

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第9期

Vol.34 No.9

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

利用PUF被动采样技术研究长三角城市群大气中多环芳烃的时空分布及来源	张利飞, 杨文龙, 董亮, 史双昕, 周丽, 张秀蓝, 李玲玲, 钮珊, 黄业茹 (3339)
FTIR对大气颗粒物PM _{2.5} 中硝酸盐的定量分析	刘娜, 魏秀丽, 高闽光, 徐亮, 焦洋, 李胜, 童晶晶, 程已阳 (3347)
福建茫荡山地区春季大气O ₃ 、HONO、HCHO、H ₂ O ₂ 对·OH的贡献率研究	刘昊, 王会祥 (3352)
水体类固醇雌激素污染现状研究进展	都韶婷, 金崇伟, 刘越 (3358)
嘉兴市地表水中兽用抗生素的污染现状调查	闫幸, 余卫娟, 兰亚琼, 李立, 吕升, 叶朝霞, 张永明, 刘锐, 陈吕军 (3368)
上海食用鱼中短链氯化石蜡的污染特征	姜国, 陈来国, 何秋生, 孟祥周, 封永斌, 黄玉妹, 唐才明 (3374)
水体环境内毒素活性的鲎法定量检测及影响因素研究	张灿, 刘文君, 张明露, 田芳, 孙雯, 钱令嘉, 战锐 (3381)
四环素类抗生素对淡水绿藻的毒性作用	徐冬梅, 王艳花, 饶桂维 (3386)
光照对东海典型赤潮藻生长及硝酸还原酶活性的影响	李鸿妹, 石晓勇, 丁雁雁, 唐洪杰 (3391)
围隔实验中浒苔在不同营养盐条件下的生长比较	庞秋婷, 李凤, 刘湘庆, 王江涛 (3398)
长江口及邻近海域浮游植物色素分布与群落结构特征	赖俊翔, 俞志明, 宋秀贤, 韩笑天, 曹西华, 袁涌铨 (3405)
长江中下游湖泊超微型真核藻类遗传多样性研究	李胜男, 史小丽, 谢微微, 龚伊, 孔繁翔 (3416)
峡谷型水源水库的氮、磷季节变化及其来源分析	黄廷林, 秦昌海, 李璇 (3423)
九龙江河流-库区系统沉积物磷特征及其生态学意义	鲁婷, 陈能汪, 陈朱虹, 王龙剑, 吴杰忠 (3430)
氮在高含沙水向人工浅水湖泊补水期间的变化规律	陈友媛, 申宇, 杨世迎 (3437)
石灰石和黄铁矿-石灰石人工湿地净化河水的研究	张菁, 李睿华, 李杰, 胡俊松, 孙茜茜 (3445)
杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究	邵学新, 李文华, 吴明, 杨文英, 蒋科毅, 叶小齐 (3451)
滇池优势挺水植物茭草和芦苇降解过程中DOM释放特征研究	谢理, 杨浩, 渠晓霞, 朱元荣, 鄢元波, 张明礼, 吴丰昌 (3458)
自来水处理工艺对溶解相中全氟化合物残留的影响	张鸿, 陈清武, 王鑫璇, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 刘国卿 (3467)
J市饮用水氯消毒副产物分析及其健康风险评价	李晓玲, 刘锐, 兰亚琼, 余素林, 文晓刚, 陈吕军, 张永明 (3474)
水中硫酸根及溶解氧质量浓度变化对管垢金属元素释放的影响	吴永丽, 石宝友, 孙慧芳, 张枝焕, 顾军农, 王东升 (3480)
重金属捕集剂对水中微量Hg(II)的处理研究	胡运俊, 盛田田, 薛晓芹, 谭丽莎, 徐新华 (3486)
聚合氯化铁-聚(环氧氯丙烷-二甲胺)复合絮凝剂在模拟水处理中的混凝特性研究	刘新新, 杨忠莲, 高宝玉, 王燕, 岳钦艳, 李倩 (3493)
镁铝复合脱色絮凝剂的微观结构形态及絮凝机制	桑义敏, 常雪红, 车越, 谷庆宝 (3502)
钴掺杂铁酸铋活化过硫酸盐降解水中四溴双酚A的研究	欧阳磊, 丁耀彬, 朱丽华, 唐和清, 廖海星 (3507)
以海泡石为载体的双金属多相类芬顿催化剂的制备及表征	宿程远, 李伟光, 刘兴哲, 王恺尧, 王勇 (3513)
氧化还原介体调控亚硝酸盐反硝化特性研究	赵丽君, 马志远, 郭延凯, 席振华, 杜海峰, 刘晓宇, 郭建博 (3520)
缓释碳源滤池用于二级出水的深度脱氮	唐蕾, 李彭, 左剑恶, 袁琳, 李再兴 (3526)
微膨胀对好氧颗粒污泥脱氮过程中N ₂ O产生量的研究	陈丽丽, 高大文 (3532)
Fenton试剂与CPAM联合调理对污泥脱水效果的影响研究	马俊伟, 刘杰伟, 曹芮, 岳东北, 王洪涛 (3538)
高效厌氧氨氧化颗粒污泥的动力学特性	唐崇俭, 熊蕾, 王云燕, 郑平 (3544)
内蒙古温带草原氮沉降的观测研究	张菊, 康荣华, 赵斌, 黄永梅, 叶芝祥, 段雷 (3552)
湘中矿区不同用地类型面源Cd输出负荷的原位实验研究	刘孝利, 曾昭霞, 陈喆, 铁柏清, 陈求稳, 叶长城 (3557)
蠡湖沉积物重金属形态及稳定性研究	王书航, 王雯雯, 姜霞, 宋倩文 (3562)
密云县境内潮河流域土壤重金属分析评价	于洋, 高宏超, 马俊花, 李迎霞, 莫雁, 孔彦鸿 (3572)
西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义	许淑婧, 张英, 余晔, 王博, 夏敦胜 (3578)
复合稳定剂对砷污染土壤的稳定研究	王浩, 潘利祥, 张翔宇, 李萌, 宋宝华 (3587)
湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征	何东, 邱波, 彭尽晖, 彭亮, 胡凌雪, 胡瑶 (3595)
安太堡露天矿复垦地不同人工植被恢复下的土壤酶活性和肥力比较	王翔, 李晋川, 岳建英, 周小梅, 郭春燕, 卢宁, 王宇宏, 杨生权 (3601)
三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响	叶锦韶, 田云, 尹华, 彭辉, 黄捷, 麻榆佳 (3607)
二氯甲烷降解菌 <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13 的分离鉴定及降解特性研究	刘洪霞, 朱润晔, 欧阳杜娟, 庄庆丰, 陈东之, 陈建孟 (3613)
引物选择对污泥微生物多样性分析的影响	徐爱玲, 吴等等, 宋志文, 任杰, 夏岩, 董珊珊, 刘梦 (3620)
钙铝类水滑石衍生复合氧化物的SO ₂ 储存性能研究	曹琳, 王海林, 解强 (3627)
基于转运站满负荷的北京市新东西城区生活垃圾物流优化方案研究	袁京, 李国学, 张红玉, 罗一鸣 (3633)
重金属污染土壤治理与生态修复论坛会议论文	
多证据分析技术在地表重金属污染评价中的应用研究	姜林, 钟茂生, 朱笑盈, 姚珏君, 夏天翔, 刘辉 (3641)
我国城市不同功能区地表灰尘重金属分布及来源	李晓燕, 刘艳青 (3648)
黄河下游滩区开封段土壤重金属分布特征及其潜在风险评价	张鹏岩, 秦明周, 闫江虹, 胡长慧, 赵亚平 (3654)
青岛北站规划区原场地表层土壤重金属污染研究	朱磊, 贾永刚, 潘玉英 (3663)
某铅蓄电池厂土壤中铅的含量分布特征及生态风险	郑立保, 陈卫平, 焦文涛, 黄锦楼, 魏福祥 (3669)
某铅冶炼厂对周边土壤质量和人体健康的影响	周小勇, 雷梅, 杨军, 周广东, 郭广慧, 陈同斌, 万小铭, 梁琪, 乔鹏伟 (3675)
某铅蓄电池厂表土不同粒径中铅分布规律研究	岳希, 孙体昌, 黄锦楼 (3679)
原位生物稳定固化技术在铬污染场地治理中的应用研究	张建荣, 李娟, 许伟 (3684)
淋洗剂对多金属污染尾矿土壤的修复效应及技术研究	朱光旭, 郭庆军, 杨俊兴, 张晗芝, 魏荣菲, 王春雨, Marc Peters (3690)
铅蓄电池厂污染土壤中重金属铅的清洗及形态变化分析	任贝, 黄锦楼, 苗明升 (3697)
超声波辅助化学萃取对某工业场地铅污染土壤修复效果研究	王鑫杰, 黄锦楼, 刘志强, 岳希 (3704)
摩擦清洗修复铅污染土壤的参数优化及清洗效率评价	杨雯, 黄锦楼, 彭会清, 李思拓 (3709)
土壤重金属钝化修复剂生物炭对镉的吸附特性研究	郭文娟, 梁学峰, 林大松, 徐应明, 王林, 孙约兵, 秦旭 (3716)
无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究	曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 王琳玲, 陈静 (3722)
《环境科学》征稿简则(3404) 《环境科学》征订启事(3444) 信息(3492, 3551, 3696, 3715)	

