

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

京津冀区域 PM _{2.5} 污染相互输送特征	王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)
顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应	许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)
基于多源数据的 PM _{2.5} 浓度时空分布预测与制图	肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)
华东区域 PM _{2.5} 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估	郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)
南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征	张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)
菏泽市 PM _{2.5} 碳组分季节变化特征	刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)
辽宁典型城市道路扬尘 PM ₁₀ 中水溶性无机离子组分特征及来源解析	张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)
天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征	姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)
高原城市昆明公路隧道大气中 PM _{2.5} 理化特征分析	王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)
2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析	段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)
不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响	楼狄明, 张子骏, 刘继凯, 谭丕强, 胡志远 (4983)
ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响	董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)
我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量	程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)
新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征	杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)
三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价	卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)
三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征	程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)
太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程	李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)
典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例	连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)
缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征	马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)
基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法	熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)
北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)
深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征	凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)
供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析	刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)
低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)
臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨	刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)
碱活化过一硫酸盐降解水中环丙沙星	葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)
MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯	王九妹, 关泽宇, 万金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)
常温下加装脱硫装置的 MCBMBR 处理高硫酸盐有机废水试验	徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)
载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收	成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)
不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能	马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)
ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化	吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)
海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)
游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验	孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)
西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构	康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)
厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征	汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)
SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化	岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)
活性污泥中硝化螺菌 (Nitrospira) 的富集及其动力学参数	姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)
pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响	张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)
接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响	张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)
活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比	孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)
长期暴露下纳米 TiO ₂ 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响	李慧婷, 崔福义 (5229)
长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征	赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)
不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异	张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)
有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征	何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)
上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价	郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)
大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析	宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)
工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应	杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)
上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险	周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)
基施硅肥对土壤微生物有效性及水稻镉累积效应的影响	高子翔, 周航, 杨文弢, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)
水稻对气态单质汞的吸收与挥发	尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)
麦田 O ₃ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算	赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)
缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果	侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)
生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N ₂ O 排放的影响	石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)
成都平原不同类型沟渠 CO ₂ 、CH ₄ 和 N ₂ O 排放通量特征及其影响因素	冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)
河流 CO ₂ 与 CH ₄ 排放研究进展	王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)
《环境科学》第 38 卷 (2017 年) 总目录	(5367)
《环境科学》征稿简则 (4950) 《环境科学》征订启事 (5031) 信息 (4923, 5105, 5161)	

工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应

杨孟¹, 李慧明², 李凤英¹, 王金花², 刁一伟³, 钱新², 杨兆平¹, 王成¹

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044; 2. 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210023; 3. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044)

摘要: 以南京一个工业区为例, 采集户外儿童游乐场地表灰尘样品, 并对其进行环境磁学测量以及重金属总量和酸可提取态测定, 以探究磁学参数对工业区该类环境介质重金属污染的指示作用。结果表明, 地表灰尘样品中磁性矿物以亚铁磁性矿物为主, 主要以假单畴-多畴颗粒存在; 样品低频磁化率和饱和等温剩磁的平均值分别为 $939.31 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $16\,618.74 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, 与城市非工业区相比磁性矿物含量较高。地表灰尘样品平均受到中度到高度的重金属污染, 部分磁学参数与重金属总量和酸可提取态占比均显著相关, 且与总量的相关性较强, 其中, Mn、Ni、Cr 总量以及污染负荷指数与非磁滞磁化率和饱和等温剩磁的相关性较高 ($0.69 \leq r \leq 0.86$, $P < 0.01$), 并具有一致的空间变化特征, 且主成分分析结果表明重金属和磁性矿物均主要来自工业活动。因此, 部分磁学参数可作为指示工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染状况的有效指标。

关键词: 重金属; 环境磁学; 儿童游乐场; 城市地表灰尘; 工业区

中图分类号: X123; X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-5282-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201704197

Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area

YANG Meng¹, LI Hui-ming², LI Feng-ying¹, WANG Jin-hua², DIAO Yi-wei³, QIAN Xin², YANG Zhao-ping¹, WANG Cheng¹

(1. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, School of Environmental Science & Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 3. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The use of mineral magnetic measurements as a potential pollution proxy is explored as an alternative means of monitoring heavy metal pollution in playground dust in industrial areas. Dust samples were collected from playgrounds in an industrial area in Nanjing. The magnetic properties of the samples were analyzed, and the total and acid-extractable concentrations of heavy metals were measured. Mineral magnetic concentration parameters [mean magnetic susceptibility (χ_{lf}) $939.31 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ and saturation isothermal remanent magnetization (SIRM) $16\,618.74 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$] indicate that the dust samples contain high concentrations of magnetic minerals when compared to the non-industrial zone of the city. High and stable S-ratio values (mean 0.97, standard deviation 0.01) indicate the prominence of ferromagnetic minerals. Low values of anhysteretic remanent magnetization (χ_{ARM})/ χ_{lf} (2.35) and χ_{ARM} /SIRM ($0.12 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{A}^{-1}$) indicate predominantly coarse pseudo single domain (PSD) and multi-domain (MD) magnetic grain size assemblages. The playground dust is considered moderately to highly polluted, and the enrichment factor values for Cd, Zn, Cu, and Pb indicate extremely high contamination levels in the playground dust. Mineral magnetic parameters [χ_{lf} , SIRM, hard isothermal remanent magnetization (HIRM), χ_{ARM} , and χ_{ARM} /SIRM] reveal significant correlations with total and acid-extractable concentrations of the trace metals, and the correlations with total concentrations are stronger. The most significant correlations were found with mineral magnetic concentrations (χ_{ARM} and SIRM) and total concentrations of the elements Mn, Ni, and Cr and the Tomlinson pollution load index (PLI) ($0.69 \leq r \leq 0.86$, $P < 0.01$). Consistent spatial characteristics between them were also found, showing that the total concentrations of heavy metals and magnetic parameter values are higher in the playgrounds near and downwind of the power plant. Results of a principal component analysis indicate that anthropogenic activities (mainly from coal consumption by power plants) are the main sources for both heavy metals and magnetic minerals. In summary, significant correlations and consistent spatial characteristics between heavy metal contents and magnetic parameters and the same anthropogenic source for heavy metals and magnetic minerals confirm that magnetic parameters could be considered as efficient indicators for heavy metal contamination in the playground dust in industrial areas.

