化宫和深沟桥较高, 兰山公园、旧车市场附近和西固公园较低外, 其他地点变化平缓. 季节对比上, 春季和夏季数值基本接近, 相比较而言, 春季 SIRM 平均值为 $5\,325.2 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$, 略高于夏季 SIRM 平均值 $4\,812.2 \times 10^{-5} \text{ Am}^2/\text{kg}$.

2.3 热磁曲线

矿物磁性特征随温度变化而变化, 可以利用磁

化强度随温度变化曲线的特征来鉴定磁性矿物成分^[14~16]. 兰州街道尘埃热磁曲线加热与冷却过程不具可逆性且冷却曲线明显位于加热曲线的上方(图 3), 指示样品在加热过程中有强磁性颗粒生成. 街道尘埃居里点为 $570 \sim 590^\circ\text{C}$, 指示样品中含有磁铁矿. 当温度超过 600°C 最大磁化强度仍然降低, 直至接近 680°C 左右, 表明样品中含有少量赤铁矿. 在样品加热曲线中均可见到当加热温度超过 450°C 之后, 磁化强度随温度的升高而急剧增加并在 500°C 左右出现峰值, 指示在加热过程中有新生成的强磁性矿物, 平稳降低的温度转化特征, 说明在街道尘埃中含有一定量的磁赤铁矿^[14].

2.4 磁滞回线

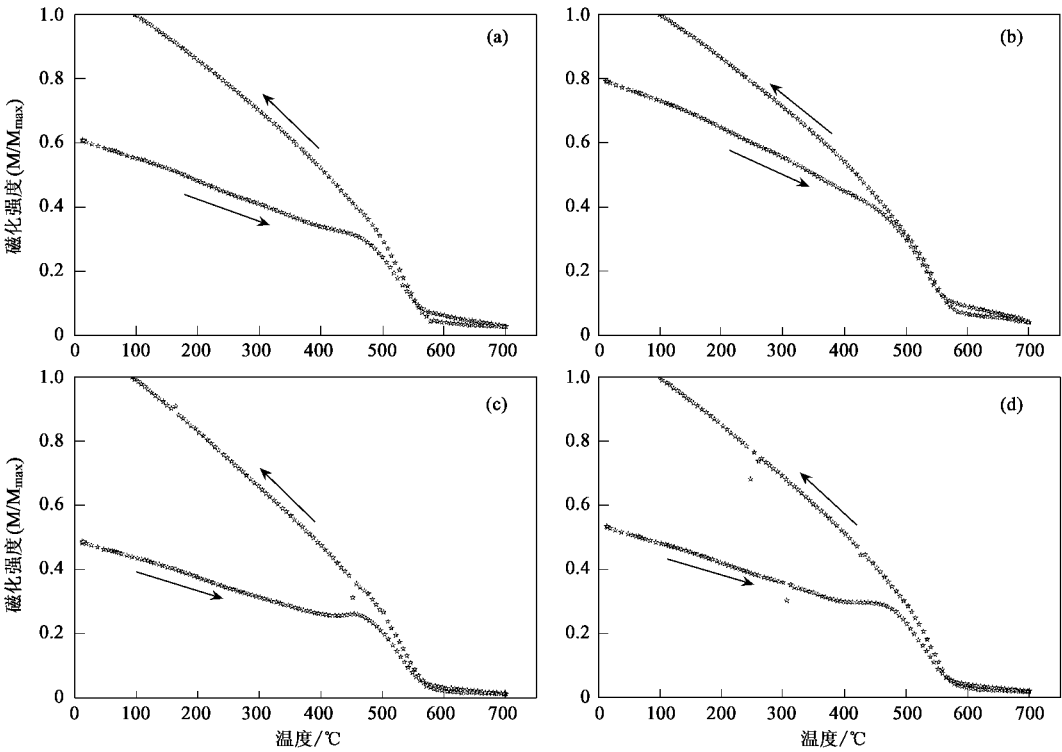


图 3 兰州市街道尘埃热磁曲线
Fig.3 Magnetic Tc curves of Lanzhou street dust

通过改变外磁场强度可以获得样品磁滞回线以及常用的磁滞参数. 磁滞回线的形状能够较好指示磁性矿物的种类^[14~16]. 实验结果显示, 兰州街道尘埃的磁滞回线特征与黄土高原黄土-古土壤序列具有一定的相似性, 同时又具备明显的自身特点. 样品均在 200 mT 左右即形成闭合的狭窄并基本达到饱和状态的磁滞回线(图 4), 表明样品中存在着相当多的低矫顽力亚铁磁性矿物(主要是铁磁矿); 同时, 含有少量高矫顽力的磁性矿物(主要是赤铁矿).

