

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第3期

Vol.38 No.3

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国人为源挥发性有机物反应性排放清单 梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 石田立, 孙西勃, 范丽雅, 叶代启 (845)

上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征 高爽, 张坤, 高松, 修光利, 程娜, 潘研 (855)

京津冀地区主要排放源减排对 PM_{2.5} 污染改善贡献评估 吴文景, 常兴, 邢佳, 王书肖, 郝吉明 (867)

北京冬季 PM_{2.5} 中金属元素浓度特征和来源分析 乔宝文, 刘子锐, 胡波, 刘景云, 逢妮妮, 吴方堃, 徐仲均, 王跃思 (876)

2015 年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析 路娜, 李治国, 周静博, 赵鑫, 杨丽丽, 冯媛, 靳伟 (884)

利用 SPAMS 研究南宁市四季细颗粒物的化学成分及污染源 刘慧琳, 陈志明, 毛敬英, 梁桂云, 黄炯丽, 李宏姣, 杨俊超, 莫招育 (894)

南半球海洋大气气溶胶单颗粒的理化特性分析 迟建伟, 李传金, 孙俊英, 张剑, 王辉, 王瀚韬, 李卫军 (903)

喷泉产生的细菌气溶胶空间分布特性 张崇森, 袁琳, 许鹏程, 刘可欣 (911)

生物滴滤塔净化含硫混合废气 叶杰旭, 缪孝平, 诸葛蕾, 赵翔宇, 江宁馨, 章晶晓, 陈东之, 陈建孟 (918)

西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析 房妮, 张俊辉, 王瑾, 姜珊, 夏敦胜 (924)

城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力 秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 张瑞钢 (936)

三峡库区小江支流沉积物硝化反硝化速率在蓄水期和泄水期的特征 王静, 刘洪杰, 雷禹, 徐晶, 宋立岩, 李勇 (946)

隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素 赵登忠, 谭德宝, 李翀, 申邵洪 (954)

白洋淀多环芳烃与有机氯农药季节性污染特征及来源分析 王乙震, 张俊, 周绪申, 孔凡青, 徐铭霞 (964)

唐山陡河水库沉积物汞的分布、来源及污染评价 吴婷婷, 王明猛, 陈旭锋, 刘文利, 李太山, 闫海鱼, 何天容, 李仲根 (979)

三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征 邓晗, 张翔, 张成, 王永敏, 王定勇 (987)

电镀厂周边地表水中重金属分布特征及健康风险评估 余葱葱, 赵委托, 高小峰, 程胜高, 黄庭, 尹伊梦, 赵珍丽 (993)

九龙江表层沉积物重金属赋存形态及生态风险 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 韩璐 (1002)

厦门筲箕湖表层沉积物金属元素赋存形态及污染评价 杨秋丽, 于瑞莲, 胡恭任, 林承奇, 韩璐 (1010)

龙口市污水灌溉区农田重金属来源、空间分布及污染评价 李春芳, 王菲, 曹文涛, 潘健, 吕建树, 吴泉源 (1018)

碳化稻壳-铁锰氧化菌耦合净化严寒村镇高铁锰地下水效能与机制 孙楠, 谌燕丽, 张颖, 鲁岩, 宋秋霞, 李春艳, 姜昭 (1028)

高藻水臭氧预氧化过程有机物转化及消毒副产物生成势 张赛, 胡学斌, 古励, 李莉, 郭显强 (1038)

预处理对短流程超滤工艺不可逆膜污染影响的中试试验 杨海燕, 邢加建, 王灿, 孙国胜, 赵焱, 梁恒, 徐叶琴, 李圭白 (1046)

Cu-Al₂O₃ 中骨架铜类芬顿催化去除水中有机污染物 徐丹, 张丽丽, 柳丽芬 (1054)

过硫酸钾氧化去除 Cu(CN)₂ 中的氰污染物 王云飞, 李一兵, 王彦斌, 齐璠静, 赵凯, 田世超, 郭涛, 关伟, 赵旭 (1061)

微生物燃料电池强化去除农药 2,4-二氯苯氧乙酸及同步产电性能 全向春, 全燕苹, 肖竹天 (1067)

桉树遗态结构 HAP/C 复合材料对水中 Cu(II) 的吸附特征 李超, 朱宗强, 曹爽, 朱义年, 谭笑, 丁慧 (1074)

基于 A²/O 处理工艺的生活污水的成组生物毒性评价 张秋亚, 马晓妍, 王晓昌, 游猛 (1084)

污水氮浓度对粉绿狐尾藻去氮能力的影响 马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭碧玲, 孙学成, 吴金水 (1093)

全海水盐度抑制下厌氧氨氧化工艺的恢复特性 齐泮晴, 于德爽, 李津, 管勇杰, 魏思佳 (1102)

饥饿对硫自养反硝化反应器生物群落结构的影响 李芳芳, 施春红, 李海波, 袁蓉芳, 马方曜 (1109)

快速启动厌氧氨氧化工艺 闫刚, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, 程朝阳 (1116)

一种 CANON 工艺处理低氨氮废水的新模式 完颜德卿, 袁怡, 李祥, 毕贞 (1122)

侧流磷回收对低溶解氧 EBPR 系统性能的影响 马娟, 宋璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟 (1130)

厌氧氨氧化污泥群体感应信号分子检测及影响研究 陈舒涵, 李安婕, 王越兴, 吴玲娟 (1137)

有机负荷对醋糟厌氧消化系统启动的影响 戴晓虎, 于春晓, 李宁, 董滨, 戴翎翎 (1144)

过氧化钙预处理对活性污泥脱水性能的影响机制 白润英, 陈湛, 张伟军, 王东升 (1151)

不同工况蚯蚓人工湿地表层污泥处理效果 董梦珂, 李怀正, 徐一啸 (1159)

全氟辛酸对大肠杆菌的氧化胁迫和膜损伤 杨蒙, 李伟, 叶锦韶, 龙焰, 秦华明 (1167)

纳米银在环境水样和实验介质中的理化性质和毒性效应 衣俊, 程金平 (1173)

血吸虫病疫区鱼体器官中氯苯化合物的污染特征 李昆, 赵高峰, 周怀东, 张盼伟, 刘巧娜, 赵晓辉, 李东佼, 任敏, 赵丹丹 (1182)

纳米沸石对大白菜生长、抗氧化酶活性及镉形态、含量的影响 秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟苏琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (1189)

利用 *in vitro* 方法研究不同铁矿对土壤砷生物可给性的影响 钟松雄, 尹光彩, 黄润林, 何宏飞, 陈志良, 林亲铁, 王文科 (1201)

不锈钢电极对重金属污染土壤的强化电动修复及电极腐蚀结晶现象与机制 温东东, 付融冰, 张卫, 顾莹莹 (1209)

施用无害化污泥影响土壤碳库组分和碳库管理指数的演变 刘晓, 黄林, 郭康莉, 张雪凌, 杨俊诚, 姜慧敏, 张建峰 (1218)

施氮和水分管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究 王婷婷, 祝贞科, 朱捍华, 汤珍珠, 庞静, 李宝珍, 苏以荣, 葛体达, 吴金水 (1227)

模拟酸雨对次生林土壤呼吸及异养呼吸的影响 陈书涛, 孙鹭, 桑琳, 胡正华 (1235)

土壤硝化和反硝化微生物群落及活性对大气 CO₂ 浓度和温度升高的响应 刘远, 王光利, 李恋卿, 潘根兴 (1245)

岩性对喀斯特灌丛土壤固氮菌与丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (1253)

板栗产区有机堆肥产物磷形态特征及其对叶片磷含量的影响 宋影, 郭素娟, 张丽, 孙慧娟, 谢明明, 武燕奇, 王静 (1262)

酸性物质对猪粪秸秆堆肥过程中氮素转化的影响 姜继超, 尧倩 (1272)

《环境科学》征稿简则(1092) 《环境科学》征订启事(1158) 信息(1166,1261,1271)

西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析

房妮¹, 张俊辉^{1*}, 王瑾¹, 姜珊¹, 夏敦胜²

(1. 宝鸡文理学院陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 宝鸡 721016; 2. 兰州大学西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 为了解西安城市不同功能区的环境现状, 通过采集西安城市不同功能区街道灰尘的样品, 进行系统的环境磁学实验分析并结合扫描电子显微镜研究表明, 街道灰尘中磁性矿物含量相对较高, 多畴和假单畴的低矫顽力软磁性矿物为主要的载磁矿物, 还含有赤铁矿等高矫顽力的硬磁性矿物。磁化率、饱和等温剩磁、低矫顽力软磁性矿物和非磁滞剩磁磁化率与饱和等温剩磁比值等磁性参数揭示出街道灰尘的磁学特征在西安城市不同功能区的差异以及污染的主要来源, 根据污染程度划分为重度污染区、中度污染区和轻度污染区并对应西安市 7 个城市功能区: 浐灞生态区(F 区)为重度污染区, 磁性物质含量较高, 表明环境污染相对较重, 污染的主要来源为“工业+交通”; 高新技术产业开发区(A 区)和中心商务区(B 区)磁性物质含量相对较高, 粗颗粒物物质相对较少, 是中度污染的区域, 其污染源分别为“工业”和“交通”; 经济技术开发区(C 区)、科教商业区(D 区)、科教文化产业区(E 区)和教育科技产业区(G 区)城市主要功能具有相似性, 是轻度污染的区域, 污染源主要为“交通”。

关键词: 街道灰尘; 磁学特性; 环境污染; 功能区; 西安市

中图分类号: X169; X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)03-0924-12 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201604074

Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City

FANG Ni¹, ZHANG Jun-hui^{1*}, WANG Jin¹, JIANG Shan¹, XIA Dun-sheng²

(1. Shaanxi Key Laboratory of Disasters Monitoring & Mechanism simulation, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721016, China; 2. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Urban environmental pollution can be revealed by the magnetic characteristics of street dust. Environmental magnetic measurements were carried out for the 151 samples of street dust collected in different functional zones of Xi'an city. Magnetic susceptibility varied within the range between $169.5 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ and $977.48 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, and the χ_{lf} average value was $415.66 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, which was 10 times higher than that of the background value. Isothermal remanent magnetization varied within the range between $2005.31 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ and $10897.64 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, and the SIRM average value was $5105.99 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$. The average value of frequency-dependent magnetic susceptibility was 1.30, which was extremely low. The SIRM curve was consistent with χ_{lf} curve. The results indicated a high concentration of magnetic minerals in street dust. The magnetic minerals were mainly low-coercivity ferrimagnetic (magnetite and maghemite) and anti-ferromagnetic minerals (hematite), which contributed to the magnetic susceptibility. The main domains of magnetic minerals were composed of multiple domain (MD) and pseudo-single domain (PSD) ferrimagnetic minerals demonstrating the pollution of environment. According to the spatial distribution of magnetic properties of street dust and the different functional zones of Xi'an city, seven districts (A, B, C, D, E, F and G areas) were divided, which were summarized as three pollution types: heavily polluted, moderately polluted and lightly polluted. In the ecological district of Baqiao (F area) which was heavily polluted, χ_{lf} , SIRM and soft values were all the highest in the seven areas, and the main pollution sources were industry and vehicle emission. χ_{lf} , SIRM and soft values were slightly higher in the high-tech industrial district (A area) and the central business and commerce district (B area), which was moderately polluted by industry and vehicle emission. However, the magnetic parameters were relatively low in the functional zones of education, tourism and culture (C, D, E and G area), demonstrating that these areas were only slightly polluted by vehicle emission.