Key words: heavy metal; environmental magnetism; playground; urban surface dust; industrial area

收稿日期: 2017-04-19; 修订日期: 2017-06-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501197, 41271511); 江苏省自然科学基金项目(BK20150915, BK20160947)

作者简介: 杨孟(1981~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为环境规划与管理, E-mail: yangmeng@nuist.edu.cn

来自污染源的颗粒物沉积在城市不透水地面形成地表灰尘。地表灰尘是重金属污染物的重要载体, 可通过再悬浮-呼吸、口手摄入和皮肤接触进入人体并危害健康^[1~3]。重金属的毒性与含量和化学形态有关, 含量和化学形态一般通过传统的实验室化学分析方法来确定。由于磁性颗粒是重金属的强吸附剂和载体, 磁性参数可以作为环境介质中重金属污染物含量的替代指标, 环境磁学作为重金属污染研究的一种间接手段, 与传统方法相比具有快速、经济、无损和信息量大等特点^[4], 已被用于多种环境介质的重金属污染研究^[5~14]。

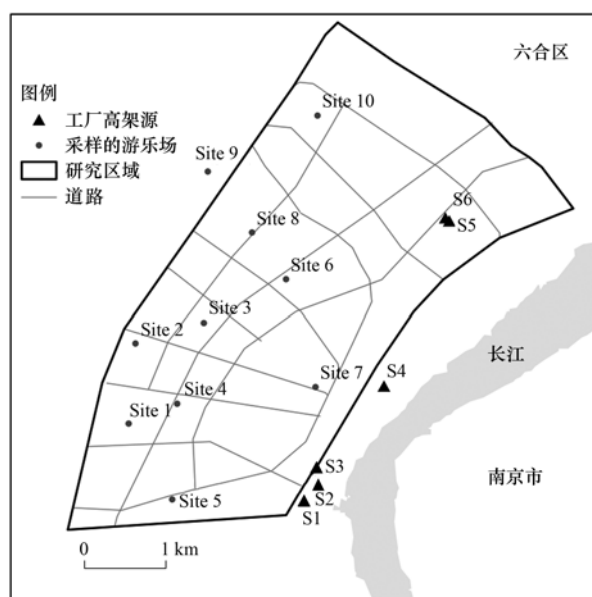
人为污染物所含的磁性颗粒与原生及次生磁性矿物在含量、类型及粒径组成上均存在差异^[15], 人为污染物进入地表灰尘后, 改变了其中磁性物质的存在状况, 使其磁性特征具有人类活动的标记。对城市地表灰尘的研究发现, 某些磁学参数与重金属含量具有显著的相关性以及一致的空间变化特征, 且磁性矿物和重金属具有相同的来源, 表明磁学参数可以指示城市地表灰尘重金属污染状况^[16~20]。然而, 这些研究是以街道灰尘作为研究对象, 不是针对儿童活动场所的地表灰尘。与成年人相比, 儿童容易摄入更多的地表灰尘, 且对重金属具有更高的吸收率和敏感性^[21]。街道并非城市儿童户外活动的主要场所, 与之相比, 幼儿园、小学或公园等场所的户外活动设施及其附近的不透水面对城市儿童地表灰尘暴露更为重要。然而, 针对儿童户外活动场所开展的地表灰尘研究较少。我国对西安^[22, 23]、武汉^[24]和香港^[25]的户外儿童游乐场开展的研究表明: 地表灰尘样品受到不同程度的重金属污染; 结合环境磁学和 Pb 同位素分析表明工业活动是城市幼儿园和小学校园地表灰尘的主要来源^[24]。工业区是城市重金属污染较为严重的区域^[18, 26], 户外游乐场地表灰尘是城市儿童重金属暴露的重要介质, 因此, 有必要针对工业区户外儿童游乐场所的地表灰尘重金属污染开展深入研究。

本文以南京市一个工业区为例, 选择 10 个户外儿童游乐场进行地表灰尘采集, 结合磁性测量和重金属测定, 分析磁学参数和重金属的相关关系和来源, 进而探讨磁学参数对工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的指示性意义, 以期户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染监测提供新的科学依据, 并为降低工业区儿童的重金属暴露提供支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为南京市北部的大厂地区(图 1), 面积约 30 km², 常住人口 19 万, 是典型的居住和工业用地混合区。该区是南京的主要化学工业基地, 有电厂、钢铁、石化等企业, 企业高架源(图 1)排放的污染物通过沉降作用进入地表灰尘, 是潜在的重金属污染源。该地区主导风向为东南风, 可能给位于污染源下风向的人口, 特别是儿童带来健康风险。



S1 钢铁厂高架源、S2 和 S3 电厂高架源、S4 ~ S6 石化企业高架源; Site1 ~ 10 为采样的游乐场编号

图 1 研究区、采样的游乐场以及高架源位置

Fig. 1 Study area, sampled playgrounds, and stacks of industrial plants

1.2 样品采集与制备

选择研究区内幼儿园、小学以及居民小区内面积相近的 10 个户外儿童游乐场(图 1), 于 2015 年 4 月进行地表灰尘样品采集, 采样前累积晴天数为 5 d。每个户外儿童游乐场均匀布设 4 ~ 5 个样点, 用塑料铲和毛刷清扫儿童活动器材和附近地面的灰尘, 每个样点收集样品质量约 40 g; 其中 2 个游乐场因地表灰尘较少, 如果布设 5 个样点, 则样品质量达不到 40 g, 因此仅布设 4 个样点; 共收集到样品 48 个, 将样品装入塑料袋密封。样品在实验室自然风干, 剔除杂质, 过 1 mm 尼龙筛, 供磁学测量。用四分法取部分样品, 过 63 μm 的尼龙筛, 供化学分析。

1.3 化学分析

重金属总量分析用电热板湿法消解^[18],采用硝酸-氢氟酸-高氯酸高温溶解 0.5 g 样品. 研究表明酸可提取态重金属具有较高的环境风险^[27],为了研究酸可提取态重金属与环境磁学参数的关系,利用欧共体修正 BCR 的第一步提取酸可提取态重金属^[27]. 样品重金属总量和酸可提取态的测定采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS, Perkin Elmer SCIEX, Elan 9000)和电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES, Perkin Elmer SCIEX, Optima 5300). 为保证分析结果的准确性,测定了国家标准土壤物质(GBW07405)中重金属元素的总量. 以上化学分析工作主要在南京大学现代分析中心完成.

1.4 磁学测量

称取约 4 g 样品装入磁学专用样品盒并压实待测. 在室温下采用 Bartington MS2 磁化率仪测定低频(频率为 470 Hz)质量磁化率(χ_{lf})和 高频(频率为 4 700 Hz)质量磁化率(χ_{hf}),并计算频率磁化率 $\chi_{fd} = (\chi_{lf} - \chi_{hf})/\chi_{lf} \times 100\%$. 用 Dtech 交变退磁仪和 JR6 旋转磁力仪测量非磁滞剩磁(ARM),使用最大交流场为 100 mT,外加直流场为 0.04 mT,计算出非磁滞磁化率(χ_{ARM}). 使用 Molspin 脉冲磁化仪和旋转磁力仪测量样品的等温剩磁(IRM)和饱和等温剩磁(SIRM),SIRM 的外加磁场强度为 1 000 mT,并测得反向磁场中的等温剩磁 IRM9(包括 -100 mT 和 -300 mT). 计算 S-ratio = $IRM_{-300\text{ mT}}/SIRM$,硬剩磁 HIRM = $[(SIRM + IRM_{-300\text{ mT}})/2]/\text{mass}$ (mass 代表质量),以及比值参数 $\chi_{ARM}/SIRM$. 以上磁学参数测定在华东师范大学河口海岸学国家重点实验室完成.

1.5 污染评价

利用 Tomlinson 污染负荷指数(tomlinson

pollution load index, PLI)评估重金属污染程度^[28]:

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \cdots \times CF_n} \quad (1)$$

式中,PLI 为某地表灰尘样品多种重金属元素的污染负荷指数; n 为参与评价的重金属元素个数; CF_i 为该样品中元素 i 的污染系数,等于该样品中元素 i 的实测含量与所有样品中元素 i 的最低含量的比值.

