

武汉市道路尘埃污染中磁学指标与重金属含量对比

郭高山^{1,2},李永涛^{3*} (1.中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029; 2.中国科学院大学,北京 100049; 3.中国地质大学地球物理与空间信息学院,湖北 武汉 430074)

摘要: 对武汉市不同功能区的道路尘埃进行环境磁学和化学分析的综合研究.结果显示:尘埃中的磁性矿物含量在空间分布上具有较大的差异,平均磁化率为工业区($7.36 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$)>交通沿线($5.38 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$)>商业区($3.76 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$)>开发区($2.26 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$)和风景区($2.48 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$).工业活动和交通因素是造成区域尘埃中磁性矿物含量升高的主要原因,地理位置和人口密度对尘埃中磁性矿物的含量也有一定的影响.岩石磁学研究结果表明:尘埃中的磁性载体以亚铁磁性矿物为主,部分样品中含有不完整反铁磁性矿物.扫描电镜和能谱分析显示:人类活动产生的磁性颗粒(铁的氧化物和铁的硅铝酸盐)一般呈球形,自然成土过程中形成的不规则状磁性颗粒(磁赤铁矿).污染负荷指数与磁化率($R^2=0.870$)、饱和等温剩磁($R^2=0.665$)等表征磁性矿物含量的参数呈显著正相关.因此,尘埃的磁学参数可以作为重金属含量的参考指标.

关键词: 环境磁学; 重金属分析; 环境污染; 街道尘埃; 武汉市

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2017)03-0868-10

Comparative of magnetism parameters and heavy metals content of street dust pollution- in Wuhan. GUO Gao-shan^{1,2}, LI Yong-tao^{3*} (1.Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 10029, China; 2.University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China). *China Environmental Science*, 2017,37(3): 868~877

Abstract: A systematic study of street dust in Wuhan city, china, was carried out using combined environmental magnetism and geochemistry techniques. Magnetic measurement showed that magnetic minerals of street dust have distinct differences in spatial distribution pattern and overall values of magnetic susceptibility in the following sequence: industrial area ($\chi=7.36 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$)> traffic route($\chi=5.38 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$)> business district($\chi=3.76 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$)> development($\chi=2.26 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$) and scenic areas($\chi=2.48 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}$). The results indicated that the content of magnetic minerals in the street dust mainly attributed to the industrial production and transportation factors, while the distribution of population density also had definite influence on the content of magnetic minerals. Rock magnetic measurements demonstrated that dominant magnetic components were ferrimagnetic minerals, as well as antiferromagnetic minerals. SEM/EDX analysis revealed that there were some spherical Fe-containing particles from anthropogenic activity, which was different from pedogenic ferromagnetic minerals in nature soil. The PLI showed significant correlation with the mean value of χ ($R^2=0.870$) and SIRM ($R^2=0.665$), which meant magnetism parameters of street dust could be seen as an indicator of heavy metals pollution.

Key words: environmental magnetism; heavy metal analysis; environmental pollution; street dust; Wuhan

街道是居民日常生活的主要活动区域,工业生产、机动车排放、化石能源燃烧产生大量重金属污染物,经过吸附和沉降作用积累在尘埃中,通过呼吸、皮肤接触等方式危害人体健康^[1].国内外学者就街道尘埃中污染物化学元素浓度和来源解析等方面开展了广泛研究,取得了很多值得借鉴的成果^[2-4].环境磁学方法以其快速、灵敏度高、不易损坏样品等特点,是化学方法之外极具

潜力的污染研究方法^[5-10].现有的成果侧重于污染物空间分布及来源分析,磁学和化学分析的对比研究则相对薄弱.

目前我国对街道尘埃污染磁学性质的研究

收稿日期: 2016-08-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572153);湖北省科技支撑计划资助项目(2015BCE077)

* 责任作者, 教授, ytli@cug.edu.cn

集中在北京^[11]、西安^[12-13]、兰州^[14]等城市。武汉市是华中地区乃至全国大气污染防治重点城市,根据《2015年武汉市环境状况公报》全年空气污染日为 173d,其中有 113d 细颗粒物(PM_{2.5})为首要污染物。道路尘埃在自然和人类活动作用下,以悬浮颗粒物的形式进入大气,成为大气颗粒物的重要来源^[15]。正确认识尘埃污染中重金属元素含量与磁学指标的关系,是应用磁学开展污染研究的关键^[16]。本文以武汉市为研究区域,针对

不同功能区的道路尘埃进行磁学和化学性质研究,同时借助多元统计方法,研究磁学参数和重金属元素含量的关系及其环境意义,结合磁性矿物形貌特征和化学分析结果,区分土壤中磁性矿物来源,为物源分析和污染历史研究提供科学的理论证据。