Key words: street dust; magnetic properties; environmental pollution; functional zones; Xi'an City

城市街道灰尘是指分散于城市不同区域的表面固体颗粒物, 灰尘粒径相对较粗, 或粗粒级占有较大的比例, 其中累积了大量重金属、危害性无机元素以及有机物多环芳烃等多种污染物, 在城市环境中发生迁移与转化, 是城市环境污染的“源”和“汇”, 不仅影响环境质量, 而且危害人类健康, 因此, 街道

灰尘造成的城市生态环境污染不可忽视, 目前, 街道灰尘沉积物作为重要的研究对象在城市环境污染研

收稿日期: 2016-04-09; 修订日期: 2016-10-11

作者简介: 房妮(1980~), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向环境污染与修复, E-mail: lvluo1118@126.com

* 通信作者, E-mail: bwlzjh@126.com

究中广泛开展^[1-3]。城市街道灰尘目前的研究主要侧重运用地球化学元素和有机物的方法来判别重金属和多环芳烃的含量、分布特征、赋存形态、来源、毒性、迁移循环及环境效应等方面取得了较多的研究成果和进展^[4-16]。街道灰尘物中磁性物质的表面吸附的重金属主要是由于环境污染导致的,重金属造成的污染程度与磁性物质的磁学特性密切相关,因此,为运用环境磁学方法进行街道灰尘的环境污染状况研究奠定了良好的基础^[17-21]。传统的化学研究方法一般对样品的破坏较大,且分析周期较长,花费较大;与其相比较,环境磁学的方法则更简单、经济、快速、对样品量需求少以及对样品无破坏性等诸多优势,因此,矿物的磁性研究已经为监测环境污染和进行环境评估等提供了一种便捷经济和有效的方法^[22-27]。运用磁化率对西安路边土壤和街道灰尘做过一些相关的研究^[28],但是研究所用的磁学参数相对单一,而且没有系统的磁学参数测量以及反映街道灰尘的磁学特征,且研究的区域范围相对较小,且磁化率及其它磁学参数随时间在城市不同功能区的空间变化以及污染程度,值得做进一步更为深入地研究。

西安市地处关中平原中部,是陕西省最大的工业城市,其电力、热力、电子信息和石油化工等工业的生产具备了一定的规模和实力,能源结构仍然是煤炭占主导地位。尤其近年来,西安的工业、商业、交通、建筑以及城市发展速度非常迅速,面临

的环境问题也越来越多,更加严峻,因此对其环境研究既具有现实意义又具有科学价值。本文以西安城市不同功能区街道灰尘为研究对象,系统分析了西安市街道灰尘中磁性物质的含量、种类以及颗粒大小等特征,分析了西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征分布特征和规律,揭示不同功能区街道灰尘磁学参数反映的污染空间变化,进一步分析探讨西安城市不同功能区环境污染的主要来源、环境污染的现状与污染程度,以期为改善和治理西安城市环境提供理论指导和科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品收集与处理

在西安城市不同功能区街道均匀选择样品采集点,在选定的采样点,为防止细颗粒粉尘飘扬,影响实验结果,因此,采样时须用毛刷轻轻地将街道灰尘刷入塑料簸箕中,装入样品袋密封,标注好采样日期与采样点周围环境,采样结束后运回实验室。样品收集时间为 2015 年 8 月 15 ~ 17 日和 2016 年 7 月 20 ~ 21 日,分别在一段晴朗天气之后进行,总共收集样品 151 个(图 1)。将采集的样品过 1 mm 的尼龙筛,植物根系、碎屑和砾石类等物质被剔除。在西安市长安区南部采集 5 个黄土(S₀)样品作为背景参照样品与街道灰尘磁学参数进行对比。

1.2 实验方法

用 Bartington 公司生产的磁化率仪分别测定低

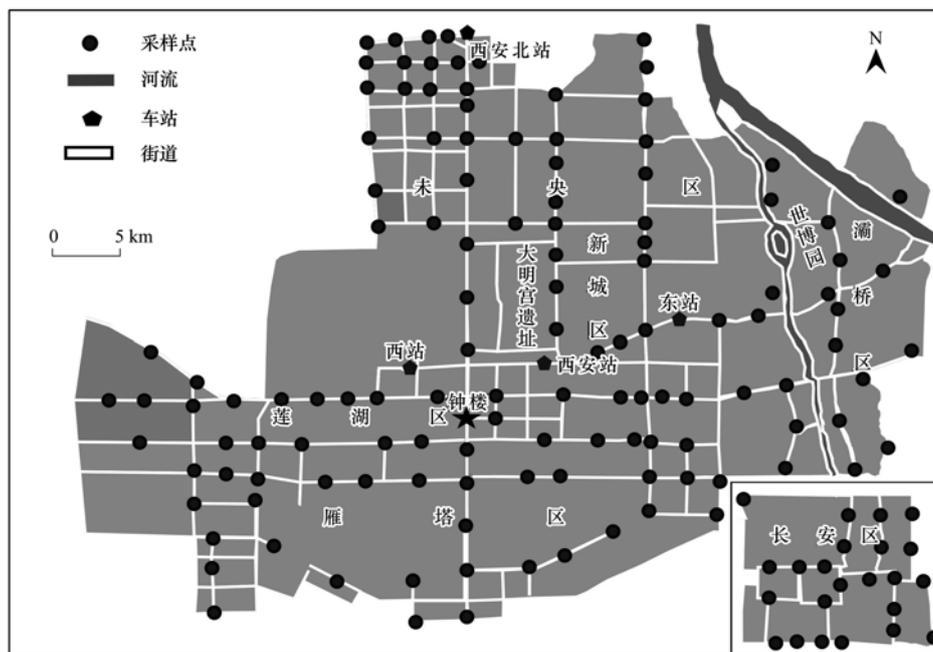


图 1 西安城市不同功能区街道灰尘采样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites for street dust in different functional zones of Xi'an City

频(频率为 470 Hz)质量磁化率(χ_{lf})和低频(频率为 4 700 Hz)质量磁化率(χ_{hf}),计算出频率磁化率,公式为: $\chi_{fd} = (\chi_{lf} - \chi_{hf})/\chi_{lf} \times 100$. 非磁滞剩磁(ARM)的测量使用交变退磁仪和 Minispin 旋转磁力仪测量,并计算非磁滞剩磁磁化率(χ_{ARM}). 等温剩磁(IRM)用 ASCIM-10-30 脉冲磁化仪和 JR-6A 双速自动旋转磁力仪测量,饱和等温剩磁(SIRM)是指外加磁场磁感应强度为 1 000 mT 时所获得的等温剩磁,并测量需要的反向磁场的 IRM,根据 IRM 和 SIRM 等计算出“软”剩磁、“硬”剩磁和 S-ratio,公式分别为: $soft = (SIRM - IRM_{-20\text{ mT}})/2$; $HIRM = (SIRM + IRM_{-300\text{ mT}})/2$; $S\text{-ratio} = -IRM_{-300\text{ mT}}/SIRM$. 磁滞参数的测量使用美国 Lakeshore 公司生产的 MicroMag3902 型变梯度磁力仪,比如:矫顽力(B_c)、剩磁矫顽力(B_{cr})、饱和磁化强度(M_s)、饱和剩余磁化强度(M_{rs})以及 FORC 曲线等. 磁性矿物的外观形态特征用扫描电子显微镜(SEM)观察. 以上实验分别在中国科学院地球环境研究所、兰州大学西部环境教育部重点实验室和宝鸡文理学院陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室测试完成.

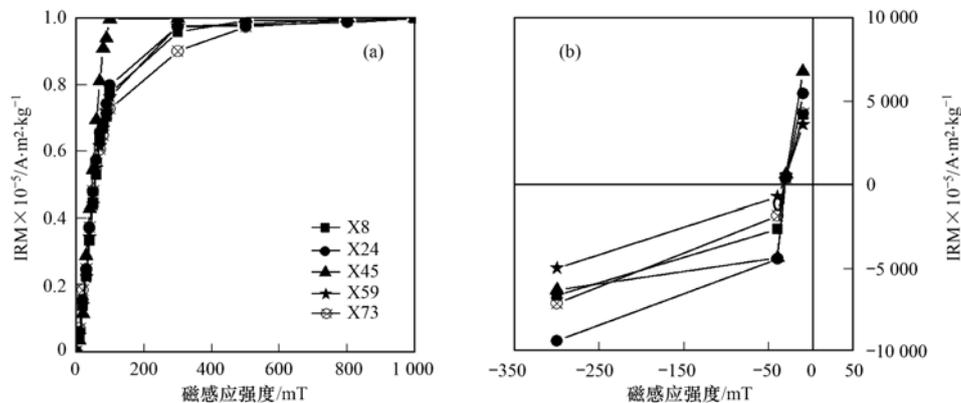


图 2 典型样品的 IRM 变化曲线和 B_{cr} 变化曲线

Fig. 2 IRM and B_{cr} curves for representative samples

样品中的低场磁学性质控制者为低矫顽力的磁性矿物,如磁铁矿和磁赤铁矿^[30].

