

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲 PM_{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征 徐建辉, 江洪 (3119)

宁波市 PM_{2.5} 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算 杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)

青岛大气中酸碱气体及 PM_{2.5} 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系 周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)

北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征 胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)

2015 年春节北京市空气质量分析 程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)

上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系 王红丽 (3159)

生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究 陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)

一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型 郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘闯, 王旭东, 张思敏 (3175)

巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素 叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张攻琪, 周阳 (3186)

河北洹河溶解性有机物光谱学特性 虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)

东山岛地下水“三氮”空间分布特征 吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)

重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化 梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)

硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 δ¹³C_{DIC} 的影响 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)

阆中市思依镇水化学特征及其成因分析 张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)

东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动 陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)

水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响 胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)

溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟 杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)

坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果 李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)

典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估 李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)

南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比 张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)

臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响 刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)

含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响 吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)

厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究 王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永锋 (3298)

印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究 申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)

螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征 覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)

两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究 税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)

农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析 孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)

四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析 张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)

从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化 刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)

提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响 刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀 (3352)

常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究, 以长江中下游地区夏玉米季为例 桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)

水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响 傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)

厌氧条件下砂壤水稻土 N₂、N₂O、NO、CO₂ 和 CH₄ 排放特征 曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373)

黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征 陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)

生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响 郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)

宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征 倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)

石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究 胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)

江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例 王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)

缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征 李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)

西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应 聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)

电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评估 郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)

典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性 刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)

紫色土对硫丹的吸附与解吸特征 赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)

紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响 焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)

4 株外生菌根真菌对 Al³⁺ 吸收与吸附的研究 王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)

长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评估 于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)

北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律 宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)

城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响 吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)

V₂O₅-WO₃/TiO₂ 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英 任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)

基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析 林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)

我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨 江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)

异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响 司友斌, 王娟 (3533)

《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)

西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应

聂燕¹, 王新¹, 王博², 许淑婧³, 高福元¹, 余晔², 夏敦胜^{1*}, 夏昕鸣⁴

(1. 兰州大学资源环境学院, 西部环境教育部重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; 3. 信阳师范学院华锐学院理工系, 信阳 464000; 4. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

摘要: 以甘肃省白银市为研究区域, 系统采集 43 个城区街道尘埃样品, 并对其进行环境磁学和重金属元素特征分析。结果表明, 白银市街道尘埃磁性特征以低矫顽力的磁铁矿和磁赤铁矿为主导, 磁晶体粒径为较粗的假单畴(PSD)和多畴(MD)颗粒; 样品低频磁化率(χ_{lf})变化范围为(43.75 ~ 1 340.08) $\times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $245.98 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, 与国内综合型大城市相比, 白银市街道尘埃磁性矿物含量相对较低, 但呈现明显的空间分布差异, 表现为工业区高于带状交通区, 带状交通区高于商业区, 新城区磁性矿物含量较低; 白银市各功能区污染源相对单一, 工业污染对强磁性矿物的贡献占主导, 污染程度空间分异显著。白银市街道尘埃样品中 Cu、Pb、Zn 整体含量较高, 污染负荷指数(PLI)与低频磁化率(χ_{lf})、非磁滞剩磁化率(χ_{ARM})、饱和等温剩磁(SIRM)、“软”剩磁(SOFT)相关性较高, 且空间变化特征较为一致, 表明反映磁性矿物含量的参数可以有效监测城市重金属污染, 进而圈定重金属综合污染区域和范围, 为进一步的城市污染治理工作提供快速有效的证据支持。

关键词: 街道尘埃; 环境磁学; 重金属; 污染负荷指数; 白银市

中图分类号: X169; X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3438-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.09.040

Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China

NIE Yan¹, WANG Xin¹, WANG Bo², XU Shu-jing³, GAO Fu-yuan¹, YU Ye², XIA Dun-sheng^{1*}, XIA XIN-ming⁴

(1. Key Laboratory of Western China's Environmental Systems (Ministry of Education), College of Earth and Environment Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Department of Science and Engineering, Xinyang Normal University Huarui College, Xinyang 464000, China; 4. College of Earth and Environment Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Magnetic characteristics and heavy metal properties of 43 street dust samples collected from Baiyin City, northwest of China were systematically analyzed. The results revealed that the main magnetic minerals were low-coercivity magnetite and maghemite with coarse pseudo single domain (PSD) and multi-domain (MD) in magnetic grain size. Compared with the domestic comprehensive cities, low frequency magnetic susceptibility(χ_{lf}) value of street dust samples in Binyin varied from $43.75 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ to $1\,340.08 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ with the average value of $245.98 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$, the magnetic mineral content in street dust samples of Binyin was low relatively, but it varied among distinct districts with industrial district was the highest and the stripe traffic area was more higher than those of other regions (commercial district, new district). Different functional zones of Baiyin had a single pollution source relatively. Additionally, the contribution to strong magnetic minerals was predominated by industrial pollution and the distribution of pollution degrees in Binyin showed a significant spatial difference. Concentrations of heavy metals (Cu, Pb, Zn) were generally high in Baiyin street dust. The significantly positive correlation between magnetic parameters (χ_{lf} , χ_{ARM} , SIRM, SOFT) and pollution load index (PLI) and their consistent spatial characteristics confirm that magnetic concentration parameters can effectively monitor urban heavy metals pollution and determine the bounds and areas of pollution, providing a valuable tool for further urban pollution control.

Key words: street dust; environmental magnetism; heavy metal; pollution load index; Baiyin City

城市街道尘埃是人类和自然共同作用形成的一种复杂的环境介质, 是污染物在城市环境中传播的重要媒介和载体^[1], 同时也是室内灰尘和城市大气颗粒物的重要来源^[2,3]。受人类生产、生活活动的影响, 街道尘埃本身富含或吸附着大量由工业生产、交通运输、城市建设等产生的有害重金属元素 (Cu、Pb、Zn 等)。首先, 附着重金属的街道尘埃可通过呼吸吸入、手-口摄入和皮肤接触这 3 种途径进入

人体, 进而引起各种疾病, 对人体健康造成损害^[4-6]; 其次, 街道尘埃在降水冲刷作用下进入土壤、水体环境中, 所携带的有害物质富集以致循环污染^[7,8], 严重威胁城市生态系统平衡; 再者, 街道

收稿日期: 2014-12-31; 修订日期: 2015-04-15

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项 (lzujbky-2013-m03, lzujbky-2015-225)

作者简介: 聂燕 (1989 ~), 女, 硕士, 主要研究方向为城市污染与环境磁学, E-mail: niey13@lzu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: dsxia@lzu.edu.cn

尘埃很难在一定的位罝长时间堆积,易再次悬浮到大气气溶胶中而产生二次污染^[9~11].因此,对城市街道尘埃污染特征的研究具有重要意义.

