

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

**2014**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析 ..... 刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)

1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析 ..... 刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)

瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征 ..... 刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)

上海城区PM<sub>2.5</sub>中有机碳和元素碳变化特征及来源分析 ..... 张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)

亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布 ..... 王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)

无锡市冬季典型天气PM<sub>2.5</sub>中碳组分的污染特征 ..... 云龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)

高炉炼铁工艺细颗粒物PM<sub>2.5</sub>排放特性分析 ..... 范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)

重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究 ..... 祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)

双组分VOCs的催化氧化及动力学分析 ..... 卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)

汽车排放超细颗粒物浓度及粒径谱特征的研究 ..... 陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)

疏勒河上游地表水化学离子特征及其控制因素 ..... 周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)

河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量 ..... 陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)

大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价 ..... 张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)

雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价 ..... 柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)

北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析 ..... 李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖淋 (3352)

黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布 ..... 李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)

合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征 ..... 李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)

基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究 ..... 刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)

杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态 ..... 邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)

基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演 ..... 李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)

天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例 ..... 高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)

利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度 ..... 李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)

Cu<sub>2</sub>O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究 ..... 王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)

不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究 ..... 李欢旋,王金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)

还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸 ..... 周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)

多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较 ..... 宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)

不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究 ..... 金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)

气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响 ..... 李祥,张大林,黄勇,陈宗炬,袁怡 (3449)

微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究 ..... 刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚炜 (3455)

“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究 ..... 吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)

温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析 ..... 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)

污水处理厂尾水细菌群落结构分析 ..... 徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)

沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究 ..... 国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)

内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析 ..... 李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)

基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析 ..... 李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)

S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响 ..... 陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)

影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析 ..... 李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)

河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系 ..... 马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)

*Fontibacter* sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究 ..... 马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)

基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析 ..... 艾建超,王宁,杨净 (3530)

石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究 ..... 杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)

不同施磷量(KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化 ..... 郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)

硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中的形态影响 ..... 杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)

硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响 ..... 刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)

再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响 ..... 龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)

西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次分布特征 ..... 秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)

黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ<sup>13</sup>C值的影响 ..... 杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)

碳底物含量对厌氧条件下水稻土N<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、NO、CO<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>排放的影响 ..... 陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂, Klaus Butterbach-Bahl (3595)

北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM<sub>2.5</sub>能力研究 ..... 梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)

污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响 ..... 刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)

京津冀区域生产和消费CO<sub>2</sub>排放的时空特点分析 ..... 汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)

水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究 ..... 任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)

《环境科学》征稿简则(3279) 《环境科学》征订启事(3545) 信息(3364,3486,3552,3563)

# 石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究

杨涵<sup>1,3,4</sup>, 熊黑钢<sup>2\*</sup>, 陈学刚<sup>3,4</sup>

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 北京联合大学应用文理学院城市系, 北京 100083; 3. 新疆师范大学地理科学与旅游学院, 乌鲁木齐 830054; 4. 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室, 乌鲁木齐 830054)

**摘要:** 以干旱区新兴绿洲城市石河子市为研究区, 采集 80 个(0~10 cm) 表层土壤样品, 运用环境磁学方法, 对土壤磁性矿物的含量、组成和粒度等参数进行了详细测定和分析。结果表明, 石河子市表层土壤磁性特征以亚铁磁性的多畴磁铁矿或磁赤铁矿为主导, 同时伴有少量的不完全反铁磁性矿物; 从空间分布来看, 亚铁磁性矿物含量表现为北部新城区 > 中心城区 > 郊区农用地; 而磁性矿物颗粒粒度大小依次为北部新城区 > 郊区农用地 > 中心城区。磁性矿物的高浓度区与大多数工厂的分布具有一致性; 但重化工业集中区(N1~N7) 却表现为磁性矿物浓度较低, 同时磁性颗粒粒径较大。在研究区内质量磁化( $\chi_{LF}$ )、饱和等温剩磁(SIRM)和软剩磁(SOFT)是指示工业所在区的有效磁性参数指标, 而在化工业集中区需结合磁性粒度参数 $\chi_{FD}\%$ 进行判别。

**关键词:** 环境磁学; 表层土壤; 空间变化; 磁性特征; 石河子市

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3537-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.09.041

## Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City

YANG Han<sup>1,3,4</sup>, XIONG Hei-gang<sup>2</sup>, CHEN Xue-gang<sup>3,4</sup>

(1. College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. College of Applied Arts and Science, Beijing Union University, Beijing 100083, China; 3. College of Geography Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China; 4. Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Urumqi 830054, China)

**Abstract:** The 80 topsoil samples (0-10 cm) are collected from different land use types in built-up areas, northern new town (including chemical concentration area and concentrated residential areas) and suburban agricultural land at Shihezi oasis city in arid zone of Xinjiang, China. The aim of this study is to analysis the magnetic parameters of concentration, composition and particle size of magnetic properties for the urban topsoils, and to describe the spatial distribution under different circumstances of land use. The magnetic grain parameters show that the soils are dominated with coarser multi domain (MD) ferrimagnetic grain. The magnetic mineralogy parameters suggest that samples are dominated by ferrimagnetic minerals corresponding to magnetite-like minerals, but contain a small amount of anti-ferromagnetic material. From the spatial distribution, the concentration of magnetic minerals are ranked in the order of northern new town > built-up areas > suburban agricultural land. Particle size of magnetic minerals are ranked in the order of northern new town > suburban agricultural land > built-up areas. The high concentration of magnetic parameters areas is coincident with factories' area. However, the magnetic concentration in heavy chemical industry region (N1-N7) are low, and particle size of the magnetic particles is larger.  $\chi_{LF}$ , SIRM and SOFT are effective magnetic parameter indexes indicating the light industrial zone of the study area. While, the discrimination in the heavy chemical industry area needs to combine with a magnetic particle parameters ( $\chi_{FD}\%$ ).

