

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析 ..... 包良满,刘江峰,雷前涛,李晓林,张桂林,李燕 ( 1 )  
中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平 ..... 林海涛,李琦路,张干,李军 ( 10 )  
广州城区秋冬季大气颗粒物中WSOC吸光性研究 ..... 黄欢,毕新慧,彭龙,王新明,盛国英,傅家谟 ( 16 )  
南京地区大气PM<sub>2.5</sub>潜在污染源硫碳同位素组成特征 ..... 石磊,郭照冰,姜文娟,芮茂凌,曾钢 ( 22 )  
青奥会前后南京PM<sub>2.5</sub>重金属污染水平与健康风险评估 ..... 张恒,周自强,赵海燕,熊正琴 ( 28 )  
南昌市秋季大气PM<sub>2.5</sub>中金属元素富集特征及来源分析 ..... 林晓辉,赵阳,樊孝俊,胡恭任,于瑞莲 ( 35 )  
南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究 ..... 马佳,于兴娜,安俊琳,朱彬,于超,朱俊,夏航 ( 41 )  
边界层低空急流导致北京PM<sub>2.5</sub>迅速下降及其形成机制的个例分析 ..... 廖晓农,孙兆彬,何娜,赵普生,马志强 ( 51 )  
电厂燃煤烟尘PM<sub>2.5</sub>中化学组分特征 ..... 王毓秀,彭林,王燕,张腾,刘海利,牟玲 ( 60 )  
2014年APEC期间北京市空气质量改善分析 ..... 程念亮,李云婷,张大伟,陈添,孙峰,李令军,李金香,周一鸣,杨妍妍,姜磊 ( 66 )  
APEC会议期间北京机动车排放控制效果评估 ..... 樊守彬,田灵娣,张东旭,郭津津 ( 74 )  
晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析 ..... 王燕,彭林,李丽娟,王毓秀,张腾,刘海利,牟玲 ( 82 )  
北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究 ..... 薛亦峰,周震,钟连红,闫静,曲松,黄玉虎,田贺忠,潘涛 ( 88 )  
长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征 ..... 尤翔宇,刘湛,张青梅,漆燕,向仁军,苏艳蓉 ( 94 )  
长春城市水体夏秋季温室气体排放特征 ..... 温志丹,宋开山,赵莹,邵田田,李思佳 ( 102 )  
查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和CDOM吸收特性 ..... 李思佳,宋开山,赵莹,穆光熠,邵田田,马建行 ( 112 )  
不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究:以广西大溶江、灵渠流域为例 ..... 孙平安,于爽,莫付珍,何师意,陆菊芳,原雅琼 ( 123 )  
大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价 ..... 黄允优,曾焯,刘守江,马永红,胥晓 ( 132 )  
西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征 ..... 杨帆,蒋秩锋,王翠翠,黄晓楠,吴芝斌,陈琳 ( 141 )  
合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析 ..... 樊慧慧,李如忠,裴婷婷,张瑞钢 ( 148 )  
辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征 ..... 王维契,周俊丽,裴淑玮,刘征涛 ( 156 )  
水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价 ..... 黄廷林,刘飞,史建超 ( 166 )  
低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响 ..... 游蕊,梁丽,覃蔡清,邓晗,王定勇 ( 173 )  
北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态 ..... 王馨慧,单保庆,唐文忠,张超,王闯 ( 180 )  
紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨 ..... 王文东,张轲,许洪斌,刘国旗 ( 187 )  
二氧化钛光催化氧化阿散酸 ..... 许文泽,杨春风,李静,李建斐,刘会芳,胡承志 ( 193 )  
紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能 ..... 段伦超,王凤贺,赵斌,陈亚君 ( 198 )  
氢氧化镧-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用 ..... 林建伟,王虹,詹艳慧,陈冬梅 ( 208 )  
纳米TiO<sub>2</sub>吸附HgCl<sub>2</sub>水溶液中Hg(II) ..... 周雄,张金洋,王定勇,覃蔡清,徐凤,罗程钟,杨熹 ( 220 )  
好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建 ..... 周林军,刘济宁,石利利,冯洁,徐炎华 ( 228 )  
3种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性 ..... 古文,周林军,刘济宁,陈国松,石利利,徐炎华 ( 240 )  
Fe(II)活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水 ..... 朱松梅,周振,顾凌云,蒋海涛,任佳懿,王罗春 ( 247 )  
长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源 ..... 李静雅,吴迪,许芸松,李向东,王喜龙,曾超华,付晓芳,刘文新 ( 253 )  
直链烷基苯指示城市化过程初步研究 ..... 徐特,曾辉,倪宏刚 ( 262 )  
龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征 ..... 刘硕,吴泉源,曹学江,王集宁,张龙龙,蔡东全,周历媛,刘娜 ( 270 )  
水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响 ..... 吴杨周,陈健,胡正华,谢燕,陈书涛,张雪松,申双和,陈曦 ( 280 )  
中水浇灌对土壤重金属污染的影响 ..... 周益奇,刘云霞,傅慧敏 ( 288 )  
生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响 ..... 安艳,姬强,赵世翔,王旭东 ( 293 )  
3种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响 ..... 彭禧柱,杨胜香,李凤梅,曹建兵,彭清静 ( 301 )  
丛枝菌根真菌对铈污染土壤上玉米生长和铈吸收的影响 ..... 王芳,郭伟,马朋坤,潘亮,张君 ( 309 )  
珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯(PAEs)污染分布特征 ..... 李彬,吴山,梁金明,邓杰帆,王珂,梁文立,曾彩明,彭四清,张天彬,杨国义 ( 317 )  
三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响 ..... 韦丽丽,周琼,谢从新,王军,李君 ( 325 )  
起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较 ..... 靳振江,曾鸿鹄,李强,程亚平,汤华峰,李敏,黄炳富 ( 335 )  
序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析 ..... 李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 ( 342 )  
铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果 ..... 杨婷婷,朱能武,芦昱,吴平霄 ( 350 )  
运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究 ..... 邓欢,蔡旅程,姜允斌,钟文辉 ( 359 )  
通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响 ..... 齐鲁,魏源送,张俊亚,赵晨阳,才兴,张媛丽,邵春岩,李洪枚 ( 366 )  
高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究 ..... 陈文和,邓明佳,罗辉,丁文杰,李琳,林坚,刘俊新 ( 377 )  
应用FCM-qPCR方法定量检测水中常见病原体 ..... 王明星,柏耀辉,梁金松,霍咏,杨婷婷,袁林江 ( 384 )  
乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响 ..... 娄雪宁,周丽萍,宋丹,杨荣,龙峰 ( 391 )  
废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响 ..... 楼子墨,王卓行,周晓馨,傅瑞琪,刘榆,徐新华 ( 397 )  
《环境科学》征订启事(9) 《环境科学》征稿简则(15) 信息(50, 165, 186, 287)