3 讨论

3.1 兰州街道尘埃环境磁学特征

磁学参数可以揭示样品中磁性矿物类型、粒径和含量^[14~16]. 表 1 给出了兰州街道尘埃样品的基本磁学参数, 其中 χ_{ir} 、SIRM、 χ_{ARM} 、HIRM、和 SOFT 等参数主要反映了样品中所含磁性矿物的浓度, 而 χ_{fd} 、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 、 $\text{SIRM}/\chi_{\text{ir}}$ 、 $\chi_{\text{ARM}}/\chi_{\text{ir}}$ 、HARD%、 $S_{-20 \text{ mT}}$ 、 $S_{-100 \text{ mT}}$ 及 $S_{-300 \text{ mT}}$ 则与样品中磁性矿物的颗粒大小和

种类有关^[14~16]。

兰州街道尘埃的 χ_{ir} 值偏高(表 1 和图 2), 指示了街道尘埃中磁性矿物含量较高. SIRM 和 χ_{ir} 及 SOFT 的线性相关[图 2 和图 5(a)]反映了样品磁学性质主要受到亚铁磁性矿物和不完全反铁磁性矿物的控制. 在磁场强度 - 300 mT 状态, 尘埃获得的等温剩磁已经达到饱和值的 96%(表 1), 表明磁铁矿和磁赤铁矿是样品剩磁的主要载体. 样品在 - 300 mT 没有达到饱和, 意味着赤铁矿等高矫顽力的磁性矿物对剩余磁性也有贡献. 兰州街道尘埃表现为高 χ_{ir} 值和低 HIRM 值[图 5(b)], 说明街道尘埃样品中磁性矿物含有大量亚铁磁性矿物磁铁矿. 热磁曲线和磁滞回线结果也同时说明街道尘埃中所含磁性矿物主要为磁铁矿, 并含有赤铁矿.

磁性矿物的磁化强度比 (M_{rs}/M_s) 和矫顽力比 (B_{cr}/B_c) 可以用来指示磁性矿物颗粒的大小^[26]. 单畴(SD)颗粒的磁性特征为 $M_{rs}/M_s > 0.5$ 且 $B_{cr}/B_c < 1.5$; 多畴(MD)颗粒的磁性特征是 $M_{rs}/M_s < 0.1$ 且 $B_{cr}/B_c > 4$; 介于二者之间的则为准单畴(PSD)颗粒^[11]. 兰州街道尘埃样品中 M_{rs}/M_s 和 B_{cr}/B_c 比值正好落入 PSD 磁性矿物范围[图 5(c)], 表明街道尘埃中亚铁磁性矿物的粒度较粗, 为准单畴颗粒. 对比 χ_{fd} 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 也可以半定量地指示样品中磁性矿物颗粒大小^[27], 兰州尘埃样品的 χ_{fd} 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 落入磁性矿物的准单畴(PSD)和多畴(MD)范围[图 5(d)], 与根据 M_{rs}/M_s 和 B_{cr}/B_c 确定的磁性矿物颗粒大小基本一致, 进一步说明兰州街道尘埃样品中磁性矿物颗粒为准单畴.