2.1.2 磁滞回线(magnetic hysteresis loop)

磁滞回线可以用来表示在各种磁场变化下,内部磁学性质随之发生的变化,磁性矿物成分不同的物质,磁滞特征大不相同,磁滞回线有细腰型、粗腰型和直线型等特点^[31,32]. 图 3 显示,代表性样品的磁化强度在外加磁场小于 300 mT 之前快速的增强,随后增强的速率减小,磁滞回线表现出明显的细腰变化特征,表明软磁性矿物是样品的主要载磁矿物.

2 结果与分析

2.1 磁学实验结果

2.1.1 IRM 曲线和 B_{cr} 曲线

IRM 曲线和 B_{cr} 曲线是识别磁性矿物种类的重要参数,IRM 不受顺磁性和抗磁性物质的影响,随着外加磁场强度的不断增大,一些剩磁矿物很容易饱和或者在较低的磁场范围内就可以饱和,这主要由亚铁磁性和不完整反铁磁性等“软磁”矿物所贡献,在 0.3T 以上或者更高的范围都难以饱和的磁性矿物,这主要是由赤铁矿等“硬磁”性矿物所贡献^[29,30]. 在外加磁场小于 100 mT 时,西安城市街道灰尘样品的 IRM 值随着外加磁场的增强不断增大,当外加磁场达到 100 mT 时,IRM 值可达 SIRM 值的 80% 左右,当外加磁场达到 300 mT 时,IRM 值可达 SIRM 值的 90% 以上,在 1T 时样品基本达到 SIRM [图 2(a)],即近似饱和状态,表明磁铁矿、磁赤铁矿等软磁性矿物是样品剩磁的主要载体^[30],但同时可能含有赤铁矿等硬磁性矿物. 代表性样品反向磁场退磁结果表明, B_{cr} 分别为: 24.07、28.16、31.25、30.31 和 31.28 mT [图 2(b)],均小于 35 mT,表明

西安城市不同功能区街道灰尘样品的 M_s (饱和磁化强度) 值分别为 1.18×10^{-4} 、 6.44×10^{-4} 、 4.38×10^{-4} 和 $2.17 \times 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, M_{rs}/M_s 的比值分别为 0.23、0.11、0.13 和 0.05, B_c 值分别为 6.32、8.18、8.69 和 5.70 mT, B_{cr}/B_c 值分别为 3.81、3.44、3.59 和 5.32 (图 3).

2.1.3 FORC 图

FORC (first-order reversal curve) 图能很好地鉴别磁性矿物和判别其磁畴状态及颗粒间的相互作用,可以区分磁畴间无相互作用的 SD 颗粒、磁畴间

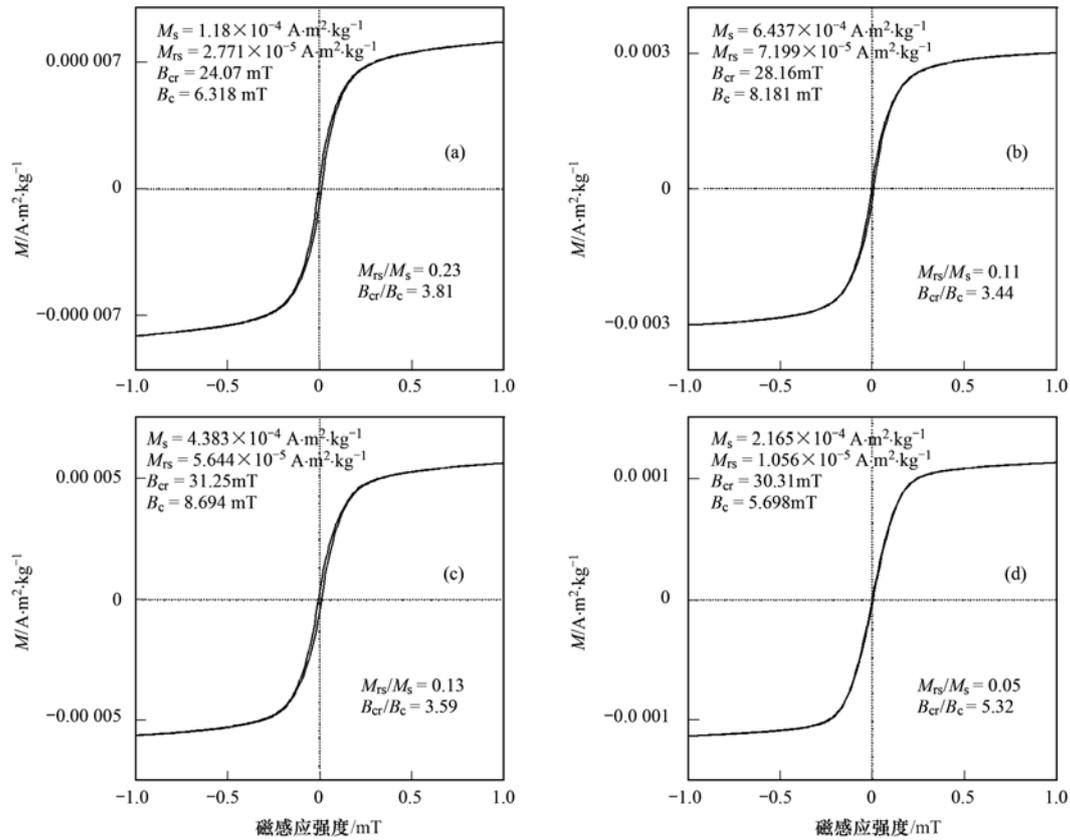


图3 典型样品的磁滞回线

Fig. 3 Magnetic hysteresis loops for representative samples

相互作用的SD、SP和MD、PSD颗粒以及鉴别多种磁性颗粒混合的样品的磁性成分,横坐标 H_c 、纵坐标 H_u 分别代表矫顽力和相互作用力场^[33,34]。代表性样品FORC图中心矫顽力小于 10×10^{-3} T,等值线沿着 $H_c = 0$ 处存在较大的垂直分布,垂直分布均大于 40×10^{-3} T,且具有大开口的特征(图4),表明街道灰尘样品中磁铁矿主要为MD颗粒^[35,36],另如果样品中间存在闭合的等值线,外部的等值线又呈现出开口垂直分布的特征[图4(b)和4(c)],一般认为这种现象磁性矿物的颗粒大小为PSD^[37]。

2.2 扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM)

SEM的分辨率一般可达到1 nm、放大倍数达到数十万倍,清晰地观察到纳米/微米矿物的表面形貌特征,微孔隙的形态及分布等,进而为矿物的成因、分析等提供依据^[38]。西安城市不同功能区街道灰尘代表性样品磁性颗粒的SEM实验结果表明,外形呈现球状且表面近似光滑,颗粒“直径”大小 $> 10 \mu\text{m}$ (图5),一般认为这是粗颗粒的磁铁矿的典型特征,主要来源为化石燃料的高温燃烧^[39],不同代表性样品在 $100 \mu\text{m}$ 、 $500 \mu\text{m}$ 和 1.00 mm 情况下(图

5),伴随越来越多球粒状颗粒出现,但同时也存在棱角形状的不规则磁铁矿,这可能是由于自然过程而产生。

3 讨论

3.1 西安城市街道灰尘磁学特征

磁化率是指物质在外加磁场下被磁化的难易程度,其大小主要反映了样品中亚铁磁性(如磁铁矿)的含量^[40]。西安城市街道灰尘磁学参数变化(表1): χ_{lf} 和 χ_{hf} 值变化范围分别在 $(169.5 \sim 977.48) \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(163.48 \sim 964.08) \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值分别为 $415.66 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $410.41 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。与背景值相比,街道灰尘样品磁化率值均比背景土壤值大,平均值是背景值的10余倍,表明西安城市不同功能区街道灰尘的磁性物质含量较高。 χ_{ARM} 则反映SSD和细粒级准单畴(PSD)亚铁磁性矿物含量^[41], χ_{ARM} 值变化范围为 $(305.04 \sim 1068.49) \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值为 $556.89 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$;西安市街道灰尘SIRM变化范围为 $(2005.31 \sim 10897.64) \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值为 $5105.99 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$,