**Key words:** environmental magnetic properties; topsoil; spatial variability; magnetic properties; Shihezi City

目前,城市化和工业化对城市乃至区域生态系统的影响,已经成为各国政府面临的重大议题<sup>[1]</sup>。据统计,2011年世界城市化率达到了51.1%,已有一半以上的人口生活在城市,发达国家则高达70%以上,在我国也已达到51.27%<sup>[2,3]</sup>,并且发展中国家城市化趋势仍在继续。虽然全球范围内只有不到2%的地表为城市所覆盖,但80%的工业和生活污染物来源于城市,其中很大一部分污染物直接或间接地进入城市和周边地区的土壤生态系统中<sup>[4]</sup>。这些受污染的土壤与密集的城市人群紧密接触,通过

食物链影响人畜健康,并通过对水体、大气的影 响进而影响城市环境的质量<sup>[5,6]</sup>。工业生产和交通运输等人类活动排放的磁性颗粒物,在沉积过程中往往停留在土壤的表层,因此表土的磁性可以反映较短时期内的污染状况<sup>[7]</sup>。已有研究表明,与自然来

收稿日期: 2014-01-17; 修订日期: 2014-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41161029,41171165); 北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划项目(IDHT20130322); 北京联合大学人才强校计划项目(BPHR2012E01)

作者简介: 杨涵(1980~),女,博士研究生,主要研究方向为城市环境, E-mail: yanghan\_89@sina.com

\* 通讯联系人, E-mail: xhg1956@sohu.com

源的磁性颗粒相比,这些颗粒物具有明显不同的磁学性质,并且可以改变土壤中磁性物质的循环形式和存在状况<sup>[8-10]</sup>。此外,受污染土壤的磁性往往与土壤重金属元素含量有一定的相关性,因此,可以通过分析城市表层土壤环境的磁学特征,来间接监测人类活动对土壤环境污染程度<sup>[11, 12]</sup>。

环境磁学自 20 世纪 80 年代作为一门独立学科形成以来,因其测量方法具有简便、快速、经济,且对样品无损等特点<sup>[13-15]</sup>,已被广泛应用环境污染范围的圈定<sup>[16]</sup>、污染历史重建<sup>[17]</sup>以及典型地区污染<sup>[18]</sup>来源分析等方面。目前在国内外,关于城市环境磁性特征的研究多集中于百年以上的老城<sup>[19-21]</sup>。在新疆对城市环境重金属方面的研究多是应用传统的地球化学方法,且多集中于对乌鲁木齐土壤环境重金属分布及生态风险方面的研究<sup>[22, 23]</sup>。而借用磁学方法对西部新兴绿洲城市的表层土壤,开展磁性特征、空间变化及污染物来源解析研究,尚未见报道。因此,本研究尝试通过磁学手段探讨新疆新兴城市——石河子市不同用地类型背景下的土壤磁学特征及空间变化规律,以期为新兴城市环境质量提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

石河子市是新疆解放以后在戈壁滩上新建的城市,于 1976 年 1 月建市,是新疆生产建设兵团直轄的一个县级市,历史上一度是新疆兵团总部所在地,

目前是农八师实行师市合一管理体制的一个新兴城市。该市位于新疆维吾尔自治区北部,天山北麓中段,准噶尔盆地南缘,东距自治区首府乌鲁木齐 150 km。石河子行政区全部分布在玛纳斯河冲积平原上,该地区地势平坦,自东南向西北倾斜,平均海拔 300~500 m 左右,冬季长而严寒,夏季短而炎热,年平均气温 7.5℃,年平均降水量 213.35 mm,年蒸发量 1 537.5 mm,属典型的温带大陆性气候。

石河子市是天山北坡经济带中部的中心城市,垦区的政治、经济、科技、文化中心。城市的大规模开发始于 1950 年左右新疆建设兵团在马纳斯河流域垦荒,到 2008 年底石河子市城市建成区面积约为 62 km<sup>2</sup>,目前市区人口约 42 万,是目前玛纳斯河流域规模最大、设施最完善的一座新兴绿洲城市。石河子市工业产业结构已从最初以纺织业和食品等为支柱产业转为化工、能源等行业<sup>[24]</sup>,形成了以能源、原材料为主的重型工业结构的资源型产业体系,环境污染也渐趋严重。

### 1.2 样品采集与实验方法

#### 1.2.1 采样点布设及采样方法

研究区主要包括石河子市市区及周边农用地,研究区范围及采样点具体分布如图 1 所示。按用地功能和建城先后将其划分为中心城区(U 采样区)、北部新城(N 采样区)、郊区农用地这 3 个部分(F 采样区)。中心城区为 312 国道以南的城区,市区的经济、文化、行政、交通运输、社会服务、教育文化用地等都集中于此,城区东边和西边分布有主要食

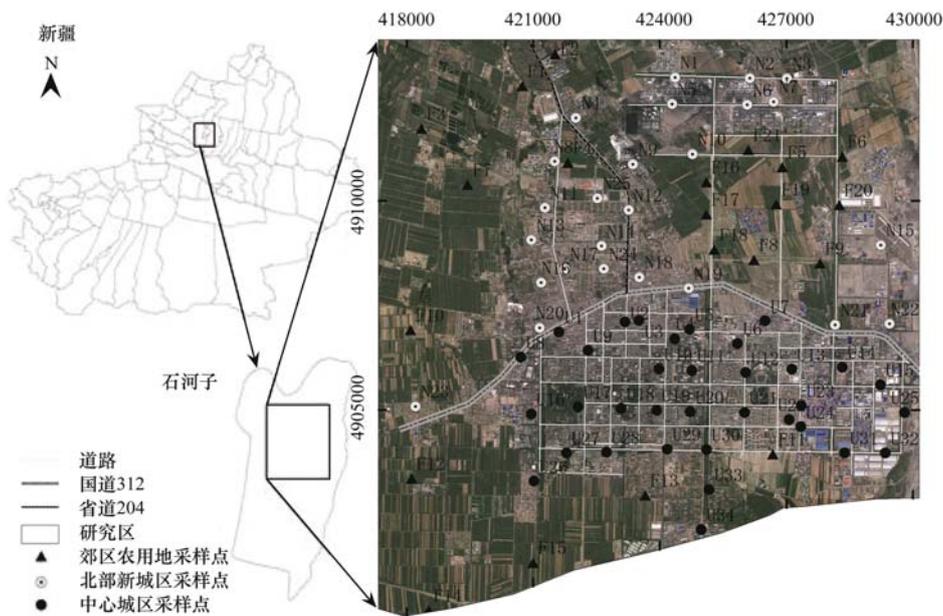


图 1 研究区位置及采样点

Fig. 1 Study area, sampling locations on the image from 2010

品加工业、棉纺加工业、建材业等;北部新城区包括 312 国道以北的经济技术开发区和北部重化工业园区;郊区农用地指分布于城郊及工业区周围的耕地和农村居民点。本次调查采样点的选取依照空间分布的均匀性与实际土壤分布情况相结合的原则。中心城区和北部新城区(U 和 N 采样区)污染源相对较多,采样点以约 1 km × 1 km 进行采样;郊区农用地(F 采样区)污染源较少,采样相对稀疏,以约 2 km × 2 km 进行采样。具体采样点则根据土壤分布状况及可达性进行采样。