西北干旱区黄河沿岸典型工业带表土磁性特征及其环境意义

许淑婧¹, 张英¹, 余晔², 王博¹, 夏敦胜^{1,2*}

(1. 兰州大学西部环境与气候变化研究院, 兰州大学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沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 对西北干旱区黄河沿岸典型工业带中两个工业城市乌海和石嘴山表土样品进行了系统的环境磁学参数的测量, 分析了表土磁性矿物的含量、种类、颗粒大小, 并对其环境指示意义进行研究. 结果表明, 表土的磁性矿物以假单畴-多畴磁铁矿为主. 磁性矿物的浓度和颗粒大小在不同功能区表现出一定的差异, 工业区表土磁性矿物的浓度最高, 颗粒最粗, 农业区次之, 原煤区浓度最低, 颗粒最细. 环境磁学监测手段对于因化石燃料燃烧而造成的污染指示较为敏感, 而对未经燃烧原料的污染指示作用并不显著. χ_{f} 、SIRM、SOFT 是指示城市土壤污染状况的有效指标, 环境磁学方法是监测和评价城市土壤污染状况的一种重要手段.

关键词: 环境磁学; 磁性矿物; 表土; 环境污染; 西北干旱区黄河沿岸

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)09-3578-09

Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance

XU Shu-jing¹, ZHANG Ying¹, YU Ye², WANG Bo¹, XIA Dun-sheng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Western China's Environmental System, Ministry of Education, Research School of Arid Environment & Climate Change, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: We have carried out environmental magnetic investigation on topsoil samples of two industrial cities Wuhai and Shizuishan along the Yellow River in the arid regions in northwest China. The concentration, type, magnetic grain sizes of the magnetic minerals and the environmental significance were discussed. The results showed that the main magnetic grain sizes were multi-domain (MD) and pseudo single domain (PSD). The concentration and grain sizes of magnetic minerals showed differences in different functional zones. In industrial zone, the concentration was higher and the grain size was coarser, while there were obviously fewer and finer magnetic minerals in agricultural zone and raw coal zone. Environmental magnetic measurements were efficient to monitor pollution caused by burned fossil fuel, but were not sensitive to unburned fuel. χ_{f} , SIRM and SOFT were effective indicators to reflect urban soil pollution. Environmental magnetism method was found to be an important way to monitor and evaluate soil pollution in a city.

Key words: environmental magnetism; magnetic minerals; topsoils; environmental pollution; along the Yellow River in arid regions in northwest China

随着工业化和城市化进程的不断加快, 土壤污染问题日益突出, 已引起国内外学者的广泛关注^[1~12]. 土壤是连接有机界与无机界的中心环节, 是地球表层系统中物质与能量迁移和转化的重要环节. 土壤中的污染物质可以通过食物链和其他渠道影响人体健康, 因此其污染问题也越来越引起众多学者的重视^[3~12]. 然而常规的化学分析方法价格昂贵、周期长、效率低, 因此不能得到广泛使用. 而环境磁学方法作为一种新生的环境污染监测手段, 具有简便、快速、经济、灵敏度高、对样品无破坏性、对环境无污染等优点, 为城市地表污染研究提供了一项非常实用有效的方法^[4~19]. 土壤中的磁性矿物主要来源于土壤母质、成土作用以及人类活动. 研

究表明, 人类活动过程中产生的磁性颗粒通过各种方式沉积到地表^[1~3], 对土壤造成了一定程度的污染, 并且主要集中在表层土壤^[4]. 人类活动引起的土壤磁性增强具有高磁化率和低百分频率磁化率的特征^[5], 其特征显著区别于土壤母质和成土作用, 因此磁学方法在监测人类活动造成的土壤污染方面具有独特优势, 对表土磁学性质的研究是指示环境污染的有效手段.

收稿日期: 2012-12-20; 修订日期: 2013-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071125); 中国科学院百人计划项目(290827631); 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-09-0447)

作者简介: 许淑婧(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为城市污染与环境磁学, E-mail: xusj2011@lzu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: dsxia@lzu.edu.cn

目前磁学监测方法已成功运用于土壤^[1~12]、河流沉积物^[13,14]、街道尘埃^[15,16]、大气降尘^[17~19]等多方面研究中。其中,许多学者对我国城市表层土壤磁性特征开展了一定的研究,主要集中在北京^[6]、上海^[7]、杭州^[8]、洛阳^[9]等中国的东部城市,但是对西北地区的研究却相对较少。乌海和石嘴山是西北地区两个典型的工业城市,位于黄河上游,资源利用和城市发展导致黄河过境水质恶化,环境污染严重。本文选取乌海和石嘴山地区表土为研究对象,详细分析了研究区表土在不同土地利用方式下的磁性矿物的含量、种类和粒度特征,并对其差异性进行探讨,同时阐述了表土样品磁学参数的空间变化规律,以期在此基础上为阐明该地区环境污染状况、判断污染物来源提供依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

西北干旱区黄河沿岸地区处于生态脆弱区,是连接我国中东部和西北部的重要纽带,其经济发展对于增加全国能源和原材料的供给具有重要意义^[20],同时,黄河上游沿岸工业带的建立及大规模开发,给当地原本就很脆弱的生态环境带来了巨大压力,对大气环境、水环境、土壤环境等都造成了不同程度的污染^[21],进而影响到中下游城市。

本研究于2011年10月主要沿黄河所流经的宁夏平原和河套平原地区由北向南分3个功能区共采集120个表土样品(图1),采样点均分布在乌海和石嘴山市,其中农业区(农田、草地、戈壁)样品55个,工业区(煤场、钢铁厂、汽车修理厂)样品45个,原煤区(原煤堆场)样品20个。采样土层为表层0~2 cm,采样间距为1~3 km不等。采样范围集中在北纬38°53′0.4″~39°50′55.6″,东经106°14′5.8″~106°55′12.5″之间。同时为保证样品的代表性,每个采样点的土壤分析试样均由多点采集混合而成。采样过程中一律使用塑料工具操作。

1.2 实验方法

表土样品在室内自然风干、研磨、过筛(20目标准分样筛)、称重,用塑料薄膜包紧后装入8 cm³正方体无磁性磁学专用样品盒中压实密封。本研究对所有样品进行了以下磁学参数的系统测定:①低频(470 Hz)磁化率(χ_{lf})和高频(4 700 Hz)磁化率(χ_{hf})使用英国Bartington公司生产的MS2型磁化率仪测定,测定3次求平均值,并计算百分频率磁化率 $\chi_{fd}\% = (\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf} \times 100$;②无磁滞剩磁(ARM,交