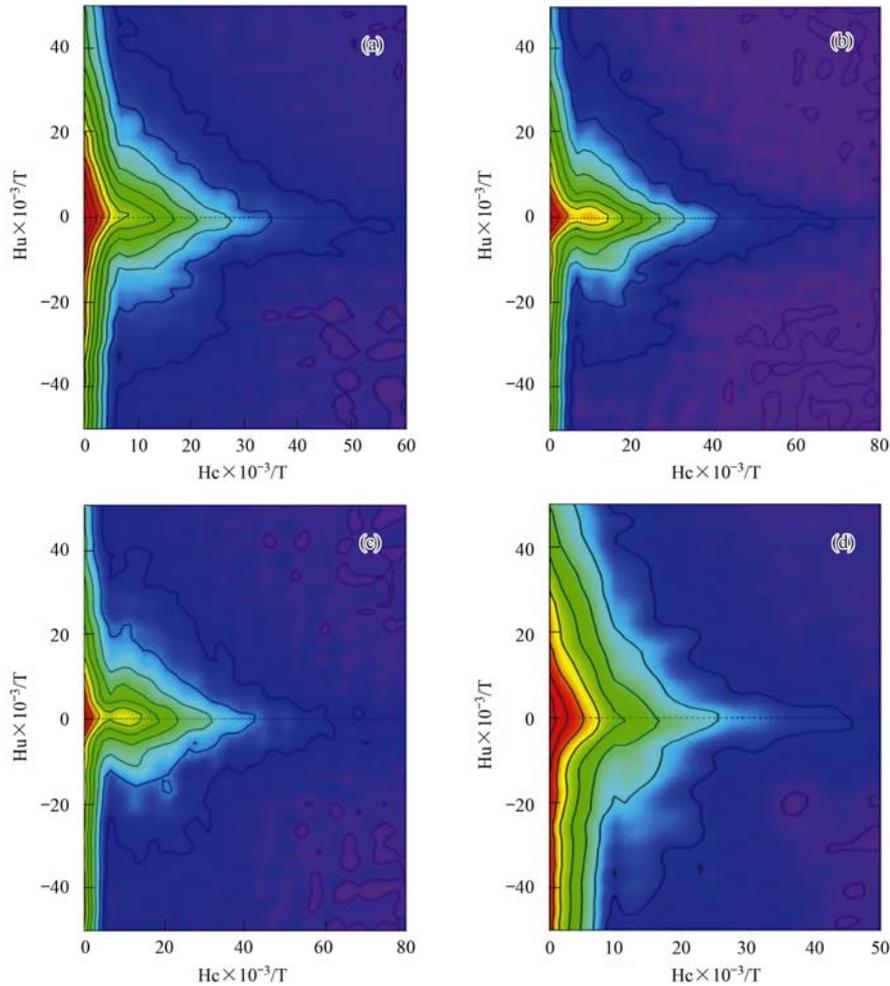


图4 典型样品的 FORC 图

Fig. 4 FORC diagrams for representative samples

表1 西安城市不同功能区街道尘埃样品的磁学参数

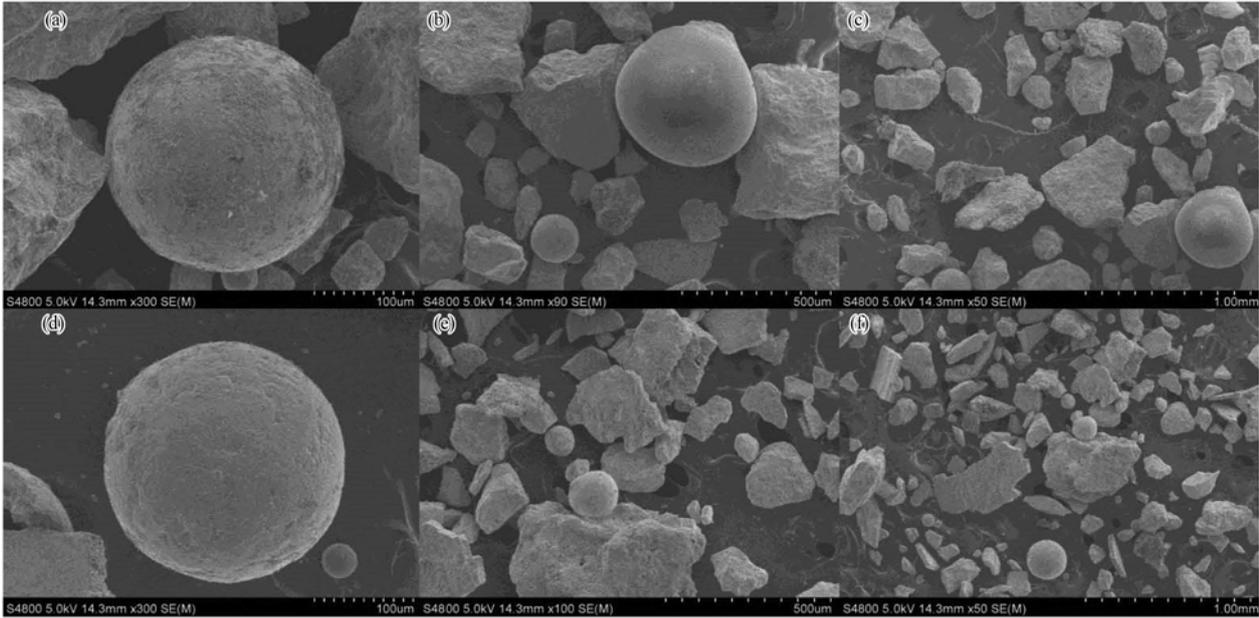
Table 1 Magnetic parameters for street dusts in different functional zones of Xi'an City

项目	$\chi_{if} \times 10^{-8}$ / $m^3 \cdot kg^{-1}$	$\chi_{hf} \times 10^{-8}$ / $m^3 \cdot kg^{-1}$	$\chi_{fd}/\%$	$\chi_{ARM} \times 10^{-8}$ / $m^3 \cdot kg^{-1}$	SIRM $\times 10^{-5}$ / $A \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$	soft $\times 10^{-5}$ / $A \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$	HIRM $\times 10^{-5}$ / $A \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$	S-ratio	$\chi_{ARM}/SIRM$ $\times 10^{-3}/m \cdot A^{-1}$
最大值	977.48	964.08	3.55	1 068.49	10 897.64	4 023.09	502.52	0.99	0.21
最小值	169.5	163.48	0.05	305.04	2 005.31	204.72	4.79	0.84	0.05
平均值	415.66	410.41	1.3	556.89	5 105.99	1 987.75	153.22	0.95	0.11
背景值	42.03	40.51	3.61	89.72	179.25	165.31	32.02	0.93	0.27

χ_{ARM} 和 SIRM 值同样也都远高于背景值,表明磁性矿物的含量很高. 西安市街道灰尘 soft 值变化范围为(204.72 ~ 4 023.09) $\times 10^{-5} A \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$,平均值为1 987.75 $\times 10^{-5} A \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$,高于背景值 10 余倍. HIRM 可用于检测赤铁矿和针铁矿等高矫顽力磁性矿物的含量^[41],街道灰尘样品的 HIRM 值得变化范围为(4.79 ~ 502.52) $\times 10^{-5} A \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$,平均值为153.22 $\times 10^{-5} A \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$. S-ratio 可以用来判别样品中亚铁磁性矿物和不完全反铁磁性矿物的相对含量,当 S-ratio 的值接近 1 时,表明样品中亚铁磁性矿物占主导地位,反之,则表明赤铁矿或者针铁矿等高

矫顽力的磁性矿物的含量增加^[32,41]. 西安城市不同功能区街道灰尘样品的 S-ratio 值变化范围为 0.84 ~ 0.99,平均值为 0.95 > 0.93 (土壤的背景值),表明亚铁磁性矿物为主导矿物. 因此, S-ratio、soft 和 HIRM 的高值,均表明西安市街道灰尘中磁性矿物相对富集.

χ_{fd} 指示 SP 颗粒对磁化率的贡献^[41],西安市街道灰尘样品的 χ_{fd} 变化范围在 0.05 ~ 3.55, χ_{fd} 含量大于 3% 的样品仅占总量的 0.06%,平均值为 1.30,表明样品中含有的细颗粒磁性矿物很少,而且一般认为,污染的土壤频率磁化率都小于 3%,所以,西



X25 样品: (a)100 μm; (b)500 μm; (c)1 mm; X48 样品: (d)100 μm; (e)500 μm; (f)1 mm

图 5 X25 和 X48 样品的扫描电子显微镜图

Fig. 5 Diagrams of scanning electron microscope for samples X25 and X48

安市街道灰尘样品中的磁性矿物很大程度上是由于污染所导致。χ_{ARM}/SIRM 比值可以表征样品颗粒的相对大小,一般来说,粗颗粒(较粗的 PSD 或 MD)磁铁矿的 χ_{ARM}/SIRM 比值相对较高,细颗粒(SD 或者较细的 PSD)磁铁矿比值相对较低^[31,41],西安市街道灰尘样品的 χ_{ARM}/SIRM 比值变化范围为 0.05 ~ 0.22 m·A⁻¹,平均值为 0.11 m·A⁻¹,小于背景值 0.22 m·A⁻¹,表明样品中的磁性矿物主要以粗颗粒为主。Dearing-plot 和 Day-plot 都是目前广泛应用的来判断磁性矿物磁畴状态的手段^[31,41],西安市街道粉尘全部样品的 Dearing 图 [图 6(a)] 和代表性样品的 Day 图 [图 6(b)] 均表明,磁性矿物的磁畴主

要为 MD + PSD 等粗颗粒,这与 χ_{fd} 结果、FORC 图和 SEM 等参数均具有很好的一致性,表明西安市街道灰尘中磁性矿物的磁畴主要由粗颗粒的 MD 和 PSD 组成。

西安市街道灰尘样品的 χ_{lf} 和 SIRM、χ_{lf} 和 soft 均具有良好的相关性 (r = 0.92 和 r = 0.72) [图 7(a) 和 7(b)],表明磁化率主要是由亚铁磁性矿物所控制,样品中主要的载磁性矿物为低矫顽力的亚铁磁性矿物。IRM 曲线、B_{cr} 曲线、Loop 曲线、FORC 图和 S-ratio 等分析表明,样品中含有的主要磁性矿物为磁铁矿、磁赤铁矿,但还含有赤铁矿等。χ_{lf} 和 χ_{fd} 具有反相关关系 (r = -0.21) [图 7(c)],进一步表