2013 年 7 月 29 日 ~ 8 月 4 日采集研究区表层 0 ~ 10 cm 样品,其中 U 采样区 34 个;N 采样区 25 个;F 采样区 21 个,共获取表层土壤样品 80 件供实验分析。每个土样均由约 10 m<sup>2</sup> 以内的 5 个按对角线法采取的土样混合而成,约 0.5 kg,将其装入聚乙烯自封袋中编号,采样过程中对采样点进行 GPS 定位及周围环境状况记录。

### 1.2.2 样品测试与分析

将采回的土样放置干燥通风无灰尘污染的室内自然风干,过 1 mm 尼龙筛,去除枯枝落叶、植物根、残茬等,称重后用塑料保鲜膜包紧装入 10 cm<sup>3</sup> 的磁学专用样品盒内并压实,供测试用。

磁化率采用连接 B 型双频探头的 Bartington MS2 磁化率仪测定,包括低频质量磁化率  $\chi_{LF}$  (0.47kHz) 和高频质量磁化率  $\chi_{HF}$  (4.7kHz),并根据公式  $\chi_{FD} = (\chi_{LF} - \chi_{HF}) / \chi_{LF} \times 100\%$  计算百分频率磁化率  $\chi_{FD}\%$ 。等温剩磁 (IRM) 使用 ASC IM-10 脉冲磁化仪和 Molspin 小旋转磁力仪获得,先用 ASC IM-

10 脉冲磁化仪依次对样品在 20、60、100、300 和 1 000 mT 的场强下磁化,再使用小旋转磁力仪分别测量对应的 IRM,其中 1 000 mT 场强下的 IRM 作为饱和等温剩磁 (SIRM)。然后测量样品在 -20、-60、-100 和 -300 mT 反向磁场下的 IRM。根据上述测量结果分别计算出硬剩磁 [HIRM = (SIRM + IRM<sub>-300</sub>)/2]、软剩磁 [SOFT = (SIRM + IRM<sub>-20</sub>)/2] 以及比值参数  $S_{ratio}$  [ $S_{ratio} = 100 \times (-IRM_{-300} / SIRM)$ ]、SIRM/ $\chi_{LF}$  等磁性比值参数。磁参数具体意义见文献 [25 ~ 27]。以上磁性参数的测定在新疆干旱区湖泊环境与资源自治区重点实验室完成。数据统计分析采用 Excel 2010 软件,制图和计算采用 ArcGIS 9.3 软件完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤磁性矿物含量分析

$\chi_{LF}$  和 SIRM 可以指示样品中磁性矿物的富集程度。在常温下, $\chi_{LF}$  主要反映亚铁磁性矿物(磁铁矿和磁赤铁矿)的总含量,但当铁磁性在样品中含量较低时,受磁性矿物类型和颗粒特征的影响也较显著<sup>[28, 29]</sup>。SIRM 是设定 1T 的脉冲磁场中获得的等温剩磁为饱和等温剩磁,其值大小也反映了样品中磁性矿物含量,与  $\chi_{LF}$  相比,主要反映亚铁磁性和不完全反铁磁性矿物的含量,不受顺磁性和抗磁性矿物的影响<sup>[30]</sup>。

表 1 为石河子市 80 个表层土壤样品的磁学参数测定结果,结果表明:石河子市所有样品的磁化率平均值为  $90.4 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ,最高值是 N12,位于

表 1 土壤磁性参数统计结果

Table 1 Summary statistics of the magnetic parameters measured

磁性参数	所有土样 (n = 80)		中心城区 (n = 34)		北部新城区 (n = 25)		郊区农用地 (n = 21)		乌鲁木齐 <sup>[31]</sup>	
	范围(均值)	标准偏差	范围(均值)	标准偏差	范围(均值)	标准偏差	范围(均值)	标准偏差	范围(均值)	标准偏差
$\chi_{LF} \times 10^{-8}$ /m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup>	20.0 ~ 415.1 (89.9)	9.13	37.9 ~ 323.7 (89.2)	9.86	24.1 ~ 415.1 (98.4)	19.69	20.0 ~ 395.3 (80.5)	19.25	26.1 ~ 299.6 (87.3)	NA
SIRM × 10 <sup>-5</sup> /Am <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup>	495.5 ~ 12 296.2 (2 656.3)	270.40	618.4 ~ 9 256.1 (2 867.6)	331.88	505.6 ~ 12 296.2 (2 686.7)	569.83	495.5 ~ 10 341.4 (2 259.1)	507.83	559.2 ~ 4 466.7 (1 992.95)	NA
SOFT × 10 <sup>-5</sup> /Am <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup>	78.9 ~ 4 998.6 (941.3)	114.66	182.5 ~ 4 217.9 (1 022.3)	158.37	78.9 ~ 4 998.6 (1 043.1)	242.19	80.7 ~ 4 145.7 (733.7)	211.06	176.6 ~ 1 870.1 (724.6)	NA
HIRM × 10 <sup>-5</sup> /Am <sup>2</sup> ·kg <sup>-1</sup>	0.3 ~ 2 388.8 (155.2)	34.40	17.7 ~ 2 388.8 (203.0)	78.59	8.7 ~ 503.4 (117.5)	24.44	0.3 ~ 611.9 (123.6)	31.94	12.8 ~ 189.9 (70.2)	NA
$S_{ratio}/\%$	40.8 ~ 100 (88.7)	0.012	48.4 ~ 98.2 (89.3)	0.019	55.6 ~ 99.5 (89.3)	0.016	40.8 ~ 100 (86.9)	0.03	87.4 ~ 98.6 (92.8)	NA
$\chi_{FD}/\%$	0.2 ~ 9.1 (3.4)	0.24	0.7 ~ 8.2 (2.9)	0.31	0.3 ~ 8.5 (4.1)	0.052	0.2 ~ 9.1 (3.2)	0.049	0.3 ~ 6.9 (2.1)	NA
SIRM/ $\chi_{LF}$ × 10 <sup>3</sup> /Am <sup>-1</sup>	7.7 ~ 54.0 (29.5)	0.63	16.3 ~ 54.0 (31.7)	1.09	7.7 ~ 39.7 (27.7)	1.09	19.5 ~ 33.2 (28.2)	0.85	11.5 ~ 50.1 (23.7)	NA

北部新城区内石河子总厂的新建商业街旁边的居民点,为  $415.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 最低点是 F2, 位于研究区北部郊区农用地的玉米地, 值为  $20.0 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 与采样方法类似(表层 10 cm)的乌鲁木齐地区相比, 平均值相当, 但变化幅度更大, 最高值是最低值的 20 倍以上. 中心城区(U 区)、北部新城(N 区)、郊区农用地(F 区)磁化率大小顺序依次为 N 区 > U 区 > F 区, 表明研究区亚铁磁性矿物总含量北部新城最大, 中心城区次之, 郊区农用地最小. 北部新城虽然建设时间较晚, 但污染强度最大; 中心城区磁化率变幅最小, 反映出石河子市区内污染程度的空间差异不大, 同时, 最高值和最低值均不在中心城区, 反映出典型污染源及环境污染最小处, 均不在中心城区; 郊区农用地污染低于城市.