1 实验材料与方法

1.1 样品采集

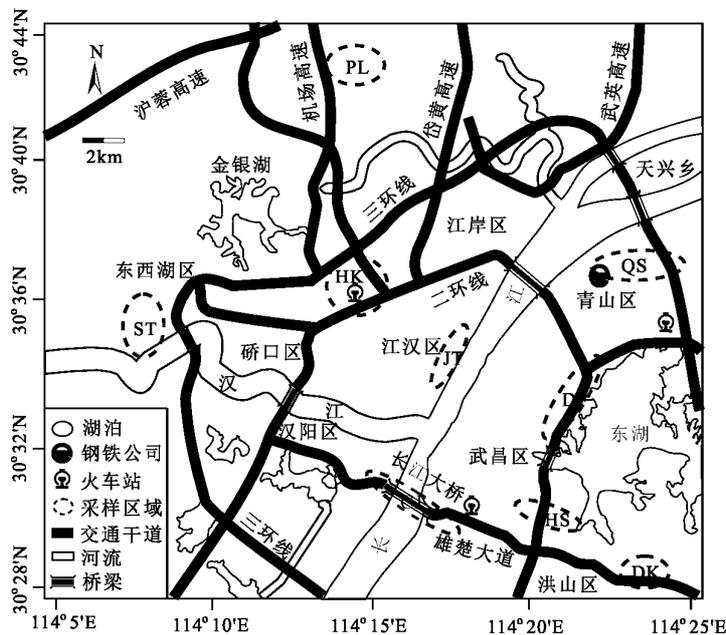


图1 武汉市道路尘埃采样点示意

Fig.1 Map showing the sampling sites in Wuhan city

本次研究选取盘龙城开发区(PL)、汉口火车站(HK)、江滩公园(JT)、四台工业区(ST)、长江大桥(CJ)、青山工业区(QS)、洪山商贸区(HS)、东湖风景区(DF)和东湖开发区(DK),共计 9 个采样区域(图 1)。采样区覆盖交通密集区、人口密集区、工业区、风景区和开发区等不同环境,反映了武汉市的整体情况,具有良好的对比性和代表性。样品采集在 2015 年 7 月天气连续良好的情况下完成。期间保证每个样品尽可能的分布于各个功能区的主要路段,采集点距约 200m,每个采样点的采集面积覆盖周围 1~2m²,共采集街道尘埃样品 211 个。采样的过程中使用塑料刷和畚箕收

集非机动车道的道路尘埃,随后密封装入聚乙烯塑料袋,并编号和记录采样点周围交通状况和建筑布局等环境特征。

1.2 实验方法

所有样品自然风干,用 1mm 尼龙筛剔除杂物,装入底面直径 2.5cm、高 2.2cm 的圆柱体无磁样品盒并压实密封。样品质量磁化和热磁曲线测量使用 AGICO 公司生产的 KLY-3S 型卡帕桥和 1‰ 电子天平;低频(0.47kHz)和低频磁化率(4.7kHz)测量使用 Bartington 公司生产的 MS2B 频率磁化率仪。以上工作在中国地质大学(武汉)岩石磁学实验室完成。磁滞回线在中国科学院地

质与地球物理研究所古地磁与年代学实验室完成.重金属含量分析在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质重点实验室使用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)完成. SEM/EDX分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,采用荷兰 FEI 公司生产的 Quanta200 环境扫描电子显微镜.

2 结果与讨论

2.1 道路尘埃磁学性质

2.1.1 磁性矿物含量与类型 质量磁化率(χ)和饱和等温剩磁(SIRM)指示了磁性矿物粗略浓度^[17].由表 1 可见,各功能区 χ 均值位于(2.26~7.36) $\times 10^{-6} \text{m}^3/\text{kg}$,总体样品均值 $4.10 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{kg}$,图 2(a)表明, χ 在长江大桥、青山工业区偏大,盘龙城开发区和江滩公园偏低,汉口火车站和四台工业区出现较大波动. SIRM 变化规律与 χ 基本相同,变化范围 (1474~4661) $\times 10^{-5} \text{A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$,平均值 $2502 \times 10^{-5} \text{A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$.综合来看,尘埃中磁性矿物含量在空间分布上具有较大差异,呈现出工业区>交通沿线>商业区>开发区和风景区的分布特征,这与卢升高^[18]在地表土壤磁性的研究结果基本一致,说明了尘埃和地表土壤之间存在转换作用.

硬剩磁(HIRM)能够指示高矫顽力的不完整反铁磁性矿物含量^[17].表 1 可见,各功能区 HIRM 均值位于(141~481) $\times 10^{-5} \text{A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$,总体样品均值为 $304.8 \times 10^{-5} \text{A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$.图 2(d)可见,青山工业区、

长江大桥和东湖风景区 HIRM 偏高,说明在该部分地区不完整反铁磁性矿物含量偏高.软剩磁(SOFT)指示了低矫顽力的亚铁磁性矿物含量,能够灵敏反映假单畴(PSD)和多畴颗粒(MD)^[19].各功能区样品 SOFT 均值位于(612~1775) $\times 10^{-5} \text{A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$,总体样品均值为 $968.2 \times 10^{-5} \text{A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$.SOFT 总体变化趋势与 χ 、SIRM 变化趋势相同,在江滩、东湖风景区和盘龙城开发区出现低值(图 2(e)),指示了该地区尘埃中亚铁磁性矿物尤其是 MD 和 PSD 含量较少.尘埃样品的 SIRM 和 χ 相关系数为 0.5095(图 3),说明剩磁载体并非主导 χ 的唯一因素,存在多相磁性矿物影响;SIRM 与 SOFT 显著相关($R^2=0.9214$)(图 4),线性拟合曲线通过原点,说明亚铁磁性矿物含量较高, χ 受亚铁磁性物质含量影响较大^[20].

2.1.2 磁性矿物粒度 频率磁化率(χ_{fd})与样品中磁性矿物粒度大小有关,主要反映超顺磁(SP)与单畴(SD)过渡态磁性颗粒含量^[12].由表 1 可见,总体样品 χ_{fd} 变幅在 0.21%~4.11%,平均值 1.26%,各功能区 χ_{fd} 均值位于 1.00%~1.87%.根据 Dearing 提出的模型^[18]可知,样品中磁性矿物以粗颗粒为主,四台工业区、盘龙城和江滩公园存在极少量 SP 颗粒.此外,根据 SIRM/ χ 可以粗略估计大于几十纳米的磁性颗粒的粒度,当磁性颗粒大于 SP/SD 边界值时, SIRM/ χ 随着颗粒度的增大而减小^[21].图 2(f)中数值波动幅度较大,反映了道路尘埃中磁性矿物粗细不均,大小不一.

