

# 兰州市城市街道尘埃磁学特征时空变化规律

王冠, 夏敦胜\*, 刘秀铭, 陈发虎, 余晔, 杨丽萍, 陈建徽, 周爱锋

兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000;

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

\* 联系人, E-mail: [dsxia@lzb.ac.cn](mailto:dsxia@lzb.ac.cn)

2007-09-06 收稿, 2008-01-02 接受

国家自然科学基金项目(批准号: 40571147, 40401064)和科技部重点国际合作项目(批准号: 2002CB714004)

**摘要** 城市环境问题日益受到关注. 兰州市是中国西北典型工业城市之一, 对不同时空条件下兰州市街道尘埃样品的磁学特征进行了研究. 结果表明, 尘埃样品中磁性矿物以假单畴磁铁矿为主; 磁性矿物含量随季节变化显著, 冬春季高, 而秋季低; 磁性矿物含量在工业区、密集街区以及交通要道等区域高. 这些观测表明尘埃样品中的磁性颗粒物来源于自然源和人类活动两方面的贡献. 研究结果指示磁学参数  $\chi_{lf}$  和 SOFT% 能够有效的指示污染物中磁性矿物的含量变化. 磁学方法能够有效、快速和经济的监测城市街道尘埃污染状况.

**关键词**  
环境磁学  
城市污染  
街道尘埃  
兰州市

对城市街道尘埃的研究始于20世纪70年代中期<sup>[1]</sup>. 街道尘埃是污染物质在城市环境中传播的重要介质<sup>[2]</sup>, 它包含以下主要来源<sup>[3]</sup>: 悬浮粒子的沉降物和经过重新迁移的土壤, 同时, 交通、供暖、建筑物退化、建造和革新, 电镀金属的腐蚀等对其周围沉降的街道尘埃都有直接的贡献. 街道尘埃很难在一定的位置堆积较长时间, 易再次悬浮到大气气溶胶中<sup>[4]</sup>, 在降水冲刷作用下, 成为街道径流及承受水体中溶解固体及悬浮物的主要组成部分<sup>[5]</sup>, 对城市土壤、水环境等造成持续污染, 因此, 街道尘埃是城市环境污染研究中的重要对象. 由于街道尘埃可通过吸入, 摄取及皮肤接触对人体造成潜在的危害, 国外对城市街道尘埃的研究比较重视, 取得了许多值得借鉴的成果<sup>[6-13]</sup>. 这些研究多集中在元素含量和源解析以及重金属污染<sup>[8,9]</sup>. 其中对后者的研究又多集中于街道尘埃中的“铅”成分和其他参数的关系研究, 包括人体中的“铅”<sup>[6,10]</sup>、痕量元素<sup>[11]</sup>、有机质含量<sup>[2,12]</sup>及多环芳烃(PAHs)<sup>[13]</sup>等. 目前我国对街道尘埃环境污染问题缺乏足够的认识, 街道尘埃环境污染研究处于起步阶段.

与传统的化学分析手段相比, 简单、经济、快速

和无破坏性的磁学测量可用于大气颗粒监测<sup>[14,15]</sup>. 磁学技术已被广泛的应用于重金属污染研究<sup>[16-20]</sup>. 街道尘埃中不同来源的磁性物质具有不同的磁学性质<sup>[21]</sup>, 这是利用磁学手段进行街道尘埃研究的主要理论基础. 比如, 利用磁学技术可判别灰灰及道路尘埃中车辆产生的颗粒<sup>[20-22]</sup>.

前人主要研究街道尘埃磁性特征的空间分布特征(静态特征)<sup>[12,19-24]</sup>, 而对其时间演化(动态特征)很少涉及<sup>[12,19-24]</sup>. 本文选择大气污染现象较为严重的兰州市街道尘埃样品为研究对象, 在前期工作的基础上<sup>[22,23]</sup>, 通过多种磁学实验手段, 确定不同来源的街道尘埃的磁学参数特征及其时空变化规律, 为今后在该地区应用磁学手段研究环境污染提供科学依据.

## 1 研究方法

兰州市位于中国陆域几何中心, 是以石油、化工、有色金属、机械、电力为主的工业城市. 工业污染物、生活污染物排放量大, 加之城区处于狭长的河谷盆地, 四周又是重重荒山, 这些特殊的地理位置、地形条件、气象条件和不尽合理的工业布局使兰州市面临十分严峻的城市污染形势, 具体地说, 兰州在国

内大城市中污染指数始终比较靠前。为较系统地研究兰州市街道尘埃的磁性特征,我们选择兰州市城区的西固区、安宁区、七里河区及城关区4个城区为研究区(图1);分别于2005年9月(秋)、2006年1月(冬)和2006年3月(春),在兰州市街道,选择连续干燥无雨的天气,用塑料簸箕和毛刷进行尘埃收集,现场将样品密封保存。采样点分布在不同区域:步行街,公园,不同车流量的街道,工厂,医院等,遍布整个市区,分别采集46(秋)、72(冬)和60(春)块街道尘埃样品,其中有33块样点为3个季节重复采集样品点,每一个样品都是在每一个时期相应的每个样点获得。

所有样品在实验室内自然干燥,用1mm尼龙分样筛将样品过筛以剔除杂物、树枝和小石头,然后称取4g左右的样品装入磁学专用样品盒,压实。磁化率测量采用兰州大学西部环境教育部重点实验室的英国Bartington MS2磁化率仪测量。非磁滞剩磁(ARM, 交变磁场峰值100 mT, 直流磁场0.04 mT)和饱和等温剩磁(SIRM)使用华东师范大学磁学实验室的英国Molspin公司生产的交变退磁仪、脉冲磁化仪和Minispin旋转磁力仪完成测量。磁滞回线和居里点利用德国Petersen Instruments生产的MMvfb测量。并根据测量结果计算相关磁学参数,包括低频磁化率(0.47 kHz) $\chi_{lf}$ —— $\times 10^{-8}/m^3 \cdot kg^{-1}$ , 饱和等温剩磁SIRM (SIRM=IRM<sub>1000 mT</sub>)—— $\times 10^{-6}/Am^2 \cdot kg^{-1}$ , 硬剩磁HIRM (HIRM=[(sirm+irm<sub>-300</sub>)/2]/mass)—— $\times 10^{-5}/Am^2 \cdot kg^{-1}$ , 软剩磁SOFT (SOFT=[(sirm-irm<sub>-20</sub>)/2]/mass)—— $\times 10^{-6}/Am^2 \cdot kg^{-1}$ , 非磁滞剩磁磁化率 $\chi_{ARM}$ —— $\times 10^{-8}/m^3 \cdot kg^{-1}$ 等参数,以及比值参数频率磁化