# 碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析

包良满<sup>1</sup>, 刘江峰<sup>2</sup>, 雷前涛<sup>1</sup>, 李晓林<sup>1</sup>, 张桂林<sup>1</sup>, 李燕<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800; 2. 信阳师范学院物理电子工程学院, 信阳 464000)

**摘要:** 碳质颗粒物是大气颗粒物的重要组成部分, 对全球气候变化、环境质量、人类健康等有重要影响. 本研究使用扫描质子微探针针对上海两个典型环境监测点的大气颗粒物及 7 类污染排放源的单颗粒进行了分析. 利用微束非卢瑟福弹性背散射谱 micro-EBS (non-Rutherford elastic backscattering, EBS) 分析了单颗粒中的 C 含量, 发现燃煤烟尘、燃油烟尘、汽车尾气、柴油公交车尾气等污染源中碳质颗粒物占优, 而水泥尘、钢铁工业尘、土壤尘中无机颗粒物占优; 中心城区的碳质颗粒物占优, 而工业区的无机颗粒物占优. 单颗粒物的元素分布可以反映颗粒物发生大气化学反应的重要信息, 利用微束质子激发 X 射线荧光谱 micro-PIXE (particle induced X-ray emission, PIXE) 分析得到了大气颗粒物的 S、Ca、Fe 等元素分布, 发现含 Ca 的碳质颗粒在大气中发生了硫化反应.