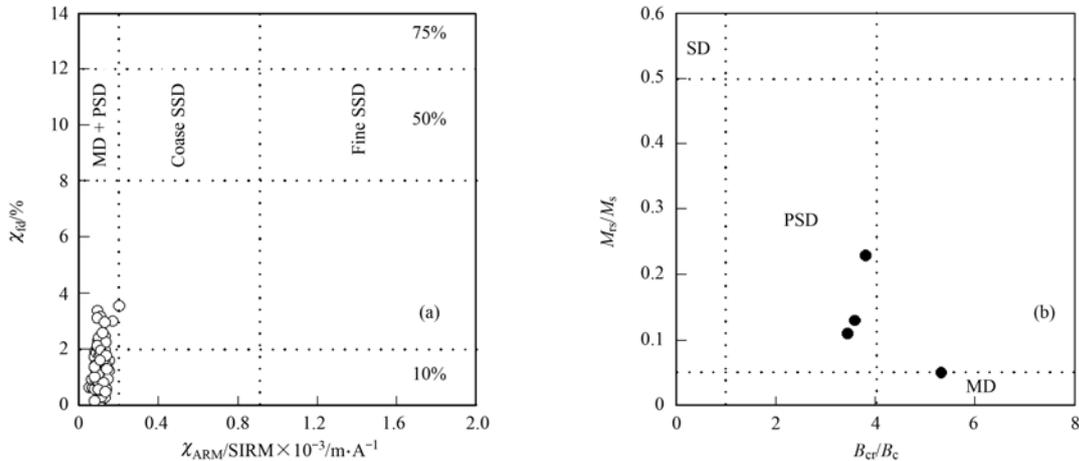


图 6 街道灰尘样品的 Dearing 图和 Day 图

Fig. 6 Dearing and Day diagrams of street dust

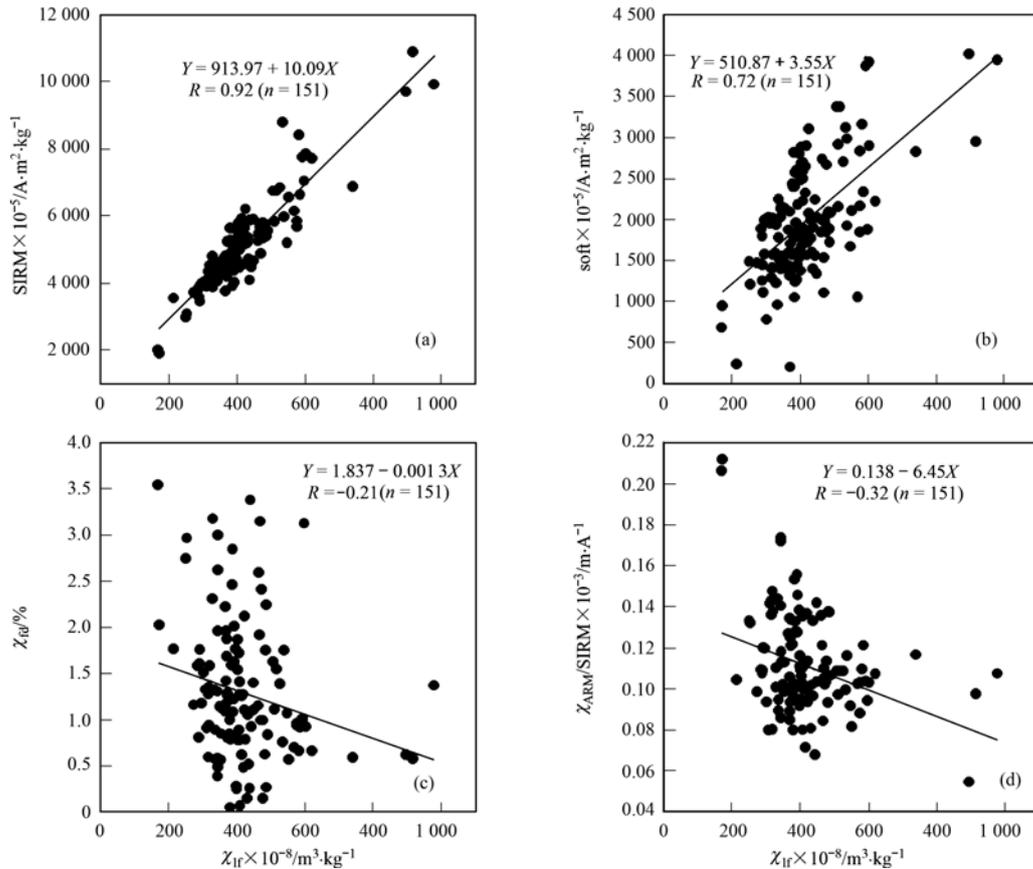


图7 西安城市不同功能区街道灰尘磁学参数相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis of magnetic parameters for street dusts in different functional zones of Xi'an City

明了样品中SD颗粒含量较少, $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 和 χ_{IF} 具有反相关性($r = -0.32$) [图7(d)], 则表明磁化率值高的样品其磁性矿物磁畴相对较小, 反之磁化率值低的样品则磁性矿物的磁畴颗粒较大。

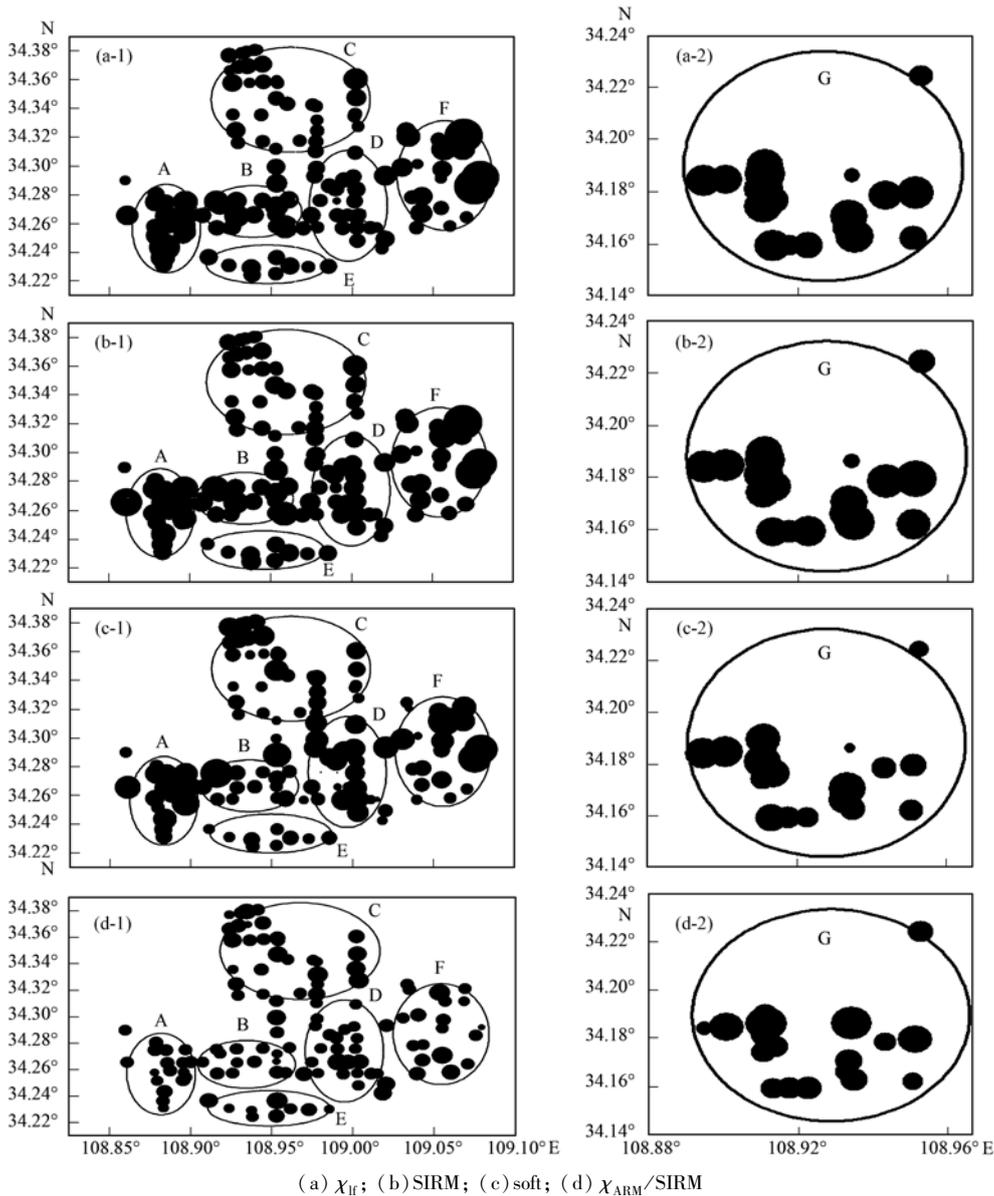
3.2 西安城市不同功能区街道灰尘磁性空间分布、物质来源与环境污染

将 χ_{IF} 、SIRM、soft 和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 这4个分别反映磁性矿物含量、磁性矿物的种类和磁畴大小的具有代表性的主要磁学参量投影到西安城市坐标图上, 明显显示出在空间分布上的变化和差异, 分布模式在西安城市不同功能区不尽相同, 随功能区的不同城市功能和环境特征而发生变化。代表磁性矿物含量的磁学参数(χ_{IF} 和SIRM)与反映低矫顽力软磁性矿物含量的soft在不同功能区具有相似的变化特征, 代表磁性矿物磁畴大小 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 在空间上的分布基本相反, 因此, 根据西安城市的功能区划分^[42], 综合这4种磁学参数在不同区域变化特征, 将西安城市不同功能区街道灰尘磁学参数的空间变化划分为7个主要区域(图8)。

A区(高新技术产业开发区): 高新技术产业开发区位于城市的西部, 2010年以后该区发展迅速,

仅2010年开发面积高达35 km², 拥有西门子、可口可乐、日立、三星、西电集团、陕西重汽等众多的大型工业企业及辅助配套企业2000多家, 目前该区主要依靠高新技术产业开发带动发展。该区域街道灰尘 χ_{IF} 和 SIRM 的平均值为 $468.91 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $5837.58 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, 均高于全市平均值, 分别是背景值的10余倍和30余倍; soft的平均值为 $2213.90 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, 为背景值的13倍; $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 的平均值为 $0.103 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{A}^{-1}$, 表明街道灰尘中低矫顽力的粗颗粒的磁铁矿所占比重较大, 属于典型的污染所导致。

B区(中心商务区): 该功能区主要包括钟楼及其周围商业圈, 地理位置优越, 区域中心性最高, 零售商贸业、市政办公业、服务行业等都是西安最发达的区域。该区域街道灰尘的 χ_{IF} 和 SIRM 的平均值分别为 $486.66 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $6064.92 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$; soft 的平均值为 $2393.54 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 的平均值为 $0.103 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{A}^{-1}$, 其中 χ_{IF} 、SIRM、soft 和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 值与A区基本持平, 表明磁性矿物的含量、种类和颗粒与A区均很相似, 但是对该区域来说, 城市功能与A区