率 $\chi_{fd}\%$  ( $\chi_{fd}\%=[\chi_{lf}-\chi_{hf}]/\chi_{lf} \times 100$ ), SOFT% (SOFT=[SOFT/SIRM]  $\times 100$ ), HARD% (HARD%=(HIRM/SIRM)  $\times 100$ ),  $\chi_{ARM}/\chi_{lf}$ ,  $\chi_{ARM}/SIRM$ —— $\times 10^{-5}/m \cdot A^{-1}$ , SIRM/ $\chi_{lf}$  —— $\times kA \cdot m^{-1}$ 和S-ratio (IRM<sub>-300</sub>/SIRM) (其中IRM<sub>-300</sub>是样品在300 mT反向磁场中磁化后所携带的剩磁)。

## 2 结果与分析

### 2.1 街道尘埃基本磁学参数变化

测量结果如表1所示。当样品中磁性颗粒的粒径变化不大时, $\chi_{lf}$ 反映了样品中含铁磁性矿物的总体贡献,通常由样品中的亚铁磁性矿物含量所决定<sup>[14]</sup>。兰州市街道尘埃样品磁化率值总体较高,平均值为 $449.21 \times 10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1}$ ,变化范围在 $50.03 \times 10^{-8} \sim 1348.10 \times 10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1}$ 之间。其中冬春季的值较高,平均值分别为 $466.22 \times 10^{-8}$ 和 $484.49 \times 10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1}$ ,在秋季,其平均值为 $376.55 \times 10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1}$ 。冬春季的 $\chi_{lf}$ 平均值是秋季 $\chi_{lf}$ 平均值的1.2倍左右。

与 $\chi_{lf}$ 相似,SIRM,SOFT和 $\chi_{ARM}$ 等参数主要与磁性矿物含量和粒度有关<sup>[25]</sup>,其中SIRM不受顺磁性和抗磁性物质的影响,主要由亚铁磁性矿物和不完整反铁磁性矿物所贡献<sup>[14]</sup>,SOFT近似反映磁铁矿含量,尤其是多畴(MD)和超顺磁(SP)/稳定单畴(SSD)边界范围的低矫顽力磁性颗粒含量<sup>[26]</sup>, $\chi_{ARM}$ 则反映SSD和细粒级假单畴(PSD)亚铁磁性矿物含量<sup>[26]</sup>。从表1可知,兰州市街道尘埃样品SIRM,SOFT和 $\chi_{ARM}$ 平均值分别为 $6458.94 \times 10^{-8}$ , $2246.81 \times 10^{-8}$ 及 $908.35 \times 10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1}$ ,对比3个季节的SIRM,SOFT和 $\chi_{ARM}$

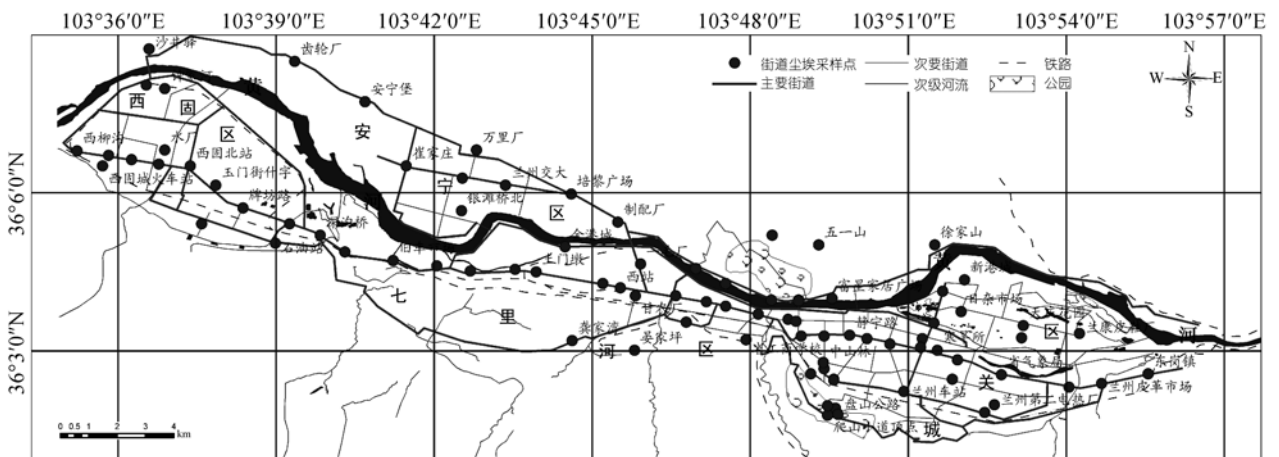


图1 兰州市街道尘埃样品采样点示意图

平均值,均呈现冬春季高,秋季低的趋势. HIRM 可以用来估算反铁磁性矿物的含量,对比 3 个季节的 HIRM 平均值,同样体现出秋季低,春冬季高的变化趋势.

$\chi_{fd}\%$ ,  $\chi_{ARM}/\chi_{if}$ ,  $\chi_{ARM}/SIRM$ ,  $SIRM/\chi_{if}$ 及S-ratio主要反映了磁性矿物的颗粒大小和类型<sup>[14,27]</sup>;  $\chi_{fd}$ 反映样品中超顺磁性颗粒物的含量<sup>[28]</sup>; 兰州市街道尘埃样品 $\chi_{fd}\%$ 平均值较低为 2.21%,反映了样品中超顺磁性颗粒物含量低. 由此,  $\chi_{ARM}/\chi_{if}$ ,  $\chi_{ARM}/SIRM$ 反映了亚铁磁性矿物晶粒大小特征. SOFT%和HARD%可用来近似估算样品中亚铁磁性矿物和反铁磁性矿物的相对含量. 表 1 显示SOFT%(33.81%)远大于HARD%(2.64%),表明样品中以亚铁磁性矿物为主,同时含有少量的不完全反铁磁性矿物. S-ratio( $IRM_{300mT}/IRM_{1T}$ )指示了高矫顽力(“硬”)剩磁与低矫顽力(“软”)剩磁物质的相对含量的多少,可用来评价亚铁磁性物质和反铁磁性物质相对重要性,其中S-ratio高值

表明亚铁磁性物质的相对重要性<sup>[29]</sup>,表 1 显示,兰州市街道尘埃样品S-ratio平均值为 0.974,同时 3 个季节变化不大(秋季 0.943,冬季 0.951,春季 0.946),说明样品中以亚铁磁性矿物为主. 重复样点磁性测量结果表明(表 1),样品的平均值具有相对高的 $\chi_{if}$ 值( $550.20 \times 10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1}$ )及SOFT%(34.19%),较低的HARD%(2.64%)和 $\chi_{fd}\%$ (2.21%),与整体样品所得的结果十分相似,表明这 33 个重复采样样点的街道尘埃样品与所有样品的磁性特征相似.