**关键词:** 大气颗粒物; 扫描质子微探针; 单颗粒; micro-EBS; micro-PIXE; 污染源

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0001-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.01.001

## Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe

BAO Liang-man<sup>1</sup>, LIU Jiang-feng<sup>2</sup>, LEI Qian-tao<sup>1</sup>, LI Xiao-lin<sup>1</sup>, ZHANG Gui-lin<sup>1</sup>, LI Yan<sup>1</sup>

(1. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China; 2. College of Physics & Electronic Engineering, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

**Abstract:** Carbonaceous particles are an important component of the atmospheric aerosol particles and important for global climate change, air quality and human health. The PM<sub>10</sub> single particles from two environmental monitor locations and seven pollution emission sources were analyzed using scanning proton microprobe (SPM) techniques. The concentration of carbon in individual particles was quantitatively determined by proton non-Rutherford elastic backscattering spectrometry (EBS). The results of this investigation showed that carbonaceous particles were dominant in the pollution sources of coal and oil combustions, diesel bus exhaust and automobile exhaust, while inorganic particles were dominant in the sources of steel industry, cement dust and soil dust. Carbonaceous matter was enriched in particles from the city center, while mineral matter was the main component of airborne particles in the industrial area. Elemental mapping of single aerosol particles yielded important information on the chemical reactions of aerosol particles. The micro-PIXE (particle induced X-ray emission) maps of S, Ca and Fe of individual carbonaceous particles showed that sulfuration reaction occurred between SO<sub>2</sub> and mineral particles, which increased the sulfur content of particles.

**Key words:** airborne particulate matter; scanning proton microprobe; individual particle; micro-EBS; micro-PIXE; pollution source

碳质颗粒物是大气颗粒物的重要组成部分, 一般占 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 质量的 20% ~ 60%, 占亚微米颗粒物的大部分 (~50%), 对空气质量、气候变化和人体健康有重要的影响<sup>[1]</sup>. 有机颗粒物含有许多对人体产生致癌、致畸、致突变的成分, 且细颗粒中有机成分多, 易于进入肺的深处并沉积, 从而可能引起癌症的发生, 导致健康损伤<sup>[2]</sup>. 有机颗粒物还能够影响大气能见度, 是大气光化学烟雾、酸沉降的重要贡献者, 可通过长距离传输对区域和全球环境产生重要影响<sup>[3]</sup>. 学者们重视大气中有机颗粒物的来源与形成机制的研究, 目前主要集中在浓度和化学组分的测量、成因和来源以及环境效应等方面<sup>[4]</sup>. 颗粒物中的有机成分分析普遍应用了热分解法、热分解-光学分析法, 以及质谱、光谱等方

法<sup>[5,6]</sup>. 这些方法一般需要样品的前处理, 分析使得有机成分损失或发生化学变化, 且只能进行整体法 (Bulk) 分析. 单颗粒分析能够提供整体法不具备的丰富信息, 有助于研究颗粒物的起源、形成、大气化学过程和对环境的影响, 单颗粒的组成、形状和大小, 以及元素分布可以提供有用的信息<sup>[7]</sup>. 在大气颗粒物的单颗粒分析中, 透射电镜 (TEM) 得到了较多的应用<sup>[8~10]</sup>. 但在 TEM 分析中, 由于电子散射造成的高背景, 使用 TEM 难以测定微区中的痕量元素. 扫描质子微探针 (scanning proton microprobe,

收稿日期: 2015-07-08; 修订日期: 2015-09-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11175236); 上海市科研计划项目 (14ZR1448300)

作者简介: 包良满 (1979 ~), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为核分析技术应用, E-mail: baoliangman@sinap.ac.cn

SPM) 由于具有灵敏度高、检测限低、多元素同时分析的优点, 在大气颗粒物的单颗粒分析中得到了很好地应用<sup>[11]</sup>. 中国科学院上海应用物理研究所利用质子微探针技术分析单个大气颗粒物, 将微束质子激发 X 射线分析 (proton induced X-ray emission, PIXE) 和计算机模式识别技术结合, 建立了单颗粒物污染解析方法<sup>[12]</sup>. 质子微探针能在微区内综合多种物理效应, 一次测量能够同时获得多种信息. 常规的质子激发 X 荧光分析, 因 Si(Li) 探测器密封铍窗对 X 射线的吸收产生衰减而无法分析原子序数小于 12 的元素. 质子非卢瑟福弹性背散射分析 (non-Rutherford elastic backscattering, EBS) 对轻元素分析比较灵敏, 当质子束达到一定能量时 (一般 2.0 ~ 3.0 MeV) 可突破核的库仑势垒, 核散射起作用, 产生散射截面增强效应, 提高了分析的灵敏度, 适宜于 C、O 等轻元素分析<sup>[7]</sup>. 近年来, 利用质子非卢瑟福弹性背散射对大气颗粒物 C、O 元素含量进行分析已有报道, 但主要针对整体样品, 而单颗粒分析少<sup>[13]</sup>. 本研究利用质子微探针的 Micro-EBS 谱, 测量了颗粒物中的 C 和 O, 结合 Micro-PIXE 分析, 利用 C/O 比值可区分有机颗粒物和无机颗粒物, 探讨了颗粒物中碳质成分和无机成分特征, 分析了颗粒物的来源, 以期对有机大气颗粒物的研究提供一种新的方法, 可帮助识别颗粒物的污染来源和评估其毒性.