石河子市所有样品的饱和等温剩磁(SIRM)变幅为  $(495.5 \sim 12\,296.2) \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均值为  $2\,656.3 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ , 与乌鲁木齐相比, 变幅更大且平均值高出约  $600 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ , 表明石河子市亚铁磁性和不完全反铁磁性矿物的含量比乌鲁木齐地区更高. 分区来看, 中心城区、北部新城、郊区农用地的饱和等温剩磁平均值分别为  $2\,867.6 \times 10^{-5}$ 、 $2\,686.7 \times 10^{-5}$  和  $2\,259.1 \times 10^{-5} \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ , 其大小顺序与  $\chi_{\text{LF}}$  不同, 依次为 U 区 > N 区 > F 区, 表明中心城区亚铁磁性和不完全反铁磁性矿物的含量最大, 其次是北部新城, 最小的依然是郊区农用地.

## 2.2 土壤磁性矿物组成分析

为探讨样品中磁性矿物组分, 分别以  $\chi_{\text{LF}}$  为横坐标, 以 SIRM、SOFT、HIRM 为纵坐标, 对所有样品进行投影和相关性分析(图 2).  $\chi_{\text{LF}}$  与 SIRM 显著正相关,  $R^2 = 0.971\,6$  [图 2(a)], 反映出样品中对  $\chi_{\text{LF}}$  的贡献主要来源于亚铁磁物质和不完全反铁磁性矿物. SOFT 可以用来指示磁铁矿的含量, 尤其是低矫顽力的多畴(MD)亚铁磁性矿物<sup>[26]</sup>;  $\chi_{\text{LF}}$  与 SOFT 亦存在良好的相关性,  $R^2 = 0.937\,5$  [图 2(b)], 进一步反映了样品的  $\chi_{\text{LF}}$  主要受亚铁磁性矿物的控制. HIRM 主要用于估计高矫顽力的不完全反铁磁性矿物(如赤铁矿和针铁矿). 这是由于亚铁磁性矿物在磁场强度为 200 ~ 300 mT 时已经基本达到饱和状态, 对 HIRM 没有贡献, 本次样品获得的  $\text{IRM}_{300}$  的平均值达到饱和值的 96%. HIRM 与  $\chi_{\text{LF}}$  相关性较差, 仅为 0.071 3 [图 2(c)], 表明样品中不完全反铁磁性矿物不主导样品的磁性特征. 综上所述, 亚铁磁物质主导了研究区样品的  $\chi_{\text{LF}}$ .

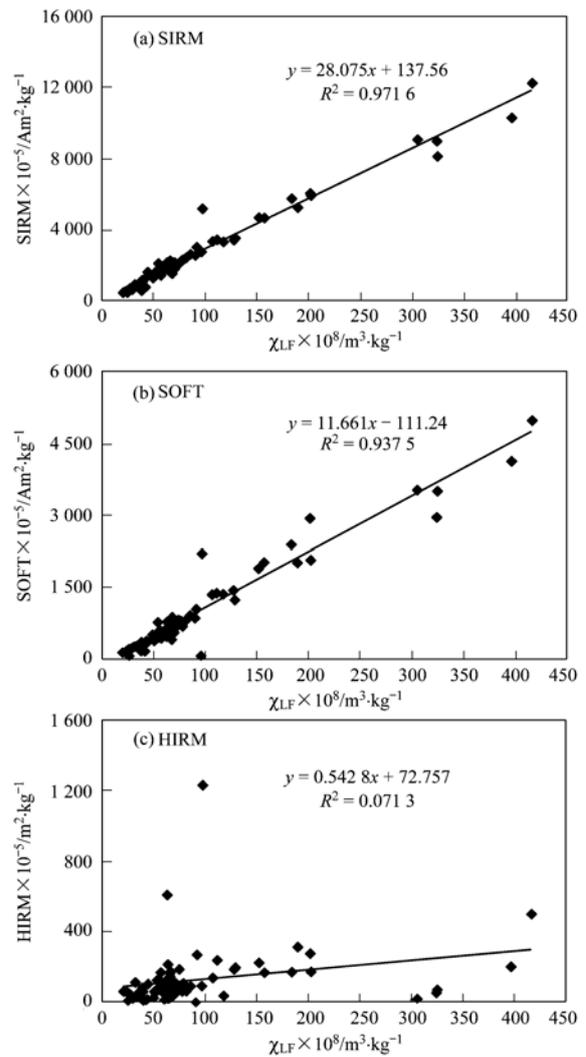


图 2 石河子市表层土壤磁学参数关系

Fig. 2 Correlations among magnetic parameters of surface soil of urban area in Shihezi

等温剩磁获得曲线(IRM)是区分磁性矿物种类的另一重要参数<sup>[32]</sup>. 分别选取各区代表性样品 U20、N3、F12, 此外另选了 F18, 该点附近磁化率值显著高于其他郊区农用地, 制得典型样品 IRM 曲线(图 3). 所有样品在施加场强 60 mT 时 IRM 快速上升, 达到饱和值的 50% 以上, 施加 100 mT 时达到饱和值的 68% ~ 84%, 施加 300 mT 磁场时 IRM 基本达到饱和值的 89% ~ 97%. 场强为 0 ~ 300 mT 范围内, IRM 上升趋势呈先快后慢, 300 mT 基本达到饱和. 磁场大于 300 mT 后, IRM 的继续增加是硬磁性矿物的贡献, 说明样品中虽然有硬磁性矿物存在, 但其含量远低于软磁性矿物.  $S_{\text{-ratio}}$  反映软磁成分(如磁铁矿/磁赤铁矿)与硬磁成分(如赤铁矿、针铁矿)之间的比率, 软磁成分越多,  $S_{\text{-ratio}}$  值越大<sup>[30]</sup>. 表 1 显示石河子样品中  $S_{\text{-ratio}}$  值变化范围为 86.5 ~

