

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

2014年APEC前后北京城区PM_{2.5}中水溶性离子特征分析 杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明(4325)

2013年北京市不同方位PM_{2.5}背景浓度研究 李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨(4331)

APEC期间北京空气质量改善对比分析 李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达(4340)

嘉兴市春季PM、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应 沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王聿(4348)

烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响 赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁(4358)

典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡 张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤(4366)

上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应 刘飞,褚慧敏,郑祥民(4374)

重庆金佛山降雪中飞灰颗粒物特征及来源解析 于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立(4381)

利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究 梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤(4389)

低浓度CO₂在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附 刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真(4396)

红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制 郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞(4403)

中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征 安思危,孙涛,马明,王定勇(4414)

基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射漫射衰减系数 张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮(4420)

白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征 郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明(4430)

小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应 李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰(4436)

湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响 余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治(4444)

贵州纳朵洞洞穴水文地球化学变化特征及其环境意义 沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖(4455)

碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析 邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国(4464)

钱塘江(杭州段)表层水中全氟化合物的残留水平及分布特征 张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳(4471)

长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价 田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣(4479)

城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例 齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁(4486)

柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响 覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇(4494)

微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响 左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩(4501)

扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律 陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍(4509)

生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应 张树楠,肖润林,刘锋,吴金水(4516)

开放系统下方解石对磷的去除 李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文(4523)

铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系 李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生(4531)

基于优质碳源提供的CAMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究 程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良(4539)

ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验 周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵(4546)

基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价 符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春(4553)

北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析 张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平(4561)

广州市小学生多环芳烃内暴露水平 苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞(4567)

构建三元混合污染物的三维等效图 刘雪,刘树深,刘海玲(4574)

化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新(4582)

不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性 严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑(4591)

基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图 施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩(4600)

土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究 谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰(4609)

纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响 李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳(4615)

蜈蚣草中砷与铈的赋存特征及其相互作用 张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚(4623)

纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响 熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟芬琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(4630)

黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响 陈永勤,江玲,徐卫红,迟芬琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭(4642)

耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化 马聪,秦丹,孙倩,于昌平(4651)

浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征 李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎(4659)

缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化 曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源(4667)

华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响 张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊(4676)

再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估 田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙(4682)

《环境科学》第36卷(2015年)总目录 (4690)

《环境科学》征订启事(4347) 《环境科学》征稿简则(4454) 信息(4463,4530,4573,4581)

上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应

刘飞, 褚慧敏*, 郑祥民

(华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241)

摘要: 为探究城市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应, 按照上海市年均主导风设置纵横两个采样断面, 采集城郊区公园绿地中广泛分布的香樟树叶, 进行岩石磁学和重金属元素分析. 结果表明, 样品磁性矿物以亚铁磁性矿物为主导, 磁性颗粒物的含量和粒径由典型工业区沿冬季风方向逐级递减. 对叶片进行超声清洗后磁化率下降63%~90%, 即样品的磁性特征主要取决于叶表附尘. 树叶重金属元素Fe、Mn、Zn、Cu、Cr、V、Pb含量与磁参数显著相关($0.442 \leq R \leq 0.799$, $P < 0.05$), 说明城市公园绿地树叶磁参数可以作为大气重金属污染的替代指标. 运用多元统计分析方法表明, 研究区树叶磁性矿物及重金属含量主要受工业活动和交通道路污染的复合影响.

关键词: 磁参数; 重金属; 树叶; 公园; 污染

中图分类号: X123; X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4374-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.12.007

Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution

LIU Fei, CHU Hui-min*, ZHENG Xiang-min

(Key Laboratory of Geo-information Science of Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: To reveal the magnetic response to the atmospheric heavy metal pollution in leaves along urban parks, Camphor leaf samples, widely distributed at urban parks, were collected along the year leading wind direction of Shanghai, by setting two vertical and horizontal sections, using rock magnetic properties and heavy metal contents analysis. The results showed that the magnetic minerals of samples were predominated by ferromagnetic minerals, and both the concentration and grain size of magnetite particles gradually decreased with the winter monsoon direction from the main industrial district. A rigorous cleaning of leaves using ultrasonic agitator washer could remove about 63%~90% of low-field susceptibility values of the leaves, and this strongly indicated that the intensity of magnetic signal was mainly controlled by the PMs accumulated on the leaves surfaces. Moreover, there was a significant linear relationship between heavy metals contents (Fe, Mn, Zn, Cu, Cr, V and Pb) and magnetic parameters ($0.442 \leq R \leq 0.799$, $P < 0.05$), which suggested that magnetic parameters of urban park leaves could be used as a proxy for atmospheric heavy metal pollution. The results of multivariate statistical analysis showed that the content of magnetic minerals and heavy metal industry-loaded tree leaves was affected by associated pollution of industry and traffic.