目前,国内外学者就街道尘埃重金属含量、来源、空间分布特征以及迁移转化规律等方面开展了广泛研究,取得了许多值得借鉴的成果^[12~18].然而,传统的化学分析方法周期长、费用高,难以进行大范围布点,而环境磁学技术凭借灵敏度高、简单快速、对样品无破坏性、费用低和样品用量少等特点,已逐渐成为除化学以外又一极具潜力的城市污染监测手段^[19].近年来环境磁学发展十分迅速,有研究表明^[20~23],交通、工业生产等人类活动中释放的磁性颗粒物往往伴随着重金属的共生和富集,使得磁学参数定量评价城市污染程度成为可能.例如,Wang等^[24]建立了兰州市、嘉峪关市表土重金属污染的磁学定量标准^[25],Zhang等^[26]则建立了钢铁厂周边河流沉积物重金属污染的磁学定量指标.由此可见,环境磁学在城市重金属污染监测领域具有十分广阔的发展前景.

然而,前人的研究对象多为综合型城市,城市污染类型多以工业和交通污染为主导,而对于污染类型相对较为单一的工矿型城市的研究则较少涉及.甘肃省白银市是我国西北地区重要的有色金属冶炼基地之一,长期以来Cu、Pb、Zn金属的开采冶炼和化工生产造成的重金属污染已成为白银市主要的环境问题^[27,28].许多学者对白银市农田土壤^[29],冶炼厂、尾矿坝周围土壤^[27],东大沟水体沉积物和附近土壤^[30,31],工业区、生活区水样^[32]以及白银市大气

颗粒 $PM_{2.5}$ ^[33]等不同环境介质的重金属污染特征开展了系统研究,但是对白银市街道尘埃化学性质及磁性特征,以及磁学参数与重金属之间关系的研究尚未见报道,为此本文选取白银市街道尘埃为研究对象,通过环境磁学手段和重金属特征相结合,探寻白银市磁学参数和重金属的空间分布特征以及二者间的内在联系,进而探讨磁学参数对西北地区典型工矿型城市重金属污染的指示性意义.

1 材料与方法

1.1 样品采集

白银市位于甘肃省中部,地处黄河上游,介于黄土高原和腾格里沙漠之间的过渡地带.白银市海拔在1 275~3 321 m之间,气候干旱少雨,光照充足,年均气温6~9℃,年降水量180~450 mm,多集中在7、8、9这3个月,占全年降水量的60%以上,年蒸发量1 500~1 600 mm.白银区常年盛行风向为偏北风,属东南季风气候西北部边缘区.白银市东部是老城区,工矿企业和商业中心集中分布于此,厂房密集的工业区中分布有西北铅锌冶炼厂、铜冶炼厂等众多工厂;西部为白银市新城,南部109国道穿城而过.

本研究选取白银城区主要街道为重点研究区域,于2013年3月选择晴朗干燥、连续无雨的天气收集街道尘埃样品.在研究区内,按照沿街道网格布点与实际情况相结合的原则,共设置43个样点(图1),样点间距约1 km,每处采点面积为4~5 m²,根据样点尘埃量适当调整采样面积,用塑料簸

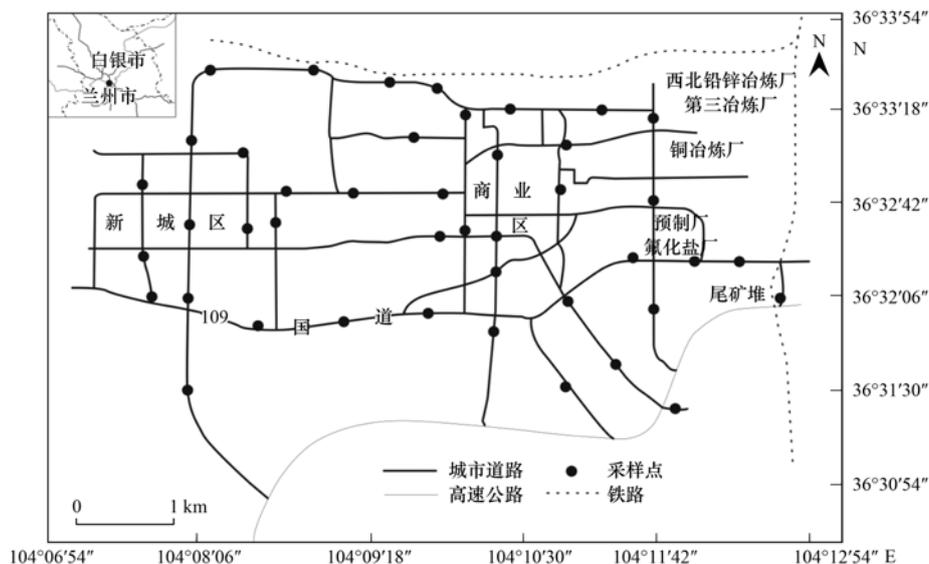


图1 白银市街道尘埃采样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites of street dust in Baiyin City

箕和毛刷收集样品,装入自封袋现场密封保存,并标注样品号。在采样期间,各采样点均用全球定位系统(GPS)定位,记录每个采样点的经度和纬度,并记录采样点周围的环境特征,以便后期分析。