### 2.2 热磁曲线(J-T 曲线)

磁化强度随温度变化曲线(即J-T曲线)不仅能够揭示样品中主要载磁矿物的种类,而且能够较客观地反映主要磁性矿物在加热过程中的变化特征<sup>[14]</sup>,因此J-T曲线被广泛应用于分析样品中的磁性矿物种类. 部分样品的热磁实验结果显示:兰州街道尘埃样品的J-T曲线(在空气中)不可逆,冷却曲线均明显位

表 1 兰州市街道尘埃不同季节环境磁学基本参数<sup>a)</sup>

	2005-09		2006-01		2006-03	
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
$\chi_{if}$	50.03~1178.32	376.55	115.60~1348.10	466.22	141.94~1137.08	484.49
( $10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1}$ )	(193.75~1178.32)	(427.40)	(157.45~1348.10)	(581.91)	(328.98~1137.08)	(552.35)
$\chi_{fd}\%$	1.25~14.60	2.51	1.00~5.83	2.22	1.19~3.08	1.97
	(1.25~14.60)	(2.55)	(1.00~5.83)	(2.05)	(1.19~2.43)	(1.88)
SIRM	739.36~40378.44	5692.08	1873.96~15171.58	6688.13	2358.53~19277.93	6771.83
( $10^{-5} Am^2 \cdot kg^{-1}$ )	(2651.36~40378.44)	(6459.38)	(2499.09~15171.58)	(7847.77)	(4793.66~19277.93)	(7585.56)
HIRM	46.68~1107.82	126.14	65.85~435.27	156.69	86.18~1142.65	181.56
( $10^{-5} Am^2 \cdot kg^{-1}$ )	(50.37~1107.82)	(138.68)	(78.46~435.27)	(173.08)	(86.18~1142.65)	(217.95)
SOFT	187.55~20428.37	2010.33	609.04~6309.02	2344.50	770.34~6296.66	2310.89
( $10^{-5} Am^2 \cdot kg^{-1}$ )	(847.04~20428.37)	(2335.54)	(798.16~6309.02)	(2800.86)	(1657.44~6296.66)	(2596.02)
SOFT%	24.92~50.59	32.04	30.38~53.57	34.82	30.38~39.44	33.96
	(28.04~50.59)	(32.96)	(30.38~44.53)	(35.37)	(31.31~39.44)	(34.23)
HARD%	0.14~16.70	2.85	1.19~4.34	2.45	0.89~14.66	2.71
	(0.14~16.70)	(2.61)	(1.22~4.34)	(2.28)	(0.89~14.66)	(2.83)
$\chi_{ARM}$	109.32~4538.76	741.31	292.83~3276.43	990.32	369.34~1990.69	938.04
( $10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1}$ )	(436.53~4538.76)	(829.81)	(542.56~1860.91)	(1043.70)	(664.42~1990.69)	(1033.01)
$\chi_{ARM}/\chi_{if}$	1.07~4.44	2.07	0.99~7.20	2.31	0.81~5.74	2.09
	(1.07~4.44)	(2.02)	(1.01~4.29)	(1.97)	(0.81~2.90)	(1.98)
$\chi_{ARM}/SIRM$	0.10~0.20	0.14	0.08~0.65	0.16	0.10~0.35	0.14
( $10^{-3} m \cdot A^{-1}$ )	(0.10~0.20)	(0.14)	(0.08~0.27)	(0.14)	(0.10~0.18)	(0.14)
$SIRM/\chi_{if}$	7.95~39.46	14.95	7.35~19.53	14.93	6.96~18.96	14.42
	(7.95~39.46)	(14.78)	(7.35~17.46)	(14.19)	(6.96~18.96)	(14.18)
S-ratio	0.666~0.997	0.94	0.913~0.976	0.95	0.707~0.982	0.95
	(0.666~0.997)	(0.95)	(0.913~0.976)	(0.95)	(0.707~0.982)	(0.94)

a) 括号内为 33 个重复样点的磁学参数计算值

于加热曲线的上方. 样品加热到 500 以后, 磁化强度急剧降低, 在 580 (磁铁矿的居里温度)左右磁化强度几乎降低到零, 说明兰州市街道尘埃样品中的磁性矿物以磁铁矿为主(图 2). 冷却过程中, 随温度的降低, 磁化强度升高, 表明加热过程中形成了新的亚铁磁性矿物.

### 2.3 磁滞回线

磁滞现象是铁磁性物质特有的物理现象,用来描述铁磁性物质在脉冲直流磁场中所获得的剩余磁化强度与外加磁场强度间的相互关系. 成分不同的天然物质, 磁滞特征大不相同, 因此,可以利用磁滞回线特征鉴别铁磁性矿物 [14]. 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 [29,30]. 兰州市街道尘埃样品均在 250 mT左右形成闭合的磁滞回线(图 3), 表明样品的磁滞行为是以低矫顽力的磁性矿物(主要是磁铁矿)为主导.

## 3 讨论

### 3.1 兰州市街道尘埃样品磁性矿物种类及粒度特征

如前所述, S-ratio平均值,  $J-T$ 曲线及磁滞回线特征均显示了亚铁磁性矿物主导了兰州市街道尘埃所有样品的磁性特征. 样品的剩磁矫顽力 $B_{cr}$ 较低, 介于 20~40 mT之间, 这些特征皆表明低矫顽力的亚铁磁性矿物主导样品的磁性特征 [14].

SIRM 不受顺磁性和抗磁性物质的影响, 主要由铁磁性矿物和不完整反铁磁性矿物所贡献; 软剩磁 SOFT 则主要反映了亚铁磁性矿物的含量;  $\chi_{if}$ 与 SIRM 的高度线性相关, 及 SIRM 与 SOFT 的显著正相关(图 4), 相关系数分别为 0.86 和 0.97, 也反映了  $\chi_{if}$ 的变化主要受到亚铁磁性矿物的含量变化控制.