利用富集系数(enrichment factor, EF)评估地表灰尘样品中重金属的富集程度^[29]:

$$EF = (C_x/C_{ref})_{sample}/(B_x/B_{ref})_{background} \quad (2)$$

式中,EF 为某地表灰尘样品中重金属 x 的富集系数; $(C_x/C_{ref})_{sample}$ 为该灰尘样品中重金属 x 含量与参考元素(Al)含量的比值; $(B_x/B_{ref})_{background}$ 为背景样品中重金属 x 含量与参考元素(Al)含量的比值. 背景样品的元素含量来自文献[30].

2 结果与分析

2.1 重金属含量与污染评价

地表灰尘样品中重金属总量从大到小为:Fe > Al > Mn > Zn > Cu > Pb > Cr > Ni > Co > Cd(表 1). 与南京市街道灰尘研究^[18,27]相比,本研究中 Mn 的总量较高,Co 和 Cu 的总量较低. 重金属元素的 EF 均大于 10(表 1),根据 EF 的分类标准^[18],这些元素均存在不同程度的富集. 其中,Cd、Zn、Cu 和 Pb 为极高富集,说明受到的人为污染极其严重;Mn 和 Ni 为高富集,受到的人为污染较为严重. 其他元素为显著富集,其中 Fe 和 Co 的 EF 略大于 10,说明受到的人为污染较小、存在一部分的自然源^[31]. PLI 指数取值范围为 1.37 ~ 6.60,平均值为 3.49(表 2),表明样品的重金属污染程度差异较大,平均受到中度到高度的重金属污染^[18].

表 1 样品重金属含量、富集系数(EF)和风险评估编码(RAC)统计量¹⁾($n = 48$)

Table 1 Summary of heavy metal concentrations, enrichment factor (EF) and risk assessment code (RAC) of dust samples

元素	单位	总量			酸可提取态含量			EF			RAC/%			风险等级
		范围	平均值	标准差	范围	平均值	标准差	范围	平均值	标准差	范围	平均值	标准差	
Al	%	0.20~0.57	0.40	6.09	0.02E-1~0.07	0.02	0.01	ND ²⁾	ND	ND	0.45~20.72	6.09	3.40	低
Cd	mg·kg ⁻¹	0.38~2.76	1.20	25.67	0.04~1.16	0.37	0.32	59.34~384.69	161.73	84.93	0.00~88.10	25.67	17.61	中
Co	mg·kg ⁻¹	4.99~12.00	8.45	20.37	0.80~9.28	1.74	1.63	7.25~21.25	11.27	3.18	9.25~79.63	20.37	14.28	中
Cr	mg·kg ⁻¹	20.37~188.36	70.27	2.38	0.36~3.20	1.30	0.56	3.94~38.35	14.37	9.05	0.74~6.44	2.38	1.38	低
Cu	mg·kg ⁻¹	21.25~232.13	94.25	5.63	0.04~60.40	5.45	8.74	16.34~202.20	70.17	42.33	0.09~26.02	5.63	5.01	低
Fe	%	0.11~6.20	2.10	1.24	0.03E-2~0.03	0.01	0.01	0.54~33.72	10.93	8.17	0.01~10.12	1.24	2.05	低
Mn	mg·kg ⁻¹	238.51~1 756.55	737.48	34.38	100.40~552.00	229.64	97.20	6.39~53.74	21.91	13.36	17.59~61.25	34.38	10.74	高
Ni	mg·kg ⁻¹	14.67~56.00	35.70	7.30	1.12~5.96	2.42	0.91	8.28~45.58	22.77	9.11	2.62~20.61	7.30	3.20	低
Pb	mg·kg ⁻¹	15.95~452.49	84.66	5.09	0.08~47.28	6.17	11.68	11.25~283.14	54.20	57.71	0.22~28.63	5.09	4.88	低
Zn	mg·kg ⁻¹	104.47~1 568.42	428.40	56.48	60.40~1 212.80	257.35	243.98	35.94~417.02	112.99	85.38	30.55~92.48	56.48	13.82	极高

1) n 代表样品数,下同;2) ND 表示无数据,因为 Al 为参考元素

表 2 样品磁学参数和 PLI 的统计量 (n = 48)

Table 2 Summary of magnetic parameter values and pollution load index (PLI) of dust samples

指标	范围	平均值	标准差
$\chi_{\text{lf}} \times 10^{-8} / \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	106.43 ~ 1 995.03	939.31	479.12
$\chi_{\text{fd}} / \%$	0.88 ~ 13.69	3.66	3.16
$\text{SIRM} \times 10^{-5} / \text{A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$	1 525.75 ~ 45 739.03	16 618.74	11 341.66
$\chi_{\text{ARM}} \times 10^{-8} / \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	435.34 ~ 4 285.83	1 817.14	998.30
$\text{HIRM} \times 10^{-5} / \text{A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$	35.49 ~ 1 415.20	455.30	368.48
$\chi_{\text{ARM}} / \chi_{\text{lf}}$	0.94 ~ 10.01	2.35	1.84
$\chi_{\text{ARM}} / \text{SIRM} \times 10^{-3} / \text{m} \cdot \text{A}^{-1}$	0.09 ~ 0.29	0.12	0.03
S-ratio	0.93 ~ 1.00	0.97	0.01
PLI	1.37 ~ 6.60	3.49	1.42

重金属酸可提取态含量如表 1 所示. Zn 和 Mn 的酸可提取态在总量中所占的比例最高, 分别为 56.48% 和 34.38%, 表明在酸性条件下迁移性最强^[32, 33]. Fe 的酸可提取态占比最低(1.24%), 迁移性最弱^[32, 33]. 其他元素酸可提取态占比低于 10.00%, 迁移性较低. 风险评估编码法 (risk assessment code, RAC) 基于酸可提取态在总量中所占的比例来评估环境风险的高低^[34, 35], 结果表明: Zn 具有极高的环境风险, Mn 为高风险, Cd 和 Co 为中等风险, 其他元素为低风险(表 1). 以上结果与其他研究相似^[27, 32].

2.2. 磁学属性

磁化率是指物质在外加磁场下被磁化的难易程度, 其大小主要反映了样品中亚铁磁性矿物的含量^[15]. SIRM 也可以反映样品磁性强弱, 但与磁化率不同的是, 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整反铁磁性矿物所贡献^[20]. 由表 2 可知, 大厂儿童游乐场地表灰尘样品 χ_{lf} 和 SIRM 的平均值分别为 $939.31 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $16\,618.74 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, 高于重金属污染较轻的商业区和文教区^[18], 表明工业区儿童游乐场地表灰尘磁性矿物含量较高. S-ratio 是指示样品中亚铁磁性矿物和不完整的反铁磁性矿物相对含量的磁学参数, 并随着不完整的反铁磁性矿物贡献的增加而下降^[19]. 由表 2 可知, 样品 S-ratio 值较高且比较稳定, 平均值为 0.97, 标准差为 0.01, 表明了亚铁磁矿物占主导.