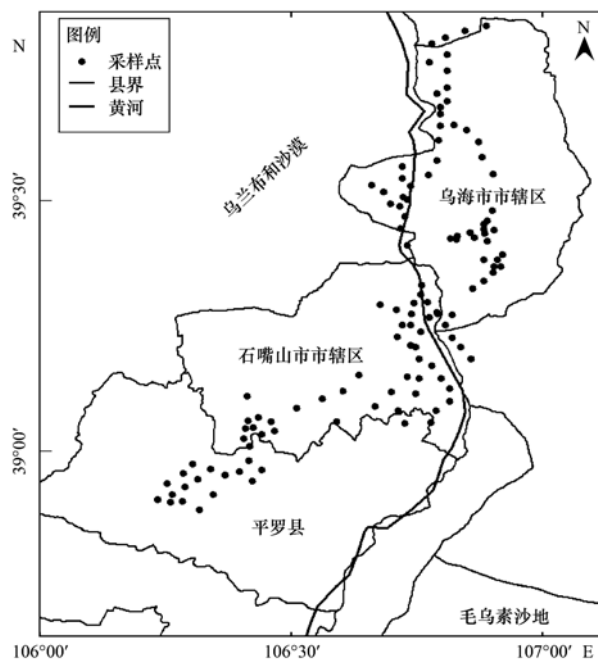


图1 研究区位置示意

Fig. 1 Geographic site of study area

变磁场峰值 100 mT, 直流磁场 100 μ T) 使用捷克 AGICO 公司生产的 LDA-3 型交变退磁仪 (AF demagnetizer) 和英国 Molspin 公司生产的 Minispin 旋转磁力仪测定,并计算无磁滞剩磁磁化率(χ_{ARM});③等温剩磁 (IRM) 和饱和等温剩磁 (SIRM) 使用 Molspin 公司生产的 MMPM10 强磁仪和 Minispin 旋转磁力仪测定,通常设定 1T 的磁场中所获得的等温剩磁为饱和等温剩磁,反向磁场包括 -20、-100 和 -300 mT, IRM_{-20} 、 IRM_{-100} 和 IRM_{-300} 与 SIRM 的比值依次为 S_{-20} 、 S_{-100} 和 S_{-300} ,并计算了软剩磁 $SOFT = [(SIRM - IRM_{-20\text{ mT}}) / 2] / \text{mass}$ 和硬剩磁 $HIRM = [(SIRM + IRM_{-300\text{ mT}}) / 2] / \text{mass}$ (式中 mass 代表质量),剩磁矫顽力 H_{cr} 由线性内插获得;④热磁曲线、磁滞回线使用德国 BRUKER 公司生产的 B-E15f 型 VFTB (variables field transition balance) 可变磁场磁天平测量仪测量。以上实验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 室温磁学参数变化

磁化率表示样品在外界磁场作用下被磁化的难易程度,是对样品整体磁性强弱的反映,一般指示磁性矿物的含量^[22,23]。研究区表土样品 χ_{lf} 变化范围为 $7.75 \times 10^{-8} \sim 1\,617.36 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,平均值为 $135.73 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,与西北地区自然表土相比^[24~26], χ_{lf} 值总体偏高,变化范围较大(表1和图

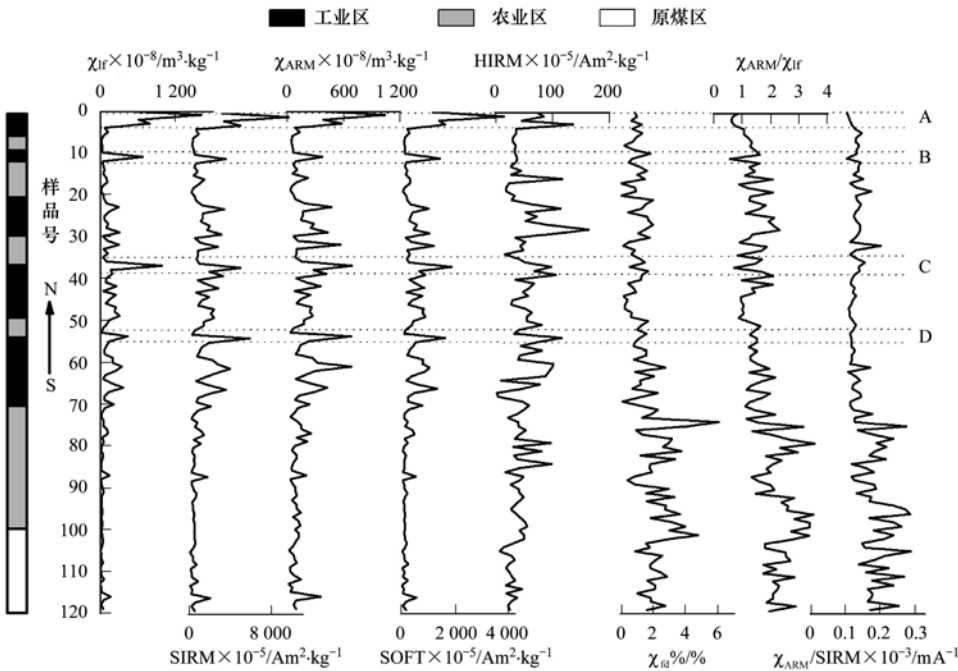
2),表明研究区磁性矿物含量总体较高且分布不均,而且城市土壤的磁性偏强. 在空间上, χ_{lf} 较大的采样点从北向南依次出现在千里山钢厂、鑫鑫煤场、汽车修理厂、石嘴山钢厂附近,值分别为 $1\,617.36 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (2 号样品)、 $685.73 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (12 号样品)、 $989.82 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (38 号样品)、 $449.11 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ (55 号样品),显著高于其他样品,其中千里山钢厂附近 2 号样品的 χ_{lf} 值高出平均值 11 倍之多. 在 3 个不同的功能区中,工业区表土样品的 χ_{lf} 平均值最大,达到

$265.42 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,变化范围为 $54.00 \times 10^{-8} \sim 1\,617.36 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$;农业区表土样品磁化率值较小,平均值为 $64.02 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,变化范围为 $19.27 \times 10^{-8} \sim 307.09 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$;原煤区表土样品磁化率平均值最小,为 $41.10 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,变化范围为 $7.75 \times 10^{-8} \sim 172.60 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$. 表明工业区磁性矿物的浓度最大,原煤区最小.

百分频率磁化率反映超顺磁性颗粒(SP)含量变化,往往指示了成土作用的效应^[22]. 当 $\chi_{fd}\%$ 值小

表 1 表土样品不同功能区环境磁学参数统计特征

磁学参数	农业区(55 个)		工业区(45 个)		原煤区(20 个)	
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
$\chi_{lf} \times 10^{-8} / \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	19.27 ~ 307.09	64.02	54.00 ~ 1 617.36	265.42	7.75 ~ 172.60	41.10
$\chi_{fd} \% / \%$	0 ~ 6.06	1.76	0.12 ~ 2.78	1.10	0.86 ~ 4.78	2.19
$\chi_{ARM} \times 10^{-8} / \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	35.10 ~ 573.90	109.02	82.43 ~ 1 040.35	290.27	17.83 ~ 362.20	90.93
$\text{SIRM} \times 10^{-5} / \text{Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$	230.55 ~ 2 827.93	694.80	649.15 ~ 9 614.41	2 359.08	74.95 ~ 2 077.04	498.82
$S_{-20} \% / \%$	16.59 ~ 42.54	27.42	22.59 ~ 40.80	31.09	21.21 ~ 46.02	27.98
$S_{-100} \% / \%$	52.85 ~ 89.12	75.15	74.49 ~ 92.40	82.98	66.26 ~ 85.59	76.44
$S_{-300} \% / \%$	73.27 ~ 98.47	92.56	90.65 ~ 99.93	96.52	76.60 ~ 98.15	91.84
$\text{SOFT} \times 10^{-5} / \text{Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$	50.99 ~ 1 203.01	200.84	161.25 ~ 3 845.51	763.41	19.72 ~ 561.34	138.85
$\text{HIRM} \times 10^{-5} / \text{Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$	16.12 ~ 118.60	42.86	1.41 ~ 164.53	66.36	7.70 ~ 51.25	29.36
$\text{SOFT} \% / \%$	16.59 ~ 42.54	27.42	22.59 ~ 40.80	31.09	21.21 ~ 46.02	27.98
$\text{HARD} \% / \%$	1.53 ~ 26.73	7.44	0.07 ~ 9.35	3.45	1.85 ~ 23.40	8.24
χ_{ARM} / χ_{lf}	0.81 ~ 3.55	1.87	0.55 ~ 2.32	1.36	1.93 ~ 2.72	2.30
$\chi_{ARM} / \text{SIRM} \times 10^{-3} / \text{mA}^{-1}$	0.11 ~ 0.29	0.16	0.10 ~ 0.17	0.12	0.14 ~ 0.29	0.20



A. 千里山钢厂; B. 鑫鑫煤场; C. 汽车修理厂; D. 石嘴山钢厂

图 2 表土样品环境磁学参数变化

Fig. 2 Variation of magnetic parameters in topsoils

于5%时表明SP颗粒不占主导地位,当 χ_{fd} %值大于6%时,样品中含有较多的SP颗粒,当 χ_{fd} %值大于10%时,样品中含有大量SP颗粒^[23]. 研究区表土样品的 χ_{fd} %值变化范围为0~6.06%,平均值为1.59%(表1和图2). 农业区、工业区、原煤区表土样品 χ_{fd} %平均值分别为1.76%、1.10%、2.19%. 除了处于农业区中的75号样品 χ_{fd} %值大于5%之外其余样品都在5%以下. 以上结果表明表土样品中超顺磁性颗粒的含量很低或几乎不含超顺磁性颗粒.