(a) χ_{lf} ; (b) SIRM; (c) soft; (d) $\chi_{ARM}/SIRM$

图 8 西安城市不同功能区磁学参数空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of magnetic parameters for street dusts in different functional zones of Xi'an City

完全不同,其城市中心功能区位显著,各种商业活动频繁,车流量较大,因此与 A 区的污染来源也可能存在一定的差异。

C 区(经济技术开发区): 由于西安城市发展向北扩张并伴随重心北移,西安行政中心、铁路北客站等城市功能中心和电力电子、新型材料等产业为支柱的西安国家级经济技术开发区坐落于此,所以该区域的行政与经济功能特色突出^[42]。 χ_{lf} 和 SIRM 的平均值分别为 $351.50 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $4\ 550.29 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, soft 的平均值为 $1\ 861.57 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ [图 7 (c)], $\chi_{ARM}/SIRM$ 的平均值为 $0.111 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{A}^{-1}$, 其 χ_{lf} 、soft 和 SIRM 明显小于 A 和 B 区域, $\chi_{ARM}/SIRM$ 值略高于 A 和 B 区域, 远低于背景值, 表明其与环境污染有关。

于背景值,表明其与环境污染有关。

D 区(科教商业区): 该区域西边紧邻钟楼核心商业区,分布有西安交通大学、西安理工大学和西安建筑科技大学等高校,多个城市主题公园分布于此,其城市的教育和商业功能显著,在西安的城市发展中占有较为重要的位置。 χ_{lf} 的平均值为 $356.28 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, SIRM 的平均值为 $4\ 433.07 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, soft 的平均值为 $1\ 786.84 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, $\chi_{ARM}/SIRM$ 的平均值为 $0.108 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{A}^{-1}$, 这一区域 χ_{lf} 、soft 和 SIRM 值与 C 功能区基本相同,与 A 和 B 功能区存在较大的差异,表明其污染的来源可能存在较大的差别。

E 区(科教文化产业区): 该区域为西安高等院

校分布最为集中和密集的区域,区内科教事业较为发达,同时由于曲江国家级文化产业示范区的存在,大雁塔、大唐芙蓉园等为代表的旅游文化景区分布其中,其文化产业、旅游业等第三产业发达.该城市功能区内, χ_{lf} 的平均值为 $358.87 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, SIRM 的平均值为 $4\,248.06 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, soft 的平均值为 $1\,668.22 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, χ_{ARM}/SIRM 的平均值为 $0.108 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{A}^{-1}$,总体上,该区域代表性磁学参数的变化与 D 功能区相近,从城市功能上来说,这两个区域也有相似之处,因此,其污染物质的来源可能具有相似性.

F 区(浐灞生态区):浐河、灞河流经该区(图 1),自然生态环境优良,尤其近些年,浐灞生态区与西安国际港务区的功能定位,凸显了该区的生态经济发展特色.该城市功能区内, χ_{lf} 和 SIRM 的平均值为 $558.67 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $6\,695.53 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$,远高于全市平均值,大于其它所有功能区,分别是背景值的 15 倍和 40 余倍;soft 的平均值为 $2\,553.99 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$,为背景值的 14 倍, χ_{ARM}/SIRM 的平均值为 $0.108 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{A}^{-1}$,也是所有功能区最小的,表明其粗颗粒磁性矿物所占的比重与其它功能区相比较是最大的.总的来说,该功能区街道灰尘中主要为低矫顽力的粗颗粒的亚铁磁性矿物所占比重是城市中最高的,其污染的来源和类型也可能更为复杂和多样.

G 区(教育科技产业区):该功能区地处长安区,郭杜教育科技产业开发区与国家民用航天产业基地强化了该区科教文化的功能和作用,是未来该区发展的经济增长极和主要功能载体.该城市功能区内, χ_{lf} 的平均值为 $328.73 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,SIRM 的平均值为 $3\,912.48 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$,soft 的平均值为 $1\,436.19 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$,反映磁性矿物含量

和种类的这 3 个参数与其它 7 个功能区相比其数值最小,并且低于西安市的平均值, χ_{ARM}/SIRM 的平均值为 $0.132 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{A}^{-1}$,在 7 个功能区中居首,总体上该区域代表性磁学参数的变化与 D 和 E 功能区相近,这 3 个区域在城市功能上基本相同,因此,其污染物质的来源可能同样具有相似性.

城市道路灰尘中磁性物质一般由自然界或者人类活动所贡献,土壤、基岩的风化以及和大气的干湿沉降是主要的自然源;人为源通常指人为的输入,总体来说有汽车交通污染源、工业污染和城市建设与市政生活等,这些不同来源的尘埃携带重金属和磁性物质,是街道灰尘最主要的污染来源^[43].根据磁学参数与平均值、背景值的大小,将不同功能区污染程度分别划分为重度污染区、中度污染区和轻度污染区这 3 种类型(表 2),其中重度污染区为浐灞生态区,根据磁学参数,其污染最为严重,该区域在 20 世纪 90 年代前聚集了传统的“三高”工业部门,虽紧邻中心商务区但污染却较大,火电、化工等污染性企业较多,且煤炭是主要的工业能源,集中表现为单位 GDP 产值能耗和单位工业增加值能耗均位于全市所有行政区之首^[42],绕城高速进出口从这一区域经过,上下绕城公路的各类汽车造成的交通污染也是另外重要的一个方面,因此,这一功能区的污染源主要为“工业和交通”,但是,由于这一生态区功能的定位,推动了区域生态环境建设,区内环境污染得到有效的控制和治理,因此,在这一功能区的区内部分地段 χ_{lf} 和 SIRM 等磁学参数含量较低,表明部分区域生态环境相对较好;A 区和 B 区为中度污染区,B 区中心商务区由于车流量较大、汽车尾气排放和轮胎磨损等造成污染,因此其污染的主要来源为“交通”;A 区依然是西安城市工业布局相对集中的区域,但是与浐灞生态区“高污染”的

表 2 西安市不同功能区街道灰尘主要磁学参数(χ_{lf} 、SIRM、soft 和 χ_{ARM}/SIRM) 揭示的环境污染
Table 2 Environmental pollution revealed by the main magnetic parameters (χ_{lf} , SIRM, soft and χ_{ARM}/SIRM)

区域(平均值)	城市功能区	for street dusts in different functional zones of Xi'an City				污染程度
		χ_{lf} $\times 10^{-8}/\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	SIRM $\times 10^{-5}/\text{A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$	soft $\times 10^{-5}/\text{A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$	χ_{ARM}/SIRM $\times 10^{-3}/\text{m} \cdot \text{A}^{-1}$	
A	高新技术产业开发区	468.91	5 837.58	2 213.90	0.103	中度污染
B	中心商务区	486.66	6 064.92	2 393.54	0.103	中度污染
C	经济技术开发区	351.50	4 550.29	1 861.57	0.111	轻度污染
D	科教商业区	356.28	4 433.07	1 786.84	0.108	轻度污染
E	科教文化产业区	358.87	4 248.06	1 668.22	0.105	轻度污染
F	浐灞生态区	558.67	6 695.53	2 553.99	0.108	重度污染
G	教育科技产业区	328.73	3 912.48	1 436.19	0.132	轻度污染
全市平均值		415.66	5 105.99	1 987.75	0.11	
背景值		42.03	179.25	165.31	0.270	

工业相比较,其工业多为新型工业,污染程度相对 F 区较低,因此为中度污染,但是其污染的主要来源为也可以归纳为“工业”。轻度污染区主要包括 C、D、E 和 G 这 4 个功能区,其城市功能基本相近,主要为科教以及文化生活区,工业分布相对较少,污染程度相对较轻,因此其污染的主要来源为“交通”。总体上,传统工业区的污染程度高于新型工业区和商贸区,而科教、文化和旅游功能区的污染程度则相对较轻,且各自的污染来源各不相同。

有研究表明,城街道灰尘颗粒物的磁学参数与重金属元素之间既有相同的来源,又具有良好的相关性,通过对西安城市街道灰尘重金属的研究发现^[44,45],西安路面沉积物中重金属(Ba、V、Zn、Cd、Cu、Pb、Ni 和 Cr)的含量在不同功能区的分布规律整体上具有一致性,但是又存在一定的差异,所有重金属元素质量含量都是旅游区最低,其它 3 个区则各有差异,其中 Pb 含量:工业区(393.01 mg·kg⁻¹) > 商业区(365.22 mg·kg⁻¹) > 科教区(340.65 mg·kg⁻¹) > 旅游区(305.99 mg·kg⁻¹); Cd 含量:工业区(15.93 mg·kg⁻¹) > 商业区(15.45 mg·kg⁻¹) > 科教区(14.63 mg·kg⁻¹) > 旅游区(10.73 mg·kg⁻¹); Zn 含量:工业区(662.30 mg·kg⁻¹) > 商业区(616.20 mg·kg⁻¹) > 科教区(527.07 mg·kg⁻¹) > 旅游区(474.49 mg·kg⁻¹)。总的来说,西安路面沉积物中的 Pb、Zn、Ba 和 Cd 的含量工业区 > 商业区 > 居民文教区 > 旅游区,而 Pb、Zn 和 Cd 主要是工业排放和交通排放等人为来源,这里的工业区与文中的高新技术产业开发范围基本一致,居民文教区和旅游区与文中科教文化功能区范围基本一致。对西安市不同功能区环境污染的研究,运用重金属的方法研究的区域范围比运用磁学参数研究的范围小,但是就两种方法均做研究的区域而言,研究结果对于污染程度和污染来源的解析均具有极大的相似性和一致性,有力地支持了街道灰尘磁学参量对西安市城市不同功能区污染的研究结论,进一步表明运用环境磁学的方法并选择适当的磁学参数来揭示西安城市不同功能区环境污染的程度具有较强的科学性和可靠性。

4 结论

(1)本文以系统的环境磁学方法为主,结合 SEM 等方法对西安城市不同功能区街道灰尘的磁学性质进行了系统的研究。西安城市不同功能区街道灰尘的磁性矿物含量很高,磁性矿物主要载体矿