由于 χ_{ARM} 对稳定单畴(SSD)颗粒的敏感性, 比值参数 $\chi_{\text{ARM}} / \chi_{\text{lf}}$ 可指示亚铁磁性矿物颗粒的大小, 较高的比值反映了较多的 SSD 颗粒, 而较低的比值则显示了较多的多畴(MD)或超顺磁(SP)颗粒^[36]. $\chi_{\text{ARM}} / \text{SIRM}$ 也指示磁性颗粒的粒度变化, 但由于不受 SP 颗粒的影响, 较低的比值则反映了较多的 MD

颗粒^[36]. 本研究中大多数样品 $\chi_{\text{ARM}} / \chi_{\text{lf}} < 10$, 所有样品 $\chi_{\text{ARM}} / \text{SIRM} < 0.50 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{A}^{-1}$, 指示了亚铁磁性矿物以假单畴(PSD)-较粗的多畴(MD)颗粒为主. χ_{fd} 是当外加磁场频率增大时磁化率增减的百分率, 也可指示磁性矿物的粒径大小, 区分 SP 颗粒和单畴(SD)颗粒^[37]. Dearing 图通过 χ_{fd} 和 $\chi_{\text{ARM}} / \text{SIRM}$ 来判断磁性矿物颗粒大小^[15], 其同样表明大多数样品的磁性矿物以假单畴-多畴颗粒为主, 但少数样品 χ_{fd} 达 5% 以上, 表明存在一定量的 SP 颗粒(图 2).

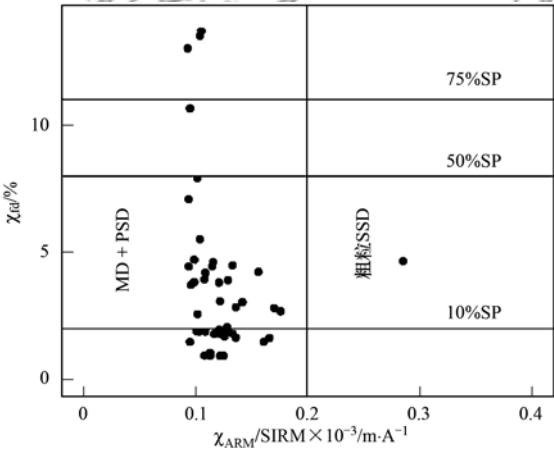


图 2 样品的 Dearing 图 (n = 48)

Fig. 2 Dearing plot of dust samples

3 讨论

3.1 重金属含量与磁学参数的相关性分析

为明确重金属及磁性矿物的来源及两者之间的内在联系, 对样品中重金属含量参数和磁学参数进行相关分析. 结果表明磁学参数 (χ_{lf} 、SIRM、HIRM、 χ_{ARM} 以及 $\chi_{\text{ARM}} / \text{SIRM}$) 与部分元素的总量和酸可提取态占比均具有显著的相关性, 且与总量的相关性较强(表 3). 由于磁铁矿主要位于残渣态^[38], 磁性矿物含量主要与残渣态存在强的正相

表 3 样品磁学参数与重金属含量参数的 Pearson 相关系数(r)¹⁾ ($n=48$)

Table 3 Pearson's correlation coefficients (r) between magnetic properties and heavy metal concentrations of dust samples

		χ_{lf}	χ_{fd}	SIRM	HIRM	χ_{ARM}	χ_{ARM}/χ_{lf}	$\chi_{ARM}/SIRM$	S-ratio
重金属总量	Al	-0.21	-0.13	-0.29 *	-0.43 **	-0.29 *	-0.11	0.30 *	0.47
	Cd	0.26	0.25	0.63 **	0.58 **	0.64 **	0.27	-0.44 **	-0.09
	Co	0.21	0.19	0.51 **	0.42 **	0.53 **	0.18	-0.32 *	0.06
	Cr	0.25	0.33 *	0.71 **	0.56 **	0.69 **	0.27	-0.46 **	0.07
	Cu	0.28	0.25	0.53 **	0.45 **	0.52 **	0.21	-0.50 **	0.03
	Fe	0.05	0.26	0.52 **	0.38 *	0.49 **	0.22	-0.27	0.14
	Mn	0.42 **	0.37 *	0.86 **	0.79 **	0.86 **	0.27	-0.57 **	-0.15
	Ni	0.44 **	0.33 *	0.76 **	0.69 **	0.77 **	0.27	-0.64 **	-0.12
	Pb	0.07	0.21	0.43 **	0.41 **	0.46 **	0.26	-0.27	-0.03
	Zn	-0.01	-0.05	-0.04	-0.06	-0.04	-0.02	-0.14	0.11
重金属酸可提取态占比	PLI	0.29	0.35 *	0.73 **	0.63 **	0.74 **	0.32 *	-0.54 **	0.01
	Al	0.18	0.16	0.36 *	0.37	0.35	0.10	-0.29	-0.14
	Cd	0.08	0.15	0.24	0.22	0.25	0.18	-0.06	-0.01
	Co	-0.31 *	-0.14	-0.36 *	-0.35 *	-0.36 *	-0.08	0.43	0.19
	Cr	-0.33 *	-0.04	-0.40 **	-0.41 **	-0.41 **	-0.10	0.21	0.21
	Cu	-0.37 *	-0.14	-0.39 *	-0.39 *	-0.42 **	-0.11	0.33	0.20
	Fe	-0.01	-0.01	0.05	0.18	0.05	0.02	-0.11	-0.42
	Mn	-0.37	-0.12	-0.44 **	-0.41 **	-0.45 **	-0.08	0.56 **	0.13
	Ni	-0.34	-0.16	-0.35 *	-0.30 *	-0.38 *	-0.12	0.29	0.12
	Pb	0.17	0.11	0.25	0.26	0.28	0.09	-0.14	-0.05
	Zn	-0.24	0.23	0.11	0.09	0.10	0.30	0.16	0.10

1) * 表示在 0.05 置信区间内相关性显著 (双边检验); ** 表示在 0.01 置信区间内相关性显著 (双边检验)

关,与酸可提取态相关性不强^[39].因此,下文主要关注重金属总量与磁学参数的关系.

与反映磁性矿物粒径大小的参数($\chi_{ARM}/SIRM$)相比,反映磁性矿物含量的参数(χ_{ARM} 和 SIRM)与重金属元素总量的相关性更强.即,磁性矿物含量对重金属污染的响应比磁性颗粒大小敏感^[18,20].

χ_{ARM} 和 SIRM 与 Ni、Mn 和 Cr 总量以及 PLI 呈强正相关($r>0.69$) (表 3),表明其指示重金属污染的高可行性.用 SIRM 预测 Ni、Mn 和 Cr 总量以及 PLI 的线性回归方程如图 3 所示. $\chi_{ARM}/SIRM$ 与重金属含量弱相关, $\chi_{ARM}/SIRM$ 越大、重金属含量以及 PLI 越小(表 3).即,亚铁磁和反铁磁性颗粒的磁晶粒