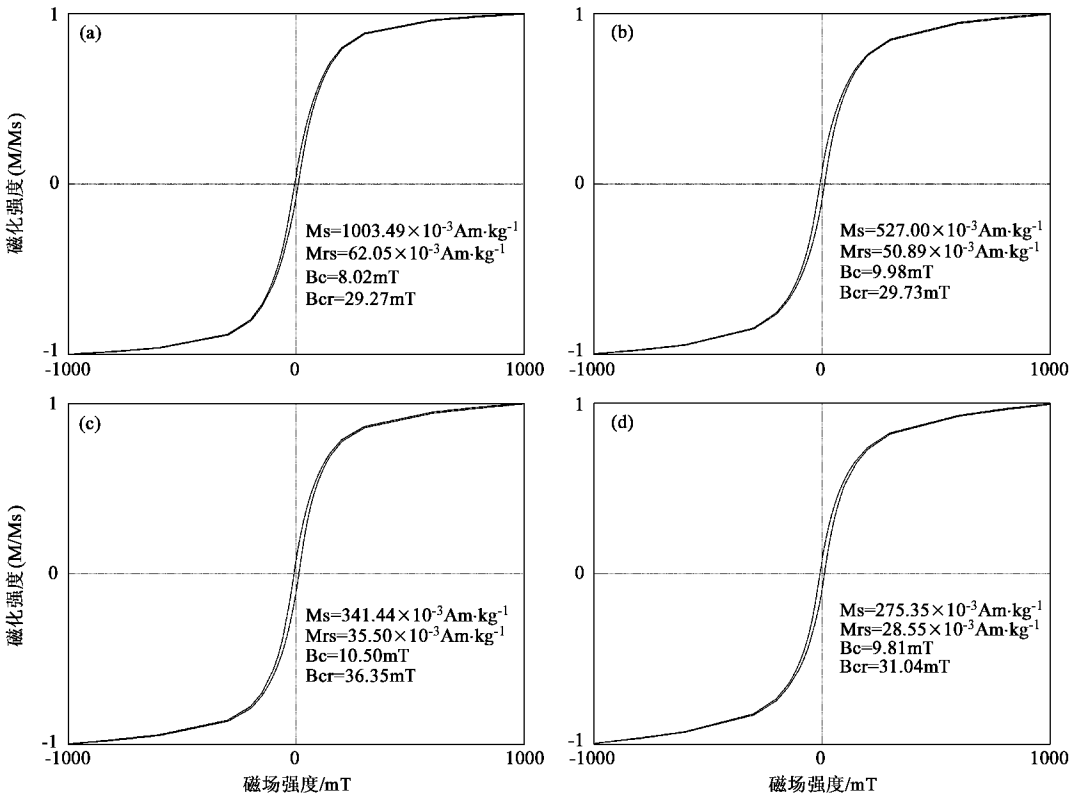


图 4 兰州市街道尘埃磁滞回线
Fig. 4 Magnetic hysteresis loops of Lanzhou street dust

3.2 街道尘埃磁学特征的时空变化

春季与夏季兰州街道尘埃中磁性矿物性质基本一致(表 1 和图 2), 反映了兰州街道尘埃样品中磁性矿物来源的稳定性, 同时也存在着一定差异, 春季样品 χ_{ir} 和 SIRM 等反映磁性矿物浓度的参数较夏季样品高, 指示春季样品中磁性矿物浓度比夏季高. 春季样品的 χ_{fd} 较夏季样品的低, 说明春季样品中超顺

磁性颗粒物含量低, 反映了其污染源在不同季节可能存在一定差异. 图 4 中所列的 4 个尘埃样品中, 样品(a)采集于兰州市城关区东端的东岗镇, 样品(b)和(d)分别在春季和夏季采集于兰州市商业中心南关什字, 尘埃样品(c)采集于兰州工业分布集中区西固钟家河. (a)磁滞回线参数 M_s 最大, 反映了磁性矿物浓度最高. 比较(b)和(d)磁滞回线发现春季样品