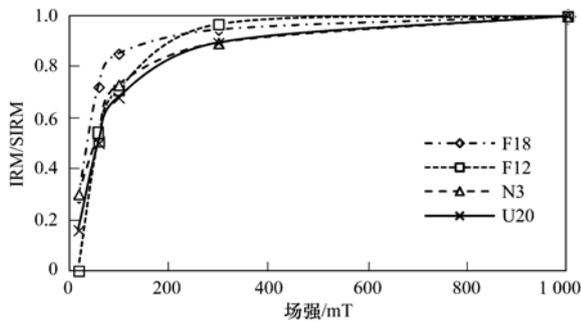


图3 典型土样的等温剩磁(IRM)获得曲线

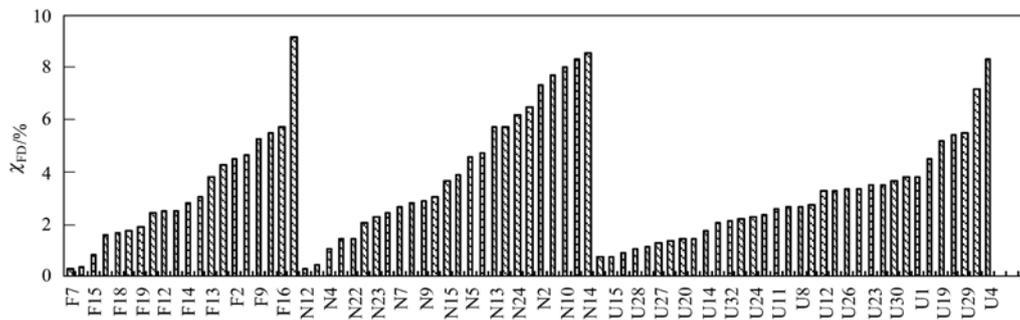
Fig. 3 IRM acquisition curves of typical urban soil samples

92.0%, 均值为 88%, 进一步证明研究区样品的软磁成分主导了磁性特征。

### 2.3 土壤磁性矿物粒度分析

频率磁化率值  $\chi_{FD}$  ( $\chi_{FD} = [(\chi_{LF} - \chi_{HF})/\chi_{LF}] \times 100\%$ ) 可以大致反映样品中超顺磁与单畴界限附近的细粘滞性超顺磁颗粒 (SP,  $< \sim 0.03 \mu\text{m}$ ) 的比例, 频率磁化率值高, 说明其中的超顺磁性颗粒比例多<sup>[30]</sup>。Dearing<sup>[33]</sup> 提出应用  $\chi_{FD}$  半定量估算 SP 颗粒浓度的指标: 当  $\chi_{FD} < 2\%$  时, 基本不含 SP 颗粒;

在 2% ~ 10% 之间, SP 和粗颗粒混合存在; 在 10% ~ 14% 之间, 以 SP 颗粒为主 (> 75%)。U 区、N 区、F 区的  $\chi_{FD}$  变幅分别为 (0.7 ~ 8.2)%、(0.3 ~ 8.5)%、(0.2 ~ 9.1)% , 平均值分别为 2.9%、4.1%、3.2% (表 1), 大小依次是 N 区 > F 区 > U 区, 表明研究区样品中 SP 颗粒比例为 N 区最大, U 区最小, F 区介于其中。U 区和 F 区中, 各有约 1/3 样品的  $\chi_{FD}$  小于 2% (图 4), 说明这些样品中基本不含超顺磁性颗粒, 主要是粗颗粒多畴亚铁磁性矿物; 其余 2/3 样品的  $\chi_{FD}$  均在 2% ~ 10% 之间, 且主要集中在 2% ~ 6% 之间, 说明由 SP 颗粒和粗颗粒混合而成; N 区约有 1/5 样品的  $\chi_{FD} < 2\%$ , 基本不含 SP 颗粒, 其余 4/5 样品的  $\chi_{FD}$  均在 2% ~ 10% 之间, 除含有顺磁性颗粒外, 还有粗颗粒混合存在。已有研究表明, 在其他条件不变的情况下, 受人类活动影响大的区域, 磁化率高,  $\chi_{FD}$  低, 人类活动释放的磁性颗粒具有多畴和假单畴粗粒的特征<sup>[34]</sup>。因此, 研究区内 3 个区域受人类活动影响大小顺序为 U 区 > F 区 > N 区。

图4  $\chi_{FD}$  的空间分布Fig. 4 Spatial distribution of  $\chi_{FD}$ 

## 3 讨论

### 3.1 磁性参数的空间分布特征

根据采样点样品的磁性参数, 采用克里格插值法对未知点进行空间插值, 绘制出石河子市表层土壤空间分布图 (图 5)。

研究区表土样品磁性矿物含量的空间分布差异显著, 从图 5 可以看出,  $\chi_{LF}$ 、SIRM、SOFT 的空间变化趋势一致, 分别在 N11、F8、U16 及 U25 附近出现高值, 表明这几处亚铁磁性矿物含量较高。这与已有研究结果相符, 现代大气中大部分的磁性小球主要是由化石燃料燃烧、金属冶炼等工业生产活动造成的, 而这些工业活动对土壤造成的污染伴有磁化率增加的现象<sup>[30,35]</sup>。这几个磁化率高值区中, N11

为北泉镇的居民区, 北泉镇现多为新建的工厂和新兴的商贸城, 可能是由于建筑尘土、人类生活垃圾、汽车尾气等污染物的积累, 致使郊区附近的亚铁磁性含量普遍较高。中心城区虽然人口居住也较集中, 土壤同样受汽车尾气等污染影响大, 但所采集的表层土壤位于绿化带内, 乔木和草本的覆盖率多高达 95% 以上, 对污染有一定的净化处理作用。而在 N11 处, 采集的表土多在裸土地上, 无植物覆盖。因此, 北泉镇居民区附近的磁性含量高于中心城区。F8 为棉花地, 南边是正在重修的 312 国道, 北边是正在修建北工业园区管委会大楼, 可能是由于建筑扬尘和汽车尾气等污染物排放, 导致 F8 附近的农用地里磁性颗粒含量较高。U16、U8 位于中心城区西边, 附近有一造纸厂, 以及部分建材业和棉纺加工业