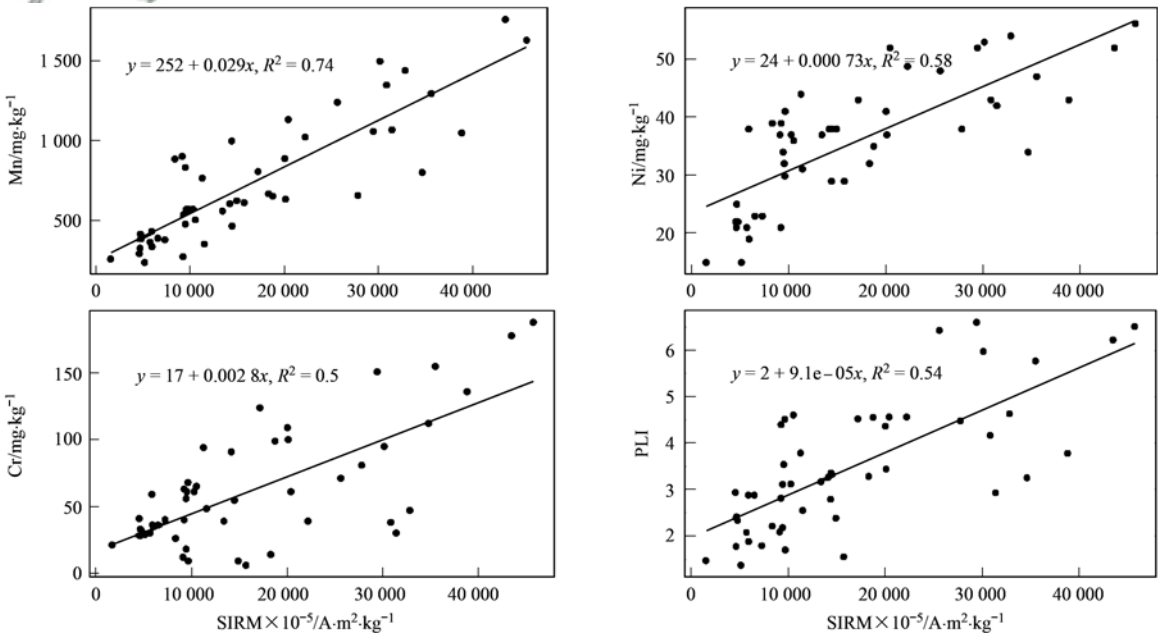


图 3 样品 SIRM 与 Mn、Ni 和 Cr 总量以及 PLI 的线性回归线 ($n=48$)

Fig. 3 Linear correlation analysis between SIRM and Mn, Ni, Cr, and PLI for dust samples

度越小，重金属含量越低^[6,20]。

3.2 重金属与磁性颗粒的来源分析

将磁学参数以及重金属总量数据标准化后进行主成分分析以初步判断其来源，结果如表 4 所示。得到特征值大于 1 的主成分 5 个，累计方差贡献率为 88%。其中，第一主成分的方差贡献率为 50%，该主成分中磁学参数(χ_{ARM} 、SIRM、HIRM、 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$)以及多种元素总量和 PLI 的载荷大于 0.60。重金属元素载荷从大到小排序是：Ni > Mn > Cd > Cu > Pb > Cr > Co。这些元素的主要人为来源均是工业（电厂或工业锅炉）燃煤^[40]，这表明第一主成分中重金属的来源主要与工业活动有关。根据相关分析的结果（表 4），除了 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 和 Pb 的相关性不

显著外，第一主成分中的磁学参数与重金属元素均显著相关，这表明磁性颗粒和这些元素具有相同的人为来源，且主要与工业活动有关。Ng 等^[25]对香港儿童活动场所地表灰尘的研究也发现 Pb 与多个磁学参数（包括 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ ）均无显著相关，认为这和低铅汽油的使用减少了交通源向地表灰尘的 Pb 输入有关。自 1991 年我国使用低铅汽油以来，Pb 的主要来源从交通变为工业锅炉燃煤^[40]，因此，Pb 与其他主要来自工业燃煤的元素同处第一主成分是合理的。第二主成分的贡献率为 16%，该成分主要在 Al 和 Fe 上有较高的载荷，这两种元素为地壳元素^[41]，表明第二主成分主要受制于母质和自然过程。

表 4 样品重金属总量和磁学参数的主成分分析结果¹⁾

Table 4 Principal component analysis for the heavy metal total concentrations and magnetic parameters					
项目	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
χ_{lf}	0.44	-0.51	0.63	-0.19	0.18
χ_{fd}	0.39	0.21	-0.69	0.01	0.24
SIRM	0.92	-0.27	-0.11	-0.15	0.12
HIRM	0.79	-0.5	-0.11	-0.09	-0.25
χ_{ARM}	0.92	-0.27	-0.11	-0.09	0.15
$\chi_{\text{ARM}}/\chi_{\text{lf}}$	0.42	0.34	-0.77	0.17	-0.1
$\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$	-0.85	0.29	0.1	0.29	0
S-ratio	-0.09	0.61	0.06	-0.13	0.68
Al	-0.09	0.81	0.34	-0.01	0.09
Cd	0.82	0.05	0.09	-0.32	-0.08
Co	0.67	0.15	0.16	0.43	0.23
Cr	0.73	0.46	0.08	-0.46	-0.13
Cu	0.79	0.31	0.2	-0.06	-0.12
Fe	0.43	0.62	0	-0.55	-0.26
Mn	0.85	-0.31	-0.04	0.03	0.23
Ni	0.89	-0.13	0.08	0.09	0.18
Pb	0.74	0.36	0.03	0.26	-0.1
Zn	0.47	0.31	0.29	0.45	-0.27
PLI	0.94	0.27	0.14	0.1	-0.07
特征值	9.18	3.04	1.84	1.29	1.01
方差/%	50	16	10	7	5
累计方差/%	50	66	76	83	88

1) 黑体数值代表载荷大于 0.60

3.3 磁学参数与重金属污染源的空间关系

以磁学参数作为替代指标研究工业点源造成的污染，发现工业点源附近、主导风向下风向的区域环境介质磁化率增强、污染物含量较高^[42~44]。本研究也发现在距电厂较近且在其主导风向（东南风）下风向的游乐场 Mn、Ni、Cr 和 Cd 总量以及 PLI 指标取值较大（图 4），部分磁学参数（SIRM、 χ_{ARM} 、 χ_{fd} 和 $\chi_{\text{ARM}}/\chi_{\text{lf}}$ ）也具有相似的空间特征（图 5）。参考重金属含量和磁学参数的空间分布，初步将游乐场分成两类：A 类距电厂较近且在其主导风向下风向，

包括编号为 Site3、Site4 和 Site6 的游乐场；其他距电厂较远或不在其下风向的游乐场为 B 类。虽然 Site7 距离电厂较近，但是不在其下风向，PLI 和磁学参数值均较低，因此，将其归于 B 类。方差分析表明两类儿童游乐场的磁学参数和重金属总量均存在显著差异（表 5）。A 类儿童游乐场的 Mn、Ni、Cr 和 Cd 总量以及 PLI 显著高于 B 类（ $P < 0.01$ ）。由于 Mn、Ni、Cr 和 Cd 主要来自电厂燃煤^[40]，推断电厂燃煤是该工业区儿童游乐场地表灰尘重金属的重要来源。A 类的 χ_{lf} 和 SIRM 显著较大（ $P < 0.05$ ）（表

5), 表明位于工业源下风向且距离较近的地表灰尘磁性矿物含量较高^[15, 20]. A 类的 χ_{fd} 和 χ_{ARM}/χ_{If} 也显著较大($P < 0.05$), 表明 SP 占比较大^[15, 36]. 燃烧

产生的磁性颗粒主要为细颗粒, 以 SP 颗粒为主并伴有 SSD 颗粒^[15], 因此, 推断 A 类儿童游乐场地表灰尘中的磁性颗粒更多地来源于电厂燃煤.