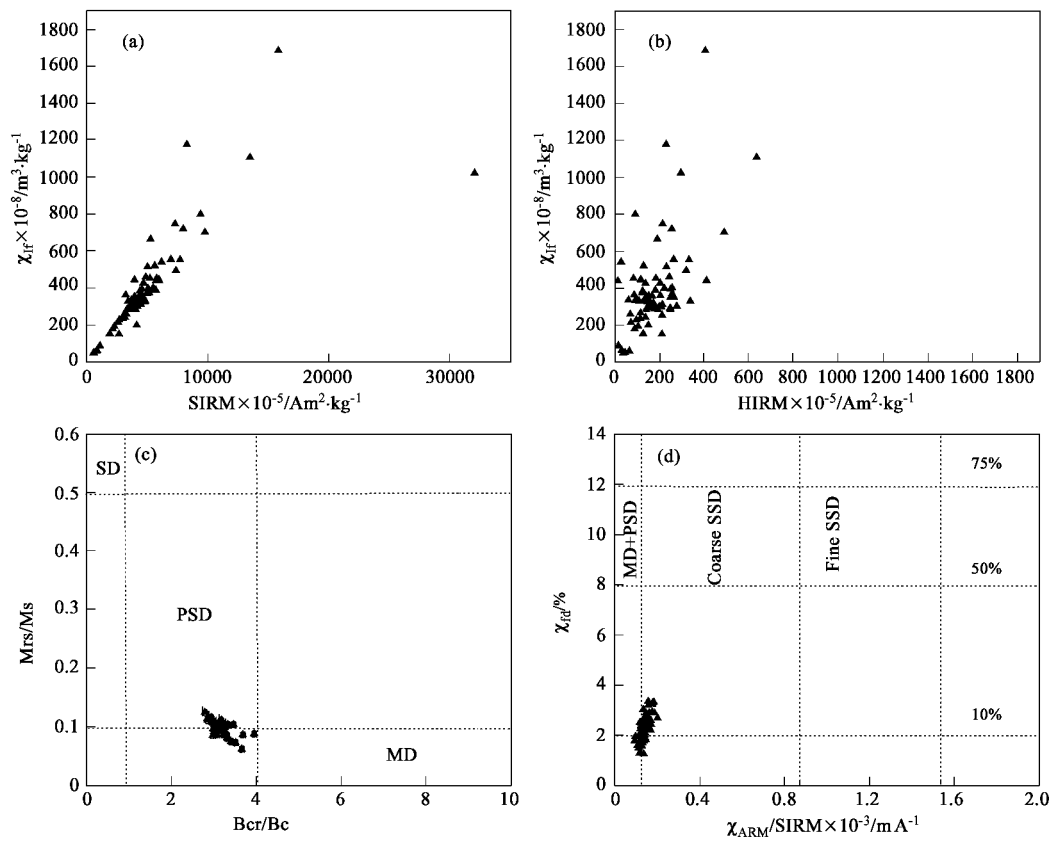


图 5 兰州市街道尘埃环境磁学参数散点图

Fig.5 Scatter plot of magnetic parameters of Lanzhou street dust

表 2 磁性特征随海拔变化对比

Table 2 Variation of magnetic parameters with height

样号	地点	经度	纬度	海拔 /m	χ_{ir} $\times 10^{-8}/m^3 \cdot kg^{-1}$	SIRM $\times 10^{-5}/Am^2 \cdot kg^{-1}$
20050922-41	五泉山广场	103°49.35′	36°05.03′	1 542	370.88	4 963.76
20050922-42	生态情山庄	103°49.28′	36°01.58′	1 610	60.75	808.75
20050922-43	爬山小道	103°49.37′	36°01.55′	1 701	64.30	849.54
20050922-46	盘山公路	103°49.40′	36°01.48′	1 858	151.36	2 661.85
20050922-44	山顶	103°49.28′	36°01.47′	1 859	52.46	593.96
20050922-45	三台阁	103°49.28′	36°01.47′	1 949	88.72	1 094.25

的 M_s 比夏季样品的 M_s 高出近一倍,可能反映了春季高频率的强沙尘暴带来了更多的磁性矿物,也可能指示了季节的气象条件导致污染物中磁性颗粒扩散/累积的差异。

在空间上, χ_{ir} 、SIRM、 χ_{ARM} 、HIRM 和 SOFT 等反映磁性矿物浓度参数的数值随着样品采集点的海拔升高而降低(图 2 中 41 ~ 46 号样品,表 2),当超过一定海拔高度时其磁性矿物含量保持在相对稳定的低水平,指示了街道尘埃中的磁性矿物有很大一部份来自于市区日常的生产与生活活动。城关区东端的东岗镇、七里河区东端的文化宫和西固区东端的