Key words: magnetic parameters; heavy metals; tree leaves; parks; pollution

随着经济发展和城市化步伐加快,城市大气颗粒物污染已成为严重的环境问题,引起广泛地关注^[1,2]. 重金属污染是大气颗粒物污染重要的组成部分,寻找大气重金属污染快速监测、有效追踪评估的方法是城市大气颗粒物重金属污染重要的研究领域. 近年来,国内外有利用工业区或交通道路沿线植物叶片的磁学性质研究大气颗粒物污染的报道^[3-15],前人研究指出,在城市工业区或交通道路沿线采集的树叶,由于吸附大量含磁性颗粒的飞灰或降尘,树叶磁参数与重金属含量关系显著,磁参数可以反映某区域大气重金属污染水平^[14,15]. 但前人研究的区域功能单一,范围较小,且只简单提出环境载体的磁性与重金属的相关关系,缺少对污染源的追踪与辨析. 城市绿地是城市环境重要的调节器和缓冲区,也是响应环境污染的敏感区,绿地周边环

境中的污染物对绿地的胁迫作用,对于绿地发挥各类生态效应有着重要的影响. 本研究,根据上海地区年均主导风向设置两条采样断面,采集城郊区公园绿地中广泛分布的香樟树叶,进行岩石磁学和重金属含量分析,旨在探讨利用城市公园绿地树叶磁参数监测区域大气重金属污染水平的可行性,并运用地统计及多元统计分析方法初步探究树叶磁参数和重金属含量的空间特征、相关关系及来源分析,以为城市大气重金属污染的监测提供新的科学依据.

收稿日期: 2015-04-25; 修订日期: 2015-07-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371032); 华东师范大学地理学国家理科基地科研训练及科研能力提高项目(J1310028)

作者简介: 刘飞(1989~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气环境地球化学, E-mail: liufly1982@126.com

* 通讯联系人, E-mail: hmchu.ecnu@gmail.com

1 材料与方法

1.1 采样区概况

上海市地处我国东部沿海,地势平坦开阔,是我国人口最多、经济最发达的地区之一. 宝山区位于其北部,为城市主要工业区,区内分布众多的钢铁冶炼和加工企业、化工厂及大型火力发电厂,交通运输繁忙,空气污染严重^[16];此外,上海属典型东亚季风控制区,冬季以北风或西北风为主,晴多雨少. 因此,当冬季在冷锋前端过境前,扩散条件差,工业区的污染物,特别是含有毒重金属细颗粒物的排放,将影响到上海市区中心,甚至周边地区的大气环境. 为了追踪上述大气污染的影响,本研究根据主导风向,选取了城郊区大部分公园绿地作为研究区域(见图1).

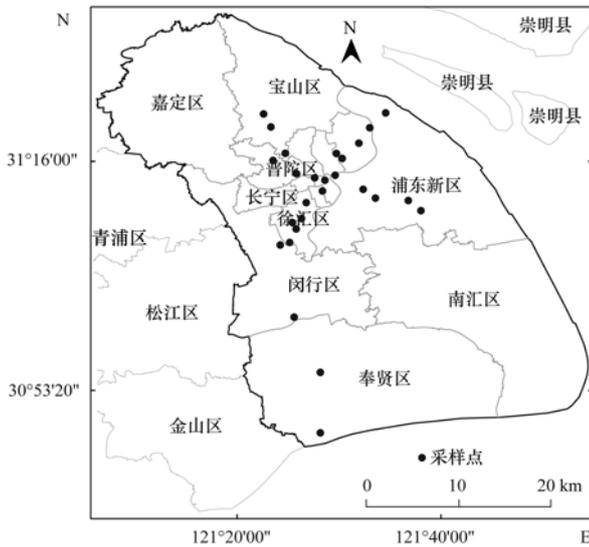


图1 采样点分布示意

Fig. 1 Study area and sampling sites

1.2 采样方法

主要以西北和东北呈十字形方向,大致2~3 km的间隔设置采样点,郊区采样点间距酌情增大. 选择区内广泛分布的常绿树种香樟(*Cinnamomum camphora*)作为研究对象. 为保证树叶表面有一定的附尘积累时间,选择天气晴好且采前2个星期无降雨的时间(2013年底至2014年初)完成. 采样时远离交通道路、工厂及居民楼,每个采样点选择10~15棵香樟树,沿树木不同生长方向,且距离地面约2.5 m高度采集生长期近一年、长势健康的老叶作为一个混合样品,这减少了沉降的不均一性和地面灰尘的干扰. 采集时还应避免手直接接触树叶表面. 采集后,迅速将样品放入采样袋内带回实验室,

再将叶片沿中央脉剪开,一半未清洗自然晾干,另一半用超声清洗机以高纯水洗涤1 h后干燥恒重24 h保存备用.