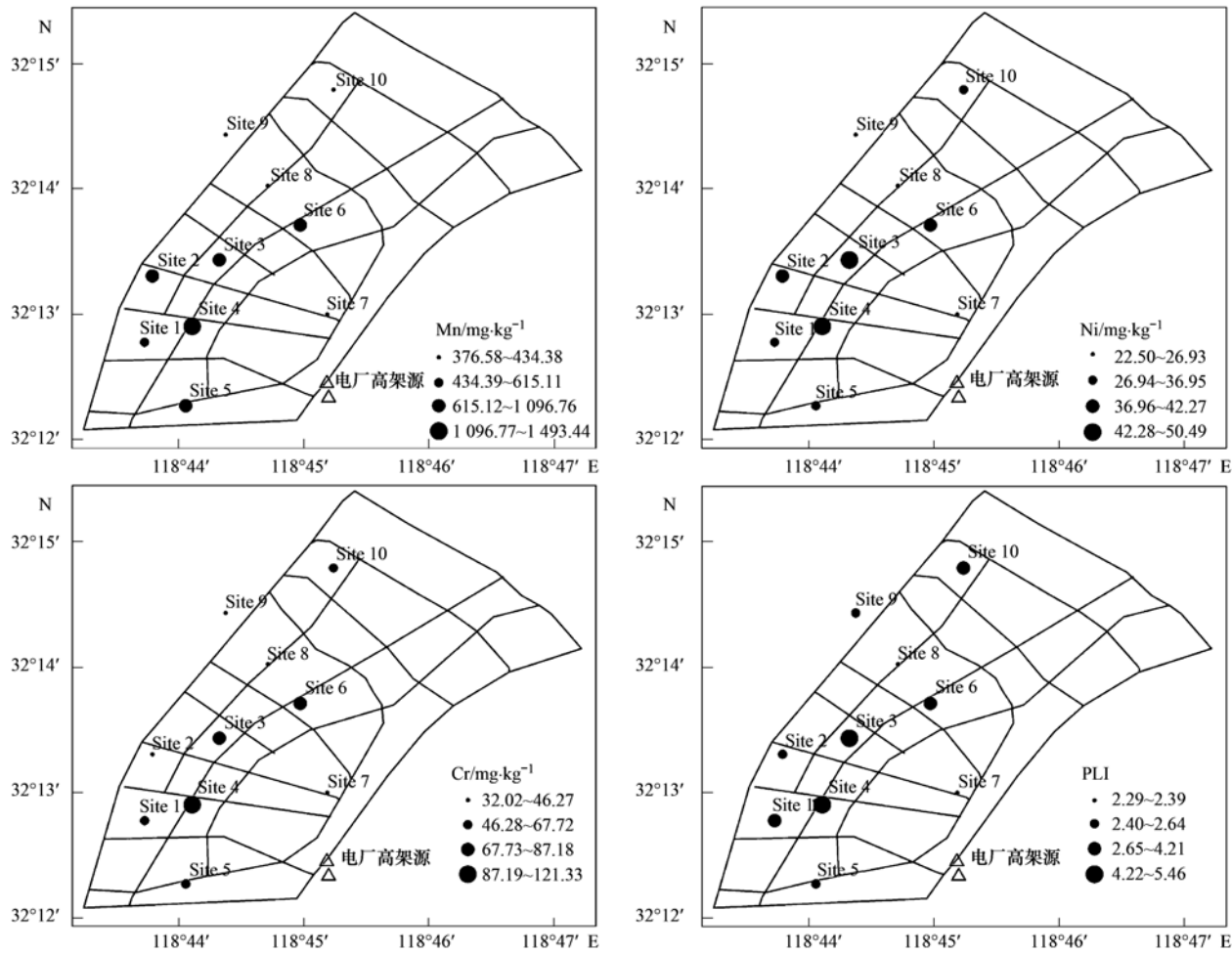


图 4 Mn、Ni、Cr 总量以及 PLI 指数的空间分布

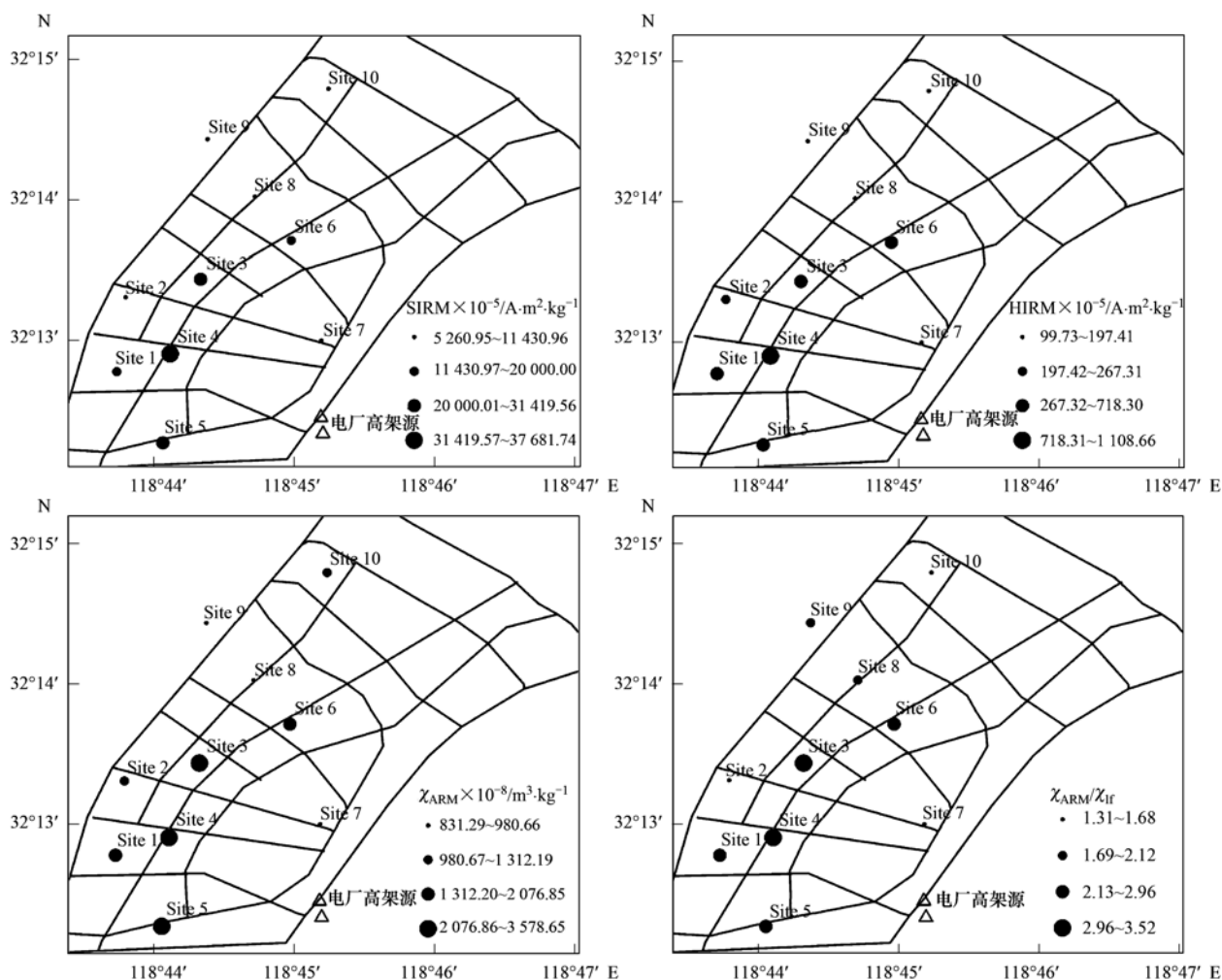
Fig. 4 Spatial distribution of total concentrations for Mn, Ni, Cr and PLI