表 1 武汉市道路尘埃环境磁学参数统计

Table 1 Environment magnetism parameters of street dust in Wuhan city

采样区	样品数	$\chi(10^{-6} \text{m}^3/\text{kg})$		$\chi_{fd}(\%)$		SIRM($10^{-5} \text{A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$)		HIRM($10^{-5} \text{A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$)		SOFT($10^{-5} \text{A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$)	
		范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
盘龙城开发区(PL)	22	0.86~5.39	2.26	0.31~3.23	1.25	393~3441	1826	24~466	186	169~1227	612
汉口火车站(HK)	28	1.72~14.73	4.11	0.25~2.62	1.22	449~6983	2997	34~1108	309	136~2122	1027
江滩公园(JT)	13	1.38~3.84	2.48	0.27~4.11	1.54	241~3496	1474	8~421	139	76~1325	603
四台工业区(ST)	18	1.87~19.32	4.04	0.41~3.72	1.87	955~8085	2212	82~850	307	108~3312	863
长江大桥(CJ)	21	2.10~9.11	5.38	0.21~2.34	1.16	2289~7060	4661	107~1000	415	606~2784	1775
青山工业区(QS)	27	3.78~13.33	7.36	0.41~4.58	1.09	2665~6883	4497	37~828	418	75~2890	1730
洪山商贸区(HS)	30	2.22~8.13	3.76	0.60~1.84	1.10	201~6086	1540	4~481	141	140~2842	762
东湖风景区(DF)	21	1.38~10.36	3.83	0.43~2.09	1.00	505~4062	1757	51~1494	347	8~2008	638
东湖开发区(DK)	25	1.33~5.13	3.66	0.48~3.42	1.12	27~4827	1555	3~2092	481	24~2475	704

注:青山工业区、洪山商贸区、东湖风景区、东湖开发区数据引自文献[17].

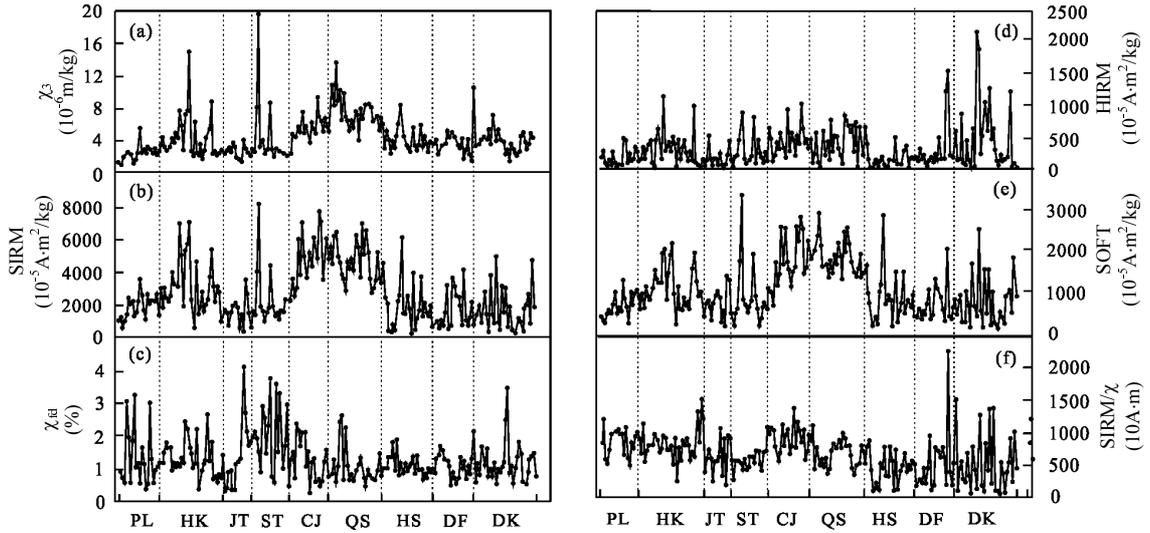


图 2 武汉市道路尘埃样品磁性参数分布

Fig.2 Distribution of magnetic properties of street dust in Wuhan city

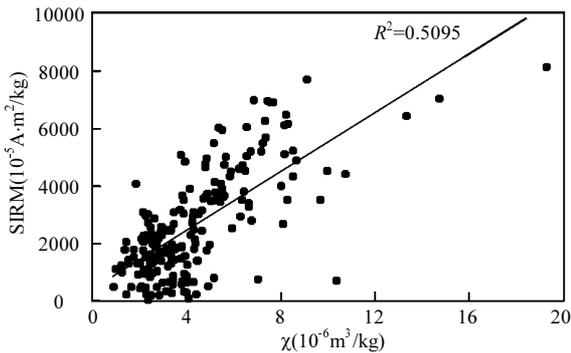


图 3 尘埃样品的 SIRM 与 χ 关系

Fig.3 Correlation between SIRM and χ in street dust samples

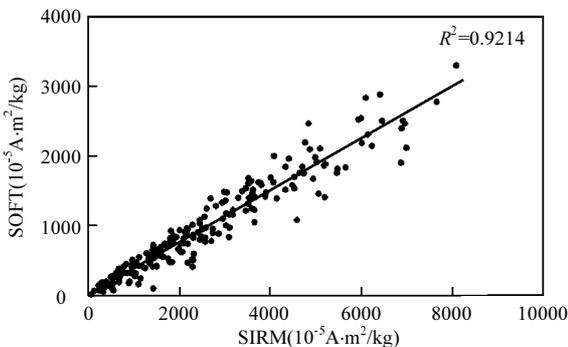


图 4 尘埃样品的 SOFT 与 SIRM 关系

Fig.4 Correlation between SOFT and SIRM in street dust samples

2.2 道路尘埃热磁和磁滞特征

2.2.1 热磁曲线 图 5 为典型样品热磁曲线,不同样品表现出相似特征.从室温开始磁化率缓慢上升,280℃处出现微弱、宽缓的峰值,在 500~520℃时达到急剧、陡峭的峰值,600℃附近大幅度降低,达到磁铁矿的居里温度^[22],超过 600℃时仍有少许降低,推测样品中含有少量的赤铁矿^[23].加热曲线与冷却曲线不具有可逆性且加热曲线位于冷却曲线之下,说明加热过程中生成新的磁性矿物^[22].