通过磁学分析可知样品的主要磁性矿物是磁铁矿, 因此剩磁比( $M_{rs}/M_s$ )和矫顽力比( $B_{cr}/B_c$ )之间的关系(即 day plot)是确定磁性矿物粒度最理想的方法.

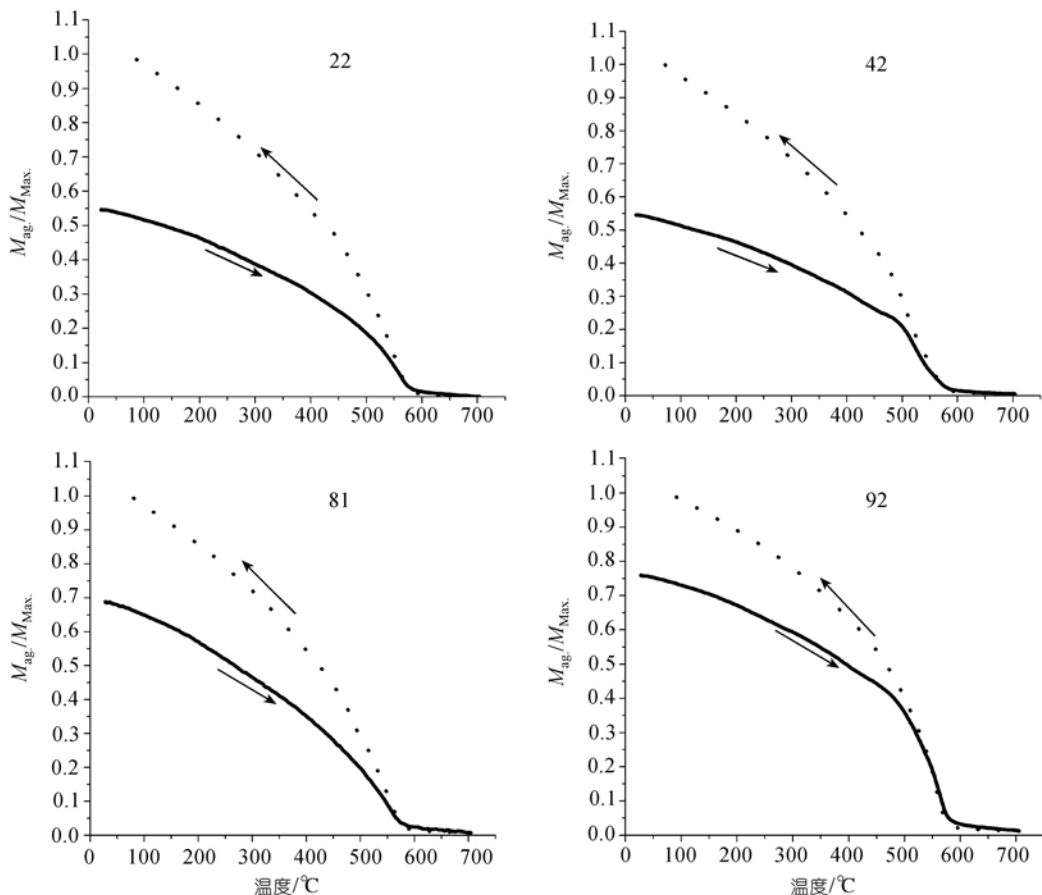


图 2 兰州市街道尘埃样品典型热磁( $J-T$ )曲线

实线和虚线分别代表加热和冷却过程. 其中 22, 92 为 2006 年 1 月所采集; 42, 81 为 2006 年 3 月所采集的街道尘埃样品

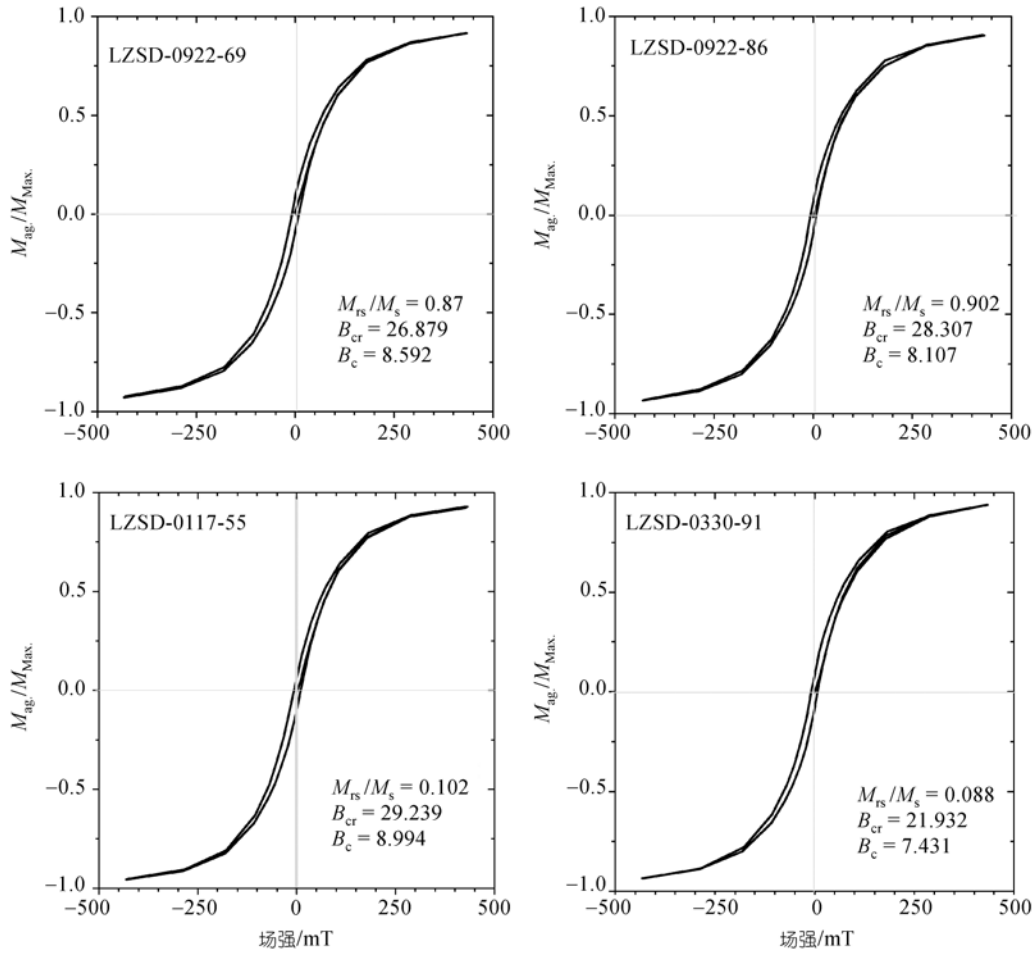


图3 兰州市街道尘埃样品典型磁滞回线

$M_{rs}$  为饱和剩磁;  $M_s$  为饱和磁化强度;  $B_c$  为矫顽力;  $B_{cr}$  为剩磁矫顽力

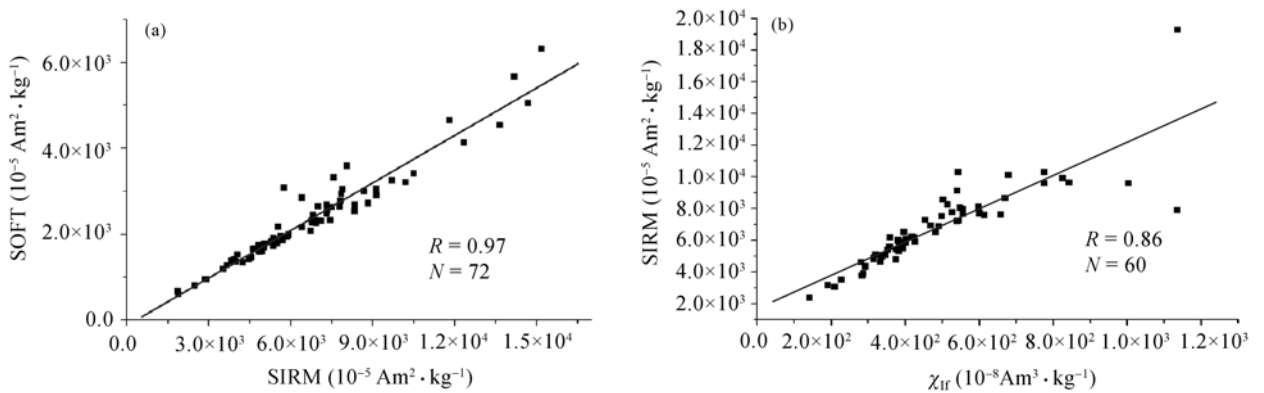


图4 SIRM与SOFT(a)和 $\chi_{rf}$ (b)关系图

R为SIRM与SOFT和 $\chi_{rf}$ 之间的相关系数



根据磁滞回线测量结果, 计算饱和剩余磁化强度与饱和磁化强度之比 $M_{rs}/M_s$ , 以及剩磁矫顽力与矫顽力之比 $B_{cr}/B_c$ , 如图 5 所示, 样品大部分落在Day图的 PSD区域内 [31], 个别样品落在MD区间. 这些磁学特征与之前的街道尘埃研究结果相一致 [22].

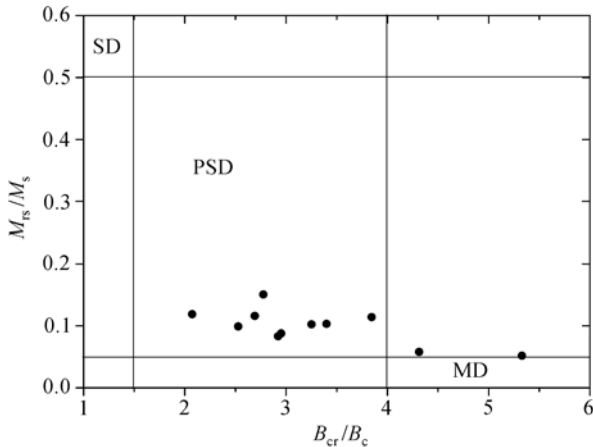


图 5 剩磁比与矫顽比之间的关系

### 3.2 兰州市街道尘埃磁学特征季节变化

根据磁参数及其比值随季节变化关系作图(图 6), 分别以 1%~99%, 25%~75%的概率作为季节变率下磁性参数分布范围, 由图 6 可知, 冬季和春季采集的街道尘埃样品的 $\chi_{lf}$ , SIRM与 $\chi_{ARM}$ 明显高于秋季所采集的街道尘埃样品的对应值, 其中冬季样品的值与春季相差不大. 