表 5 两类儿童游乐场的磁学指标、重金属含量以及 PLI 比较¹⁾

Table 5 Comparison of magnetic parameters, heavy metal concentrations and PLI in two types of sampling sites

指标	平均值		方差分析结果	
	A 类	B 类	F	P
$\chi_{If} \times 10^{-8}/m^3 \cdot kg^{-1}$	1 186.88	830.10	6.42	0.014
$\chi_{fd}/\%$	5.32	2.93	6.69	0.013
$SIRM \times 10^{-5}/A \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$	27 324.80	11 895.44	31.50	0.000
$\chi_{ARM} \times 10^{-8}/m^3 \cdot kg^{-1}$	2 775.07	1 394.52	33.30	0.000
$HIRM \times 10^{-5}/A \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$	762.90	319.59	21.50	0.000
χ_{ARM}/χ_{If}	3.24	1.95	5.68	0.021
$\chi_{ARM}/SIRM \times 10^{-3}/m \cdot A^{-1}$	0.10	0.13	9.41	0.004
$Cr/mg \cdot kg^{-1}$	94.13	49.29	13.15	0.000
$Mn/mg \cdot kg^{-1}$	1 133.60	562.82	43.36	0.000
$Ni/mg \cdot kg^{-1}$	46.47	30.94	38.26	0.000
PLI	5.01	2.82	51.11	0.000

1) A 类距电厂较近且在其主导风向下风向; B 类距电厂较远或不在其主导风向下风向

图5 SIRM、HIRM、 χ_{ARM} 和 χ_{ARM}/χ_{IF} 的空间分布Fig. 5 Spatial distribution of SIRM, HIRM, χ_{ARM} and χ_{ARM}/χ_{IF}

4 结论

(1)研究区内的户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染问题不容忽视,污染程度为中度到高度;重金属元素存在不同程度的富集,特别是Cd、Zn、Cu和Pb为极高富集。

(2)研究区内的户外儿童游乐场地表灰尘磁性矿物含量相对较高,以亚铁磁性矿物为主,主要以假单畴-多畴颗粒存在,少数样品有一定的超顺磁颗粒。

(3)磁学参数可以有效指示工业区户外儿童游乐场地表灰尘的重金属污染状况,表现在以下3个方面。①部分磁学参数与重金属元素总量和酸可提取态占比均显著相关,且与总量的相关性较强;其中,Mn、Ni、Cr总量以及PLI与 χ_{ARM} 和SIRM的相关性较高。②磁学参数(SIRM、 χ_{ARM} 、 χ_{IF} 和 χ_{ARM}/χ_{IF})与Mn、Ni、Cr和Cd总量以及PLI具有一致的空间

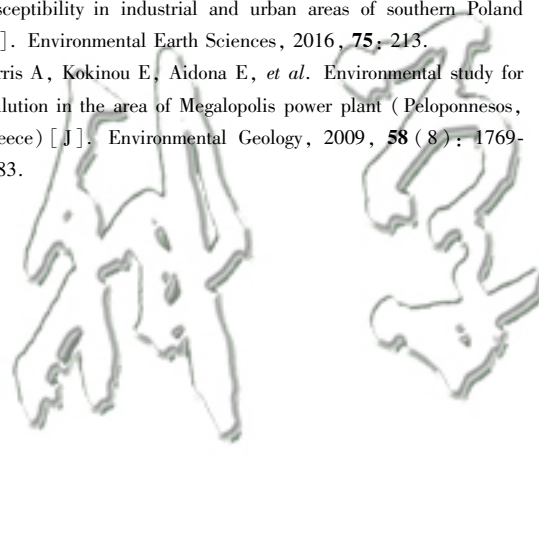
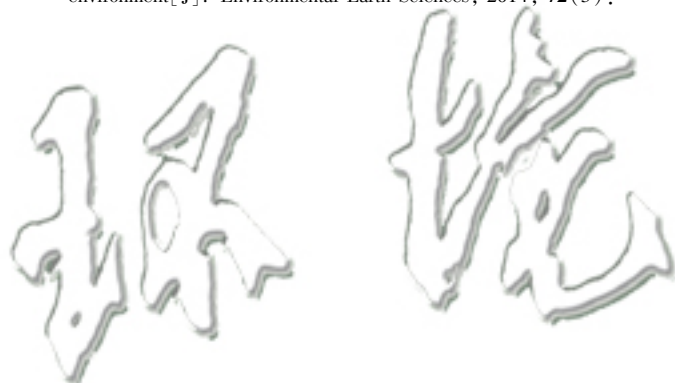
变化特征,表现为距电厂较近且在其下风向的游乐场重金属总量、PLI以及磁学参数值均较高。③重金属和磁性矿物均主要来自工业活动,特别是电厂燃煤。

参考文献:

- [1] Cao S Z, Duan X L, Zhao X G, *et al.* Health risks of children's cumulative and aggregative exposure to metals and metalloids in a typical urban environment in China[J]. *Chemosphere*, 2016, **147**: 404-411.
- [2] Mohmand J, Eqani S A M A S, Fasola M, *et al.* Human exposure to toxic metals via contaminated dust: bio-accumulation trends and their potential risk estimation [J]. *Chemosphere*, 2015, **132**: 142-151.
- [3] Wang J H, Li S W, Cui X Y, *et al.* Bioaccessibility, sources and health risk assessment of trace metals in urban park dust in Nanjing, southeast China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, **128**: 161-170.
- [4] Liu Q S, Roberts A P, Larrasoana J C, *et al.* Environmental magnetism: principles and applications [J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, **50**(4): RG4002.
- [5] Botsou F, Sungur A, Kelepertzis E, *et al.* Insights into the