1.2 实验方法

街道尘埃样品在实验室内自然风干后,过1 mm 尼龙筛以剔除杂物、杂石、树叶和其他废料,然后称取6 g左右的样品,用保鲜膜包紧装入8 cm³ 正方体磁学专用样品盒中压实并密封。本研究对所有样品进行以下磁学参数的系统测量:①低频(470 Hz)磁化率(χ_{lf})和 高频(4700Hz)磁化率(χ_{hf})使用英国 Bartington 公司生产的 MS2 型磁化率仪测定,并计算百分频率磁化率 $\chi_{fd} \% = (\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf} \times 100\%$; ②非磁滞剩磁(ARM)的测量用美国 2G Enterprises 公司生产的 2G-755R U-channel 超导磁力仪测量,将 ARM 除以施加的直流场获得非磁滞磁化率(χ_{ARM}),并计算 χ_{ARM} / χ_{lf} 比值; ③等温剩磁(IRM)和饱和等温剩磁(SIRM)使用 Molspin 生产的 MMPM10 脉冲磁化仪和 Minispin 旋转磁力仪测定。首先获得的 1T 磁场下的等温剩磁称为饱和等温剩磁,并测得反向磁场中的等温剩磁 IRM(包括 -20、-60、-100 和 -300 mT),根据上述测量结果可计算获得硬剩磁 $HIRM = [(SIRM + IRM_{-300mT}) / 2] / mass$ 和“软”剩磁 $SOFT = [(SIRM - IRM_{-20mT}) / 2] / mass$ (式中 mass 代表质量),以及比值参数 HARD%、SOFT%、 $\chi_{ARM} / SIRM$ 和 S_{-ratio} (在 300mT 的反向磁场下获得的等温剩磁为 IRM_{-300mT} , 比值 $-IRM_{-300mT} / SIRM$ 为 S_{-ratio}),剩磁矫顽力 B_{cr} 由线性内插获得。

样品风干、过筛后,在 X-荧光预处理实验室把样品磨细,取 4~4.5 g 压片成饼状,并标记样品号,用荷兰 PA Nalytical B. V 公司生产的 Magix (PW2403) X-射线荧光光谱仪对样品化学元素进行测量,选取 Cu、Pb、Zn 和 Fe 这 4 种重金属元素进行分析,磁学参数和化学元素测量均在兰州大学西部环境教育部重点实验室完成。

2 结果与分析

2.1 磁性矿物浓度

在室温条件下,磁化率大致反映样品中亚铁磁性矿物的富集程度^[34,35]。由表 1 可以看出,研究区街道尘埃样品 χ_{lf} 变化范围为 (43.75 ~ 1 340.08) $\times 10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1}$, 平均值为 $245.98 \times 10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1}$, χ_{lf} 值总体较高,同时变异系数达到 1.01。表明样品中磁性矿物含量较高,离散程度高,变化范围大,空间

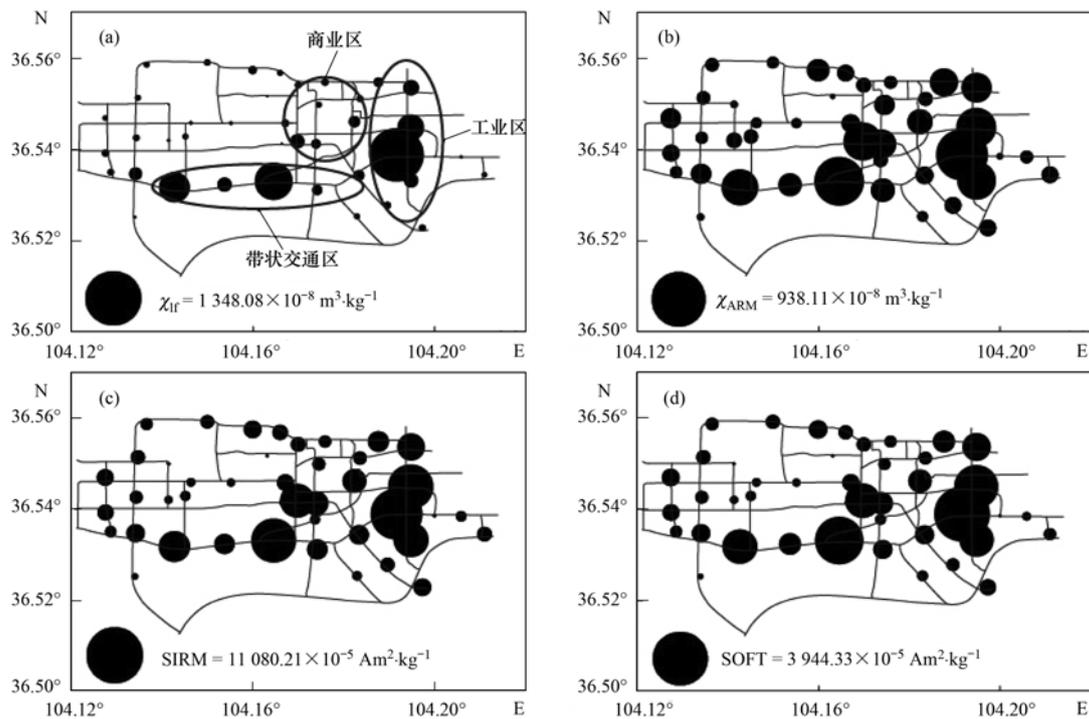
分布不均匀。在空间分布上[图 2(a)],白银市存在 3 个磁化率高值区域,分别为:以白银有色金属公司三大冶炼厂为中心的工业区,109 国道沿线的带状交通干线区域,以四龙路百货、百诚市场、会场中心电影院和益民自选市场为核心的商业区。3 个 χ_{lf} 高值区相对而言:工业区高于带状交通区,带状交通区高于商业区。新城区为 χ_{lf} 值低值区。 χ_{lf} 值总体表现为市区东部和南部高,西部和北部较低。

χ_{ARM} 、SIRM、SOFT 与 χ_{lf} 一样,主要反映磁性矿物含量的多少。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全反铁磁性矿物所贡献。“软”剩磁 SOFT 主要反映亚铁磁性矿物的含量^[36], χ_{ARM} 主要指示亚铁磁性和不完全反铁磁性矿物的浓度,对单畴(SD)颗粒和细粒级假单畴(PSD)颗粒较为敏感^[32]。由表 1 可看出, χ_{ARM} 均值为 $361.10 \times 10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1}$, 范围在 (90.82 ~ 938.10) $\times 10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1}$ 之间; SIRM 均值为 $3 768.10 \times 10^{-5} Am^2 \cdot kg^{-1}$, 范围在 (815.11 ~ 11 080.21) $\times 10^{-5} Am^2 \cdot kg^{-1}$ 之间; SOFT 均值为 $1 258.94 \times 10^{-5} Am^2 \cdot kg^{-1}$, 范围在 (252.45 ~ 3 944.33) $\times 10^{-8} m^3 \cdot kg^{-1}$ 之间。 χ_{ARM} 、SIRM、SOFT 这 3 个参数值变化范围较广,变异系数较大,分别是 0.57、0.63、0.66,表明三者数值变化幅度大,空间分布差异明显。进而由图 2(b)、图 2(c)、图 2(d)可知, χ_{ARM} 、SIRM、SOFT 这 3 个参数在空间分布上显示出与 χ_{lf} 一致的特征。说明表示磁性矿物含量的参数,特别是反映样品中亚铁磁性矿物含量的参数基本呈现一致的空间变化规律。