物为低矫顽力的软磁性矿物如:磁铁矿和磁赤铁矿,但同时还含有赤铁矿等高矫顽力的硬磁性矿物,磁性矿物的磁畴以粗颗粒(MD 和 PSD)为主,表明磁性矿物具有明显的污染的特征,可以用来指示城市环境污染。

(2)西安城市街道灰尘的磁学特征在城市的不同功能区表现出空间变化的规律,根据其变化特征,根据污染程度划分为重度污染区、中度污染区和轻度污染区,且污染的来源有所差异。浐灞生态区(F 区)为重度污染区,磁性物质的含量相对较高,揭示污染相对较重,污染源主要为“工业+交通”;高新技术产业开发(A 区)和中心商务区(B 区)磁性物质含量相对较高,粗颗粒物质相对较少,是中度污染的区域,其污染源分别为“工业”和“交通”;经济技术开发区(C 区)、科教商业区(D 区)、科教文化产业区(E 区)和教育科技产业区(G 区)城市主要功能具有相似性,是轻度污染的区域,污染源主要为“交通”。

参考文献:

- [1] Adachi K, Tainosho Y. Single particle Characterization of size-fractionated road sediments[J]. *Applied Geochemistry*, 2005, **20**(5): 849-859.
- [2] 常静,刘敏,侯立军,等.城市地表灰尘的概念、污染特征与环境效应[J]. *应用生态学报*, 2007, **18**(5): 1153-1158. Chang J, Liu M, Hou L J, et al. Concept, pollution character and environmental effect of urban surface dust[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, **18**(5): 1153-1158.
- [3] 王济,张一修,高翔.城市地表灰尘重金属研究进展及展望[J]. *地理研究*, 2012, **31**(5): 821-830. Wang J, Zhang Y X, Gao X. The advances in research on heavy metals of the surface dust in urban areas[J]. *Geographical Research*, 2012, **31**(5): 821-830.
- [4] Charlesworth S M, Lees J A. Particulate-associated heavy metals in the urban environment: their transport from source to deposit, Coventry, UK[J]. *Chemosphere*, 1999, **39**(5): 833-848.
- [5] Banerjee A D K. Heavy metal levels and solid phase speciation in street dusts of Delhi, India[J]. *Environmental Pollution*, 2003, **123**(1): 95-105.
- [6] Sutherland R A, Tack F M G, Ziegler A D, et al. Metal extraction from road-deposited sediments using nine partial decomposition procedures[J]. *Applied Geochemistry*, 2004, **19**(6): 947-955.
- [7] 王济,张浩,曾希柏,等.贵阳市城区土壤重金属分布特征及污染评价[J]. *土壤*, 2010, **42**(6): 928-934. Wang J, Zhang H, Zeng X B, et al. Distribution and pollution assessment on heavy metals in urban soils of Guiyang[J]. *Soils*, 2010, **42**(6): 928-934.
- [8] 李晓燕,刘艳青.我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源[J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3648-3653. Li X Y, Liu Y Q. Heavy metals and their sources in outdoor settled dusts in different function areas of cities[J].

- Environmental Science, 2013, **34**(9): 3648-3653.
- [9] 孟飞, 刘敏, 侯立军, 等. 上海中心城区地表灰尘与土壤中重金属累积及污染评价[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2007, (4): 56-63.
- Meng F, Liu M, Hou L J, *et al.* Heavy metals in urban dusts and soils of Shanghai and Its pollution assessment[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2007, (4): 56-63.
- [10] 李晓燕, 陈同斌, 雷梅, 等. 北京城市广场及校园表土(灰尘)中重金属水平与健康风险[J]. 地理研究, 2010, **29**(6): 989-996.
- Li X Y, Chen T B, Lei M, *et al.* Concentrations and risk of heavy metals in surface soil and dust in urban squares and school campus in Beijing[J]. Geographical Research, 2010, **29**(6): 989-996.
- [11] Chang S H, Wang K S, Chang H F, *et al.* Comparison of source identification of metals in road-dust and soil [J]. Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 2009, **18**(5): 669-683.
- [12] 向丽, 李迎霞, 史江红, 等. 北京城区道路灰尘重金属和多环芳烃污染状况探析[J]. 环境科学, 2010, **31**(1): 159-167.
- Xiang L, Li Y X, Shi J H, *et al.* Investigation of heavy metal and polycyclic aromatic hydrocarbons contamination in street dusts in urban Beijing[J]. Environmental Science, 2010, **31**(1): 159-167.
- [13] 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, 2004, **29**(7): 979-985.
- [14] Ordóñez A, Álvarez R, De Miguel E, *et al.* Spatial and temporal variations of trace element distribution in soils and street dust of an industrial town in NW Spain: 15 years of study[J]. Science of the Total Environment, 2015, **524-525**: 93-103.
- [15] Yıldırım G, Tokaloğlu Ş. Heavy metal speciation in various grain sizes of industrially contaminated street dust using multivariate statistical analysis [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, **124**: 369-376.
- [16] Tuyen L H, Minh Tue N, Takahashi S, *et al.* Methylated and unsubstituted polycyclic aromatic hydrocarbons in street dust from Vietnam and India: occurrence, distribution and *in vitro* toxicity evaluation[J]. Environmental Pollution, 2014, **194**: 272-280.
- [17] Bučko M S, Magiera T, Johanson B, *et al.* Identification of magnetic particulates in road dust accumulated on roadside snow using magnetic, geochemical and micro-morphological analyses [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(5): 1266-1276.
- [18] Ďurža O. Heavy metals contamination and magnetic susceptibility in soils around metallurgical plant[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, 1999, **24**(6): 541-543.
- [19] Jeleńska M, Hasso-Agopsowicz A, Kopcewicz B, *et al.* Magnetic properties of the profiles of polluted and non-polluted soils. A case study from Ukraine[J]. Geophysical Journal International, 2004, **159**(1): 104-116.
- [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[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 1997, **22**(1-2): 207-210.
- [21] Blundell A, Dearing J A, Boyle J F, *et al.* Controlling factors for the spatial variability of soil magnetic susceptibility across England and Wales[J]. Earth-Science Reviews, 2009, **95**(3-4): 158-188.
- [22] Blundell A, Hannam J A, Dearing J A, *et al.* Detecting atmospheric pollution in surface soils using magnetic measurements: a reappraisal using an England and Wales database[J]. Environmental Pollution, 2009, **157**(10): 2878-2890.
- [23] Canbay M, Aydin A, Kurtulus C. Magnetic susceptibility and heavy-metal contamination in topsoils along the Izmit Gulf coastal area and IZAYTAS (Turkey) [J]. Journal of Applied Geophysics, 2010, **70**(1): 46-57.
- [24] Karimi R, Ayoubi S, Jalalian A, *et al.* Relationships between magnetic susceptibility and heavy metals in urban topsoils in the arid region of Isfahan, central Iran [J]. Journal of Applied Geophysics, 2011, **74**(1): 1-7.
- [25] Zhang C X, Qiao Q 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**: 60-75.
- [26] 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[J]. 科学通报, 2008, **53**(4): 446-455.
- Wang G, Xia D S, Liu X M, *et al.* Spatial and temporal variation in magnetic properties of street dust in Lanzhou City, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, **53**(12): 1913-1923.
- [27] Wang G, Oldfield F, Xia D S, *et al.* Magnetic properties and correlation with heavy metals in urban street dust: a case study from the city of Lanzhou, China[J]. Atmospheric Environment, 2012, **46**: 289-298.
- [28] 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.
- Li P, Qiang X K, Tang Y R, *et al.* Magnetic susceptibility of the dust of street in Xi'an and the implication on pollution[J]. China Environmental Science, 2010, **30**(3): 309-314.
- [29] Thompson R, Oldfield F. Environmental magnetism [M]. London: Allen and Unwin, 1986. 1-227.
- [30] Maher B A, Thompson R. Quaternary climates, environments and magnetism [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 49-53.
- [31] Evans M E, Heller F. Environmental magnetism: principles and applications of enviromagnetics [M]. New York: Academic Press, 2003. 68-77.
- [32] Liu Q S, Roberts A P, Larrasoña J C, *et al.* Environmental magnetism: principles and applications [J]. Reviews Geophysics, 2012, **50**(4): RG4002.
- [33] Dankers P. Relationship between median destructive field and remanent coercive forces for dispersed natural magnetite, titanomagnetite and hematite [J]. Geophysical Journal International, 1981, **64**(2): 447-461.
- [34] Muxworthy A R, King J G, Heslop D. Assessing the ability of first-order reversal curve (FORC) diagrams to unravel complex magnetic signals[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, **110**(B1): B01105.

- [35] Roberts A P, Pike C R, Verosub K L. First-order reversal curve diagrams: a new tool for characterizing the magnetic properties of natural samples[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, **105**(B12): 28461-28475.
- [36] Pike C R, Roberts A P, Dekkers M J, *et al.* An investigation of multi-domain hysteresis mechanisms using FORC diagrams[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2001, **126**(1-2): 11-25.
- [37] Muxworthy A R, Dunlop D J. First-order reversal curve (FORC) diagrams for pseudo-single-domain magnetites at high temperature[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, **203**(1): 369-382.
- [38] 杜谷, 王坤阳, 冉敬, 等. 红外光谱/扫描电镜等现代大型仪器岩石矿物鉴定技术及其应用[J]. *岩矿测试*, 2014, **33**(5): 625-633.
Du G, Wang K Y, Ran J, *et al.* Application of IR/SEM and other modern Instruments for mineral identification[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2014, **33**(5): 625-633.
- [39] 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.
Zhao Y C, Zhang J Y, Wei F, *et al.* Microstructure characteristics of ferrospheres in fly ash from coal combustion[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2005, **24**(5): 474-478.
- [40] Dearing J. Environmental magnetic susceptibility. Using the Bartington MS2 system[M]. British: British Library Cataloguing in Publication Data, 1999.
- [41] Dunlop D J, Özdemir Ö. Rock magnetism: fundamentals and frontiers[M]. New York: Cambridge University Press, 1997.
- [42] 吴文恒, 徐泽伟, 杨新军. 功能分区视角下的西安市发展空间分异[J]. *地理研究*, 2012, **31**(12): 2173-2184.
Wu W H, Xu Z W, Yang X J. Quantitative research of spatial development differentiation in Xi'an from the perspective of urban functional zoning[J]. *Geographical Research*, 2012, **31**(12): 2173-2184.
- [43] 方凤满, 林跃胜, 王海东, 等. 城市地表灰尘中重金属的来源、暴露特征及其环境效应[J]. *生态学报*, 2011, **31**(23): 7301-7310.
Fang F M, Lin Y S, Wang H D, *et al.* Source, exposure characteristics and its environmental effect of heavy metals in urban surface dust[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, **31**(23): 7301-7310.
- [44] Han Y M, Du P X, Cao J J, *et al.* Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an, Central China[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **355**(1-3): 176-186.
- [45] 孙璐. 西安市路面沉积物污染机制研究[D]. 西安: 长安大学, 2015. 30-31.
Sun L. Research on pollution mechanism of road deposition sediments in Xi'an city[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015. 30-31.