SIRM、 χ_{ARM} 、SOFT、HIRM等参数和 χ_{lf} 一样,主要反映磁性矿物的浓度. 其中,SIRM不受顺磁性和抗磁性物质的影响,能够指示样品中亚铁磁性矿物和不完全反铁磁性矿物的贡献^[22]; χ_{ARM} 主要反映了单畴(SD)和细粒级假单畴(PSD)颗粒亚铁磁性和不完全反铁磁性矿物的含量^[23]. SOFT是在弱磁场中(20 mT)获得的,一般指示多畴的亚铁磁性矿物的贡献; HIRM是在一个较强的磁场中(300 mT)获得的,一般指示不完全反铁磁性矿物的贡献^[22]. 如图2所示,SIRM、 χ_{ARM} 、SOFT这3个磁学参数的变化在空间上均呈现出与 χ_{lf} 一致的趋势,在千里山钢厂、鑫鑫煤场、汽车修理厂、石嘴山钢厂附近出现峰值. 由表1可知,农业区表土样品SOFT%(SOFT与SIRM的比值)平均值(27.42%)为HARD%(HIRM与SIRM的比值)平均值(7.44%)的3.69倍;工业区表土样品SOFT%平均值(31.09%)为HARD%平均值(3.45%)的9.01倍;原煤区表土样品SOFT%平均值(27.98%)为HARD%平均值(8.24%)的3.4倍. 这表明,3个功能区中样品的磁性特征为亚铁磁性矿物所主导,同时存在不完全反铁磁性矿物的贡献.

χ_{ARM}/χ_{lf} 、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 和 S_{-300} 可以用来识别磁性矿物类型和磁性颗粒大小. 由于 χ_{ARM} 对细颗粒单畴磁性矿物非常敏感,所以 $\chi_{ARM}/SIRM$ 比值越高表明单畴颗粒的比例越高. 当样品中磁性矿物以铁磁矿为主时, χ_{ARM}/χ_{lf} 比值的大小也与颗粒大小呈反比,当样品中磁性矿物为SP颗粒时, χ_{ARM}/χ_{lf} 的解释就变得复杂^[22,23]. 农业区、工业区、原煤区 $\chi_{ARM}/SIRM$ 平均值分别为 0.16×10^{-3} 、 0.12×10^{-3} 、 $0.2 \times 10^{-3} \text{ mA}^{-1}$, χ_{ARM}/χ_{lf} 平均值分别为1.87、1.36、2.30,工业区磁性颗粒大小参数比值最低,原煤区比值最大,表明工业区磁性颗粒最粗,其次为农业区,原煤区磁性颗粒最细. S_{-300} 指示了高矫顽力磁性颗粒和低矫顽力磁性颗粒相对含量的多少,它随着反

铁磁性矿物贡献的增加而下降^[27,28]. 由表1可知,农业区表土样品 S_{-300} 的变化范围为73.27%~98.47%,平均值为92.56%;工业区表土样品 S_{-300} 的变化范围为90.65%~99.93%,平均值为96.52%;原煤区表土样品 S_{-300} 的变化范围为76.60%~98.15%,平均值为91.84%,表明样品中磁性特征以亚铁磁性矿物为主导.

2.2 热磁曲线(J-T曲线)

J-T曲线可以根据样品在加热和冷却过程中磁性物质的变化过程和磁性矿物居里点的不同来识别磁性矿物的种类^[22,29]. 图3所示为典型样品的J-T曲线,从中可以看出,所有样品的冷却曲线均位于加热曲线的上方,表明样品在加热过程中发生弱磁性矿物向强磁性矿物的转变. 所有样品的磁化强度在500~580℃附近迅速下降,并在580℃附近几乎降低到零,与磁铁矿的居里温度一致,表明表土样品中磁性矿物以磁铁矿为主.

3号样品[图3(a)]和62号样品[图3(b)]分别位于千里山钢厂和石嘴山钢厂附近,属于工业区,磁化率值较高. 3号样品的加热曲线和冷却曲线都比较简单,表明磁性矿物种类单一,在磁铁矿居里温度左右磁化强度几乎降低到零,说明磁铁矿为主要载磁矿物. 从62号样品的加热曲线可以看出,300~430℃之间,磁化强度随温度的升高出现了比较显著的磁化强度的降低,可能是亚稳定的磁赤铁矿受热转化为弱磁性的赤铁矿($\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$),磁化强度降低的幅度可能和样品中磁赤铁矿的相对含量和成土作用有关^[30]. 之后,样品在430~460℃之间磁化强度有上升趋势,达到一个峰值,可能是由于含铁硅酸盐矿物或黏土矿物等转化为磁铁矿所造成的^[31,32],随后在460~580℃附近迅速下降,并在580℃附近接近0,表明样品的高温磁学性质受磁铁矿控制^[33]. 33号样品[图3(c)]位于农业区,其加热曲线和冷却曲线也比较简单. 115号样品[图3(d)]位于原煤区,是研究区 χ_{lf} 最低值区,从热磁曲线可以看出,磁化强度随温度的升高在整个过程中表现出了比较缓慢的降低趋势,而且冷却曲线高于加热曲线10倍之多,表明在加热过程中有更多的强磁性矿物生成. 可见,不同功能区样品磁性矿物种类均以磁铁矿为主,不同样品在加热过程中表现出了不同程度的磁性矿物的转化.

2.3 磁滞回线

磁滞回线的高度可以鉴别磁性矿物的种类和浓度,宽度则完全反映磁性矿物的硬度. 虽然饱和磁

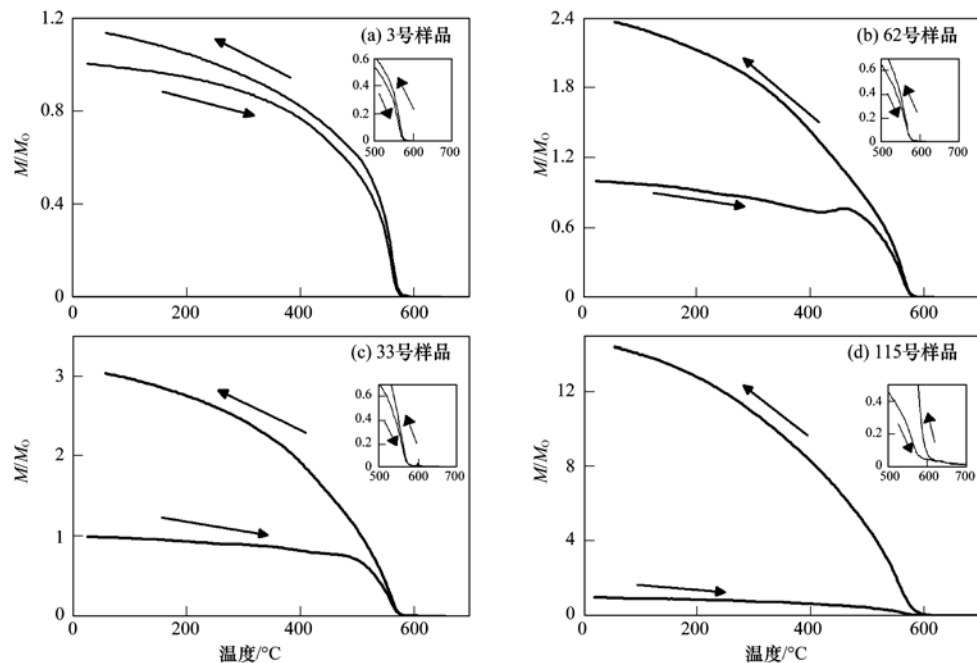


图 3 表土样品热磁曲线
Fig. 3 Thermomagnetic curves of topsoils

化强度和磁性矿物颗粒大小无关,但磁滞回线的形状也能反映磁颗粒大小^[22,23]. 由研究区典型样品磁滞回线(图 4)可知,大部分样品[图 4(a)~4(c)]的磁滞回线狭窄且陡直,说明了低矫顽力的软磁性矿物是主要的载磁矿物^[23]. 所有样品均在 250 mT 左右形成闭合狭窄并且接近饱和状态的磁滞回线,而且 B_{cr} 较低,在 25~42 mT 之间,表明低矫顽力的亚铁磁性

矿物占据主导地位. 部分样品[图 4(d)]在大于 300 mT 以上磁化强度随着外加磁场的增加仍呈现增加的趋势,表明样品中含有一定量的顺磁性矿物.