这种现象可能与兰州市 11 月至 4 月期间供暖有关, 供暖期间, 燃煤量增加, 排放的废气量增加, 煤烟等含磁性的粉尘物质的释放也相应增加, 同时由于兰州市独特的河谷地貌, 冬季地面温度降低后容易在兰州市上空形成逆温层, 阻止空气对流, 不利于污染物扩散, 这与Chen和夏等人 [32,33]研究的结果相吻合. 因此工业和交通等活动中产生的磁性矿物更多的富集于街道尘埃中, 从而 2006 年 1 月及 3 月的街道尘埃样品中 $\chi_{lf}$ , SIRM与 $\chi_{ARM}$ 表现为高值. HIRM, SOFT及SOFT%随季节变化与 $\chi_{lf}$ , SIRM与 $\chi_{ARM}$ 存在相似性, 在供暖期(11 月至次年 4 月)其值略高于非供暖期, 表明在供暖期间, 有更多的硬磁性矿物和亚铁磁性矿物产生. 同时, 春季粉尘输入量增大也是导致春季磁性矿物含量升高的原因之一. 兰州市街道尘埃样品的HIRM值高于西北地区表土的HIRM的平均值 [34], 其中冬春季高于秋季, 而春季最高, 指示了在兰州特殊的气象和地形条件下, 冬季供暖和春季自然粉尘输入对硬磁性颗粒的贡献. SOFT值冬季高

于春季和秋季, 揭示了冬季人类活动对亚铁磁性矿物的贡献.

3 次采集的街道尘埃样品的 $\chi_{fd}\%$ 在 3 个季节内的变化并不明显, 表明超顺磁性矿物随季节的变化很小. 而 S-ratio,  $\chi_{ARM}/SIRM$ ,  $SIRM/\chi_{lf}$  及  $\chi_{ARM}/\chi_{lf}$  比值主要反映了磁性矿物的颗粒大小随季节的变化并不显著. 这可以用两种机制来解释. ( ) 兰州市区主要污染源释放的磁铁矿可以都处于大颗粒的 PSD/MD 范围, 因此, 磁性颗粒的粒径并不能够区分污染源. ( ) 兰州市区尘埃中磁性矿物来源相对比较单一. 要区分这两种机制, 需要进一步研究主要污染源的磁性特征, 这将是下一步的研究重点, 本文不深入涉及.