1.3 分析方法

1.3.1 树叶磁性测量

称取2~3 g未洗涤的树叶样品,压实后放入样品盒中进行磁性测量. 采用英国Bartington MS2磁化率仪测量样品的低频磁化率;采用Dtech2000交变退磁仪、Molspin旋转磁力仪和MMPM10脉冲磁化仪测量样品的非滞剩磁(ARM)和经-300 mT、1 000 mT脉冲磁化后的等温剩磁 IRM_{-300mT} 、SIRM(IRM_{IT}). 根据测量结果计算单位质量磁化率(χ)、非滞剩磁(ARM)、饱和等温剩磁(SIRM)以及 ARM/χ 、 $SIRM/\chi$ 、 S_{-ratio} ($IRM_{-300mT}/SIRM$)等比值参数. 所有磁学测试均在华东师范大学河口海岸学国家重点实验室完成.

1.3.2 元素含量分析

称取0.5 g左右磁性测量后的原样品,利用浓硝酸-氢氟酸-高氯酸消化处理后. 采用美国Varian 710-ES型电感耦合等离子体发射光谱仪测定Fe、Mn、Zn、Cu、Cr、V和Pb等7种重金属元素的含量. 以GBW-07405为质控标样,加标回收率在85%~110%之间. 元素含量分析在华东师范大学地理科学学院完成.

清洗后样品的磁性参数和元素含量测试方法同上.

2 结果与分析

2.1 叶片磁参数分布特征

对研究区27个样品的磁性参数进行质量归一化处理^[9, 11, 12],结果如表1所示.

其中, χ 通常用来指示样品中亚铁磁性矿物含量,也受到矿物晶粒大小的影响^[17];SIRM主要由亚铁磁性和不完整反铁磁性矿物贡献,不受顺磁性和抗磁性物质的影响,但受到矿物晶粒大小的影响^[18, 19]. 由研究区的树叶磁化率空间分布[图2(a)、2(b)]结合表1可知,磁化率值空间差异性较大,高值区主要出现在宝山工业区, χ 最高值为 $9.80 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,并沿着北向南方向逐渐降低,最低值为 $1.80 \times 10^{-8} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,出现在市区西南郊区. 本研究中 χ 和SIRM均低于胡守云等^[14]、隆茜等^[20]研究国内城市工业污染区和交通道路沿线树叶样品测量值,而Gautam等^[11]、Hanesch等^[13]在研究树叶磁化率时认为树种差异对研究结果影响很

表 1 叶片磁参数与重金属含量统计数据($n=27$)

Table 1 Statistical data for magnetic parameters and heavy metal contents of leaf samples

项目	上海市公园绿地	
	范围	平均值 \pm 标准偏差
$\chi \times 10^{-8}/\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	1.80 ~ 9.80	6.02 \pm 2.20
$\text{ARM} \times 10^{-6}/\text{A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$	0.20 ~ 5.39	1.76 \pm 1.52
$\text{SIRM} \times 10^{-6}/\text{A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$	537.51 ~ 1463.34	982.75 \pm 266.78
$S_{\text{-ratio}}$	0.93 ~ 0.97	0.95 \pm 0.01
$\text{ARM}/\chi \times 10^2/\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	0.02 ~ 1.33	0.43 \pm 0.46
ARM/SIRM	0.0001 ~ 0.0067	0.0022 \pm 0.0021
$\text{SIRM}/\chi \times 10^3/\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	12.96 ~ 29.89	17.48 \pm 4.18
$\text{Fe}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	289.73 ~ 742.86	487.69 \pm 105.94
$\text{Mn}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	26.34 ~ 108.38	52.02 \pm 21.80
$\text{Zn}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	12.21 ~ 64.53	28.00 \pm 13.47
$\text{Cu}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	7.58 ~ 14.66	9.73 \pm 1.60
$\text{Cr}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.65 ~ 2.52	1.30 \pm 0.50
$\text{V}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.73 ~ 2.42	1.58 \pm 0.41
$\text{Pb}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.64 ~ 7.88	2.79 \pm 1.90

小. 因此,这种差异主要是因为研究区域为公园绿地,受人类活动影响有限. 图 2(b)中 SIRM 空间分布模式与 χ 值很相似,由图 3 可知,两者的相关性高 ($R_1=0.929, P<0.01$). 据前人研究结果^[21, 22]表明,对树叶样品磁化率值贡献较大的是亚铁磁性矿物. 此外, SIRM 是人工外加磁场下获得的,当样品磁性较弱时,相对于低场质量磁化率,更能突显亚铁磁性矿物携带的人类污染信息^[14].