3 讨论

3.1 表土样品磁性矿物含量和种类分析

表 1 给出的所有磁学参数中, χ_{lf} 、 χ_{ARM} 、SIRM、

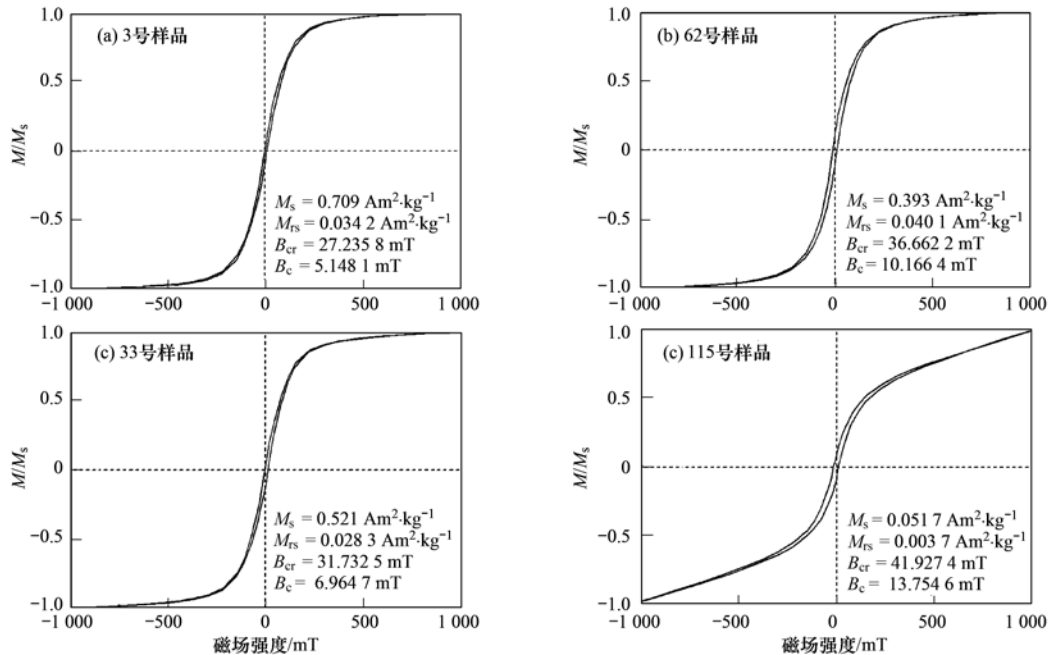


图 4 表土样品磁滞回线
Fig. 4 Magnetic hysteresis loops of topsoils

SOFT、HIRM 等参数主要表征磁性矿物的含量特征, 而 $\chi_{fd\%}$ 、 $SIRM/\chi_{if}$ 、 χ_{ARM}/χ_{if} 、 $\chi_{ARM}/SIRM$ 、 $HARD\%$ 、 S_{-20} 、 S_{-100} 、 S_{-300} 等参数则主要反映样品中磁性矿物的种类和粒度^[22]。

SIRM 不受顺磁性和抗磁性物质的影响, 主要反映亚铁磁性和不完全反铁磁性矿物的贡献。SIRM/ χ_{if} 能够反映磁性矿物类型的变化, 当样品中只有一种磁性矿物存在或只有一种磁性矿物含量占绝对优势时, 即使磁性矿物颗粒大小存在差异, SIRM 与 χ_{if} 散点分布图也将呈一条直线; 如果样品中有多相磁性矿物存在, SIRM 与 χ_{if} 散点分布图线性则比较差^[30]。由图 5(a) 和表 2 可知, 农业区、工业区、原煤区 SIRM 与 χ_{if} 均呈显著相关, 其中原煤区相关性最为显著, 说明样品中顺磁性和抗磁性矿物的贡献

不是很明显, 而是亚铁磁性或反铁磁性矿物中的一种磁性矿物占主导地位。SOFT 反映样品中低矫顽力亚铁磁性矿物的含量, 3 个功能区 SOFT 与 SIRM 的高度相关性[图 5(b) 和表 2] 说明样品的磁学性质主要受亚铁磁性矿物控制。在磁场强度 300 mT 状态下, 3 个功能区样品获得的等温剩磁平均值均达到饱和值的 90% 以上(表 1), 接近饱和, 表明样品主要的剩磁载体是低矫顽力的磁铁矿和磁赤铁矿。样品在 300mT 还没有完全达到饱和, 说明样品中还存在一定的较高矫顽力磁性矿物。但是 3 个功能区样品中 χ_{if} 与 HIRM 相关性均很差[图 5(d) 和表 2], 进一步表明样品中高矫顽力的反铁磁性矿物含量不占主导地位。结合热磁曲线和磁滞回线结果可知, 样品中所含磁性矿物主要为磁铁矿。

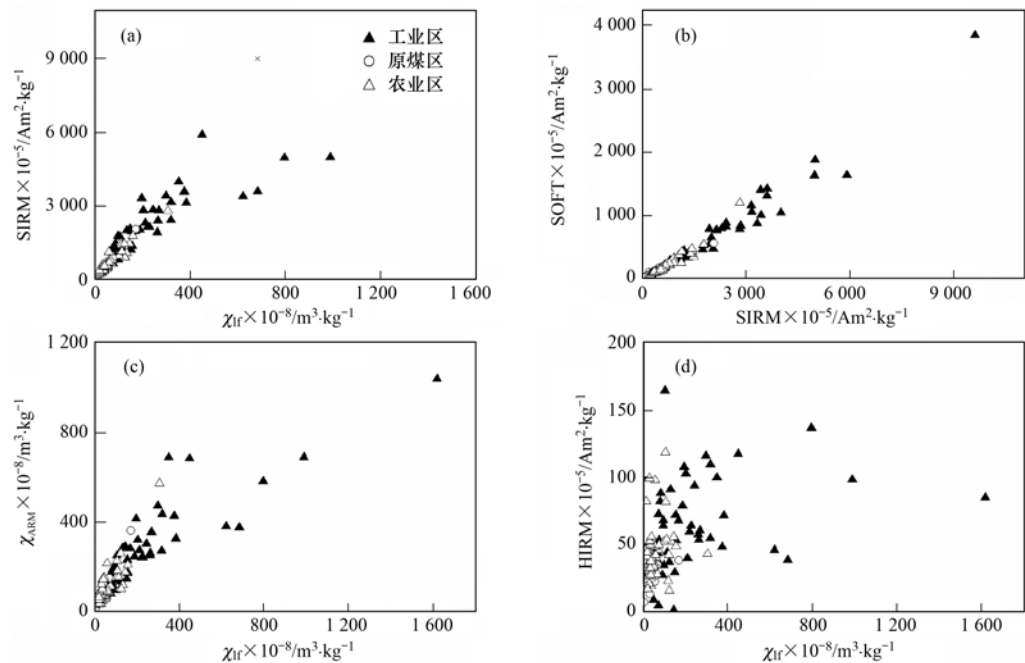


图5 表土样品磁学参数散点图

Fig. 5 Scatter plots of magnetic parameters of topsoils

表2 表土样品磁学参数相关系数(R)¹⁾

Table 2 Correlation coefficient (R) between magnetic parameters of topsoils

功能区	磁学参数			
	$\chi_{if}/SIRM$	$SIRM/SOFT$	χ_{if}/χ_{ARM}	$\chi_{if}/HIRM$
农业区	0.950 7 *	0.962 3 *	0.854 5 *	0.100 0
工业区	0.911 3 *	0.974 2 *	0.863 6 *	0.251 8
原煤区	0.994 7 *	0.984 4 *	0.972 3 *	0.258 2