对不同季节的磁学参数分别做单元素方差分析, 结果显示, 秋冬春 3 个季节中 33 个重复样点中所采样品的磁学参数 $\chi_{lf}$ 的季节差异性显著( $F = 3.57261$ ,  $P = 0.03188$ ), 同时SOFT%的季节差异性也表现显著( $F = 4.40817$ ,  $P = 0.01474$ ), 其他各参数的季节性差异并不显著. 与Xie等人 [35]得到的结果相似. 这表明兰州市街道尘埃样品中亚铁磁性矿物含量随季节的变化而变化, 冬春季含量明显升高. 化石燃料(如煤)高温燃烧, 可以生成球形的磁性颗粒, 释放到环境中, 会造成大气飘尘、降尘和土壤中磁性明显增强. 许多研究 [15-18,30,35-37]揭示火电厂附近土壤、钢铁厂污水排放口附近的沉积物中, 磁性矿物含量明显升高. 煤中通常含有铁和硫化物, 导致排放烟尘中含有大量的铁和硫化物矿物 [30,38], 由此推断兰州市冬春季燃煤量增加, 释放至空气中的含硫物质及燃烧不充分释放的S和FeS等物质增多, 同时受到供暖、气象和地形条件等因素的影响, 导致兰州市街道尘埃中亚铁磁性矿物的增加.

通过上述分析可知, 兰州市街道尘埃样品磁性参数的变化受到人类活动, 即供暖、工业污染和交通等因素, 以及地形和气象条件的影响. 同时,  $\chi_{lf}$  和 SOFT%能更有效的指示尘埃污染物磁性矿物含量的季节差异.

### 3.3 兰州市街道尘埃磁学特征空间变化

兰州市的石油、化工工业主要分布在西固区; 城关区为兰州市的中心区, 除皋兰山、九州台、白塔山及徐家山等是市区绿化重点或游览地外, 其他地区主要是居民区和商业区分布地; 安宁区则以文化教育为主; 七里河区以石油化工、机械工业和文化教育为主.

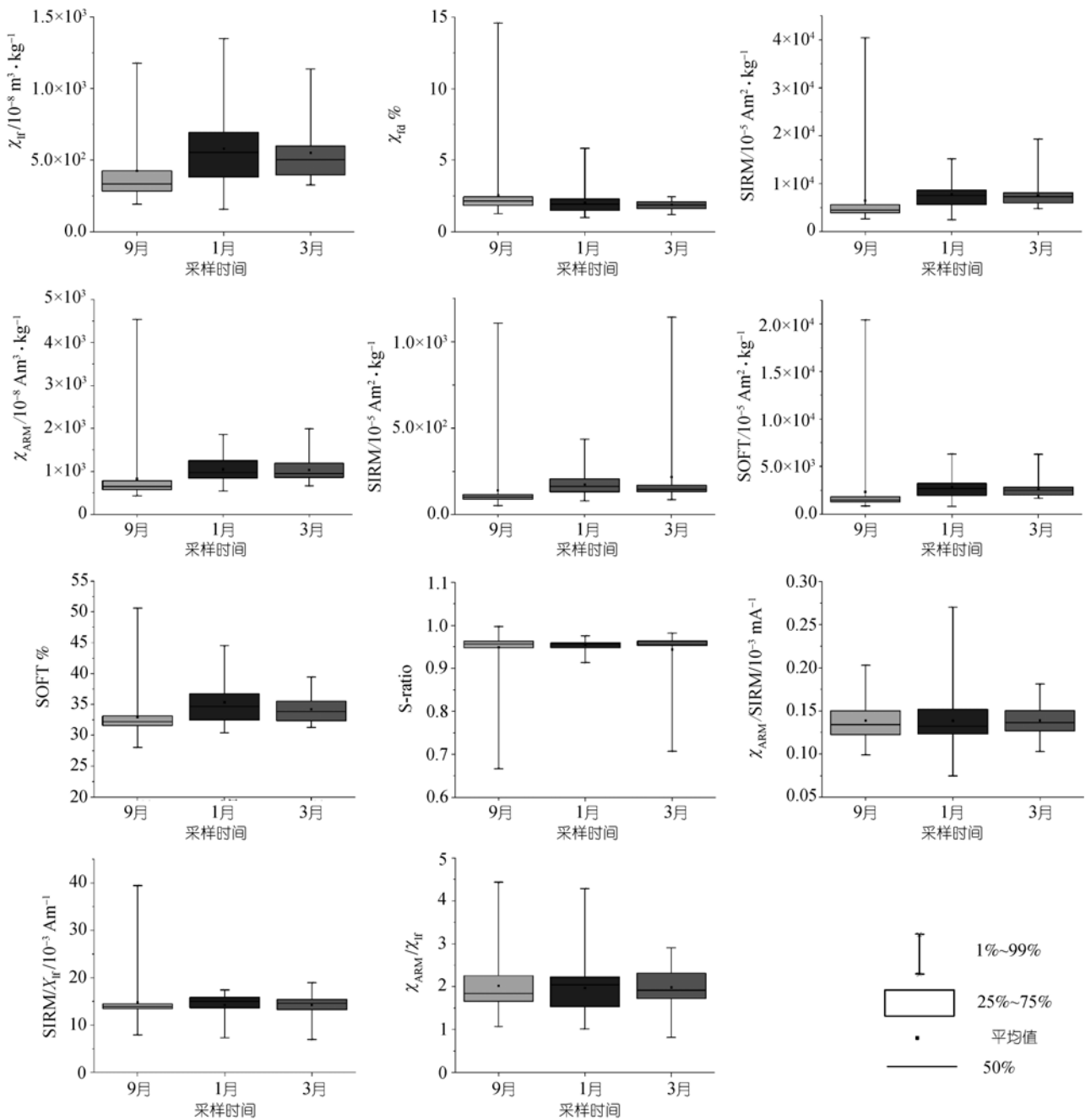


图6 磁参数及其比值随季节变化关系

如前所述,  $\chi_{ir}$ 指示样品中含铁矿物的总体贡献,且在季节分析中,  $\chi_{ir}$ 能够更有效的指示兰州市街道尘埃样品磁性特征的季节差异,结合相关分析,一些测量值的空间分析可以为判断来源提供有用的信息 [32].利用SURFER软件对兰州市街道尘埃样品的 $\chi_{ir}$ 值进行空间插值分析,图7为秋、冬、春3个季节兰州市街道尘埃样品 $\chi_{ir}$ 的等值线分布图以及冬春季与秋季