## 1 材料与方 法

### 1.1 样品采集

大气颗粒物样品采集于上海市中心城区人民广场 (RMGCH) 和宝山工业区钢铁研究所 (GYS). 宝山工业区采样点位于上海宝山区钢铁研究所一幢高约 20 m 的大楼楼顶, 经纬度为东经 121.488°, 北纬 31.376°. 宝山区位于上海市北部, 是我国重要的钢铁工业和化工基地, 区内大气污染严重, 是上海市重点污染治理区域. 人民广场采样点位于上海市区中心, 经纬度为东经 121.484°, 北纬 31.236°, 代表了商业区和交通密集区, 广场人流量大, 交通繁忙. 人民广场采样点高度约为 20 m. 使用 Mini-Partisol TM Model 2100 型采样器 (美国 Rupprecht and Patashnick Co., Inc. 生产) 采集 PM<sub>10</sub> 样品, 流速 5 L·min<sup>-1</sup>, 采样滤膜为 Millipore 硝化纤维膜.

根据对上海市大气颗粒物排放源的调查<sup>[14]</sup>, 使用 Anderson 分级采样器采集了上海市颗粒物主要排放源: 燃煤烟尘、燃油烟尘、汽车尾气、柴油公交

车尾气、水泥尘、钢铁工业尘、土壤尘, 颗粒物收集在石英滤膜上.

### 1.2 单颗粒样品制备

扫描质子微探针分析用的单颗粒样品制备步骤如下<sup>[14]</sup>: ① 将 2 mg 尼龙颗粒放入到 2.5 mL 异丁醇中, 加热使之形成尼龙溶液; ② 取 0.1 mL 尼龙溶液滴入去离子水中, 在水面上形成约 0.2 μm 厚的尼龙膜; ③ 立刻轻抖采样膜上颗粒样品, 使之均匀洒落在尼龙膜上; ④ 用孔径 10 mm 的铝托架轻轻从水中捞起尼龙膜, 分散的颗粒物附着在尼龙膜上. 单颗粒靶样品干燥后就可以进行 SPM 测量. 通过光学显微镜观察 (图 1), 颗粒物完全散开, 牢固黏附在膜上, 能经受质子束的长时间轰击.



图 1 单颗粒大气颗粒物的 SPM 靶样显微照片

Fig. 1 Micrographs of single aerosol particles on the SPM target film

### 1.3 扫描质子微探针实验

在中国科学院上海应用物理研究所的扫描质子微探针装置上进行单颗粒分析, 装置介绍见文献 [15]. 加速器提供能量 3 MeV、束斑直径 ~ 5 μm、流强 100 ~ 200 pA 的质子束. PIXE 分析采用 Ortec 公司生产的 Si(Li) 探测器, 探测器和束流方向成 135° 处, 对 5.9 keV 的 X 射线分辨率为 160 eV. EBS 分析使用 Au(Si) 面垒探测器, 探测器直径 4 mm, 距离样品约 50 mm, 散射角度 165°, 探测器的分辨率为 15 keV. 3 MeV 的质子束穿透单颗粒和衬底后, 利用法拉第筒测量束流强度.

实验中, 采用定点测量的方式获取单颗粒的 micro-PIXE 和 micro-EBS 谱, 每个颗粒测量时间约 30 min. 共测定了 7 个污染源和两个环境监测点的大气颗粒物 PM<sub>10</sub> 的单颗粒样品. 颗粒物元素分布使用了扫描方式测量, 扫描范围 50 × 50 μm<sup>2</sup>, 获得了典型颗粒物中元素分布.