1) * 表示在 0.001 置信度水平下显著相关

3.2 表土样品磁性矿物粒度特征

表土样品中 $\chi_{ARM}/\chi_{if} < 10$, $\chi_{ARM}/SIRM < 0.5 \times 10^{-3} \text{ mA}^{-1}$ (表 1), 表明亚铁磁性矿物以假单畴和多

畴为主^[34]。在 χ_{if} 与 χ_{ARM} 相关关系图[图 5(c)] 中, 3 个功能区 χ_{if} 和 χ_{ARM} 均呈现比较高的相关性, 反映了单畴颗粒对亚铁磁性矿物也具有一定的贡献。

若主要磁性矿物为磁铁矿时, 磁性矿物的饱和剩磁和饱和磁化强度之比 (M_{rs}/M_s) 与剩磁矫顽力和矫顽力之比 (B_{cr}/B_c) 的关系图 (Day 图) 可以用来确定磁性矿物的粒度^[35]。由图 6(a) 可知, M_{rs}/M_s 和 B_{cr}/B_c 的比值落入 Dunlop^[36] 修订的 Day 图 PSD 和 MD 范围内, 表明样品中亚铁磁性矿物的粒度较粗, 为假单畴和多畴颗粒, 而且原煤区颗粒最细。Dearing 图也通常用来反映磁性矿物的颗粒大

小^[37],通过对比 $\chi_{fd}\%$ 与 $\chi_{ARM}/SIRM$ [图6(b)]可知,样品同样落在 PSD 和 MD 范围内,同时可以看出,农业区和原煤区磁晶粒度明显小于工业区,与根据

Day 图确定的磁性矿物颗粒大小基本一致. 结合 Day 图和 Dearing 图可知,样品中以较粗的 PSD 和 MD 为主,而且工业区最粗,原煤区最细.

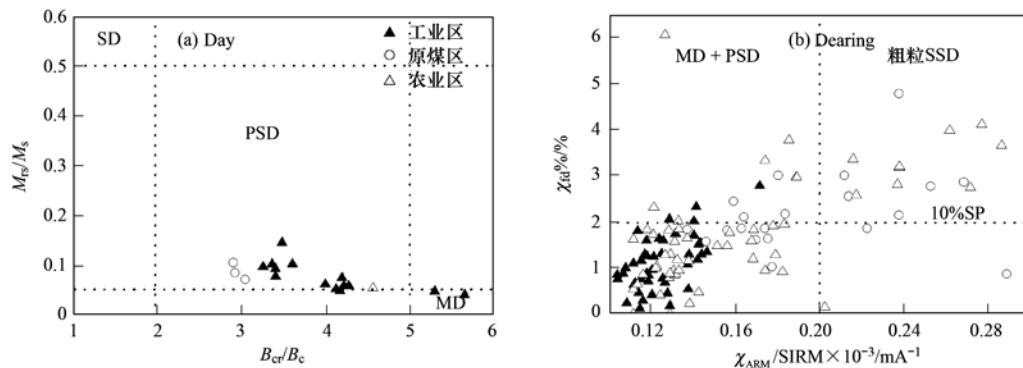


图6 表土样品 Day 图和 Dearing 图

Fig. 6 Day plot and Dearing plot of topsoils

3.3 表土磁学参数空间变化规律及其环境意义

如前所述,工业区表土样品 χ_{lf} 、SIRM、SOFT 平均值总体最高,农业区次之,原煤区最低,农业区和原煤区相差不大.

在人类活动密集的工业区,工业活动对土壤造成了很大程度的污染,常常伴随着磁化率的增加. 现代大气中大部分的磁性小球主要是由于金属冶炼、化石燃料燃烧和钢铁工业生产等人类活动造成的^[22]. 研究还表明,化石燃料的高温燃烧会使所含的黄铁矿转化为球状磁铁矿^[1]. 张卫国等^[38]指出,火力发电厂和粉煤灰堆场附近产生的球形磁性颗粒,是工业污染的产物. 以上磁学分析表明,磁性颗粒物的含量由千里山钢厂、鑫鑫煤场、汽车修理厂、石嘴山钢厂向外逐渐降低,从一定程度上说明污染范围以污染源企业为中心向外扩散. 因此,本研究区工业区表土样品的磁化率高值很大程度上是由于人类活动的影响,钢厂、煤场、汽车修理厂这些污染企业排放的废气、废渣、飞灰等污染物会使周围表土磁性矿物含量升高. 而且,由磁化率与频率磁化率的分布图(图7)来看,磁化率与频率磁化率呈一定程度的负相关,表明表土样品已经受到不同程度的污染,其中工业活动起到了很大作用. 已有研究成果表明,北京^[6]、上海^[7]、洛阳^[9]、兰州^[12]城市表土反映磁性矿物含量的磁学参数均比本区表土大,由此可以看出,虽然工业活动对本区表土造成了污染,但污染程度没有东部城市和兰州严重.

值得注意的是,原煤区分布着一系列的煤场,但是 χ_{lf} 、SIRM、SOFT 值却表现出相对于其他任何地

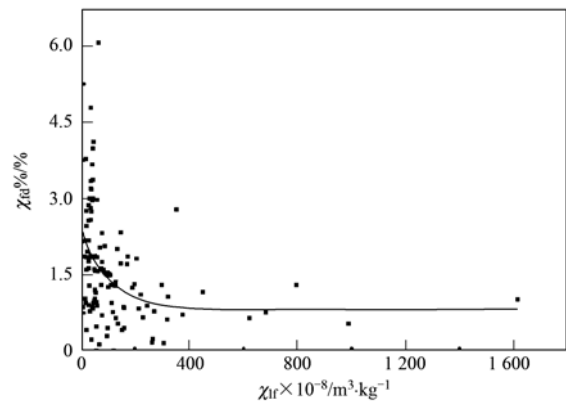


图7 表土样品磁化率和频率磁化率的关系

Fig. 7 Magnetic susceptibility vs frequency-dependent magnetic susceptibility of topsoils

方都明显的低值. 经研究发现,此区域地处石嘴山市“黑三角”区域,工业原料均为未经燃烧的原煤,因此不会引起磁性矿物含量的升高. 而农业区远离工业污染源,受到的污染较小,但是由于农田有可能受到附近污染河流的灌溉作用,污水中的重金属进入农田,而磁性颗粒是重金属的强吸附剂和载体,因此农业区也会受到轻微污染,其 χ_{lf} 、SIRM、SOFT 值会比原煤区有所升高,但差别不大. 进一步证明了,只有工业活动中化石燃料的燃烧才会对磁性矿物含量贡献很大. 再加上研究区范围不大,各个点气候的差异很微弱,因此研究区磁性参数的空间差异反映了工业来源的磁性颗粒物的特征.

低的 χ_{ARM}/χ_{lf} 指示粗的铁磁晶粒,而高的 χ_{ARM}/χ_{lf} 指示了细的晶粒,尤其是单畴颗粒. 张卫国等^[38]通过对长江口潮滩沉积物的环境磁学研究表明,人类活动释放的磁性晶粒具有多畴和假单畴粗粒的特

征。由表 1 可知,3 个功能区中,工业区 $\chi_{\text{ARM}}/\chi_{\text{H}}$ 值和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 值最低,原煤区最高,表明工业区磁性矿物颗粒最粗,原煤区最细。由图 2 可以看出, $\chi_{\text{ARM}}/\chi_{\text{H}}$ 和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 的低值出现在千里山钢厂、鑫鑫煤场、汽车修理厂附近,指示该区域表土磁性矿物颗粒较粗,暗示了附近污染源企业的存在。可见,研究区表土样品不仅磁性矿物含量的空间分布差异显著,并且不同功能区的磁性矿物颗粒大小也存在显著差异。

4 结论

(1)研究区表土环境磁学研究结果指示表土磁化率总体偏高,磁性矿物以磁铁矿为主,假单畴和多畴颗粒主导了磁性矿物的粒度特征。

(2)磁性矿物的浓度和颗粒大小在不同功能区表现出一定的差异,磁参数空间变化明显,工业区表土磁性矿物的浓度最高,颗粒最粗,农业区次之,原煤区浓度最低,颗粒最细。

(3)土壤的磁化率增强主要受控于当地污染源企业的影响,即污染扩散范围以厂区为中心向外扩散。环境磁学监测手段对于因化石燃料燃烧而造成的污染指示较为敏感,而对未经燃烧原料的污染指示作用并不显著。磁学参数 χ_{H} 、SIRM、SOFT 能够有效地监测城市土壤污染状况。