深沟桥的 χ_{ir} 值都较高,其它地点变化平缓。由于受地形约束,这 3 个地点为兰州市东西交通的要道口,市内主街道(或公路)和铁路在这 3 个地区并排通过,汽车、火车等排放的废气可能是造成 χ_{ir} 值都异常高的原因,但不是主要或唯一原因。如果仅是由于汽车、火车等交通废气造成的 χ_{ir} 值都异常高,那么就应该在盆地西端口(城关区西端的西关什字、七里河区西端口职工医院附近和西固区西端西柳沟)也应该出现高值,但实验结果并非如此。兰州市区近地面主导风向为东风,带动污染物向西移动,在盆地西端受狭管效应影响风速升高,将更多污染物带走。当

进入到下一个盆地后,由于空间陡然变的开阔,风速减小,地面和空中的污染物更多的堆积在了盆地东端.可见在具有串珠状河谷盆地的城市兰州,污染物的沉积和分布在很大程度上受到气象条件和地形地貌格局的影响.

3.3 兰州市城市污染源分析

城市地表污染物主要来源于自然界和人类活动.世界上多数城市的污染以自然源为主^[28],杨丽萍和陈发虎^[9,20]的研究表明我国北方城市人为源(主要指燃煤产物)占有较大比例.兰州市街道尘埃样品的 χ_{ir} 与西北干旱地区表土样品的 χ_{ir} 非常接近^[24],可能指示了在样品中含有来自于西北干旱地区表土的尘埃.兰州市街道尘埃具备高磁化率、低频率磁化率的特征组合,说明样品中磁性颗粒物主要来自于人类活动.

与临近的中山林样品的 χ_{ir} 值($440.9 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$)和五泉山公园样品的 χ_{ir} 值($370.9 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$)相比,皋兰山公园盘山阶梯样品的 χ_{ir} 值较低(表 2).当采样点高出市区一定高度时(42~45 号样品), χ_{ir} 值稳定在一较低数值范围内,为 $52 \times 10^{-8} \sim 89 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,公园盘山公路处(样号 46) χ_{ir} 值上为 $151.4 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$.42~45 号样品的 χ_{ir} 值与兰州地区现代地层(例如九洲台^[29]和皋兰山^[30])的 χ_{ir} 值接近,可能在很大程度上反映了自然降尘对街道尘埃的贡献.盘山公路上的样品(46 号)的 χ_{ir} 值为 $151.4 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,可能反映了自然降尘与交通对路面尘埃贡献的累计叠加.五泉山公园样品(样号为 41) χ_{ir} 值为 $370.9 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ (表 2),与兰州市街道尘埃夏季样品的 χ_{ir} 的平均值接近(表 1),可以近似地反映兰州市自然降尘与人类活动产物对街道尘埃 χ_{ir} 值的贡献.兰州污染自然降尘贡献约为 18.1%(67/371),人为活动贡献约为 81.9%(307/371),其中包含交通约 22.6%(84/371)的贡献,与杨丽萍等^[9]通过地球化学方法得到结论基本一致,可见兰州市城市污染以人为活动为主.当然这种估算具有一定的相对性,且盘山公路的汽车流量较市区偏少.

3.4 与世界其他城市比较

英国利物浦^[6]街道尘埃 χ_{ir} 和 χ_{id} 值分别为 $236.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 1.7%,曼彻斯特^[23]街道尘埃 χ_{ir} 和 χ_{id} 值依此为 $230 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 5.6%.江苏省徐州市^[25]城市表土 χ_{ir} 和 χ_{id} 值分别为 $179 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ 和 3.59%,南京市^[31]城市表土 χ_{ir} 平均值为 $118.6 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$.兰州市街道尘埃 χ_{ir} 平均值高达

$399.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$,可见兰州是世界污染最严重的城市之一.位于河谷盆地的兰州市区,南北两山对峙,造成了市区上空的空间有限,加上常年风速小,特别是在冬季,静风率高,逆温天数多,逆温层像“锅盖”一样经常罩在市区上空,大气污染物扩散不出,只有在近地面的有限空间累积、回旋.这种特殊的地形和气象条件,使得兰州市区的大气环境容量比平原城市的环境容量小得多,必然导致严重的大气污染^[32].其次,兰州市的能源和产业布局不合理^[33],兰州市能源结构以煤为主,电力企业、石油化工、金属冶炼及建材为主要污染行业,兰州第二热电厂建在城市的上风向,加重了市区污染.同时,受沙尘暴降尘的影响,近 15 a 来甘肃省大气自然降尘背景值总体水平呈上升趋势^[34].