2.2 磁性矿物类型

SOFT 与 HIRM 的相对含量可以用于指示亚铁磁性矿物与反铁磁性矿物的相对含量。表 1 中,样品的 SOFT 平均值为 $1 258.94 \times 10^{-5} Am^2 \cdot kg^{-1}$, 远远高于 HIRM 平均值 ($92.99 \times 10^{-5} Am^2 \cdot kg^{-1}$), 同时,指示亚铁磁性矿物相对含量的 SOFT% 平均值 (32.87%) 是指示反铁磁性矿物相对含量的 HARD% 平均值 (2.93%) 的 11 倍多,表明亚铁磁性矿物主导着样品的磁性特征,同时样品中也含有少量的反铁磁性矿物。

S_{-ratio} 值表示高矫顽力磁性矿物(如赤铁矿)和低矫顽力磁性矿物(如磁铁矿和磁赤铁矿)的相对含量,可指示磁性矿物的种类。对于铁磁性物质, S_{-ratio} 值接近于 1,而随着反铁磁性矿物的增加, S_{-ratio} 值减小^[37]。表 1 中,样品 S_{-ratio} 最高值达到 0.97,平均值为 0.94,变异系数只有 0.03,样品在 300mT 磁



黑点的大小代表对应参数值的大小

图2 白银城区街道尘埃基本磁学参数空间分布

Fig. 2 Spatial variation of magnetic parameters of street dust in Baiyin

表1 白银城区街道尘埃基本磁学参数统计特征

Table 1 Magnetic parameters values of street dust in Baiyin

磁学参数	范围	平均值	标准差	变异系数
$\chi_{lf} \times 10^{-8} / \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	43.75 ~ 1340.08	245.98	248.82	1.01
$\chi_{fd} / \%$	0.24 ~ 3.01	1.22	0.67	0.55
$\chi_{ARM} \times 10^{-8} / \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	90.82 ~ 938.10	361.10	205.45	0.57
$\text{SIRM} \times 10^{-5} / \text{Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$	815.11 ~ 11080.21	3768.10	2363.63	0.63
χ_{ARM} / χ_{lf}	0.70 ~ 2.90	1.80	0.50	0.28
$\chi_{ARM} / \text{SIRM} \times 10^{-3} / \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$	0.08 ~ 0.15	0.10	0.01	0.17
B_{cr} / mT	32.24 ~ 44.13	37.65	2.70	0.07
$\text{SOFT} \times 10^{-5} / \text{Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$	252.45 ~ 3944.33	1258.94	837.92	0.66
$\text{HIRM} \times 10^{-5} / \text{Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$	37.56 ~ 216.49	92.99	41.40	0.45
$\text{SOFT} \% / \%$	28.07 ~ 36.90	32.87	2.31	0.07
$\text{HARD} \% / \%$	1.30 ~ 7.00	2.93	1.30	0.44
$S_{\text{-ratio}}$	0.86 ~ 0.97	0.94	0.03	0.03

场下,获得的等温剩磁基本上都达到了饱和值的90%,表明低矫顽力的磁铁矿和磁赤铁矿是样品剩磁的主要载体,而样品在300mT并未达到饱和,指示其中可能含有赤铁矿等高矫顽力磁性矿物.具有刚玉结构的矿物,如赤铁矿,其剩磁矫顽力 B_{cr} 大约为0.2T,具有尖晶石结构的矿物,如磁铁矿,其剩磁矫顽力 B_{cr} 均小于50mT^[38].白银市街道尘埃样品的剩磁矫顽力 B_{cr} 在32.24~44.13mT间波动,均值为37.65mT,总体较低,进一步说明低矫顽力的磁铁矿主导了样品的磁性特征.

2.3 磁性矿物粒径

$\chi_{fd} \%$ 指示当测量场频率增加时磁化率增减的百分数,由于超顺磁性和单畴(SP/SD)界限附近的亚微磁性颗粒的磁化率取决于外场的频率,所以 $\chi_{fd} \%$ 可用来估计样品中是否存在超顺磁性颗粒^[35].表1中,研究区样品的 $\chi_{fd} \%$ 值变化范围在0.24%~3.01%之间,平均值仅1.22%,最大值低于5%,表明样品中细黏滞性SP颗粒的含量很低或几乎不含SP颗粒.

χ_{ARM} 主要依赖单畴亚铁磁性矿物的存在,而 χ_{lf}

取决于所有磁畴状态亚铁磁性矿物的含量,因此 χ_{ARM}/χ_{IF} 通常随磁晶粒度的增加而减少^[39]; χ_{ARM} 和 SIRM 同为剩磁参数,不受顺磁性矿物影响,因而 $\chi_{ARM}/SIRM$ 能分辨亚铁磁性矿物的颗粒大小^[40]. 表 1 中, χ_{ARM}/χ_{IF} 在 0.70 ~ 2.90 间变化,平均值为 1.80,变异系数为 0.28; $\chi_{ARM}/SIRM$ 在 $(0.08 \sim 0.15) \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{A}^{-1}$ 间变化,平均值为 $0.10 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{A}^{-1}$,变异系数为 0.17. 这两个比值参数的平均值和变异系数均比较小,表明样品中含有较多粗粒组分的磁性矿物. 白银新城区和商业区样品的 χ_{ARM}/χ_{IF} 均值为 1.92、1.95,相对而言,工业区内样品和 109 国道沿线样品的 χ_{ARM}/χ_{IF} 较低,均值分别为 1.75、1.35. 同时, $\chi_{ARM}/SIRM$ 参数值具有与 $\chi_{ARM}/$

χ_{IF} 参数值较为一致的空间变化特征.