参考文献:

- [1] Flanders P J. Identifying fly ash at a distance from fossil fuel power stations [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(4): 528-532.
- [2] Kapička A, Petrovsky E, Ustjak S, *et al.* Proxy mapping of fly-ash pollution of soils around a coal-burning power plant: A case study in the Czech Republic [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1999, **66**(1-2): 291-297.
- [3] Gautam P, Blaha U, Appel E, *et al.* Environmental magnetic approach towards the quantification of pollution in Kathmandu urban area, Nepal [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2004, **29**(13): 973-984.
- [4] Strzyszczyński Z, Magiera T. Magnetic susceptibility and heavy metals contamination in soils of southern Poland [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1998, **23**(9-10): 1127-1131.
- [5] 旺罗, 刘东生, 吕厚远. 污染土壤的磁化率特征[J]. *科学通报*, 2000, **45**(10): 1091-1093.
- [6] 朱艳明, 郭小蕾, 周力平. 北京地区表土磁性特征及其环境意义[J]. *科学通报*, 2010, **55**(17): 1717-1725.
- [7] Hu X F, Su Y, Ye R, *et al.* Magnetic properties of the urban soils in Shanghai and their environmental implications [J]. *CATENA*, 2007, **70**(3): 428-436.
- [8] Lu S G, Bai S Q. Study on the correlation of magnetic properties and heavy metals content in urban soils of Hangzhou City, China [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2006, **60**(1): 1-12.
- [9] Lu S G, Bai S Q, Xue Q F. Magnetic properties as indicators of heavy metals pollution in urban topsoils: A case study from the city of Luoyang, China [J]. *Geophysical Journal International*, 2007, **171**(2): 568-580.
- [10] 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.
- [11] 琚宜太, 王少怀, 张庆鹏, 等. 福建三明地区被污染土壤的磁学性质及其环境意义[J]. *地球物理学报*, 2004, **47**(2): 282-288.
- [12] 王博, 夏敦胜, 余晔, 等. 兰州城市表层土壤重金属污染的环境磁学记录[J]. *科学通报*, 2012, **57**(32): 3078-3089.
- [13] Zhang C X, Qiao Q Q, Piper J 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Xia D S, Yang L P, Ma J Y, *et al.* Magnetic characteristics of dustfall in urban area of north China and its environmental significance [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, **50**(11): 1724-1732.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 屠晓峰. 黄河中上游地区矿产与水资源及其经济发展的影响[J]. *资源科学*, 1992, (1): 26-30.
- [21] 董锁成, 李雪, 石广义, 等. 宁蒙陕甘沿黄生态经济带建设构想[J]. *地理研究*, 2010, **29**(2): 204-213.
- [22] Thompson R, Oldfield F. *Environmental Magnetism* [M]. London: Allen & Unwin, 1986. 1-127.
- [23] 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.
- [24] 夏敦胜, 魏海涛, 马剑英, 等. 中亚地区现代表土磁学特征及其古环境意义[J]. *第四纪研究*, 2006, **26**(6): 937-946.
- [25] 夏敦胜, 陈发虎, 马剑英, 等. 黄土高原-阿拉善高原典型断面表土磁学特征研究[J]. *第四纪研究*, 2007, **27**(6): 1001-1008.

- [26] 李平原, 刘秀铭, 刘植, 等. 腾格里沙漠边缘表土磁学性质及其意义[J]. 第四纪研究, 2012, **32**(4): 771-776.
- [27] Evans M E, Heller F. Environmental Magnetism: Principles and Applications of Enviromagnetics[M]. Oxford (UK): Academic Press, 2003. 1-229.
- [28] Verosub K L, Roberts A P. Environmental magnetism: Past, present, and future[J]. Journal of Geophysical Research, 1995, **100**(B2): 2175-2192.
- [29] 敖红, 邓成龙. 磁性矿物的磁学鉴别方法回顾[J]. 地球物理学进展, 2007, **22**(2): 432-442.
- [30] 李勇, 李海燕, 白凌燕, 等. 发育于石英岩之上的表土磁学性质及其环境磁学意义[J]. 土壤, 2009, **41**(1): 60-66.
- [31] Deng C L, Zhu R X, Jackson M J, *et al.* Variability of the temperature-dependent susceptibility of the Holocene eolian deposits in the Chinese Loess Plateau: A pedogenesis indicator [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, 2001, **26**(11-12): 873-878.
- [32] Liu Q S, Deng C L, Yu Y, *et al.* Temperature dependence of magnetic susceptibility in an argon environment: implications for pedogenesis of Chinese loess/palaeosols[J]. Geophysical Journal International, 2005, **161**(1): 102-112.
- [33] 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.
- [34] Oldfield F. Toward the discrimination of fine-grained ferrimagnets by magnetic measurements in lake and near-shore marine sediments [J]. Journal of Geophysical Research, 1994, **99**(B5): 9045-9050.
- [35] 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.
- [36] Dunlop D J. Theory and application of the Day plot (M_{rs}/M_s versus H_{cr}/H_c) 1. Theoretical curves and tests using titanomagnetite data [J]. Journal of Geophysical Research, 2002, **107**(B3), doi:10.1029/2001JB000486.
- [37] 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.
- [38] 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.