CONTENTS

Reactivity-based Anthropogenic VOCs Emission Inventory in China	LIANG Xiao-ming, ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (845)
Characteristics of Reactive VOCs Species During High Haze-Pollution Events in Suburban Area of Shanghai in Winter	GAO Shuang, ZHANG Kun, GAO Song, <i>et al.</i> (855)
Assessment of PM _{2.5} Pollution Mitigation due to Emission Reduction from Main Emission Sources in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Wen-jing, CHANG Xing, XING Jia, <i>et al.</i> (867)
Concentration Characteristics and Sources of Trace Metals in PM _{2.5} During Wintertime in Beijing	QIAO Bao-wen, LIU Zi-ru, HU Bo, <i>et al.</i> (876)
Online Source Analysis of Particulate Matter (PM _{2.5}) in a Heavy Pollution Process of Shijiazhuang City During Heating Period in 2015	LU Na, LI Zhi-guo, ZHOU Jing-bo, <i>et al.</i> (884)
Analysis of Chemical Composition and Pollution Source of the Fine Particulate Matter by the SPAMS in the Four Seasons in Nanning	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, MAO Jing-ying, <i>et al.</i> (894)
Physico-chemical Characteristics of Individual Aerosol Particles in Marine Atmosphere on South Hemisphere	CHI Jian-wei, LI Chuan-jin, SUN Jun-ying, <i>et al.</i> (903)
Characteristics of Spatial Distribution of Bacterial Aerosols Produced by Fountain	ZHANG Chong-miao, YUAN Lin, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (911)
Removal of Volatile Sulfur Odor by the Biotrickling Filter	YE Jie-xu, MIAO Xiao-ping, ZHUGE Lei, <i>et al.</i> (918)
Magnetic Characteristics and Environmental Pollution Analysis of Street Dust in Different Functional Zones of Xi'an City	FANG Ni, ZHANG Jun-hui, WANG Jin, <i>et al.</i> (924)
Pollution Characteristics and Nitrification and Denitrification Potential of Superficial Sediments from Streams in an Urban-Rural Fringe	QIN Ru-bin, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (936)
Nitrification and Denitrification Rates in a Small Tributary, Nanhe River, of Three Gorge Dam Reservoir During Water Collection and Release Events	WANG Jing, LIU Hong-jie, LEI Yu, <i>et al.</i> (946)
Tempo-spatial Variations and Influential Factors of Carbon Dioxide Emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River Basin, China	ZHAO Deng-zhong, TAN De-bao, LI Chong, <i>et al.</i> (954)
Seasonal Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Surface Water of Baiyangdian Lake	WANG Yi-zhen, ZHANG Jun, ZHOU Xu-shen, <i>et al.</i> (964)
Distributions, Sources and Pollution Assessment of Hg in Sediment of Douhe Reservoir in Tangshan City	WU Ting-ting, WANG Ming-meng, CHEN Xu-feng, <i>et al.</i> (979)
Release Characteristics of Mercury from Submersed Typical Herbaceous Plants in the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area	DENG Han, ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (987)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water Around Electroplating Factories	YU Cong-cong, ZHAO Wei-tuo, GAO Xiao-feng, <i>et al.</i> (993)
Speciation and Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments from Jiulong River	LIN Cheng-qi, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (1002)
Fractionation and Contamination Assessment of Metal Elements in the Surface Sediments of Yundang Lagoon in Xiamen	YANG Qiu-li, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1010)
Source Analysis, Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sewage Irrigation Area Farmland Soils of Longkou City	LI Chun-fang, WANG Fei, CAO Wen-tao, <i>et al.</i> (1018)
Efficiency and Mechanism of Purifying High Iron-Manganese from Ground Water in the Cold Villages and Towns Based on The Coupling of Rice Husk and Iron-Manganese Oxidizing Bacteria	SUN Nan, CHEN Yan-li, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1028)
Peroxidation of High Algae-laden Water by Ozone; Algae Organic Matter Transformation and Disinfection By-products Formation	ZHANG Sai, HU Xue-bin, GU Li, <i>et al.</i> (1038)
Effects of Pretreatment on Hydraulic Irreversible Membrane Fouling During Ultrafiltration Short Process: A Pilot Study	YANG Hai-yan, XING Jia-jian, WANG Can, <i>et al.</i> (1046)
Fenton-like Catalytic Removal of Organic Pollutants in Water by Framework Cu in Cu-Al ₂ O ₃	XU Dan, ZHANG Li-li, LIU Li-fen (1054)
Oxidation Destruction of Cu(CN) ₂ ⁻ by Persulfate	WANG Yun-fei, LI Yi-bing, WANG Yan-bin, <i>et al.</i> (1061)
Enhanced Removal of Herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid and Simultaneous Power Generation in Microbial Fuel Cells	QUAN Xiang-chun, QUAN Yan-ping, XIAO Zhu-tian (1067)
Adsorption Characteristics of Copper in Water by the Porous Biomorph-Genetic Composite of HAP/C with Eucalyptus Wood Template	LI Chao, ZHU Zong-qiang, CAO Shuang, <i>et al.</i> (1074)
Biological Toxicity Evaluation of Domestic Wastewater Based on A ² /O Treatment Processes Using a Battery of Bioassays	ZHANG Qiu-ya, MA Xiao-yan, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1084)
Effect of Wastewater Nitrogen Concentrations on Nitrogen Removal Ability of <i>Myriophyllum aquaticum</i>	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1093)
Recovery Performance of ANAMMOX Process after Inhibition Resulting from Seawater	QI Pan-qing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1102)
Impact of Starvation Conditions on Biological Community Structure in Sulfur Autotrophic Denitrification Reactor	LI Fang-fang, SHI Chun-hong, LI Hai-bo, <i>et al.</i> (1109)
Quick Start-up of Anaerobic Ammonium Oxidation Process	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1116)
A New Model for the Treatment of Low Ammonia Nitrogen Wastewater by CANON Process	WANYAN De-qing, YUAN Yi, LI Xiang, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Side-stream Phosphorus Recovery on the Performance of EBPR System Under Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (1130)
Identification and Influence of Quorum Sensing on Anaerobic Ammonium Oxidation Process	CHEN Shu-han, LI An-jie, WANG Yue-xing, <i>et al.</i> (1137)
Effects of Organic Loading Rate on Startup Performance of Anaerobic Digestion with Vinegar Residues	DAI Xiao-hu, YU Chun-xiao, LI Ning, <i>et al.</i> (1144)
Influencing Mechanism of Calcium Peroxide Pre-treatment on Dewatering Performance of Waste Activated Sludge	BAI Run-ying, CHEN Zhan, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1151)
Treatment Effects of Earthworm Constructed Wetlands in Different Working Conditions	DONG Meng-ke, LI Huai-zheng, XU Yi-xiao (1159)
Effect of PFOA on Oxidative Stress and Membrane Damage of <i>Escherichia coli</i>	YANG Meng, LI Yi, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1167)
Physicochemical Properties and Antibacterial Effect of Silver Nanoparticles; A Comparison of Environmental and Laboratorial Conditions	YI Jun, CHENG Jin-ping (1173)
Pollution Characteristics of Chlorobenzenes in Organs of Fish from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1182)
Effect of Nano Zeolite on Growth, Activity of Antioxidant Enzyme, and Chemical Fractions and Concentration of Cd in Chinese Cabbage	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (1189)
Effect of Different Iron Minerals on Bioaccessibility of Soil Arsenic Using <i>in vitro</i> Methods	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, HUANG Run-lin, <i>et al.</i> (1201)
Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals Contaminated Soils by Stainless Steel Electrodes as well as the Phenomenon and Mechanism of Electrode Corrosion and Crystallization	WEN Dong-dong, FU Rong-bing, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1209)
Influence of the Application of Non-Hazardous Sewage Sludge on the Evolution of Soil Carbon Pool and Carbon Pool Management Index	LIU Xiao, HUANG Lin, GUO Kang-li, <i>et al.</i> (1218)
Input and Distribution of Photosynthesized Carbon in Soil-Rice System Affected by Water Management and Nitrogen Fertilization	WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, <i>et al.</i> (1227)
Effects of Simulated Acid Rain on Soil Respiration and Heterotrophic Respiration in a Secondary Forest	CHEN Shu-tao, SUN Lu, SANG Lin, <i>et al.</i> (1235)
Response of Soil Nitrifier and Denitrifier Community and Activity to Elevated Atmospheric CO ₂ Concentration and Temperature	LIU Yuan, WANG Guang-li, LI Lian-qing, <i>et al.</i> (1245)
Effects of Lithology on the Abundance and Composition of Soil Nitrogen-fixing Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Karst Shrub Ecosystem	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1253)
Characterization of Phosphorus Forms in Organic Composts and Their Effects on Leaf Phosphorus Content of <i>Castanea mollissima</i> in Chinese Chestnut Producing Area	SONG Ying, GUO Su-juan, ZHANG Li, <i>et al.</i> (1262)
Effects of Acidic Materials on the N Transformations During the Composting of Pig Manure and Wheat Straw	JIANG Ji-shao, YAO Qian (1272)