$S_{\text{-ratio}}$ 值可指示样品中亚铁磁性矿物和不完整的反铁磁性矿物的相对含量^[18]. 由表 1 可知,研究区 $S_{\text{-ratio}}$ 值较高且比较稳定,平均值为 0.95,标准偏差为 0.01,说明样品中所含磁性矿物种类变化不大,主要为亚铁磁性矿物. 由图 2(c)可知,其值分布模式与 χ 和 SIRM 一致,说明本研究中树叶的磁

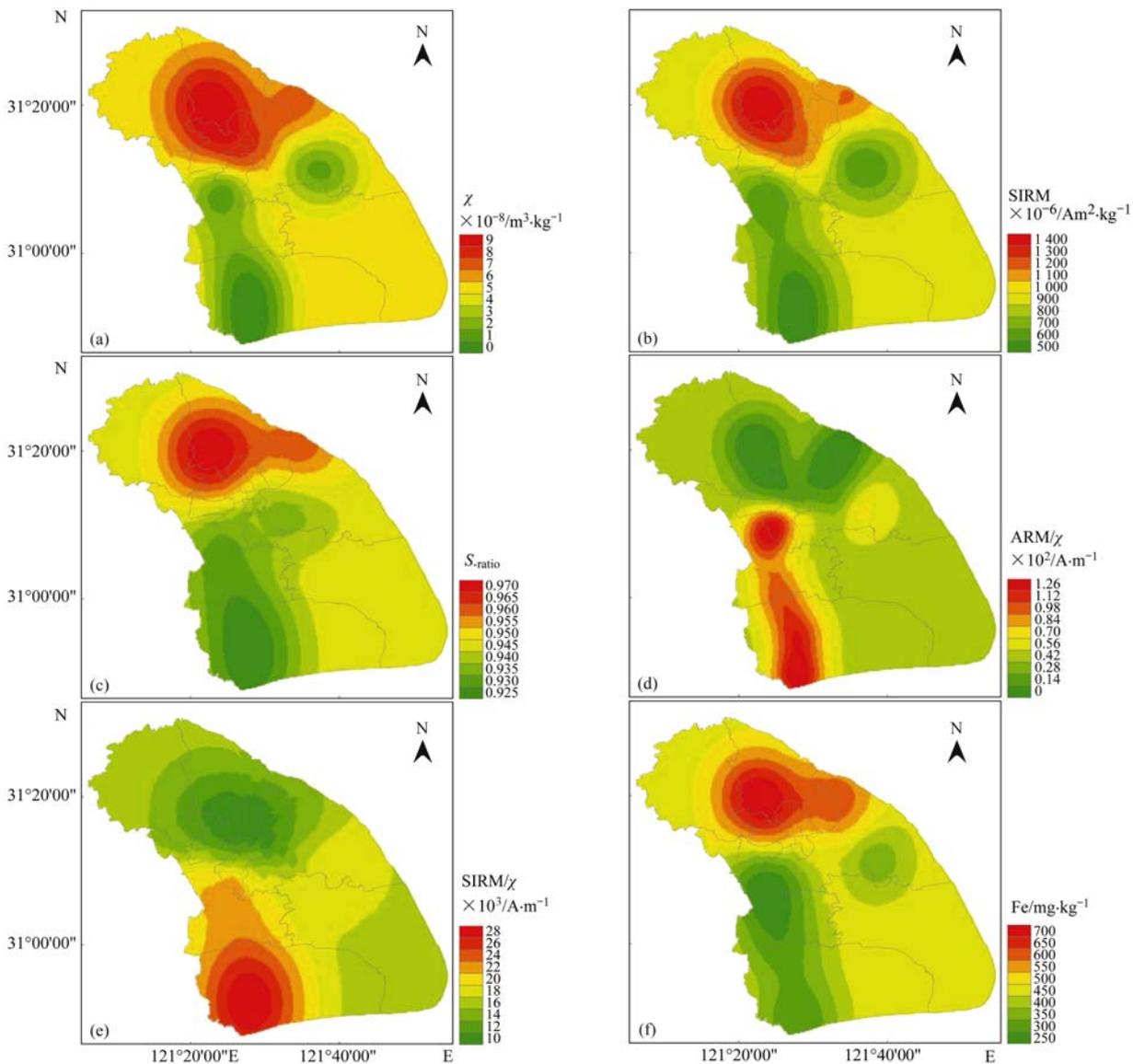


图 2 叶片磁参数和重金属空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of magnetic parameters and heavy metal content of leaf samples