磁性矿物颗粒大小也可用 Dearing 图来判别^[41],如图 3 所示,样品的 $\chi_{fd}\%$ 和 $\chi_{ARM}/SIRM$ 值都落在假单畴(PSD)和多畴(MD)范围内,且 SP 颗粒含量较低,表明样品中磁性矿物的粒度较粗. χ_{IF} 与 χ_{ARM} 的关系图(King 图)也可用来分析磁性矿物颗粒的粒度^[42],结果显示,白银市街道尘埃样品大部分位于 1 ~ 5 μm 范围内,进一步表明样品磁性颗粒以粗磁晶粒径的 PSD 和 MD 颗粒为主导. 有研究表明,工业活动等人类行为产生的磁性颗粒具有强磁性和粗粒度的特性,明显不同于自然成土过程中产生的磁性颗粒^[43],因此,白银市街道尘埃样品中的磁性颗粒很大程度上来源于人类活动.

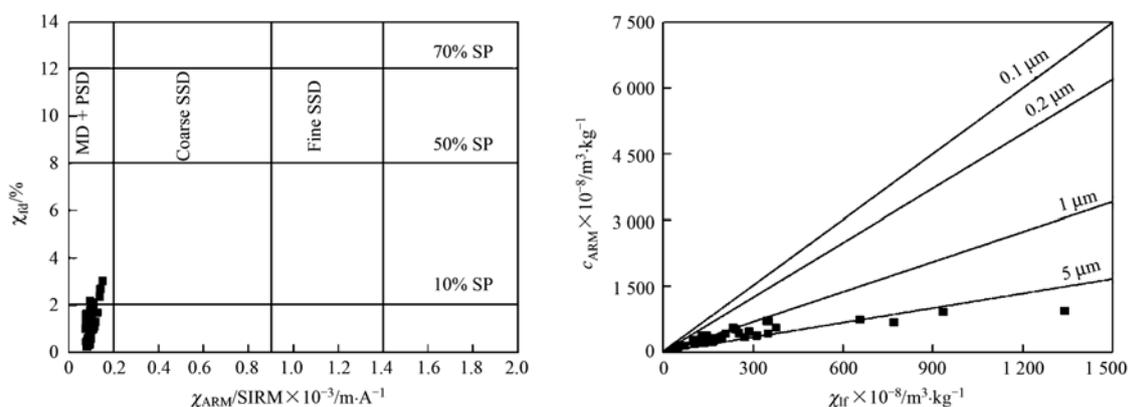


图 3 街道尘埃 Dearing 图和 King 图

Fig. 3 Dearing plot and King plot of street dust in Baiyin

2.4 重金属质量分数与污染评价

表 2 显示,白银市街道尘埃重金属含量总体偏高. Cu、Pb、Zn、Fe 的最高值分别为 $887.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $553.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $3977.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $48.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,是背景值^[44]的 36.84、29.46、58.07 和 1.55 倍,其中 Cu、Pb、Zn 的平均值远高于背景值,Fe 的平均值和背景值相当,表明这 4 种重金属元素存在不同程度的富集,其中 Cu、Pb、Zn 累积趋势极为显著. 此外,Cu、Pb、Zn、Fe 的最大值分别高出最小值 20.50、50.76、39.92 和 2.20 倍,指示重金属元素富集存在明显的空间差异.

为了更好地反映白银市重金属污染程度及其空间变化特征,本研究采用可以反映重金属综合污染情况的污染负荷指数(tomlinson pollution load index, PLI)^[45]对污染程度进行评价. 其公式为:

$$CF = C_{\text{metal}}/C_{\text{baseline}}$$

$$PLI = (CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n)^{1/n}$$

式中,CF 为元素的污染系数, C_{metal} 为样品中元素含量, C_{baseline} 为元素背景值,本研究选取甘肃省 A 层土壤元素背景值作为白银市街道尘埃样品的背景, n 为参与评价的元素个数. PLI 值越高,表示污染越严重.

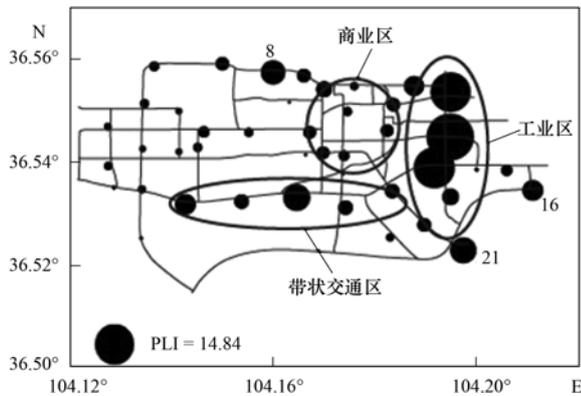
表 2 白银街道尘埃重金属元素质量分数统计

Table 2 Heavy metal content of street dust in Baiyin

项目	Cu / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Pb / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Zn / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Fe / $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$
最小值	41.3	10.7	97.2	15.0
最大值	887.8	553.8	3977.9	48.0
平均值	244.7	87.4	825.2	29.1
甘肃省 A 层 土壤背景值 ^[44]	24.1	18.8	68.5	30.9

图 4 展示了白银市街道尘埃 PLI 空间的分布特征. PLI 值在 1.12 ~ 14.84 间变化,其中工业区样品 PLI 的平均值为 7.24,带状交通区为 5.79,商业区为 3.11,是 PLI 的三大高值区,银西区的 PLI 平均值相对较低,为 2.51. 就污染程度而言,工业区高于带状

交通区,带状交通区高于商业区,新城区较轻. 总体而言,白银市街道尘埃普遍受到重金属污染的影响且空间差异极为显著.



黑点大小代表 PLI 值大小; 数字 8、16、21 分别表示 8、16、21 号样品

图 4 白银街道尘埃污染负荷指数 (PLI) 空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of PLI in street dust of Baiyin City

3 讨论

3.1 白银市街道尘埃磁性特征

由以上分析可以看出,白银市街道尘埃样品磁性矿物含量整体偏高,并且磁性特征以亚铁磁性矿物为主导,低矫顽力的磁铁矿和磁赤铁矿主导了样品的磁性特征,同时样品中也含有少量的反铁磁性矿物. 磁性矿物含量空间分布变异较大,总体表现为白银市东部和南部高,西部和北部较低,其高值主要分布在东部的工业区,南部的 109 国道沿线带状区域以及白银市商业区,白银新城区则为其低值区. 白银市街道尘埃样品的磁晶粒度整体较粗,主要以 PSD 和 MD 颗粒为主,粗粒径颗粒主要分布在白银市工业区和南部的带状交通区. 与国内综合型大城市街道尘埃样品磁性测量结果进行对比可以发现

(表 3),城市街道尘埃样品均具有高磁化率,低百分频率磁化率特征^[46~51],显示出这些城市街道尘埃样品受到不同程度的人为影响. 此外, χ_{lf} 平均值显示白银市街道尘埃样品的磁性矿物浓度总体低于北京、上海、武汉、西安、福州和兰州等综合型大城市,这主要和城市规模,人口密度有密切关系. 北京、上海是全国重要的政治、经济中心,二者的人口规模已在千万以上;武汉、西安、兰州和福州均为所在省的省会城市,随着城市化过程的加快,市区建成面积不断扩大,市区人口数量也在不断攀升. 大规模的工业、商业活动,繁忙的人流车流使得综合型大城市污染状况更加严重.