等也集中于此,这些工厂排放的污染物可能导致 U16 附近磁性颗粒含量较高. U25 位于中心城区东边,食品加工、纺织厂及石河子老城区等集中于此. 磁化率高的这几个区域,共同点是有工厂分布或受到较大的建筑扬尘污染. 因此,本研究区内表土样品的磁化率高值很大程度上是受人类活动的影响,棉纺加工、造纸厂、纺织厂等工厂所用的化石燃料造成的废气、废渣、飞灰及扬尘等污染物使周围表土的磁性矿物含量增高. 需要提出的是:在北部新城区的工业集中区(N1~N7),主要有天辰化工、天业电石、合盛硅业及天能乙炔等重化工企业,涉及聚氯乙烯、烧碱、电石、塑料加工等,尽管受到粉煤灰、电石渣、柠檬酸渣等化工污染的影响,亚铁磁性含量与周围农田及中心城区相比却意外降低. 粉煤灰、电石渣、柠檬酸渣等化工污染等可能致使附近表土磁性含量减弱. 已有研究中,也有污染区磁化率降低的现象,如 Hu 等<sup>[36]</sup>在云南阳宗海研究发现,虽然受到火力发电厂所排放强磁性粉煤灰的输入影响,湖泊沉积物的磁性却意外降低,通过地球化学等其他参数的分析,认为是由于来自火电厂所排放硫化物的酸沉降,造成了沉积物中磁性矿物的溶解并导致磁性减弱. 综上所述,在石河子市,高磁化率区域部分值得注意,与工业活动、建筑扬尘等呈正相关. 此外,在化工业集中区(N1~N7)虽然受粉煤灰、电石渣、柠檬酸渣等化工污染严重,但磁性含量意外降低,与污染物浓度呈负相关.

HIRM 和 SIRM/ $\chi_{LF}$ 的变化趋势相似(图 5),峰值区均出现在 U25、U8,表明这里的高矫顽力的不完全反铁磁性矿物含量较高. 已有研究结果表明,SIRM 的峰值分布与煤厂、钢厂、汽车修理厂等污染源的分布有较好的一致性<sup>[37,38]</sup>. 本研究中 U25、U8 的共同点是都位于中心城区且附近均有建材、棉纺加工造纸等工厂,与前人研究结果相符. 从 SIRM/ $\chi_{LF}$ 分布来看,312 国道以北较低,以南较高. 在 312 国道以南主要的中心城区,主要污染来自于交通排污、棉纺厂和食品加工厂产生的废气、废水、废渣等,高矫顽力的不完全反铁磁性矿物含量较高. 而 312 国道以北的是北部新城区,主要污染物为燃煤等化工污染和石河子总厂的生活排污,高矫顽力的不完全反铁磁性矿物含量相对较低.

从  $S_{-ratio}$  的分布规律来看,U25 附近最低,表明 U25 附近棉纺厂的棉尘污染使得磁性污染颗粒的软磁成分较低. 此外,N1~N7、N23、U8 及 U25 附近

的  $S_{-ratio}$  也比较低,软磁成分相对较低,亦表明化工工业排放的粉煤灰、电石渣、柠檬酸渣等污染物,造纸厂排放的纤维或木素等以及棉纺厂的棉尘污染等都使得样品中软磁成分相对较少.

不同功能区的磁性矿物颗粒大小也存在显著差异.  $\chi_{FD}$  在北部新城区较高(图 5),包括石河子总厂附近和工业集中区(N1~N7)附近. 表明在这里由 SP 颗粒较多,土壤磁性颗粒物的粒度较细. 已有研究表明,原煤区的磁晶粒度在工业带明显较小,且由 SP 颗粒和粗颗粒混合而成<sup>[34]</sup>. 工业集中区(N1~N7)的燃料多以燃煤为主,石河子总厂附近多为居民自建房,夏季居民日常烹饪和冬季取暖以燃煤为主,且距离工业集中区(N1~N7)较近,容易受到煤灰影响. 因此,在北部新城区土壤 SP 比例高,受煤灰影响较大.

### 3.2 典型污染源的磁学特性

为了探查不同污染源的磁学参数性质特点,根据上述分析结合图 5,分析研究区几个典型污染源 N25、N11、N1~N7 和 F8 附近的磁学特性特点.

在 U25 附近,其他各磁性参数均呈现高于周围值,但  $S_{-ratio}$  低.  $S_{-ratio}$  反映软磁成分与硬磁成分之间的比率,软磁成分越少, $S_{-ratio}$  值越小<sup>[31]</sup>. U25 位于中心城区东边,食品加工、纺织厂及石河子老城区等集中于此,反映出食品加工、纺织厂等排放污染物颗粒中,以亚铁磁性矿物为主导,软磁矿物含量相对较多.

在北部新城区的工业集中区(N1~N7),主要有天辰化工、天业电石、合盛硅业等重化工业,与棉纺厂、造纸厂等工业相比,虽然磁性参数  $\chi_{LF}$ 、SIRM、SOFT、HIRM、SIRM/ $\chi_{LF}$  及  $S_{-ratio}$  均比较低,即磁性矿物含量和软磁成分含量较低,但  $\chi_{FD}$  比较高,磁性矿物的粒度较小,表明受人为影响较小.

在 N11(北泉镇),采样点在居民集中居住区,附近多为新建工厂和新兴的商贸城,该处其他磁学参数均较高,但 HIRM 和 SIRM/ $\chi_{LF}$  较低,表明研究区磁性矿物虽然主要来源于亚铁磁矿物质和不完全反铁磁性矿物,但 N11 附近的不完全反铁磁性矿物含量相对较低.

F8 附近多分布农田,与研究区内其他农田相比,此处的磁性含量参数  $\chi_{LF}$ 、SIRM、SOFT 较高,而 HIRM、 $S_{-ratio}$ 、SIRM/ $\chi_{LF}$ 、 $\chi_{FD}$  等其余磁性参数与研究区其他部分郊区农用地相近,并无特殊变化. 采样期间,F8 南边的 312 组成国道正在扩修,同时 F8 北边的北工业园区管委会大楼正在修建. 因此,由