使用 SIMARA 软件拟合单颗粒的背散射谱<sup>[16]</sup>. 在 EBS 谱拟合中, 对 C、N、O、Na、Mg、Al、Si 等轻元素的散射截面采用了非卢瑟福背散射截面, 对其

他元素采用卢瑟福散射截面. 实际的颗粒物形状各异, 元素分布不均匀. 如考虑颗粒物的形状及元素分布, 对 EBS 的谱拟合带来困难. 在数据分析中, 把单颗粒样品看作双层膜. 使用简化的模型对单颗粒和衬底做了假设, 认为颗粒物中元素均匀混合, 颗粒物的厚度为  $10\ \mu\text{m}$  的薄靶. 第一层膜是大气颗粒物, 主要 C、O、Si、Ca、Fe 等组成, 各元素含量待拟合; 第二层膜为尼龙衬底膜, 厚度和组分已知. 尼龙分子式  $[(\text{CH}_2)_5\text{CO-NH}]_n$ , 膜厚  $0.2\ \mu\text{m}$  (原子面密度  $1.200 \times 10^{15}\ \text{atoms}\cdot\text{cm}^{-2}$ ), 各元素原子数百分含量为: H 58%, C 32%, N 5%, O 5%.

## 2 结果与讨论

### 2.1 污染源单颗粒分析

对污染源进行单颗粒分析. 每类污染源分析 20~40 个单颗粒, 其 micro-EBS 和 micro-PIXE 能谱如图 2 所示.

统计了颗粒物的背散射谱, 发现颗粒物 C 和 O 含量比值变化较大. 因此, 以 C 和 O 的特征峰对颗粒物进行归类, 定义 C/O (原子数比) 比值大于 2 的颗粒物为 C-rich 颗粒物, C 的质量分数在 50% 以上; C/O (原子数比) 比值小于 2 的颗粒物为 O-rich 颗粒物, O-rich 的颗粒物中氧的质量分数在 30% 以上. 利用 EBS 谱虽不能区分颗粒物中的 C 为有机 C 还是元素 C, 但根据颗粒物中有关碳质成分的已有知识, C-rich 颗粒物中为有机成分较高的颗粒物, 即为有机颗粒物<sup>[17,18]</sup>. O-rich 颗粒物中, 矿物成分和硫酸盐、硝酸盐含量高, 无机成分较高, 为无机颗粒物.

污染源颗粒物特征主要表现为: ① 燃煤排放是我国大气颗粒物的主要污染来源之一. EBS 谱和 PIXE 谱表明, 燃煤颗粒物 O-rich 颗粒物中 Mg、Al、Si、K、Ca、Fe、无机成分较高. C-Rich 颗粒物则主要元素为 C, 还含有少量的金属元素和有害元素如 As. ② 柴油公交车尾气颗粒物中 C 原子含量是 O 原子的 8 倍多, 颗粒物主要由 C 元素组成, PIXE 谱表明颗粒物中存在 Cr、Fe、Cu、Zn、Pb 等金属元素. 据研究<sup>[19]</sup>, 柴油车尾气颗粒物是复杂的聚集体, 主要由 3 种基本物质组成: 黑碳是颗粒物的核心部分; 有机物被吸附和凝结在碳颗粒表面; 硫酸盐物质由柴油中硫燃烧氧化产生. 柴油车尾气颗粒物还吸附了一些重金属元素. ③ 汽车尾气颗粒物中以碳元素为主, PIXE 谱表明颗粒物中存在 Pb 元素. 我国已于 2000 年开始使用无铅汽油, 相应的四乙基

铅被新型汽油防爆剂所取代. 在我国, 无铅汽油是指含铅量在  $0.013\ \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  以下的汽油. 因此无铅汽油并非铅含量为零的汽油, 汽车尾气中仍然含有少量铅. ④ 燃油颗粒物 C 含量远大于 O, 颗粒物中还存在 Ti、V、Fe 等金属. ⑤ 水泥颗粒中 O 含量高于 C 含量, 还存在 Mg、Al、Si、Ca 等元素, 无机矿物成分含量高. ⑥ 土壤颗粒物除 C 和 O 外, 还有 Mg、Al、Si、K、Ca、Ti 等. 土壤主要由矿物质和有机质组成, 矿物质有硅酸盐类、碳酸盐类、氧化物-氢氧化物、硫酸盐和磷酸盐类组成. ⑦ 钢铁尘颗粒物的 O 含量高于 C, 颗粒物富含 Fe 元素. 颗粒物主要成分为 C、O 和 Fe, 钢铁尘中富含氧化铁颗粒物, 由于尘粒细, 比表面积大, 颗粒物还吸附有碳质成分.