学响应主要为亚铁磁性矿物所致。

ARM/ χ 和 SIRM/ χ 比值可反映与磁畴状态有关的磁性矿物类型和颗粒大小的变化^[18]。当样品的磁性矿物组成较单一时,ARM/ χ 和 SIRM/ χ 主要指示磁性矿物颗粒的大小变化,低值反映样品中以较粗的多畴(MD,粒径 > 15 μm)或假单畴(PSD,粒径 0.50 ~ 15 μm)颗粒为主,高值代表样品以较细的稳定单畴(SSD,粒径 0.03 ~ 0.50 μm)颗粒为主^[22]。由图 2(d) 和 2(e) 中 ARM/ χ 和 SIRM/ χ 空间分布图可以看出,在宝山工业区,ARM/ χ 和 SIRM/ χ 的值比较低,说明该区域主要富集粗磁畴的磁性颗粒,且磁畴颗粒随着冬季主导风向由北向南逐渐变细。

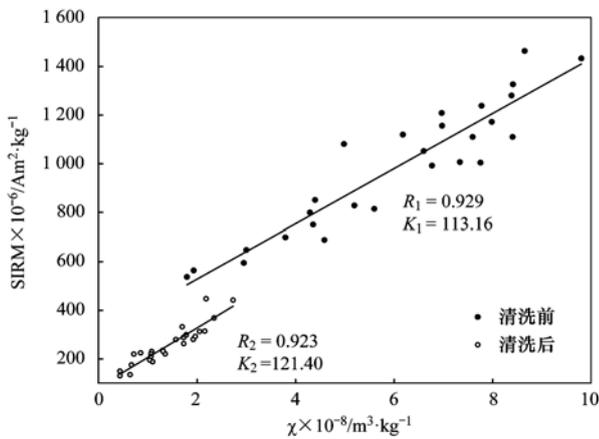


图 3 树叶样品 χ 与 SIRM 相关

Fig. 3 Correlation analysis between χ and SIRM

综上所述,在典型污染源区域,磁性矿物含量较高,磁颗粒较粗,随着季风方向距离的增加,磁性矿物的浓度和磁颗粒粒径逐渐减小,这符合风尘沉积物空间变化特征,也为进一步构建污染物扩散路径或颗粒物源解析提供参考。

2.2 植物叶片中重金属元素分布特征

由表 1 的重金属含量统计结果可得:树叶样品中 Fe、Mn 含量最高,Zn、Cu 含量次之,平均值分别为 487.69、52.02、28.00 和 9.73 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。典型人为污染元素 Cr、V、Pb 等在叶片中也相对富集,其最大值某种程度上可表明大气颗粒物污染的沉降情况。各元素最大值与最小值差异显著,说明部分研究区域可能受到多种环境污染影响,即污染源呈现出多元性与复杂性^[14]。从本次研究区域来看,重金属高值区主要集中在城市北部宝山工业区,也沿冬季季风方向逐渐降低,如图 2(f) 中 Fe 含量空间分布图所示,这与磁化率指标基本一致,反映了重金属与工业区化石燃料燃烧及其他生产活动排放的磁性颗粒来源上具有一致性^[23, 24]。

3 讨论

为进一步说明城市公园绿地中树叶的磁测可快速有效监测大气重金属污染的范围和程度,需对树叶磁参数和重金属的相关性以及影响磁参数和重金属变化的主要因素进行探究。

对指数数据标准化后进行系统聚类分析,结果如图 4 所示,其中横坐标距离越近,代表指标间的相关性越高。从中可知,各指标基本分为两类,一类主要为代表亚铁磁性矿物含量的 χ 、SIRM、 $S_{\text{-ratio}}$ 和重金属等,另一类代表大气颗粒物粒径大小的磁化率组合指标。其中,重金属元素与 χ 、SIRM、 $S_{\text{-ratio}}$ 等指标距离均在 5 左右,两者的相关性很高。同时结合表 2 分析,主要磁参数与重金属元素之间均呈显著的相关关系($0.442 \leq R \leq 0.799$, $P < 0.05$)。说明释放到大气中的粉尘颗粒物中含有很多磁性物质,重金属元素明显地吸附于磁性组分上,并在公园绿地的树叶上有所响应。可通过这种相关性建立磁性-重金属元素之间的定量关系,通过对研究区树叶