4 结论

(1)环境磁学研究结果指示兰州市街道尘埃样品中磁性矿物含量总体都较高.样品磁学性质主要受到亚铁磁性矿物和不完全反铁磁性矿物的控制;样品中磁性矿物主要为磁铁矿和磁赤铁矿,并伴有少量赤铁矿和顺磁性矿物.磁性矿物的粒度较粗,为准单畴颗粒.

(2)兰州市春季污染比夏季严重,可能反映了春季高频率的强沙尘暴带来了更多的磁性矿物,也可能指示了季节的气象条件导致污染物中磁性颗粒扩散/累积的差异.兰州市污染物的沉积和分布在很大程度上受到气象条件和地形地貌格局的影响,随着高度的增加,污染程度下降;在城区,每个盆地东端高于其他地区.

(3)兰州市城市污染以人为活动产物为主,人为活动贡献约为 81.9%,其中包含交通约 22.6%的贡献,自然降尘贡献约为 18.1%.特殊的地形和气象条件,使得兰州市区的大气环境容量比平原城市的环境容量小得多,兰州市大气污染严重.

致谢: Jan Bloemendal 博士、John Shaw 教授和 Bob Jude 先生在实验室分析中给予了热忱帮助;张家武博士、肖舜、孙洋、陈建辉及陈建军等参加了部分野外样品采集工作,作者在此一并致谢.

参考文献:

[1] Fergusson J E. Dust in the environment[A]. In: Science of Global Change [J]. American Chemical Society, 1992, 34: 117 ~ 133.

[2] Adgate J L, Willis R D, Buckley T J, et al. Chemical mass balance source apportionment of lead in house dust [J]. Environmental Science and Technology, 1998, 32: 108 ~ 114.