比较了每类污染源中 C-rich 和 O-rich 颗粒物的比值, 如图 3 所示. 可见燃油锅炉中 C-rich 颗粒物最多, 达 79%, 表明其有机成分多. 其次为汽车尾气和柴油公交尾气, 分别为 75% 和 71%. 钢铁尘、水泥、土壤中 O-rich 颗粒物多, 其含量分别为 86%、80% 和 63%. 燃煤颗粒物中 C-rich 和 O-rich 颗粒物相当. 汽车尾气、公交尾气、燃油颗粒物中碳质成分多, 钢铁尘及水泥中矿物成分占优.

### 2.2 上海地区典型 $\text{PM}_{10}$ 单颗粒

对人民广场约 560 颗单颗粒物和钢铁研究所约 300 颗单个颗粒进行了分析. 对典型颗粒物的 EBS 能谱和 PIXE 能谱进行了分析. 含 Pb 颗粒物的 PIXE 谱表明颗粒物含 K、Ca、Ti、Mn、Fe、Cu、Zn、Pb 等金属元素 (图 4). 在 EBS 谱中, 左边两个峰依次对应 C 和 O, 第 3 个峰为 Na、Mg、Al、Si 的散射峰, 第 4 个为 Fe、Ti 的散射峰, 最后小峰是 Pb 的散射峰. 使用 micro-PIXE 指纹谱对颗粒物进行了源识别<sup>[20]</sup>, 表明此颗粒物来自于煤炭燃烧. EBS 谱的拟合结果, 以原子百分比计: C 45%, N 7%, O 21%, Na 4%, Mg 8%, Al 5%, Si 6%, Fe 1%, Ti 0.2%, Pb 0.07%. 颗粒物中的 C 和 O 含量高, 在 EBS 谱中计数多, 拟合误差在 5% 左右, 而其他元素的计数少, 误差也相应大, 估计约 10%.

含 NaCl 颗粒物的 PIXE 能谱显示颗粒物中含 S、Cl、K、Ca、Mn、Fe、Pb (图 5). 拟合 EBS 谱得到元素的原子百分比含量: C 37%, N 5%, O 18%, Na 10%, Mg 18%, Al 2%, Si 2%, S 1%, Cl 7%. Micro-PIXE 指纹谱源解析表明此颗粒物来源于燃煤排放.