值得注意的是,白银市街道尘埃样品的 χ_{lf} 值在 $(43.75 \sim 1340.08) \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 间变化,与综合型大城市相比,白银市街道尘埃样品污染的空间分布差异更大,高低值区域性集中分布更加明显. 例如与兰州市污染严重的西固区和城关区相比^[21],白银市东部工业区街道尘埃样品的磁性矿物浓度显著高于前者. χ_{ARM}/SIRM 磁学参数比值可指示磁性矿物颗粒大小,表 3 中,白银市街道尘埃样品的 χ_{ARM}/SIRM 平均值低于国内综合型大城市,表明白银市街道尘埃样品磁性矿物具有更粗的磁晶体粒径. 白银市和北京、上海等城市的街道尘埃样品磁性差异主要体现了矿区城市与国内综合型城市在污染源、污染类型和污染分布上的差异. 综合型大城市工业发达,交通繁忙,污染类型主要是工业污染、交通污染以及二者的叠加,而白银市是中国西部重要的矿产资源城市,铜铅锌铝等有色金属开采、选取和冶炼加工所产生的原矿粉尘和工业粉尘是其主要的污染源,工业污染是其主要的污染类型. 由此可见,与综合型大城市相比,白银市各个功能区污染源相对单一,污染程度空间差异更加显著.

表 3 白银市与其他城市街道尘埃磁学参数对比¹⁾

Table 3 Comparison of magnetic parameter values in street dust of Baiyin and other cities

城市	市辖区建成面积 ^[52] /km ²	市辖区总人口 ^[52] /万人	$\chi_{lf} \times 10^{-8} / \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$		$\chi_{fd} / \%$		$\chi_{ARM} / \text{SIRM} \times 10^{-3} / \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$	
			范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
北京 ^[46]	1186	1187.11	179.00 ~ 1381.00	433.00	0.00 ~ 4.60	1.28	0.05 ~ 0.24	0.15
上海 ^[47]	866	1343.37	34.61 ~ 1035.82	530.11	1.22 ~ 3.55	2.17	0.08 ~ 0.13	0.11
武汉 ^[48]	500	520.65	133.00 ~ 1333.00	470.00	0.41 ~ 4.58	1.08	—	—
西安 ^[49]	327	562.65	234.50 ~ 1026.45	529.81	2.64 ~ 7.06	4.29	0.08 ~ 0.24	0.14
兰州 ^[50]	196	210.36	102.53 ~ 1221.17	442.42	1.15 ~ 7.84	2.23	0.08 ~ 0.65	0.15
福州 ^[51]	220	188.59	42.50 ~ 895.51	269.80	0.00 ~ 2.18	0.73	—	—
白银(本研究)	55	49.98	43.75 ~ 1340.08	245.98	0.24 ~ 3.01	1.22	0.08 ~ 0.15	0.10

1) “—”表示文章中没有相关数据

3.2 白银市街道尘埃磁性矿物来源分析

为了深入探讨本研究区内磁参数和重金属间的

内在联系,对磁参数指标和重金属指标进行标准化后,运用 SPSS 软件进行指标聚类分析和相关性分

析. 图 5 为聚类分析结果, 其中横坐标代表指标间的距离(采用欧几里德距离标准), 距离越近, 两者的相似度越高, 相关性越强^[53]. 图 5 中, 元素 Cu、Pb、Zn、Fe 以及 PLI 与表示磁性矿物粒度的磁学参数 χ_{ARM}/χ_{IF} 、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 、 $\chi_{fd}\%$ 距离较远, 而与表示磁性矿物浓度的磁学参数 χ_{IF} 、 χ_{ARM} 、SIRM、SOFT 之间的距离较近, 且表 4 中它们的相关系数均较高, 其中, PLI 与 χ_{IF} 、 χ_{ARM} 、SIRM、SOFT 的相关系数分别高达 0.728、0.727、0.789、0.771, 表明白银市街道尘埃样品磁性矿物与重金属元素 Cu、Pb、Zn、Fe 存在共生富集关系.

从白银市街道尘埃采样点(图 1)和 PLI 空间分布(图 4)可以看出, 8 号样品点北部是白银市重要的铁路货运线路, 受矿物货运过程中原矿粉尘散落的影响, 沿线区域的 PLI 值偏高. 16 和 21 号样品点位于白银市尾矿堆附近及其下风向区域, 由于尾矿是矿石开采和选矿过程中产生的废矿, 随风扬起的多为原矿粉尘, 因而该区域的重金属污染程度也较重. 由于原矿粉尘并不是化石燃料燃烧产生的, 其强磁性矿物含量较低, 因此这 3 个样品的 χ_{IF} 、 χ_{ARM} 、SIRM、SOFT 值相对不高, 这也表明相对于污染负荷指数 PLI, 磁性矿物含量参数对白银市原矿粉尘所产生的重金属污染指示作用不显著. 从白银市磁学参数空间分布图(图 2)和 PLI 空间分布(图 4)可以看出除了 8、16、21 号这 3 个样品外, 白银市街道尘埃样品的 χ_{IF} 、 χ_{ARM} 、SIRM、SOFT 的高低值区和 PLI 的高低值区分布基本吻合, 三大高值区分别为白银城区东部的工业区, 南部的带状交通区, 中部的

商业区, 而正在开发建设的新城区是主要的低值区域.