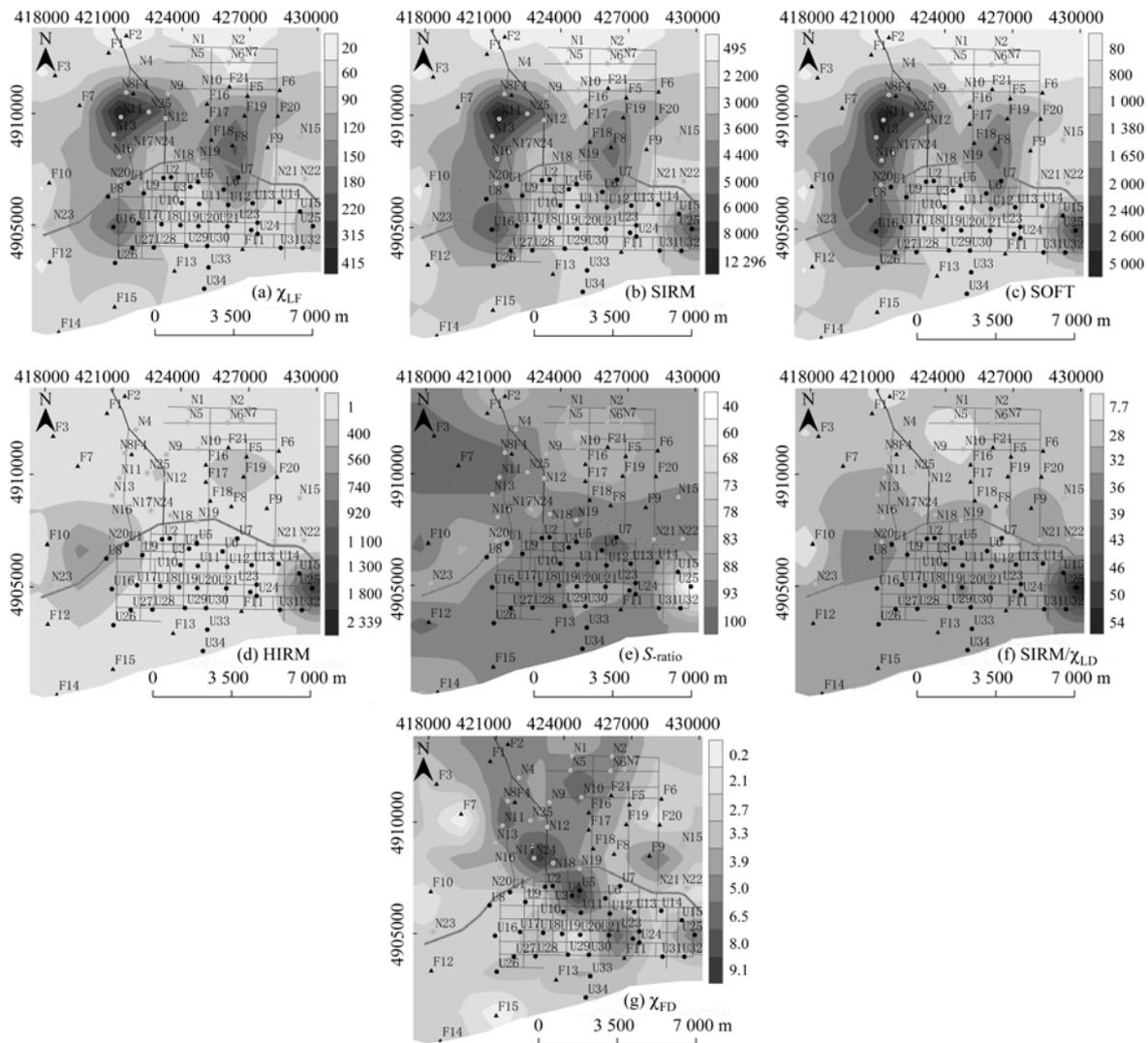


图 5 基本磁性参数空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of magnetic parameters

于近期的扬尘和汽车尾气排放所导致的污染,磁学特性仅表现为磁性物质含量较高,而磁性物质和粒度则无明显变化.

### 4 结论

(1)石河子市表层土壤的磁化率范围为  $20.0 \times 10^{-8} \sim 415.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均值  $90.4 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ . 磁性参数特征以磁铁矿或磁赤铁矿的多畴亚铁磁性矿物为主导,同时伴有少量的不完全反铁磁性矿物. 由  $\chi_{LF}$  分区域比较来看,亚铁磁性矿物总含量表现为北部新城 > 中心城 > 郊区农用地.

(2)磁性参数  $\chi_{LF}$ 、SIRM、SOFT 值较高的区域与棉纺厂、造纸厂等工厂的分布具有一致性. 即  $\chi_{LF}$ 、SIRM、SOFT 值较高的区域大都有不同类型的

工厂分布,工业生产、交通运输等人为活动产生的磁性污染物可能致使  $\chi_{LF}$ 、SIRM、SOFT 值高于周围土壤. 但在北部新城的重化工业集中区 N1 ~ N7 附近的磁性参数  $\chi_{LF}$ 、SIRM、SOFT 值比研究区内中心城区和郊区农用地的值都低,即化工业所排放的污染致使周围土壤磁性矿物含量和软磁铁含量较低.

(3)虽然 N1 ~ N7 附近的  $\chi_{LF}$ 、SIRM、SOFT 比周围土壤的低,但  $\chi_{FD}$  比周围土壤的高,表明该区虽然土壤磁性矿物含量和软磁铁含量较低,但磁学颗粒物的粒度较小,反映出该区域受煤灰影响较大. 即在石河子市可用磁性矿物含量参数结合磁性颗粒大小相关的参数圈定污染高值区域.