富 C 颗粒物的 EBS 谱拟合结果 (图 6): C 78%, N 7%, O 14%, Na 0.5%, Mg 0.5%, S 0.1%,

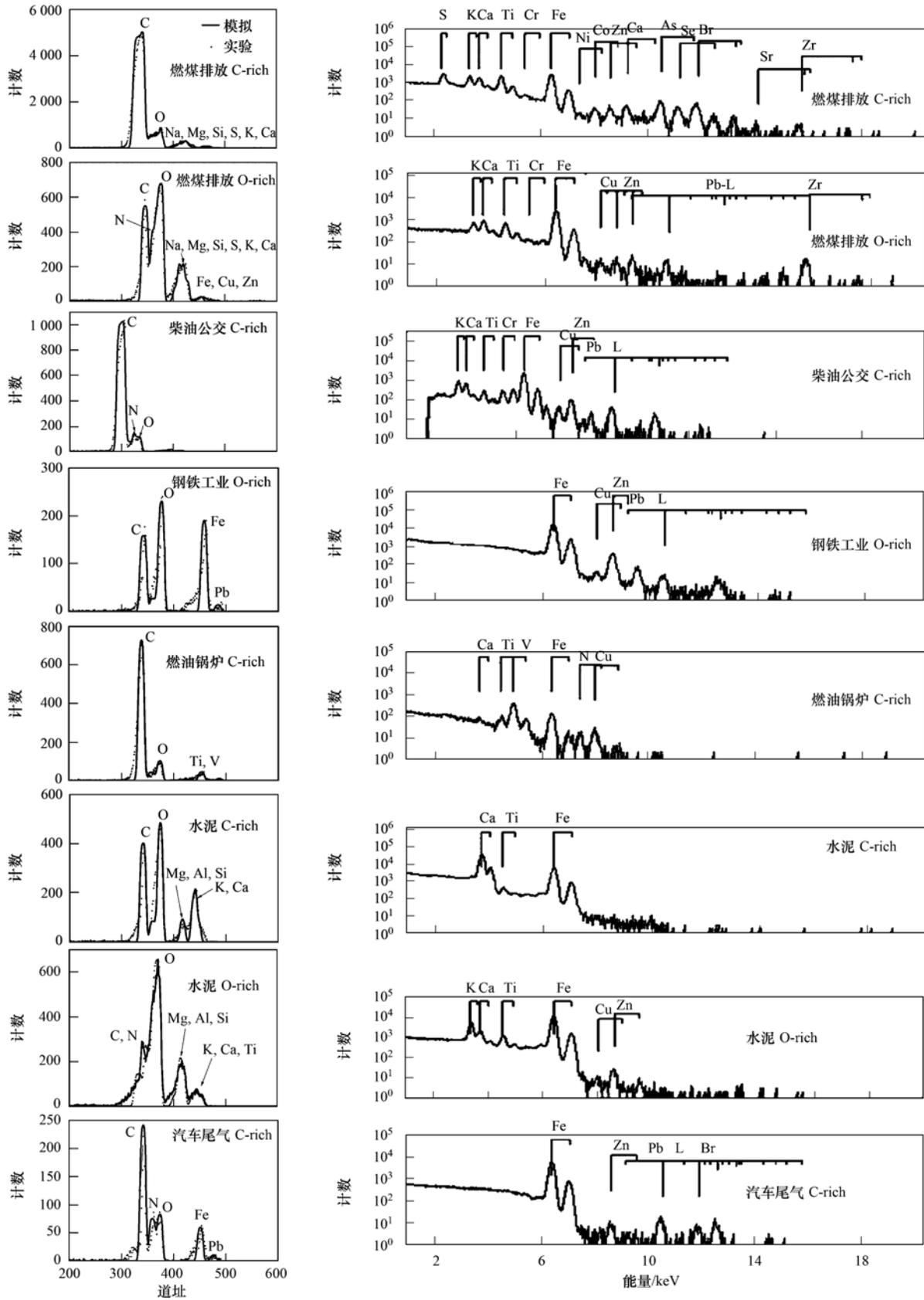


图2 燃煤排放、燃油锅炉、柴油公交、汽车尾气、钢铁工业、水泥和土壤等排放源颗粒物的 EBS 谱和 PIXE 谱  
 Fig. 2 Typical micro-EBS and micro-PIXE spectra of single aerosol particles from the pollution sources of coal and oil combustions, diesel bus exhaust, automobile exhaust, steel industry, cement dust and soil dust

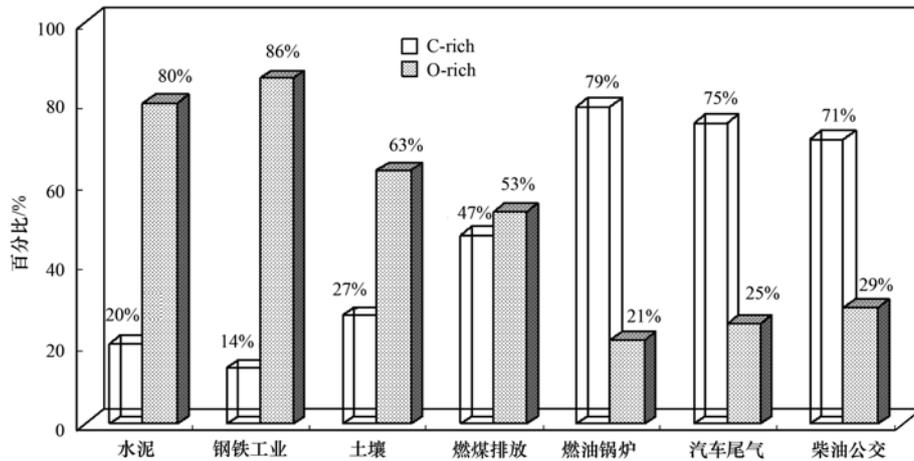


图3 水泥、钢铁工业、土壤、燃煤排放、燃油锅炉、汽车尾气、柴油公交等排放源中 C-rich 颗粒物和 O-rich 颗粒物中的百分比  
 Fig. 3 Percentages of C-rich particles and O-rich particles in the pollution sources of cement dust, steel industry, soil dust, coal and oil combustions, diesel bus exhaust and automobile exhaust