此外,不同样品中磁铁矿含量有较大差异,CJ-9、QS-9 中外源磁性颗粒输入极大增强了磁信号.JT-9 热磁曲线(图 5(c))在室温到 550℃无显著变化,表明没有磁性矿物形成,550℃左右出现最大值,但峰值较小,可能是样品中不同磁畴状态磁性矿物产生的 Hopkinson 效应^[24],同时也表明了江滩公园尘埃中亚铁磁性矿物含量较少.其他样品加热曲线在 280℃出现较小峰值,其中 PL-5、QS-9、DF-17 较为明显,可能是由于加热过程中铁的氢氧化物向磁赤铁矿转变^[25],随后的加热过程中,磁化率出现暂时性降低,可能是磁赤铁矿受热转化成赤铁矿,导致稳定性增强和磁性减弱^[26].PL-5、HK-6、CJ-9、QS-9、DF-17 在 550℃左右出现比较明显尖峰,可能是 Hopkinson 效应以及新生成的大量磁铁矿造成的^[26-27].

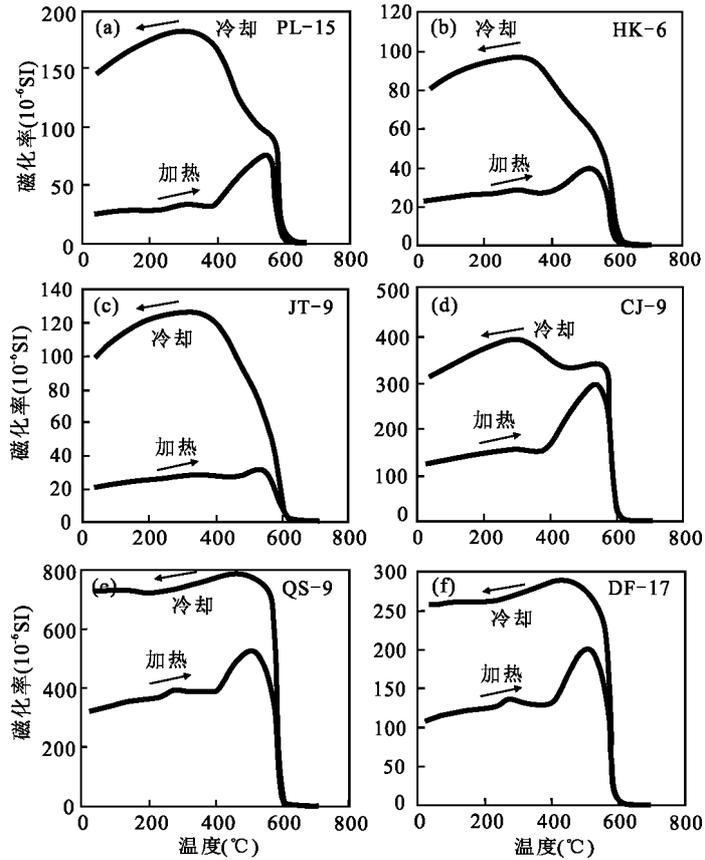
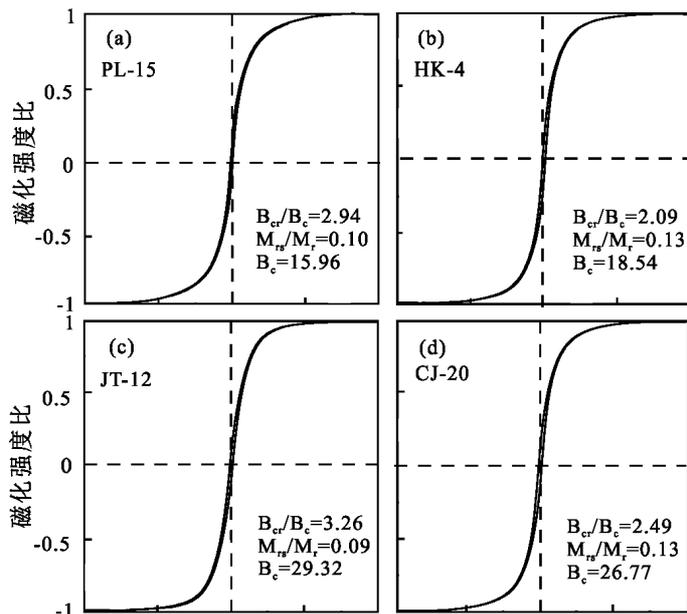