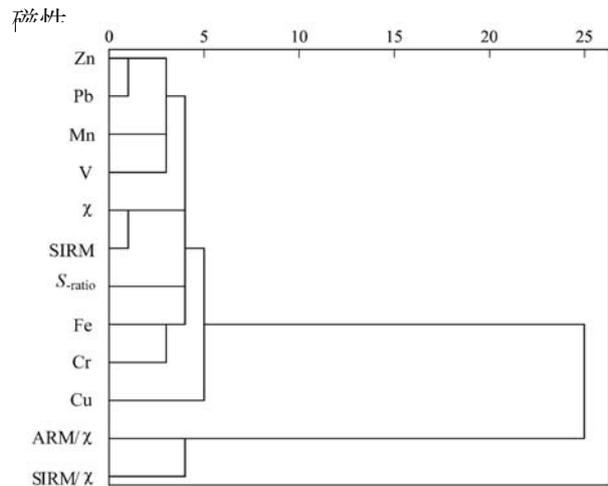


图 4 磁参数与重金属元素指标聚类树状图

Fig. 4 Dendrogram between magnetic parameters and heavy metals

表 2 磁参数和元素之间相关关系统计¹⁾ ($n = 27$)

Table 2 Correlation coefficients between magnetic parameters and heavy metals

项目	χ	SIRM	ARM/ χ	SIRM/ χ	$S_{\text{-ratio}}$
Fe	0.748 **	0.736 **	-0.745 **	-0.495 **	0.741 **
Mn	0.738 **	0.799 **	-0.658 **	-0.362	0.764 **
Zn	0.677 **	0.704 **	-0.530 **	-0.348	0.691 **
Cu	0.635 **	0.634 **	-0.474 **	-0.442 *	0.686 **
Cr	0.756 **	0.744 **	-0.770 **	-0.486 *	0.620 **
V	0.734 **	0.681 **	-0.773 **	-0.594 **	0.664 **
Pb	0.783 **	0.788 **	-0.630 **	-0.464 *	0.786 **

1) * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

测量,初步评估该区域大气重金属污染程度. 本研究中,城郊区公园绿地均受到不同程度的重金属污染,以宝山工业区最为严重,而公园绿地树叶可以作为一种经济、快速、有效的磁测载体.

为探究影响树叶磁参数和重金属变化的主要因素,文献[25, 26]通过观察雨水对白桦树叶表面的冲刷,发现叶表磁化率值随着磁性颗粒的去除而降低. 张春霞等^[15]在研究降雨前后高速公路附近松树树叶磁参数差异时也发现同样规律,说明叶表降尘量对树叶磁参数的变化有重要影响. 为此,本研究对同种样品进行超声清洗,说明叶表降尘对样品磁参数变化的贡献程度. 据统计,清洗后样品磁化率下降 63% ~ 90%,且不能去除完全. 这与前人研究结果一致. 由图 3 可知,处理后的 χ 与 SIRM 相关性依然很强 ($R_2 = 0.923$, $P < 0.01$), 处理前后回归方程斜率 K 值发生了变化,可能是清洗后样品所含的磁铁矿含量不同导致^[15]. 这也说明自然生长的树叶会受到雨水间歇性冲刷的影响,树叶磁参数反映的是较短时间尺度上城市大气污染状况.

城市叶表降尘量还和很多因素有关,如树种、

叶龄、气象条件和人类活动等有关. 刘玲等^[27]在研究不同树木叶片吸附空气悬浮颗粒及累积重金属的差异时,发现香樟树叶因具有特殊的微形态,相较于广玉兰、女贞等绿化树种其叶片单位面积日吸附 d_{100} 量更大,且吸附的主要是对人体健康危害较大的粒径小于 $1.0 \mu\text{m}$ 的细颗粒. 故本研究选用对大气污染监测与防治具有重要意义的香樟树叶作为研究对象. 而统一采用生长期近一年的老叶,可排除树种和叶龄差异对叶表降尘量的影响,同一时期对研究区域不大的上海,气象条件差异也较小. 因此,需进一步区分人类活动类型即人类污染来源的不同,对树叶磁参数和重金属变化的影响.

将指标数据标准化后进行主成分分析 (principal component analysis, PCA) 初步判断来源,其中 KMO (kaiser meyer olkin) 检验值为 0.820, Bartlett's 检验值为 $P < 0.001$,说明数据取自正态分布,总体样本相关矩阵为非单位矩阵,适合做主成分分析. 根据特征向量选取准则 (特征值 > 1.0), PCA 旋转矩阵 (表 3 和表 4) 可得到 2 个因子特征值 > 1 , 占总方差的 82.482%. 第一因子 (F1) 的贡献率为

表 3 上海地区植物叶片主成分特征值¹⁾

Table 3 Eigenvalues of major components in dust-loaded tree leaves of Shanghai district

成分	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	特征值	方差/%	累积/%	特征值	方差/%	累积/%	特征值	方差/%	累积/%
1	7.595	75.945	75.945	7.595	75.945	75.945	4.490	44.903	44.903
2	0.654	6.537	82.482	0.654	6.537	82.482	3.758	37.579	82.482
3	0.480	4.803	87.284						
4	0.386	3.859	91.143						