- [3] Harrison R M, Smith D J T, Pio C A, *et al.* Comparative receptor modeling study of airborne particulate pollutants in Birmingham (UK), Coimbra (Portugal) and Lahore (Pakistan) [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**: 3309 ~ 3321.
- [4] Sartor J D, Caboury D R. Street sweeping as a water pollution control measure: lessons learned over the past ten years [J]. *Science Total Environment*, 1984, **33**: 171 ~ 183.
- [5] Nagerotte S M, Day J P. Lead concentrations and isope ratios in street dust determined by electrothermal atomic absorption spectrometry and inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Analyst*, 1998, **123**: 59 ~ 62.
- [6] Xie S, Dearing J A, Bloemendal J. Association between the organic matter content and magnetic properties in street dust, Liverpool, UK [J]. *Science of Total Environment*, 1999, **241**: 205 ~ 214.
- [7] Xie S, Dearing J A, Bloemendal J. The organic matter content of street dust in Liverpool, UK, and its association with dust magnetic properties [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**: 269 ~ 275.
- [8] Xie S, Dearing J A, Boyle J F, *et al.* Association between magnetic properties and element concentrations of Liverpool street dust and its implications [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2001, **48**: 83 ~ 92.
- [9] 杨丽萍, 陈发虎. 兰州市大气降尘污染物来源研究 [J]. *环境科学学报*, 2002, **22** (4): 499 ~ 502.
- [10] Ordóñez A, Loredó J, Miguel E De, *et al.* Distribution of heavy metals in the street dusts and soils of an industrial city in Northern Spain [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2003, **44**: 160 ~ 170.
- [11] Anju D K Banerjee. Heavy metal levels and solid phase speciation in street dusts of Delhi, India [J]. *Environmental Pollution*, 2003, **123**: 95 ~ 105.
- [12] Sezgin N, Ozcan H K, Demir G, *et al.* Determination of heavy metal concentrations in street dusts in Istanbul E-5 highway [J]. *Environment International*, 2003, **29**: 979 ~ 985.
- [13] 康玲芬, 李锋瑞, 张爱胜, 等. 交通污染对城市土壤和植物的影响 [J]. *环境科学*, 2006, **27** (3): 556 ~ 560.
- [14] Thompson R, Oldfield F. *Environmental magnetism* [M]. London: George Allen and Unwin, 1986.
- [15] Evans M E, Heller F. *Environmental magnetism* [M]. London: Academic Press, 2003.
- [16] 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 [J]. *地学前缘*, 2006, **13** (3): 168 ~ 179.
- [17] Schibler L, Boyko T, Ferdy M, *et al.* Topsoil magnetic susceptibility mapping: Data reproducibility and comparability, measurement strategy [J]. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 2002, **46**: 43 ~ 57.
- [18] 姜月华, 殷鸿福, 王润华. 环境磁学理论方法和研究进展 [J]. *地球学报*, 2004, **25** (3): 357 ~ 362.
- [19] Hoffmann V, Knab M, Apple E. magnetic susceptibility napping of roadside pollution [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1999, **99**: 313 ~ 326.
- [20] Chen F H, Yang L P, Wang J M, *et al.* Study on atmospheric particulate pollution of Lanzhou using magnetic measurements [J]. *Journal of Environmental Science*, 1999, **11** (3): 373 ~ 377.
- [21] Shu J, Dearing J A, Morse A P, *et al.* Magnetic properties of daily sampled total suspended particulates in Shanghai [J]. *Environmental Science and Technology*, 2000, **34**: 2393 ~ 2400.
- [22] 田志, 刘庆生. 湖北省赤壁市道路尘埃的磁性结构特征与城市污染环境关系研究 [J]. *地球科学-中国地质大学学报*, 2003, **6**: 701.
- [23] Robertson D J, Taylor K G, Hoon S R. Geochemical and mineral magnetic characterisation of urban sediment particulates, Manchester, UK [J]. *Applied Geochemistry*, 2003, **18**: 269 ~ 282.
- [24] 夏敦胜, 魏海涛, 马剑英, 等. 中亚地区现代表土磁学特征及其古环境意义 [J]. *第四纪研究*, 2006, **26** (6): 937 ~ 946.
- [25] 王学松, 秦勇. 徐州市表层土壤的磁学特征 [J]. *科技导报*, 2005, **23** (11): 14 ~ 19.
- [26] Day R, Fuller M, Schmidt V A. Hysteresis properties of titanomagnetites: Grain-size and compositional dependence [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1977, **13**: 260 ~ 267.
- [27] 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 [J]. *Geophysical Journal International*, 1997, **130**: 727 ~ 736.
- [28] Fergusson J E, Kim N. Trace elements in street and house dusts: source and speciation [J]. *Science of Total Environment*, 1991, **100**: 125 ~ 150.
- [29] 陈发虎, 张维信. 甘青地区黄土地层学与第四纪冰川问题 [M]. 北京, 科学出版社, 1993. 9 ~ 85.
- [30] 戴雪荣, 李吉均, 俞立中, 等. 兰州风尘沉积的粒度分布模式及其古气候意义沉积学报 [J]. 2000, **18** (1): 36 ~ 42.
- [31] 卢英, 龚自同, 张甘霖. 城市土壤磁化率特征及其环境意义 [J]. *华南农业大学学报*, 2001, **22** (4): 26 ~ 28.
- [32] 张雷, 陈长和. 兰州市区大气污染及其治理研究 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 1994, **30** (1): 137 ~ 141.
- [33] 徐惠, 翟钧, 刘振全. 兰州市大气环境污染现状及治理对策研究 [J]. *环境保护科学*, 2003, **29**: 4 ~ 9.
- [34] 张宁, 张武平, 张萌. 沙尘暴降尘对甘肃大气环境背景值的影响研究 [J]. *环境科学研究*, 2005, **18** (5): 6 ~ 10.