图5 典型尘埃样品的 κ -T 曲线

Fig.5 κ -T curve of typical street dust samples



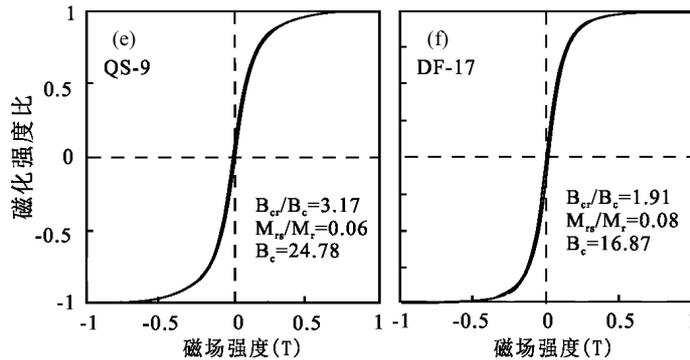


图 6 典型尘埃样品的磁滞回线

Fig.6 Magnetic hysteresis loops of typical street dust samples

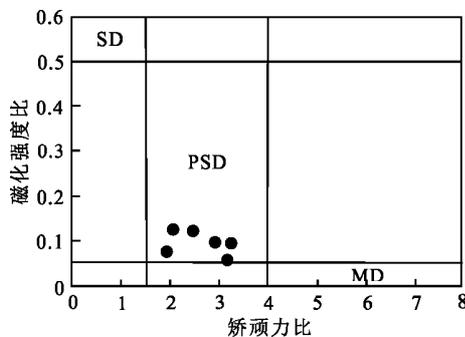


图 7 典型尘埃样品的 Day 氏图

Fig.7 Hysteresis ratio plotter on a Day diagram of typical street dust samples

2.2.2 磁滞特征 从图 6 可以看到,不同样品在外磁场强度 250mT 左右时形成闭合磁滞回线,剩磁矫顽力(B_{cr})在 15~30mT 之间,表明低矫顽力的亚铁磁性矿物主导磁滞行为.磁场强度大于 300mT 时,曲线闭合且随着磁场强度增加磁化强度仍有所增加,表明样品中含有少量高矫顽力磁性矿物.磁化强度(M_{rs}/M_s)比和矫顽力比(B_{cr}/B_c)可以用来指示磁性矿物颗粒的大小^[28].图 7 可以看出尘埃样品中磁性颗粒落在 PSD 范围内,与西安^[13]、北京^[11]、兰州^[14]等北方城市相比,武汉市尘埃中磁性颗粒偏细.

2.3 道路尘埃化学性质分析

2.3.1 尘埃重金属含量及其污染指数 为了合理评价尘埃中重金属污染水平,计算了样品的 Tomlinson 污染指数(PLI)^[29].该指数能够反映尽可能多的重金属成分对整体评价结果的

影响.表 2 为 12 个代表性道路尘埃样品中共 9 种重金属元素含量统计结果.不同采样区道路尘埃重金属含量存在较大差异,说明利用 PLI 指数对样品污染水平进行评价相对于单个元素含量作为指标更为合理.从污染程度来看,长江大桥和青山工业区污染最为严重,汉口火车站污染指数也偏高,盘龙城开发区、东湖风景区和江滩公园污染系数较低,这与磁性分析结果也较为吻合.

2.3.2 尘埃磁性矿物扫描电镜和能谱分析 选取典型样品进行扫描电镜和能谱分析.如图 8(a)和(b)所示,工业区样品中出现较多具有金属光泽的颗粒,除了普通的不规则形状外,还出现了许多球状颗粒,表面爆裂,直径 40~50 μm ,这是典型的化石燃料高温煅烧过程中形成的结构^[18],总体上该样品中含铁颗粒以铁的简单氧化物为主要形态^[30],并有少量 Fe_2O_3 (表 3).长江大桥样品中磁性颗粒也较多,同样存在着不规则形状和球状颗粒(图 8(c)和(d)),数量比工业区样品中少,并且交通因素产生的磁性颗粒中含有少量 Si、Al、Ca 元素,推测其为含铝硅的铁氧化物,铁的含量相对较低(表 3).江滩公园尘埃样品中磁性颗粒较少,外形上表现为不规则(图 8(e)和(f)),成分上仍以 Fe 和 O 为主,且与磁赤铁矿(Fe_2O_3)成分(Fe-69.94wt %和 O-30.06wt %)相当^[31],含有少量的 SiO_2 (表 3),推测是由长江沉积物在水流的冲击下残留在岸边的碎屑磁性矿物.

表2 尘埃样品中重金属含量统计结果(mg/kg)
Table 2 Summary of heavy metals in street dust samples (mg/kg)

样品号	Fe	Mn	Cr	Ni	Cu	Zn	Pb	Co	Ti	PLI
PL-11	10563	858	57.35	9.63	17.43	103	37.62	8.85	3372	1.61
PL-14	14567	678	84.64	12.35	190.5	91	31.83	8.09	2609	2.13
HK-7	12713	746	79.52	17.54	56.84	329	56.51	5.85	2593	2.26
HK-9	15260	982	98.66	17.70	56.21	372	81.20	10.11	3258	2.80
JT-9	10780	918	83.85	23.49	24.75	92	30.94	16.19	5477	2.13
JT-12	11615	895	78.40	24.52	70.71	130	45.90	15.11	5748	2.60
CJ-5	16335	1055	134.90	16.64	223.90	237	52.38	21.50	2667	3.29
CJ-14	14567	864	109.70	16.26	65.28	390	64.23	9.37	2742	2.67
QS-7	43600	1197	108.00	39.10	120.00	298	84.30	8.72	3160	3.71
QS-11	30908	1053	88.10	20.00	64.90	225	80.70	7.61	3688	2.89
DF-9	23672	499	65.30	17.90	85.60	293	34.00	6.97	2912	2.29
DF-17	14322	602	23.60	6.67	16.8	48	17.00	4.62	2856	1.07