- chemical partitioning of trace metals in roadside and off-road agricultural soils along two major highways in Attica's region, Greece [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, **132**: 101-110.
- [6] Bourliva A, Papadopoulou L, Aidona E. Study of road dust magnetic phases as the main carrier of potentially harmful trace elements[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **553**: 380-391.
- [7] Bourliva A, Papadopoulou L, Aidona E, *et al.* Characterization and geochemistry of technogenic magnetic particles (TMPs) in contaminated industrial soils: assessing health risk via ingestion [J]. *Geoderma*, 2017, **295**: 86-97.
- [8] Jordanova D, Jordanova N, Petrov P. Magnetic susceptibility of road deposited sediments at a national scale-Relation to population size and urban pollution [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **189**: 239-251.
- [9] 刘飞, 褚慧敏, 郑祥民. 上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应[J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4374-4380.
- Liu F, Chu H M, Zheng X M. Magnetic Response of dust-loaded leaves in parks of shanghai to atmospheric heavy metal pollution [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4374-4380.
- [10] Liu D X, Ma J H, Sun Y L, *et al.* Spatial distribution of soil magnetic susceptibility and correlation with heavy metal pollution in Kaifeng City, China[J]. *CATENA*, 2016, **139**: 53-60.
- [11] Muñoz D, Aguilar B, Fuentealba R, *et al.* Environmental studies in two communes of Santiago de Chile by the analysis of magnetic properties of particulate matter deposited on leaves of roadside trees[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **152**: 617-627.
- [12] Szuskiewicz M, Łukasik A, Magiera T, *et al.* Combination of geo-pedo-and technogenic magnetic and geochemical signals in soil profiles-diversification and its interpretation: a new approach [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **214**: 464-477.
- [13] 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.
- [14] 许淑婧, 夏敦胜, 春喜, 等. 呼和浩特市大气降尘磁学特征及其环境意义[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(4): 1004-1011.
- Xu S J, Xia D S, Chun X, *et al.* Magnetic properties of dustfall in Hohhot and their environmental implications [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(4): 1004-1011.
- [15] Dearing J. Environmental magnetic susceptibility: using the bartington MS2 system[M]. Kenilworth: Chi Publishing, 1999.
- [16] Crosby C J, Fullen M A, Booth C A, *et al.* A dynamic approach to urban road deposited sediment pollution monitoring (Marylebone Road, London, UK) [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2014, **105**: 10-20.
- [17] 房妮, 张俊辉, 王瑾, 等. 西安城市不同功能区街道灰尘磁学特征及环境污染分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 924-935.
- Fang N, Zhang J H, Wang J, *et al.* Magnetic characteristics and environmental pollution analysis of street dust in different functional zones of Xi'an city[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 924-935.
- [18] Li H M, Qian X, Wei H T, *et al.* Magnetic properties as proxies for the evaluation of heavy metal contamination in urban street dusts of Nanjing, southeast China [J]. *Geophysical Journal International*, 2014, **199**(3): 1354-1366.
- [19] 聂燕, 王新, 王博, 等. 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[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3438-3446.
- Nie Y, Wang X, Wang B, *et al.* Magnetic responses of heavy metals in street dust of typical mine-based city, northwest China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3438-3446.
- [20] 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.
- [21] Järup L. Hazards of heavy metal contamination [J]. *British Medical Bulletin*, 2003, **68**(1): 167-182.
- [22] Chen H, Lu X W, Li L Y. Spatial distribution and risk assessment of metals in dust based on samples from nursery and primary schools of Xi'an, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **88**: 172-182.
- [23] Lu X W, Zhang X L, Li L Y, *et al.* Assessment of metals pollution and health risk in dust from nursery schools in Xi'an, China[J]. *Environmental Research*, 2014, **128**: 27-34.
- [24] Zhu Z M, Sun G Y, Bi X Y, *et al.* Identification of trace metal pollution in urban dust from kindergartens using magnetic, geochemical and lead isotopic analyses [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **77**: 9-15.
- [25] Ng S L, Chan L S, Lam K C, *et al.* Heavy metal contents and magnetic properties of playground dust in Hong Kong [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2003, **89**(3): 221-232.
- [26] Peña-Fernández A, Lobo-Bedmar M C, González-Muñoz M J. Annual and seasonal variability of metals and metalloids in urban and industrial soils in Alcalá de Henares (Spain) [J]. *Environmental Research*, 2015, **136**: 40-46.
- [27] 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.
- [28] Angulo E. The Tomlinson pollution load index applied to heavy metal 'Mussel-Watch' data: a useful index to assess coastal pollution [J]. *Science of the Total Environment*, 1996, **187**(1): 19-56.
- [29] Chabukdhara M, Nema A K. Assessment of heavy metal contamination in Hindon River sediments: a chemometric and geochemical approach [J]. *Chemosphere*, 2012, **87**(8): 945-953.
- [30] 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.
- [31] 方宏达, 陈锦芳, 段金明, 等. 厦门市郊区 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 中重金属的形态特征及生物可利用性研究[J]. *生态环境学报*, 2015, **24**(11): 1872-1877.
- Fang H D, Chen J F, Duan J M, *et al.* Speciation characteristics and bioavailability of heavy metal elements in PM_{2.5} and PM₁₀ in the suburbs of Xiamen[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(11): 1872-1877.
- [32] Keshavarzi B, Tazarvi Z, Rajabzadeh M A, *et al.* Chemical speciation, human health risk assessment and pollution level of selected heavy metals in urban street dust of Shiraz, Iran [J].

- Atmospheric Environment, 2015, **119**: 1-10.
- [33] Yildirim G, Tokaloğlu Ş. Heavy metal speciation in various grain sizes of industrially contaminated street dust using multivariate statistical analysis [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, **124**: 369-376.
- [34] Perin G, Craboledda L, Lucchese M, *et al.* Heavy metal speciation in the sediments of northern Adriatic Sea: a new approach for environmental toxicity determination [A]. In: Lakkas TD (ed.). Heavy Metals in the Environment, Vol 2. Edinburgh: CEP Consultants, 1985. 454-456.
- [35] Yang J, Chen L, Liu L Z, *et al.* Comprehensive risk assessment of heavy metals in lake sediment from public parks in Shanghai [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, **102**: 129-135.
- [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] 薛勇, 周倩, 李远, 等. 曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1306-1312.
- Xue Y, Zhou Q, Li Y, *et al.* Heavy metals accumulation in the Caofeidian reclamation soils: indicated by soil magnetic susceptibility[J]. Environmental Science, 2016, **37**(4): 1306-1312.
- [38] Sipos P, Márton M, May Z, *et al.* Geochemical, mineralogical and magnetic characteristics of vertical dust deposition in urban environment[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, **72**(3): 905-914.
- [39] Botsou F, Karageorgis AP, Dassenakis E, *et al.* Assessment of heavy metal contamination and mineral magnetic characterization of the Asopos River sediments (Central Greece) [J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, **62**(3): 547-563.
- [40] Tian H Z, Zhu C Y, Gao J J, *et al.* Quantitative assessment of atmospheric emissions of toxic heavy metals from anthropogenic sources in China: historical trend, spatial distribution, uncertainties, and control policies[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(17): 12107-12166.
- [41] Wang J, Hu Z M, Chen Y Y, *et al.* Contamination characteristics and possible sources of PM₁₀ and PM_{2.5} in different functional areas of Shanghai, China[J]. Atmospheric Environment, 2013, **68**: 221-229.
- [42] Hansard R, Maher B A, Kinnersley R. Biomagnetic monitoring of industry-derived particulate pollution [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(6): 1673-1681.
- [43] Magiera T, Parzenty H, Łukasik A. The influence of the wind direction and plants on the variability of topsoil magnetic susceptibility in industrial and urban areas of southern Poland [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, **75**: 213.
- [44] Sarris A, Kokinou E, Aidona E, *et al.* Environmental study for pollution in the area of Megalopolis power plant (Peloponnesos, Greece) [J]. Environmental Geology, 2009, **58**(8): 1769-1783.



CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM _{2.5} in Jingjinji Region, 2015	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM _{2.5} Fine Particulates Based on Multi-source Data	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM _{2.5} in East China	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Heze	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} in Selected Cities in Liaoning Province	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM _{2.5} in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ($\delta^2\text{H}$) and Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO ₂ Emissions from the Xin'anjiang Reservoir	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO ₂ Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor	LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N ₂ O Emission in the North China Plain	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO ₂ and CH ₄ Emissions from Rivers	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)