$\chi_{ir}$  差值的等值线分布图.兰州市街道尘埃样品的  $\chi_{ir}$ 整体相对较高,平均值为  $466.22 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,其中西固区和城关区总体呈现为  $\chi_{ir}$  高值.在城关区内,  $\chi_{ir}$  高值主要分布在兰东建材市场、兰州皮革厂等地,新港城、兰康皮鞋厂及徐家山等远离城区的几个采样点  $\chi_{ir}$  值相对较低,而安宁区、九州开发区及五一山等地为  $\chi_{ir}$  相对低值区.同时,车流量、人流量多的交通主

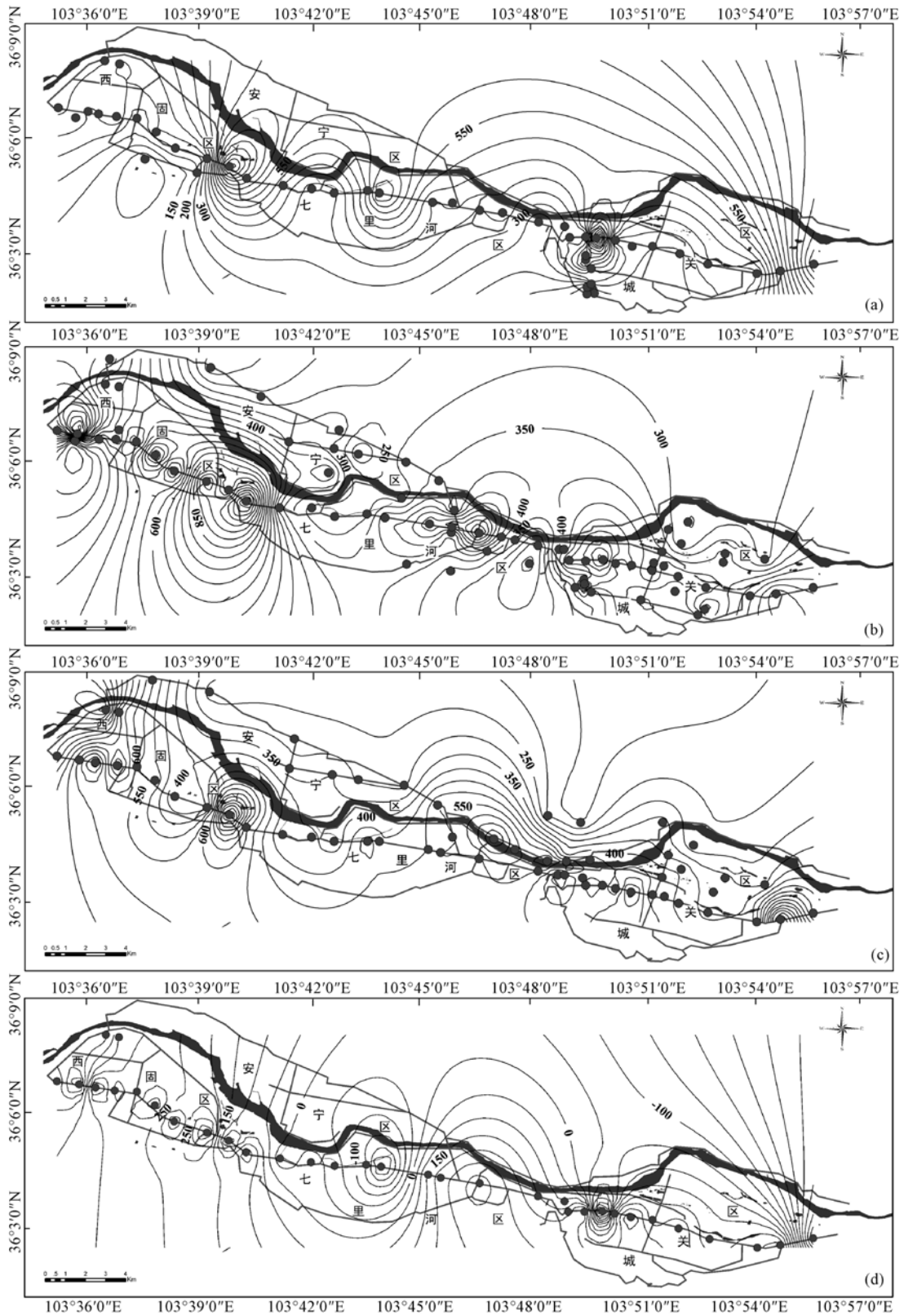


图7 兰州市街道尘埃  $\chi_{f_r}$  的空间变化

(a) 2005年9月; (b) 2006年1月; (c) 2006年3月; (d) 采暖期与非采暖期的磁性差



干道和街区集中的地方 $\chi_{if}$ 也相对较高。兰州市街道尘埃 $\chi_{if}$ 的空间分析结果显示,人口密集、人类活动强烈、工矿企业集中、交通拥挤的地区通常为磁化率高值分布区,与前人研究结果相一致 [16,20-22,38,39]。此外,兰州市街道尘埃样品冬春季(采暖期)与秋季(非采暖期)的磁性差的高值区集中分布在西固区与城关区,平均差值为  $139.73 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,最大值为  $638.14 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,由此可见供暖等人类活动对冬春季兰州市街道尘埃中磁性矿物含量的贡献很大,在空间存在显著变化。

兰州市街道尘埃样品磁化率的空间差异显示出人类活动对街道尘埃样品磁性特征的贡献,其中主要包括工业和交通的影响,受人为源影响较小的地区如安宁区、九州开发区、五一山、新港城、兰康皮鞋厂和徐家山等地, $\chi_{if}$ 值相对较低,其磁性矿物含量明显低于主要受控于工业和交通影响的样品的磁性矿物含量。这种街道尘埃样品的 $\chi_{if}$ 分布结果指示了兰州市街道尘埃样品中磁性颗粒物来自于自然和人类

活动两种物源,人类活动对街道降尘磁性参数有突出贡献,与前人的研究结果一致 [21]¹)。

#### 4 结论

通过对兰州市街道尘埃空间和季节变化的综合磁学研究,得出以下结论:

( ) 兰州市街道尘埃样品中磁性矿物含量总体较高,假单畴磁铁矿主导了样品的磁学性质。

( ) 兰州市街道尘埃中磁性矿物含量随区域变化明显,在工业区、密集街区以及交通要道等受人为因素影响较大的区域,其磁性矿物含量明显高于其他地区。

( ) 街道尘埃中磁性矿物含量季节变化特征显著,冬春季磁性矿物含量明显高于秋季,供暖和当地气象条件是造成这种差异的主要因素; $\chi_{if}$ 和SOFT%能够更有效的指示尘埃污染物磁性矿物含量的季节差异,为城市街道尘埃污染状况的监测和评估提供了有效、快速和经济手段。