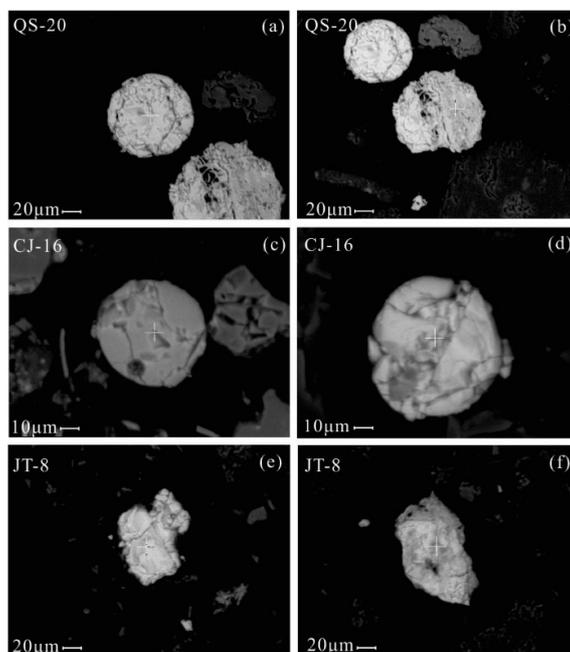


图8 典型样品中磁性颗粒的扫描电镜图像

Fig.8 Scanning electron microscopy (SEM) images of magnetic particles from typical street dust samples

表3 典型样品磁性颗粒能谱分析结果(wt%)

Table 3 Energy-dispersive X-ray (EDX) spectra of magnetic particles from typical street dust samples

颗粒	Fe	O	W	S	Cr	Al	Si	Ca	Pb	Pt
(a)	77.95	20.75	1.30	-	-	-	-	-	-	-
(b)	70.93	25.80	-	0.44	2.83	-	-	-	-	-
(e)	57.05	32.26	-	-	-	1.89	5.94	2.86	-	-
(d)	46.06	35.56	-	-	-	2.56	9.79	6.06	-	-
(e)	67.69	23.34	-	-	-	-	1.06	0.80	6.17	0.94
(f)	66.65	31.56	-	1.25	-	-	-	0.54	-	-

注:-表示磁性颗粒物中此元素含量为0.

3 道路尘埃的磁学特征和重金属含量特征的响应及环境意义

3.1 道路尘埃磁学特征和重金属含量环境污染响应

如表 4 所示,PLI 指数与 χ 、SIRM、SOFT 和 HIRM 都具有显著正相关,而与 $SIRM/\chi$ 、 χ_{fd} 的相关系数远未达到显著水平,这表明了尘埃中重金属含量与磁性矿物含量存在很强的正相关而与磁性矿物粒度无明显关系.不同的金属元素与磁性参数相关性表现为:Fe、Mn、Ni 含量与 χ 显著正相关;Cr、Pb 含量与 χ 、SIRM、SOFT 显著正相关;Zn 含量与 SIRM、SOFT 显著正相关.不同的是 Ni、Ti 与 χ_{fd} 显著正相关,且在江滩公园样品中含量较高(表 2),推测其来源于河流沉积物中的细磁性颗粒. Fe 来源较多,自然土壤,化石燃料燃烧,汽车机体腐蚀等.Zn 元素主要来自于汽车零件和轮胎磨损、汽车润滑油和工业排放^[23],表 2 中汉口火车站、长江大桥样品中 Zn 含量是其他采样区 2~3 倍,这与其拥挤的交通相关,青山工业区 Zn 含量偏高则由于工业排放;Cr 主要来自于金属腐蚀和机动车排放^[23],同样在交通区和工业区含量较高.对比不同的磁学参数, χ 与重金属含量相关性高于其他参数(表 4),同时可以发现 PLI 指数与表征磁性矿物含量参数的相关性普遍大于单个元素,这表明了利用磁参数对重金属整体含量进行评价更加可信.

表 4 尘埃磁性参数与重金属含量的 Pearson 相关系数

Table 4 Pearson's correlation matrix for the heavy metals concentration and magnetic parameters

参数	χ	χ_{fd}	SIRM	HIRM	SOFT	$SIRM/\chi$
Fe	0.848**	0.169	0.350	0.488	0.372	-0.206
Mn	0.723**	0.424	0.534	0.502	0.528	0.005
Cr	0.617*	0.230	0.721**	0.620*	0.699*	0.271
Ni	0.733**	0.672*	0.137	0.32	0.157	-0.504
Cu	0.389	-0.005	0.465	0.412	0.454	0.22
Zn	0.541	-0.110	0.637*	0.552	0.609*	0.400
Pb	0.826**	0.019	0.675*	0.616*	0.636*	0.192
Co	0.058	0.561	0.232	0.169	0.212	0.012
Ti	-0.194	0.598*	-0.481	-0.372	-0.490	-0.667*
PLI	0.870**	0.333	0.665*	0.662*	0.643*	0.004

注:**在 0.01 水平(双侧)上显著相关;*在 0.05 水平(双侧)上显著相关.