由于白银市工业区内存在西北铅锌冶炼厂、白银公司第三冶炼厂、铜冶炼厂以及预制厂和氟化盐厂等众多工厂, 工业燃煤、金属冶炼会产生球状磁性颗粒, 并且伴随 Cu、Pb、Zn、Fe 等金属元素的富集^[54], 因此工业区内街道尘埃样品强磁性矿物和重金属含量均呈现高值. 白银城区南部的 109 国道, 交通繁忙, 车流量较大, 轮胎磨损、汽车尾气等均会产生大量强磁性矿物和 Cu、Pb、Zn 元素, 使道路沿线区域污染较为严重. 相比之下, 新城尚处于开发建设阶段, 工业活动, 商业活动较少, 因而人为污染较轻. 由此可见, 白银市街道尘埃样品的强磁性矿物主要来源于城区东部的工业粉尘排放以及南部的带状交通区域, 表示亚铁磁性矿物含量的磁学参数 χ_{IF} 、 χ_{ARM} 、SIRM、SOFT 能更好地指示白银城区的工业和交通污染状况.

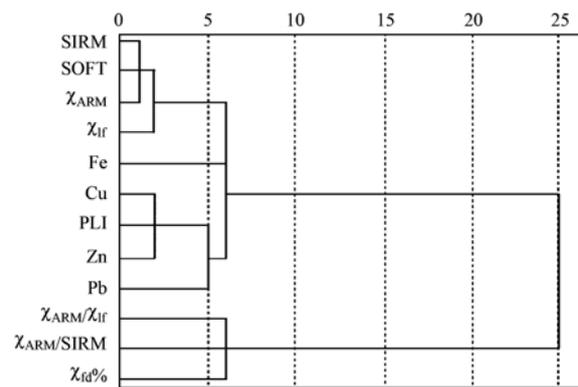


图 5 街道尘埃指标聚类树状

Fig. 5 Cluster analysis of street dust in Baiyin

表 4 磁参数与重金属元素相关分析¹⁾

Table 4 Correlation analysis between magnetic parameters and element contents

	Cu	Pb	Zn	Fe	PLI
χ_{IF}	0.489 **	0.725 **	0.699 **	0.699 **	0.728 **
χ_{ARM}	0.562 **	0.621 **	0.696 **	0.675 **	0.727 **
SIRM	0.620 **	0.696 **	0.735 **	0.703 **	0.789 **
SOFT	0.593 **	0.675 **	0.736 **	0.706 **	0.771 **

1) ** 表示在 0.01 置信度水平下显著相关; 样品数 $n=43$

4 结论

(1) 白银市街道尘埃磁化率总体较高, 磁性矿物以低矫顽力的磁铁矿和磁赤铁矿为主, 磁性矿物为较粗的假单畴和多畴颗粒. 磁性矿物含量的分布呈现出明显的空间差异, 工业区高于带状交通区, 带状交通区高于商业区, 新城磁性矿物含量较低.

(2) 与国内综合型城市相比, 白银市街道尘埃

样品磁性矿物含量相对较低, 但各功能区污染源相对单一, 污染程度空间差异更加显著, 体现了典型工矿型城市的污染特点.

(3) PLI 与磁学参数 χ_{IF} 、 χ_{ARM} 、SIRM、SOFT 高度相关, 空间分布较为一致. 强磁性矿物主要来自于工业污染和交通污染, 其中工业污染占主导地位. 综合运用 χ_{IF} 、 χ_{ARM} 、SIRM、SOFT 磁性矿物含量参数可以有效监测城市重金属污染状况, 圈定城市重

金属综合污染区域和范围.

参考文献:

- [1] Xie S J, 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**(2): 83-92.
- [2] Shu J, Dearing J A, Morse A P, *et al.* Determining the sources of atmospheric particles in Shanghai, China, from magnetic and geochemical properties [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(15): 2615-2625.
- [3] Spassov S, Egli R, Heller F, *et al.* Magnetic quantification of urban pollution sources in atmospheric particulate matter [J]. *Geophysical Journal International*, 2004, **159**(2): 555-564.
- [4] 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.
- [5] Day J P, Hart M, Robinson M S. Lead in urban street dust [J]. *Nature*, 1975, **253**(5490): 343-345.
- [6] 段恒轶, 吴亚涛, 王珏, 等. 北京市幼儿园地面尘中有毒金属浓度及其健康风险[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 3060-3065.
- [7] 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.
- [8] Li Z G, Feng X B, Li G H, *et al.* Distributions, sources and pollution status of 17 trace metal/metalloids in the street dust of a heavily industrialized city of central China [J]. *Environmental Pollution*, 2013, **182**: 408-416.
- [9] 韩力慧, 庄国顺, 孙业乐, 等. 北京大气颗粒物污染本地源与外来源的区分——元素比值 Mg/Al 示踪法估算矿物气溶胶外来源的贡献[J]. *中国科学 B 辑: 化学*, 2005, **35**(3): 237-246.
- [10] 谢绍东, 于森, 姜明. 有机气溶胶的来源与形成研究现状[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(12): 1933-1939.
- [11] 陶俊, 柴发合, 朱李华, 等. 2009 年春季成都城区碳气溶胶污染特征及其来源初探[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(12): 2756-2761.
- [12] 林啸, 刘敏, 侯立军, 等. 上海城市土壤和地表灰尘重金属污染现状及评价[J]. *中国环境科学*, 2007, **27**(5): 613-618.
- [13] 刘春华, 岑况. 北京市街道灰尘的化学成分及其可能来源[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(7): 1181-1188.
- [14] 徐素娟, 郑娜, 刘景双, 等. 有色冶金区街道灰尘中 As 和 Pb 的空间分布特征及其生态风险[J]. *环境科学*, 2011, **32**(5): 1441-1446.
- [15] 陈灿灿, 卢新卫, 王利军, 等. 宝鸡市街道灰尘重金属污染的健康风险评价[J]. *城市环境与城市生态*, 2011, **24**(2): 35-38.
- [16] 闫慧, 陈杰, 肖军. 典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例[J]. *环境科学*, 2013, **34**(10): 4017-4023.
- [17] Li H M, Qian X, Hu W, *et al.* Chemical speciation and human health risk of trace metals in urban street dusts from a metropolitan city, Nanjing, SE China [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **456-457**: 212-221.
- [18] Ram S S, Kumar R V, Chaudhuri P, *et al.* Physico-chemical characterization of street dust and re-suspended dust on plant canopies; An approach for finger printing the urban environment [J]. *Ecological Indicators*, 2014, **36**: 334-338.
- [19] Evans M E, Heller F. *Environmental magnetism* [M]. London: Academic Press, 2003. 1-299.
- [20] Xia D S, Wang B, Yu Y, *et al.* Combination of magnetic parameters and heavy metals to discriminate soil-contamination sources in Yinchuan—a typical oasis city of Northwestern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **485-486**: 83-92.
- [21] 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.
- [22] 王博, 赵爽, 夏敦胜, 等. 兰州市城区河道表层沉积物重金属污染及磁学参数相关关系研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(5): 1430-1440.
- [23] Wang B, Xia D S, Yu Y, *et al.* Detection and differentiation of pollution in urban surface soils using magnetic properties in arid and semi-arid regions of northwestern China [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **184**: 335-346.
- [24] Wang B, Xia D S, Yu Y, *et al.* Magnetic records of heavy metal pollution in urban topsoil in Lanzhou, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(3): 384-395.
- [25] 王博, 夏敦胜, 贾佳, 等. 中国西北地区典型钢铁工业城市表土重金属污染的环境磁学响应[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2013, **43**(3): 962-973.
- [26] Zhang C X, Qiao Q Q, John D A, *et al.* Assessment of heavy metal pollution from a Fe-smelting plant in urban river sediments using environmental magnetic and geochemical methods [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(10): 3057-3070.
- [27] 李小虎, 汤中立. 甘肃省白银市冶炼厂周围土壤中 Cd、Cu、Pb、Zn 的富集分布[J]. *工程勘察*, 2007, (5): 23-27.
- [28] 石培宏, 杨太保, 田庆春, 等. 白银市工业污染源重金属排放特征分析[J]. *中国环境监测*, 2012, **28**(5): 9-15.
- [29] 南忠仁, 李吉均, 张建明, 等. 白银市区土壤作物系统重金属污染分析与防治对策研究[J]. *环境污染与防治*, 2002, **24**(3): 170-173.
- [30] 李小虎, 汤中立, 初凤友. 大型金属矿山不同环境介质中重金属元素化学形态分布特征——以甘肃金昌市和白银市为例[J]. *地质科技情报*, 2008, **27**(4): 95-100.
- [31] 田庆春, 杨太保, 石培宏, 等. 白银市土壤重金属污染源分析及防治措施[J]. *中国环境监测*, 2012, **28**(6): 40-45.
- [32] 李春亮, 刘文辉. 甘肃省白银市区土壤环境质量评价[J]. *物探与化探*, 2012, **36**(6): 1014-1019.
- [33] 贺灵, 曾道明, 周国华, 等. 甘肃白银市大气颗粒物 PM_{2.5} 的地球化学特征研究[J]. *地球与环境*, 2013, **41**(3): 258-265.
- [34] 邓成龙, 刘青松, 潘永信, 等. 中国黄土环境磁学[J]. *第四纪研究*, 2007, **27**(2): 193-209.