1) 提取方法: 主成分分析

44.903%, χ 、SIRM、Fe、Cr、V 在 F1 上有较高的正载荷,第二因子 (F2) 的贡献率为 37.579%, Zn、Cu、Pb 在 F2 上有较高的正载荷. F1 可能代表了上海公园绿地树叶受工业活动影响,特别是燃煤及炼钢产生的标识元素 Fe、V. F2 可能代表了交通污染源^[28],具有明显汽车尾气排放特征的元素 Pb 在 F2 上具有明显的高载荷. 虽然上海已使用无铅汽油,但无铅汽油是指汽油含铅量在 $0.013 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,并非绝对无铅^[29],且早期交通污染累积在土壤中 Pb 元素也会再释放沉降到树叶上. 车体磨损物产生的 Zn、Cu 在 F2 上也有一定的正载荷. 通过旋转成分矩阵也发现, Mn、 $S_{\text{-ratio}}$ 在 F1 和 F2 上都有较高载荷,表明该区域内,树叶样品中重金属与磁性物质含量受到多种污染源的共同影响.

表 4 上海地区植物叶片主成分负荷¹⁾

Table 4 Component matrixes in dust-loaded tree leaves of Shanghai district

项目	旋转变换后主成分因子			
	F1	F2	F1	F2
χ	0.894	-0.222	0.813	0.433
SIRM	0.894	-0.187	0.790	0.459
$S_{\text{-ratio}}$	0.858	0.044	0.609	0.607
Fe	0.847	-0.262	0.805	0.372
Mn	0.907	-0.011	0.682	0.598
Zn	0.874	0.347	0.417	0.843
Cu	0.796	0.410	0.317	0.837
Cr	0.847	-0.344	0.860	0.310
V	0.862	-0.062	0.683	0.531
Pb	0.928	0.296	0.492	0.841

1) 黑体数值代表高载荷; 旋转法: 具有 Kaiser 标准化的正交旋转法; 旋转在 3 次迭代后收敛

此外,为深入研究树叶磁学响应的机制,明确颗粒污染物的特征与来源,在后期的研究中,需要发展更多更精确的方法。如可收集叶表附尘利用热磁曲线或选择典型样品的等温剩磁获得曲线及磁滞回线等确定载磁矿物的类型^[30, 31],用扫描电镜和能谱分析等都将进一步确定颗粒物矿物组分和含量^[32, 33],追踪颗粒物来源及迁移规律。

4 结论

(1)研究区树叶样品附着磁颗粒以亚铁磁性矿物为主。磁学指标 χ 、SIRM 和 S_{-ratio} 呈现以宝山工业区为高值区,并沿冬季风方向随距离的增加逐级递减的模式,低的 ARM/ χ 和 SIRM/ χ 组合指示了该区域主要富集粗磁畴的磁性颗粒,且随冬季风向附着磁颗粒粒径逐渐变细。

(2)对树叶样品超声清洗后磁化率下降 63% ~ 90%,表明树叶磁化率的高低主要取决于树叶表面吸附的灰尘量。

(3)附着颗粒物重金属元素 Fe、Mn、Zn、Cu、Cr、V、Pb 含量与反映亚铁磁性矿物含量的 χ 、SIRM、 S_{-ratio} 呈显著的正相关($0.442 \leq R \leq 0.799$, $P < 0.05$)。因此,可利用城市公园绿地树叶磁测手段监测区域大气重金属污染水平。通过主成分分析,表明公园绿地树叶样品主要受工业活动和交通道路的复合污染。

参考文献:

- [1] Li H M, Qian X, Wang Q G. Heavy metals in atmospheric particulate matter: a comprehensive understanding is needed for monitoring and risk mitigation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(23): 13210-13211.
- [2] Cheng Z, Jiang J K, Fajardo O, *et al.* Characteristics and health impacts of particulate matter pollution in China (2001-2011) [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **65**: 186-194.
- [3] Rai P K, Chutia B M. Biomagnetic monitoring of Atmospheric particulate Pollution through Roadside tree leaves in Aizawl city, Mizoram and their temporal and spatial variations [J]. *International Research Journal of Environment Science*, 2014, **3**(8): 46-53.
- [4] Rai P K. Environmental magnetic studies of particulates with special reference to biomagnetic monitoring using roadside plant leaves [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **72**: 113-129.
- [5] Yin G, Hu S Y, Cao L W, *et al.* Magnetic properties of tree leaves and their significance in atmospheric particle pollution in Linfen City, China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2013, **23**(1): 59-72.
- [6] Hansard R, Maher B A, Kinnersley R P. Rapid magnetic biomonitoring and differentiation of atmospheric particulate pollutants at the roadside and around two major industrial sites in the U. K. [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(8): 4403-4410.
- [7] Kardel F, Wuyts K, Maher B A, *et al.* Intra-urban spatial variation of magnetic particles: monitoring via leaf saturation isothermal remanent magnetisation (SIRM) [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **55**: 111-120.
- [8] Maher B A, Moore C, Matzka J. Spatial variation in vehicle-derived metal pollution identified by magnetic and elemental analysis of roadside tree leaves [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(2): 364-373.
- [9] Szönyi M, Sagnotti L, Hirt A M. A refined biomonitoring study of airborne particulate matter pollution in Rome, with magnetic measurements on *Quercus ilex* tree leaves [J]. *Geophysical Journal International*, 2008, **173**(1): 127-141.
- [10] Prajapati S K, Pandey S K, Tripathi B D. Monitoring of vehicles derived particulates using magnetic properties of leaves [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, **120**(1-3): 169-175.
- [11] 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.
- [12] Moreno E, Sagnotti L, Dinarès-Turell J, *et al.* Biomonitoring of traffic air pollution in Rome using magnetic properties of tree leaves [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(21): 2967-2977.
- [13] Hanesch M, Scholger R, Rey D. Mapping dust distribution around an industrial site by measuring magnetic parameters of tree leaves [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(36): 5125-5133.
- [14] 胡守云, 段雪梅, 沈明洁, 等. 北京首钢工业区大气重金属污染树叶的磁学响应 [J]. *科学通报*, 2008, **53**(4): 437-445.
- [15] 张春霞, 黄宝春, 李震宇, 等. 高速公路附近树叶的磁学性质及其对环境污染的指示意义 [J]. *科学通报*, 2006, **51**(12): 1459-1468.
- [16] 包良满, 张元勋, 李晓林, 等. 上海工业区大气颗粒物中硫的化学形态和分布 [J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(3): 231-236.
- [17] Oldfield F. Mud and magnetism: records of late Pleistocene and Holocene environmental change recorded by magnetic measurements [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2013, **49**(3): 465-480.
- [18] Thompson R, Oldfield F. *Environmental magnetism* [M]. London: Allen & Unwin, 1986. 1-227.
- [19] 杨涵, 熊黑钢, 陈学刚. 石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3537-3545.
- [20] 隆茜, 周菊珍, 孟颀, 等. 城市道路绿化带不同植物叶片附尘对大气污染的磁学响应 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(12): 4188-4193.
- [21] 俞立中, 许羽, 张卫国. 湖泊沉积物的矿物磁性测量及其环

- 境应用[J]. 地球物理学进展, 1995, **10**(1): 11-22.
- [22] 孙志明, 胡守云, 马醒华. 现代湖泊沉积物中磁性矿物的研究及其环境意义[J]. 地球物理学报, 1996, **39**(2): 178-187.
- [23] Hansen L D, Silberman D, Fisher G L. Crystalline components of stack-collected, size-fractionated coal fly ash [J]. Environmental Science & Technology, 1981, **15**(9): 1057-1062.
- [24] Lauf R J, Harris L A, Rawlston S S. Pyrite framboids as the source of magnetite spheres in fly ash[J]. Environmental Science & Technology, 1982, **16**(4): 218-220.
- [25] Muxworthy A R, Matzka J, Petersen N. Comparison of magnetic parameters of urban atmospheric particulate matter with pollution and meteorological data [J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**(26): 4379-4386.
- [26] Matzka J, Maher B A. Magnetic biomonitoring of roadside tree leaves: identification of spatial and temporal variations in vehicle-derived particulates [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(28): 4565-4569.
- [27] 刘玲, 方炎明, 王顺昌, 等. 7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征 [J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2361-2367.
- [28] 戴斯迪, 马克明, 宝乐. 北京城区行道树国槐叶面尘分布及重金属污染特征 [J]. 生态学报, 2012, **32**(16): 5095-5102.
- [29] 徐晓辉, 袁东, 叶舜华. 无铅汽油车排出颗粒物组分分析 [J]. 中国卫生工程学, 2003, **2**(1): 1-3.
- [30] King J G, Williams W. Low-temperature magnetic properties of magnetite [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2000, **105**(B7): 16427-16436.
- [31] 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.
- [32] Maher B A, Ahmed I A M, Davison B, *et al.* Impact of roadside tree lines on indoor concentrations of traffic-derived particulate matter [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(23): 13737-13744.
- [33] Urbat M, Lehdorff E, Schwark L. Biomonitoring of air quality in the Cologne conurbation using pine needles as a passive sampler-Part I: magnetic properties [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(23): 3781-3792.

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaying	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinfo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zeolite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 15, 2015

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人