3.2 道路尘埃磁学参数、重金属含量和微观结构特征的环境意义

武汉市不同功能区道路尘埃样品在磁性参数、重金属含量和微观结构上显示出较大的差异,表明城市不同功能区域受工业和人类活动影响程度不同.江滩公园生态环境良好,远离工业区且车辆禁止通行,样品中磁性矿物含量最低,粒径也较细,其重金属含量和微观结构都显示其受污染可能性较小.同样作为风景区的东湖,尘埃的磁性矿物含量偏高,主要因为位于青山工业区下风向,重工业排放的燃煤飞灰和工业粉尘造成了磁性增强,李海侠^[32]在东湖不同方位的尘埃磁性研究中也证明了风向等气候因素的影响,此外,车辆行驶也是东湖风景区尘埃磁性矿物增多的原因之一.青山热电厂和武汉钢铁厂等重工业坐落于青山区,因此该地区样品中携带了更多粗粒磁性矿物且具有典型燃煤飞灰的特征.四台作为新兴工业区,重、轻工业都有涉及,相对于重工业为主的青山工业区,其磁性参数显示出较大的波动性,磁性矿物分布的含量也较低.长江大桥尘埃由于交通污染导致了样品中磁参数异常和重金属含量增加,并且产生了含铝硅的铁氧化物相球状颗粒.长江大桥和青山工业区分别作为典型工业污染和交通污染区域,长江大桥和青山工业区的尘埃在磁性特征上亦有不同,长江大桥样品 $SIRM/\chi(8864A/m)$ 和 $\chi_{fd}(1.16\%)$ 高于青山工业区 ($6110A/m$ 和 1.09%),说明交通污染产生的磁性颗粒粒径略小于工业污染,这与杨涛在磨山、龟山道路尘埃研究中得到的结果较为一致^[19].汉口火车站和洪山商贸区作为典型人流密集区,样品的磁性都略高于江滩公园,但洪山商贸区毗邻武汉大学等高校,区域内以服装、服务业为主要经济产业,因此磁性矿物的含量低于汉口火车站.汉口火车站尘埃样品的 $SIRM/\chi(7292A/m)$ 和 $\chi_{fd}(1.22\%)$ 与长江大桥相似,这与汉口火车站交通繁忙,大量公共和私人交通工具停靠无不相关,有研究认为,在一些红灯区和停车场,车辆反复启动和关闭,加剧了车辆轮胎磨损和尾气排放,导致尘埃中某些重金属元素富集^[33],重金属分析结果也佐证了该观点(表 2).盘龙城开发区和东湖开发区

为武汉市近年来大力发展的新技术产业区,总体上两处采样区尘埃磁性参数都较小,盘龙城开发区磁性矿物含量则与江滩公园接近,重金属分析结果(表2)显示二者的PLI指数差异也较小,东湖开发区磁性矿物含量则略高,有关研究显示道路尘埃的磁性强度与城市人口呈正相关,城市人口增加会加剧环境污染程度从而造成尘埃磁性增强^[34].盘龙城开发区远离中心城市,2013年常住人口30万.东湖开发区2012年常住人口190.6万,人口规模远大于盘龙城开发区,并且东湖开发区位于光谷商业圈附近,交通条件殊为便利,尘埃样品显示出的HIRM高值则可能与交通因素有关^[11].

不同城市间的对比可以发现,武汉市城区道路尘埃磁化率变化范围 $(0.86\sim 19.32)\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{kg}$,平均值 $4.22\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{kg}$,总体上低于工业同样发达的西部城市西安^[13] $((2.35\sim 10.26)\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{kg}$,平均值为 $5.30\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{kg}$),主要由于武汉生态资源丰富,不受沙尘天气影响,水域广阔,能够容纳更多的尘埃.同处中部的城市娄底^[23]道路尘埃磁化率 $((1.09\sim 130.67)\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{kg}$,平均值 $8.80\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{kg}$)为武汉市的2倍之高,这与武汉市地处长江两岸,地势平坦,雨量丰富,近年来大力发展高新技术产业,减少重工业有关,另外娄底采样区围绕钢铁厂布设,武汉采样范围兼顾各种功能区.江滩公园尘埃磁化率 $(1.38\sim 3.84)\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{kg}$,平均值 $2.48\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{kg}$ 与福州公园灰尘^[35] $(0.43\sim 8.96)\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{kg}$,平均值 $2.70\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{kg}$ 总体相当,反映了公园生态环境中磁性矿物含量较为稳定.

4 结论

4.1 武汉市道路尘埃的磁性特征存在显著差异,不同功能区尘埃平均磁化率为工业区 $(7.36\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{kg})>$ 交通沿线 $(5.38\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{kg})>$ 商业区 $(3.76\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{kg})>$ 开发区 $(2.26\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{kg})$ 和风景区 $(2.48\times 10^{-6}\text{m}^3/\text{kg})$.工业生产和交通因素是造成尘埃中磁性矿物含量升高的主要原因,人口密度和自然条件也有一定影响.

4.2 SEM/EDX分析直观的揭示了尘埃中磁性颗粒粒度和化学成分的信息.人为因素产生的磁

性颗粒(铁的氧化物和铁的硅铝酸盐)一般呈球形且粒径较大,不同于自然成土过程中形成的不规则状磁性颗粒(磁赤铁矿).

4.3 磁性参数 χ 与污染指数PLI的相关性最高($R^2=0.870$),表明了应用磁学检测尘埃污染的科学性.武汉市尘埃污染的主要来源是工业和交通因素.工业污染对周围环境的影响与地理条件有关,交通污染呈点源分布于不同的路段,因此局部污染问题较为突出,科学合理规划工业布局和优化道路交通结构应该是今后工作过程中的发力点.