- [35] 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.
- [36] 张卫国, 俞立中. 长江口潮滩沉积物的磁学性质及其与粒度的关系[J]. 中国科学 D 辑, 2002, **32**(9): 783-792.
- [37] 潘永信, 朱日祥. 环境磁学研究现状和进展[J]. 地球物理学进展, 1996, **11**(4): 87-99.
- [38] 曲赞. 用于环境研究的磁性参数简介[J]. 地质科技情报, 1994, **13**(2): 98-100.
- [39] 王博, 夏敦胜, 余晔, 等. 典型沙漠绿洲城市表土磁性特征及环境指示意义[J]. 地球物理学报, 2014, **57**(3): 891-905.
- [40] Maher B A. Magnetic properties of some synthetic sub-micron magnetites[J]. Geophysical Journal, 1988, **94**(1): 83-96.
- [41] 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**(3): 727-736.
- [42] King J, Banerjee S K, Marvin J, *et al.* A comparison of different magnetic methods for determining the relative grain size of magnetite in natural materials; some results from lake sediments [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1982, **59**(2): 404-419.
- [43] 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.
- [44] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 329-483.
- [45] Tomlinson D L, Wilson J G, Harris C R, *et al.* Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index [J]. Helgoländer Meeresuntersuchungen, 1980, **33**(1-4): 566-575.
- [46] 郑妍. 北京市区尘土与表土磁性差异及其环境学意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006. 45-46.
- [47] 贾正长. 上海市交通干道尘土与表土磁学性质研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2010. 21-23.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 王冠. 兰州市街道尘埃磁性特征研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2008. 96-98.
- [51] 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.
- [52] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴-2011 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2011. 33-109.
- [53] 沈明洁, 胡守云, Blaha U, 等. 土壤剖面的磁学特征及其对交通污染的指示意义——以北京首都机场高速公路为例 [J]. 第四纪研究, 2007, **27**(6): 1113-1120.
- [54] 胡守云, 段雪梅, 沈明洁, 等. 北京首钢工业区大气重金属污染树叶的磁学响应[J]. 科学通报, 2008, **53**(4): 437-445.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations	XU Jian-hui, JIANG Hong	(3119)
Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon	DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, et al.	(3128)
Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM _{2.5} and Gas-Particle Partitioning in Qingdao	ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, et al.	(3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, et al.	(3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, et al.	(3150)
Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai	WANG Hong-li	(3159)
Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter	CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, et al.	(3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, et al.	(3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, et al.	(3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, et al.	(3194)
Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island	WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, et al.	(3203)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, et al.	(3212)
Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, et al.	(3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, et al.	(3230)
Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China	CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, et al.	(3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, et al.	(3248)
Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment	YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, et al.	(3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, et al.	(3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, et al.	(3269)
Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes	ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, et al.	(3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, et al.	(3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, et al.	(3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, et al.	(3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, et al.	(3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, et al.	(3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggyery Wastewater	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, et al.	(3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, et al.	(3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitro bacteria Community	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, et al.	(3339)
Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation	LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, et al.	(3345)
Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge	LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, et al.	(3352)
Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, et al.	(3358)
Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH ₄ and N ₂ O Emission from Double-Season Rice Paddy Field	FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, et al.	(3365)
Characteristics of N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil	CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, et al.	(3373)
Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau	CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, et al.	(3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, et al.	(3393)
Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia	NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, et al.	(3401)
Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification	HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, et al.	(3411)
Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City	WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, et al.	(3422)
Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, et al.	(3429)
Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China	NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, et al.	(3438)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, et al.	(3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, et al.	(3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, et al.	(3464)
Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil	JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, et al.	(3471)
Al ³⁺ Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, et al.	(3479)
Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China	YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, et al.	(3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, et al.	(3493)
Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables	LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, et al.	(3501)
Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ Catalyst and Activated Carbon	REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, et al.	(3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, et al.	(3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, et al.	(3522)
Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil	SI You-bin, WANG Juan	(3533)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行