致谢 华东师范大学提供了磁学实验室的便利条件;俞立中、张卫国老师与作者进行过有益的讨论;魏海涛、肖舜和尚华明等在样品采集过程中给予了很大的帮助,作者在此深表谢意。

#### 参考文献

- Day J P, Hart M, Robinson M S. Lead in urban street dust. *Nature*, 1975, 253: 243—245
- Xie S J, Dearing J A, Bloemendal J, et al. Association between the organic matter content and magnetic properties in street dust, Liverpool, UK. *Sci Total Envir*, 1999, 241(1-3): 205—214[doi]
- Ferreira-Baptista L, Miguel E D. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: A tropical urban environment. *Atmos Environ*, 2005, 39(25): 4501—4512[doi]
- Maxwell C M, Nelson D W. Development of Lead Emission Factor for Re-entrained Dust from Paved Roadways. The 71st Annual Meeting of the Air Pollution Control Association. Houston, 1978. 25—30
- Vermette S J, Irvine K N, Drake J J. Temporal variability of the elemental composition in urban street dust. *Environ Monit Assess*, 1991, 18: 69—77
- Miguel E D, Llamas J F, Chacón E, et al. Origin and patterns of distribution of trace elements in street dust: Unleaded petrol and urban lead. *Atmos Environ*, 1997, 31(17): 2733—2740[doi]
- Nagerotte S M, Day J P. Lead concentrations and isotope ratios in street dust determined by electrothermal atomic absorption spectrometry and inductively coupled plasma mass spectrometry. *Analyst*, 1998, 123: 59—62[doi]
- Manno E, Varrica D, Dongarrà G. Metal distribution in road dust samples collected in an urban area close to a petrochemical plant at Gela, Sicily. *Atmos Environ*, 2006, 40(30): 5929—5941[doi]
- Al-Khashman O A. Heavy metal distribution in dust, street dust and soils from the work place in Karak Industrial Estate, Jordan. *Atmos Environ*, 2004, 38(39): 6803—6812[doi]
- Anagnostopoulou M A, Day J P. Lead concentrations and isotope ratios in street dust in major cities in Greece in relation to the use of lead in petrol. *Sci Total Envir*, 2006, 367(2-3): 791—799[doi]

1) 王冠, 夏敦胜, 陈发虎, 等. 兰州市街道尘埃的元素空间变化特征分析. 干旱区资源与环境(出版中)

- 11 Faruque A, Hiroaki I. Trace metal concentrations in street dusts of Dhaka city, Bangladesh. *Atmos Environ*, 2006, 40(21): 3835—3844[[doi](#)]
- 12 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(20): 3651—3659[[doi](#)]
- 13 Michio M, Fumiyuki N, Hiroaki F, Size and density-distributions and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban road dust. *Chemosphere*, 2005, 61 (6): 783—791[[doi](#)]
- 14 Thompson R, Oldfield F. *Environmental Magnetism*. London: Allen and Unwin, 1986
- 15 Shu J, Dearing J A, Morse A P, et al. Determining the source of atmospheric particles in Shanghai, China, from magnetic geochemical properties. *Atmos Environ*, 2001, 35: 2615—2625[[doi](#)]
- 16 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
- 17 白世强, 卢升高, 单红丹. 环境物质磁性对重金属污染的指示作用研究进展. *土壤通报*, 2005, 36(5): 773—777
- 18 张卫国, 俞立中, Hutchinson S M. 长江口南岸边滩沉积物重金属污染记录的磁诊断方法. *海洋与湖沼*, 2000, 31(6): 616—623
- 19 Charlesworth S M, Lees J A. The use of mineral magnetic measurements in polluted urban lakes and deposited dusts, Coventry, UK. *Phys Chem Earth*, 1997, 22: 203—206[[doi](#)]
- 20 Hoffmann V, Knab M, Appel E. Magnetic susceptibility mapping of roadside pollution. *J Geoch Explor*, 1999, 66: 313—326[[doi](#)]
- 21 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
- 22 夏敦胜, 余晔, 马剑英, 等. 兰州市街道尘埃磁学特征及其环境意义. *环境科学*, 2007, 28(5): 937—944
- 23 Lees J A. Mineral magnetic properties of mixtures of environmental and synthetic materials: linear additivity and interaction effects. *Geophys J Int*, 1997, 131: 335—346[[doi](#)]
- 24 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
- 25 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[[doi](#)]
- 26 Maher B A. Magnetic properties of some synthetic submicron magnetites. *J Geophys*, 1988, 94: 83—96
- 27 Oldfield F. Toward the discrimination of fine-grained ferrimagnets by magnetic measurements in lake and near-shore marine sediments. *J Geophys Res(B)*, 1994, 99: 9045—9050[[doi](#)]
- 28 Dearing J A, Dann R J L, Hay K, et al. Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials. *Geophys J Int*, 1996, 124: 228—240[[doi](#)]
- 29 Evans M E, Heller F. *Environmental Magnetism-Principles and Applications of Environmagnetics*. New York: Academic Press, 2003
- 30 琚宜太, 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
- 31 Day R, Fuller M, Schmidt V A. Hysteresis properties of titanomagnetites: grain size and compositional dependence. *Phys Earth Planet Int*, 1977, 13: 260—267[[doi](#)]
- 32 Chen F H, Yang L P, Wang J M, et al. Study on atmospheric particulate pollution of Lanzhou using magnetic measurements. *J Environ Sci-China*. 1999, 11(3): 373—377
- 33 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: 地球科学*, 2007, 37(8): 1073—1080
- 34 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. *第四纪研究*, 2006, 26(6): 937—946
- 35 Xie S, Dearing J A, Boyle J, et al. Association between magnetic properties and element concentrations of Liverpool street dust and its implications. *J Appl Geophys*, 2001, 48: 83—92[[doi](#)]
- 36 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
- 37 Durza O, Heavy metals contamination and magnetic susceptibility in soils around metallurgical plant. *Phys Chem Earth-Part A: Solid Earth Geodesy*, 1999, 24: 541—543[[doi](#)]
- 38 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. *地球科学——中国地质大学学报*, 2003, (6): 701
- 39 姜月华, 殷鸿福, 王润华, 等. 湖州市土壤磁化率与重金属元素分布规律及其相关性研究. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2005, 35(5): 653—660, 666