参考文献:

- [1] 王利军,卢新卫,雷凯.宝鸡市街尘重金属元素含量及其环境风险分析[J].土壤通报,2012,43(1):200-205.
- [2] Adachi K, Tainosho Y. Single particle characterization of size-fractionated road sediments[J]. Applied Geochemistry, 2005, 20(5):849-859.
- [3] Chen X, Xia X, Zhao Y, et al. Heavy metal concentrations in roadside soils and correlation with urban traffic in Beijing, China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010,181(1-3):640-646.
- [4] Sutherland R A, Tolosa C A. Multi-element analysis of road-deposited sediment in an urban drainage basin, Honolulu, Hawaii[J]. Environmental pollution, 2000,110(3):483-495.
- [5] Goddu S R, Appel E, Jordanova D, et al. Magnetic properties of road dust from Visakhapatnam (India)—relationship to industrial pollution and road traffic[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2004,29(13/14):985-995.
- [6] Shi M, Wu H, Zhang S, et al. Weekly cycle of magnetic characteristics of the daily $\text{PM}_{2.5}$ and $\text{PM}_{2.5-10}$ in Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2014,98(12):357-367.
- [7] Xia D S, Chen F H, Bloemendal J, et al. Magnetic properties of urban dustfall in Lanzhou, China, and its environmental implications[J]. Atmospheric Environment, 2008,42(9):2198-2207.
- [8] 胡守云,王苏民,Appel E,等.呼伦湖湖沉积物磁化率变化的环境磁学机制[J].中国科学(D辑:地球科学),1998,28(4):334-339.
- [9] 许淑婧,夏敦胜,春喜,等.呼和浩特市大气降尘磁学特征及其环境意义[J].中国环境科学,2014,34(4):1004-1011.
- [10] 闫倩,戴霜,刘海娇,等.兰州某钢厂附近土壤磁化率特征及其环境意义[J].中国环境科学,2011,31(10):1732-1737.
- [11] 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[J].科学通报,2007,52(20):2399-2406.
- [12] 李鹏,强小科,唐艳荣,等.西安市街道灰尘磁化率特征及其污

- 染指示意义 [J]. 中国环境科学, 2010,30(3):309-314.
- [13] 李 鹏, 强小科, 徐新文, 等. 西安市道路灰尘磁学特征及其对环境的响应 [J]. 地球物理学报, 2010,53(1):156-163.
- [14] 王 冠. 兰州市街道尘埃磁性特征研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2008.
- [15] 李法云, 巴晓博, 廖 磊, 等. 城市街道灰尘与大气细颗粒物 (PM_{2.5}) 元素组成特征分析 [J]. 气象与环境学报, 2015,31(5): 93-98.
- [16] 沈明洁, 胡守云, U. Blaha, 等. 北京东郊 722 土壤垂向剖面重金属污染的磁学响应及其统计意义 [J]. 地球科学, 2006,31(3): 399-404.
- [17] 李永涛, 顾延生, 曲 赞, 等. 武昌地区街道尘埃磁学特征及其对环境污染的指示意义 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(2):499-506+13.
- [18] 卢升高, 白世强. 杭州城区土壤的磁性及磁性矿物学及其环境意义 [J]. 地球物理学报, 2008,51(3):762-769.
- [19] Yang T, Liu Q, Zeng Q, et al. Relationship between magnetic properties and heavy metals of urban soils with different soil types and environmental settings: implications for magnetic mapping [J]. Environmental Earth Sciences, 2012,66(2):409-420.
- [20] 李永涛, 曲 赞. 武汉东湖(官桥湖)沉积剖面的垂向磁性特征及其对环境污染的响应 [J]. 地质科技情报, 2014,33(6):226-232.
- [21] 李永涛, 顾延生, 曲 赞. 武汉天兴洲近代沉积物的磁性特征及其环境意义 [J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2011,36(4): 779-788.
- [22] 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 [J]. 地球物理学报, 2004,47(2):282-288.
- [23] Zhang C, Qiao Q, Appel E, et al. Discriminating sources of anthropogenic heavy metals in urban street dusts using magnetic and chemical methods [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012,119-120(6):60-75.
- [24] Radhakrishnamurty C, Likhite S D. Hopkinson effect, blocking temperature and Curie point in basalts [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1970,7(5):389-396.
- [25] 丰 华, 刘秀铭, 吕 斌, 等. 兰州市大气降尘磁学特征及其环境意义 [J]. 地理学报, 2012,67(1):36-44.
- [26] 乔庆庆, 张春霞, 李 静, 等. 北京市朝阳区大气降尘磁学特征及对空气污染物浓度的指示 [J]. 地球物理学报, 2011,54(1):151-162.
- [27] 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 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(4):37-46+66.
- [28] 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(4):260-267.
- [29] Angulo E. The Tomlinson Pollution Load Index applied to heavy metal, 'Mussel-Watch' data: a useful index to assess coastal pollution [J]. Science of The Total Environment, 1996,187(1): 19-56.
- [30] 赵永椿, 张军营, 魏 凤, 等. 燃煤飞灰中磁珠的显微结构特征观察 [J]. 电子显微学报, 2005,24(5):474-478.
- [31] 杨 涛. 武汉市东湖地区城市化过程环境磁学响应研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2008.
- [32] 李海侠. 武汉市东湖周边道路尘埃的磁性结构特征及其环境意义 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2003.
- [33] Li X, Poon C-s, Liu P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong [J]. Applied Geochemistry, 2001,16(11/12):1361-1368.
- [34] Jordanova D, Jordanova N, Petrov P. Magnetic susceptibility of road deposited sediments at a national scale—relation to population size and urban pollution [J]. Environmental pollution, 2014,189(12):239-251.
- [35] 郭利成, 陈秀玲, 贾丽敏. 福州市公园灰尘磁学特征及其环境意义 [J]. 中国环境科学, 2013,33(5):775-785.
- 致谢:** 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院刘双副教授提供了扫描电镜测试的部分经费; 中国科学院地球环境研究所强小科研究员, 中国科学院地质与地球物理研究所刘青松研究员为样品的测试提供了极大的方便; 中国地质大学(武汉)地球科学学院夏彬博士在扫描电镜结果的分析上提供了专业的帮助, 作者在此对以上人士深表谢意. 同时感谢两位匿名专家的为本文提出的建设性的意见.
- 作者简介:** 郭高山(1993-), 男, 山西临汾人, 中国科学院地质与地球物理研究所硕士研究生, 研究方向为固体地球物理学.