CONTENTS

PUF Passive Air Sampling of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere of the Yangtze River Delta, China: Spatio-Temporal Distribution and Potential Sources	ZHANG Li-fei, YANG Wen-long, DONG Liang, <i>et al.</i> (3339)
Quantitative Analysis of Nitrate in Atmospheric Particulates PM _{2.5} with Fourier Transform Infrared Spectroscopy	LIU Na, WEI Xiu-li, GAO Min-guang, <i>et al.</i> (3347)
Study on Contribution Factor to Atmospheric ·OH by O ₃ , HONO, HCHO and H ₂ O ₂ in Spring at Mangdang Mountain, Fujian Province	LIU Hao, WANG Hui-xiang (3352)
A Review on Current Situations of Steroid Estrogen in the Water System	DU Shao-ting, JIN Chong-wei, LIU Yue (3358)
A Study on the Veterinary Antibiotics Contamination in Groundwater of Jiaxing	LÜ Xing, YU Wei-juan, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3368)
Contamination Characteristics of Short-Chain Chlorinated Paraffins in Edible Fish of Shanghai	JIANG Guo, CHEN Lai-guo, HE Qiu-sheng, <i>et al.</i> (3374)
Detection of Endotoxin Activity in Water Environment and Analysis of Influence Factors for TAL Assay	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (3381)
Cellular Response of Freshwater Green Algae to the Toxicity of Tetracycline Antibiotics	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, RAO Gui-wei (3386)
Illumination's Effect on the Growth and Nitrate Reductase Activity of Typical Red-Tide Algae in the East China Sea	LI Hong-mei, SHI Xiao-yong, DING Yan-yan, <i>et al.</i> (3391)
Compare the Growth of <i>Enteromorpha prolifera</i> Under Different Nutrient Conditions	PANG Qiu-ting, LI Feng, LIU Xiang-qing, <i>et al.</i> (3398)
Phytoplankton Pigment Patterns and Community Structure in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	LAI Jun-xiang, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, <i>et al.</i> (3405)
Genetic Diversity of Picoeukaryotic Phytoplankton in the Lakes Along the Middle-lower Reaches of the Yangtze River	LI Sheng-nan, SHI Xiao-li, XIE Wei-wei, <i>et al.</i> (3416)
Studies on Seasonal Variation and Sources of Nitrogen and Phosphorus in a Canyon Reservoir Used as Water Source	HUANG Ting-lin, QIN Chang-hai, LI Xuan (3423)
Characteristics of Sediment Phosphorus in the Jiulong River-Reservoir System and Its Ecological Significance	LU Ting, CHEN Neng-wang, CHEN Zhu-hong, <i>et al.</i> (3430)
Variation of Nitrogen During the High Suspended Sediments Concentration Water Supply in an Artificial Shallow Lake	CHEN You-yuan, SHEN Yu, YANG Shi-ying (3437)
Limestone and Pyrite-Limestone Constructed Wetlands for Treating River Water	ZHANG Jing, LI Rui-hua, LI Jie, <i>et al.</i> (3445)
Dynamics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus Storage of Three Dominant Marsh Plants in Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LI Wen-hua, WU Ming, <i>et al.</i> (3451)
Dissolved Organic Matter Release of <i>Zizania caduciflora</i> and <i>Phragmites australis</i> from Lake Dianchi	XIE Li, YANG Hao, QU Xiao-xia, <i>et al.</i> (3458)
Influence of Tap Water Treatment on Perfluorinated Compounds Residue in the Dissolved Phase	ZHANG Hong, CHEN Qing-wu, WANG Xin-xuan, <i>et al.</i> (3467)
Study on Chlorinated Disinfection Byproducts and the Relevant Health Risk in Tap Water of J City	LI Xiao-ling, LIU Rui, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3474)
Effect of the Change in Sulphate and Dissolved Oxygen Mass Concentration on Metal Release in Old Cast Iron Distribution Pipes	WU Yong-li, SHI Bao-you, SUN Hui-fang, <i>et al.</i> (3480)
Research on Low-level Hg(II) Removal from Water by the Heavy Metal Capturing Agent	HU Yun-jun, SHENG Tian-tian, XUE Xiao-qin, <i>et al.</i> (3486)
Coagulation Characteristics of Polyferric Chloride-Poly (Epichlorohydrin-Dimethylamine) Composite Flocculant for Simulated Water Treatment	LIU Xin-xin, YANG Zhong-lian, GAO Bao-yu, <i>et al.</i> (3493)
Microstructure Morphology and Flocculation Mechanism of the Decolorizing Flocculant Poly-aluminum(III)-magnesium(II)-sulfate	SANG Yi-min, CHANG Xue-hong, CHE Yue, <i>et al.</i> (3502)
Efficient Degradation of Tetrabromobisphenol A in Water by Co-doped BiFeO ₃	OUYANG Lei, DING Yao-bin, ZHU Li-hua, <i>et al.</i> (3507)
Preparation Bimetallic Heterogeneous Fenton-Like Catalyst as Sepiolite Supported and Its Surface Chemical Characterization	SU Cheng-yuan, LI Wei-guang, LIU Xing-zhe, <i>et al.</i> (3513)
Nitrite Denitrification Characteristics with Redox Mediator	ZHAO Li-jun, MA Zhi-yuan, GUO Yan-kai, <i>et al.</i> (3520)
Advanced Nitrogen Removal Using Innovative Denitrification Biofilter with Sustained-Release Carbon Source Material	TANG Lei, LI Peng, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (3526)
N ₂ O Production in Nitrogen Removal by Micro-expansion of Granular Sludge	CHEN Li-li, GAO Da-wen (3532)
Sludge Dewaterability with Combined Conditioning Using Fenton's Reagent and CPAM	MA Jun-wei, LIU Jie-wei, CAO Rui, <i>et al.</i> (3538)
Kinetic Characteristics of High-rate ANAMMOX Granules	TANG Chong-jian, XIONG Lei, WANG Yun-yan, <i>et al.</i> (3544)
Monitoring Nitrogen Deposition on Temperate Grassland in Inner Mongolia	ZHANG Ju, KANG Rong-hua, ZHU Xian-xuan, <i>et al.</i> (3552)
Non-Point Loads of Soluble Cadmium by <i>in situ</i> Field Experiment with Different Landuses, in Central Hunan Province Mining Area	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, CHEN Zhe, <i>et al.</i> (3557)
Heavy Metal Speciation and Stability in the Sediment of Lihu Lake	WANG Shu-hang, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3562)
Analysis and Evaluation of Heavy Metals Along the Chaohe River in Miyun County	YU Yang, GAO Hong-chao, MA Jun-hua, <i>et al.</i> (3572)
Magnetic Properties of Topsoils in Typical Industrial Belt Along the Yellow River in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Significance	XU Shu-jing, ZHANG Ying, YU Ye, <i>et al.</i> (3578)
Study on Composite Stabilization of Arsenic (As) Contaminated Soil	WANG Hao, PAN Li-xiang, ZHANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (3587)
Heavy Metal Contents and Enrichment Characteristics of Dominant Plants in a Lead-Zinc Tailings in Xiashuiwan of Hunan Province	HE Dong, QIU Bo, PENG Jin-hui, <i>et al.</i> (3595)
Comparison of Soil Fertility Among Open-pit Mine Reclaimed Lands in Antaibao Regenerated with Different Vegetation Types	WANG Xiang, LI Jin-chuan, YUE Xiang-jing, <i>et al.</i> (3601)
Biodegradation of Triphenyltin and Its Effect on <i>Klebsiella pneumoniae</i>	YE Jin-shao, TIAN Yun, YIN Hua, <i>et al.</i> (3607)
Isolation and Degradation Characteristics of Dichloromethane-Degradation Bacterial Strain by <i>Methylobacterium rhodesianum</i> H13	LIU Hong-xia, ZHU Run-ye, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3613)
Effect of Different Primers on Microbial Community of Activated Sludge	XU Ai-ling, WU Deng-deng, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3620)
Reaction of SO ₂ over CaAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites Samples	CAO Lin, WANG Hai-lin, XIE Qiang (3627)
Optimization for MSW Logistics of New Xicheng and New Dongcheng Districts in Beijing Based on the Maximum Capacity of Transfer Stations	YUAN Jing, Li Guo-xue, ZHANG Hong-yu, LUO Yi-ming <i>et al.</i> (3633)
Application of Multiple Lines of Evidence Analysis Technology in the Assessment of Sites Contaminated by Heavy Metals	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, ZHU Xiao-ying, <i>et al.</i> (3641)
Heavy Metals and Their Sources in Outdoor Settled Dusts in Different Function Areas of Cities	LI Xiao-yan, LIU Yan-qing (3648)
Study on Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Soil Heavy Metals in the Yellow River Beach Region in Kaifeng City	ZHANG Peng-yang, QIN Ming-zhou, YAN Jiang-hong, <i>et al.</i> (3654)
Study on Pollution Evaluation of Heavy Metal in Surface Soil of the Original Site of Qingdao North Station	ZHU Lei, JIA Yong-gang, PAN Yu-ying (3663)
Distribution Characteristics and Ecological Risk of Pb in Soils at a Lead Battery Plant	ZHENG Li-bao, CHEN Wei-ping, JIAO Wei-tao, <i>et al.</i> (3669)
Effect of Lead on Soil Quality and Human Health Around a Lead Smeltery	ZHOU Xiao-yong, LEI Mei, YANG Jun, <i>et al.</i> (3675)
Distribution Characteristics of Lead in Different Particle Size Fractions of Surface Soil of a Lead-acid Battery Factory Contaminated Site	YUE Xi, SUN Ti-chang, HUANG Jin-lou (3679)
Research on the Application of <i>In-situ</i> Biological Stabilization Solidification Technology in Chromium Contaminated Site Management	ZHANG Jian-rong, LI Juan, XU Wei (3684)
Research on the Effect and Technique of Remediation for Multi-Metal Contaminated Tailing Soils	ZHU Guang-xu, GUO Qing-jun, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (3690)
Analysis of Washing Efficiency and Change in Lead Speciation in Lead-contaminated Soil of a Battery Factory	REN Bei, HUANG Jin-lou, MIAO Ming-sheng (3697)
Remediation Efficiency of Lead-Contaminated Soil at an Industrial Site by Ultrasonic-assisted Chemical Extraction	WANG Xin-jie, HUANG Jin-lou, LIU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3704)
Parameters Optimization and Cleaning Efficiency Evaluation of Attrition Scrubbing Remediation of Pb-Contaminated Soil	YANG Wen, HUANG Jin-lou, PENG Hui-qing, <i>et al.</i> (3709)
Adsorption of Cd ²⁺ on Biochar from Aqueous Solution	GUO Wen-juan, LIANG Xue-feng, LIN Da-song, <i>et al.</i> (3716)
Effect of Inorganic Amendments on the Stabilization of Heavy Metals in Contaminated Soils	CAO Meng-hua, ZHU Xi, LIU Huang-cheng, <i>et al.</i> (3722)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2013年9月15日 34卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 9 Sep. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人