### 参考文献:

[1] Yang T, Liu Q S, Zeng Q L, et al. Environmental magnetic

- responses of urbanization processes: evidence from lake sediments in East Lake, Wuhan, China [J]. *Geophysical Journal International*, 2009, **179**(2): 873-886.
- [ 2 ] 丰华, 刘秀铭, 吕镔, 等. 兰州市大气降尘磁学特征及其环境意义[J]. *地理学报*, 2012, **67**(1): 36-44.
- [ 3 ] 符超峰, 强小科, 宋友桂, 等. 磁学方法及其在环境污染研究中的应用[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2008, **31**(3): 249-255.
- [ 4 ] 张甘霖, 赵玉国, 杨金玲, 等. 城市土壤环境问题及其研究进展[J]. *土壤学报*, 2007, **44**(5): 925-933.
- [ 5 ] 牟树森, 青长乐. *环境土壤学*[M]. 北京: 农业出版社, 1993.
- [ 6 ] 张甘霖, 朱永官, 傅伯杰. 城市土壤质量演变及其生态环境效应[J]. *生态学报*, 2003, **23**(3): 539-546.
- [ 7 ] 尹刚, 胡守云, 闫海涛. 不同环境污染载体的磁学研究及其应用特点[J]. *地球物理学进展*, 2012, **27**(5): 1947-1956.
- [ 8 ] Kapička A, Jordanova N, Petrovsky E, *et al.* Magnetic stability of power-plant fly ash in different soil solutions[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 2000, **25**(5): 431-436.
- [ 9 ] 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): 291-297.
- [ 10 ] 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.
- [ 11 ] Strzyszcz 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.
- [ 12 ] Wang X S, Qin Y. Correlation between magnetic susceptibility and heavy metals in urban topsoil: a case study from the city of Xuzhou, China[J]. *Environmental Geology*, 2005, **49**(1): 10-18.
- [ 13 ] 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.
- [ 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 ] 闫倩, 戴霜, 刘海娇, 等. 兰州某钢厂附近土壤磁化率特征及其环境意义[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(10): 1732-1737.
- [ 16 ] Rosowiecka O, Nawrocki J. Assessment of soils pollution extent in surroundings of ironworks based on magnetic analysis [J]. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 2010, **54**(1): 185-194.
- [ 17 ] Gautam P, Blaha U, Appel E. Integration of magnetism and heavy metal chemistry of soils to quantify the environmental pollution in Kathmandu, Nepal[J]. *Island Arc*, 2005, **14**(4): 424-435.
- [ 18 ] Yang Z P, Lu W X, Long Y Q, *et al.* Assessment of heavy metals contamination in urban topsoil from Changchun City, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, **108**(1): 27-38.
- [ 19 ] Shilton V F, Booth C A, Smith J P, *et al.* Magnetic properties of urban street dust and their relationship with organic matter content in the West Midlands, UK [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(20): 3651-3659.
- [ 20 ] Yang T, Liu Q S, Zeng Q L, *et al.* Relationship between magnetic properties and heavy metals of urban soils with different soil types and environmental settings: implications for magnetic mapping[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, **66**(2): 409-420.
- [ 21 ] 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.
- [ 22 ] Liu Y Y, Liu M, Liu H F. Distribution of heavy metal in urban soil of Urumqi City[J]. *Arid Land Geography*, 2006, **29**(1): 120-123.
- [ 23 ] Wei B G, Jiang F Q, Li X M, *et al.* Spatial distribution and contamination assessment of heavy metals in urban road dusts from Urumqi, NW China[J]. *Microchemical Journal*, 2009, **93**(2): 147-152.
- [ 24 ] 张凯, 冉圣宏, 田玉军, 等. 干旱区绿洲城市扩张对水资源的影响-以石河子市为例[J]. *资源科学*, 2011, **33**(9): 1720-1726.
- [ 25 ] Heller F, Strzyszcz Z, Magiera T. Magnetic record of industrial pollution in forest soils of Upper Silesia, Poland[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(B8): 17767-17774.
- [ 26 ] Lourenço A M, Rocha F, Gomes C R. Relationships between magnetic parameters, chemical composition and clay minerals of topsoils near Coimbra, central Portugal[J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2012, **12**(8): 2545-2555.
- [ 27 ] 卢升高. *中国土壤磁性与环境*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [ 28 ] Evans M, Heller F. *Environmental magnetism: principles and applications of enviromagnetics* [M]. New York: Academic Press, 2003.
- [ 29 ] 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.
- [ 30 ] Thompson R, Oldfield F. *Environmental Magnetism* [M]. London: Allen and Unwin, 1986.
- [ 31 ] 陈学刚, 魏疆, 胡江玲, 等. 乌鲁木齐城市土壤磁性的空间变异特征研究[J]. *土壤通报*, 2014, **45**(1): 59-65.
- [ 32 ] 张春霞, 黄宝春, 李震宇, 等. 高速公路附近树叶的磁性性质及其对环境污染的指示意义[J]. *科学通报*, 2006, **51**(12): 1459-1468.
- [ 33 ] Dearing J. Magnetic susceptibility [A]. In: *Environmental magnetism: A practical guide*[C]. Technical Guide, No. 6. London: Quaternary Research Association, 1999. 35-62.
- [ 34 ] 袁大刚, 张甘霖. 城市道路区土壤的磁性性质及其发生学意义[J]. *土壤学报*, 2008, **45**(2): 216-221.
- [ 35 ] Gautam P, Blaha U, Appel E. Magnetic susceptibility of dust-loaded leaves as a proxy of traffic-related heavy metal pollution in Kathmandu city, Nepal [J]. *Atmospheric Environment*, 2005,

- 39(12): 2201-2211.
- [36] Hu S, Wang Y, Appel E, *et al.* Magnetic responses to acidification in Lake Yangzonghai, SW China[J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2003, **28**(16-19): 711-717.
- [37] 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.
- [38] 许淑婧, 张英, 余晔, 等. 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[J]. *环境科学*, 2013, **34**(9): 3578-3586.

## 欢迎订阅 2014 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2014 年为 16 开本,90 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjkx@rcees.ac.cn;网址:www.hjkx.ac.cn

## CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region .....	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i>	(3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years .....	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i>	(3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> at Mount Waliguan, China .....	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i>	(3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM <sub>2.5</sub> in Shanghai Urban Area .....	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i>	(3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China .....	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i>	(3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM <sub>2.5</sub> During Typical Winter Days in Wuxi City .....	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i>	(3280)
Emission Characteristics of PM <sub>2.5</sub> from Blast Furnace Iron Making .....	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i>	(3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing .....	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i>	(3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis .....	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i>	(3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles .....	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i>	(3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls .....	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i>	(3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir .....	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i>	(3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China .....	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i>	(3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments .....	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i>	(3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park .....	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i>	(3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River .....	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i>	(3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China .....	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i>	(3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation .....	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i>	(3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland .....	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i>	(3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation .....	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i>	(3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River .....	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i>	(3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas .....	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i>	(3408)
Synthesis of Cu <sub>2</sub> O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol .....	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i>	(3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7 .....	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i>	(3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation .....	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i>	(3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland .....	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i>	(3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process .....	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i>	(3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor .....	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes .....	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i>	(3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content .....	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i>	(3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community .....	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i>	(3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant .....	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i>	(3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater .....	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i>	(3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration .....	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i>	(3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map .....	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i>	(3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd <sup>2+</sup> on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i> .....	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i>	(3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales .....	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue	(3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai .....	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i>	(3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(III) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2 .....	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i>	(3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model .....	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing	(3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City .....	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang	(3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> .....	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i>	(3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice ( <i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil .....	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i>	(3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape .....	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i>	(3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms .....	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i>	(3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China .....	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i>	(3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ <sup>13</sup> C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province .....	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang	(3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, NO, CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition .....	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i>	(3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM <sub>2.5</sub> .....	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i>	(3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process .....	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO <sub>2</sub> Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region; an Economic Input-Output Analysis .....	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i>	(3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry .....	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i>	(3632)

# 《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)

2014年9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 15, 2014

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@reeces. 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@reeces. 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