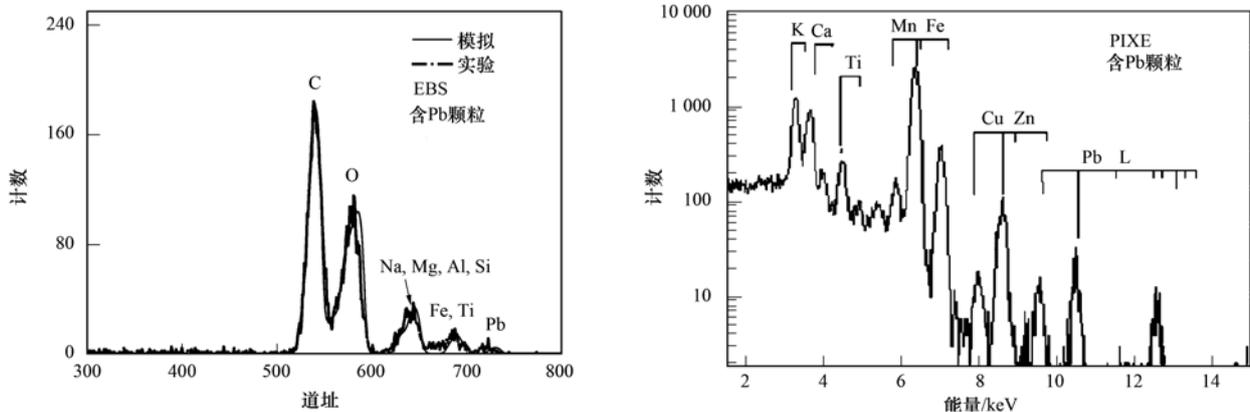


图4 含 Pb 颗粒物的 EBS 谱和 PIXE 谱  
 Fig. 4 Micro-EBS and micro-PIXE spectra of a single Pb-containing aerosol particle

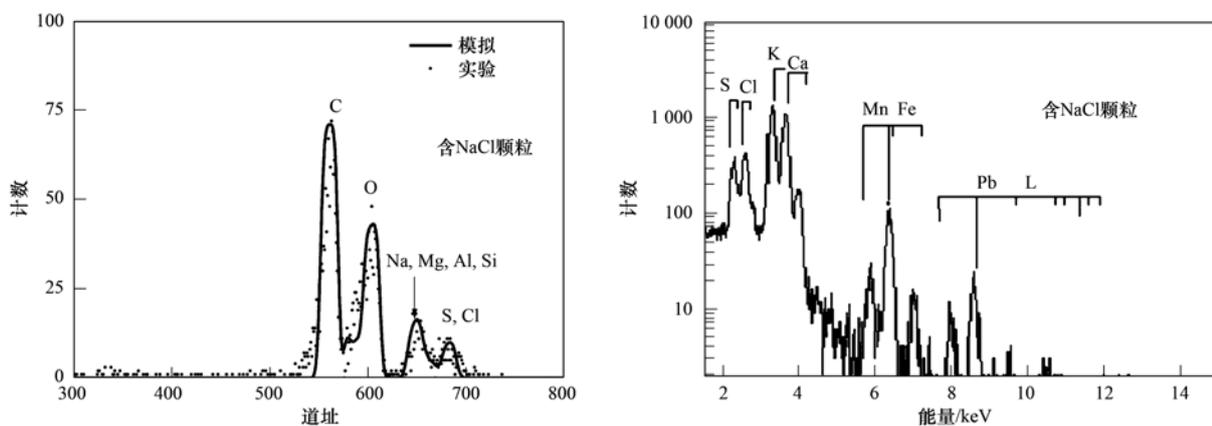


图5 含 NaCl 颗粒物的 EBS 谱和 PIXE 谱  
 Fig. 5 Micro-EBS and micro-PIXE spectra of a single NaCl-containing aerosol particle

Ca 0.1%。C 含量远高于 O 的含量,颗粒物富含碳质成分,为有机颗粒物。PIXE 谱中表明颗粒物有 Mn、Fe、Cr、Ni、V、Cu、Pb 等元素。Micro-PIXE 指纹谱源解析表明此颗粒物来源于汽车尾气排放。

富 O 颗粒物的 EBS 谱的拟合结果(图 7):C 29%, O 63%, Mg 2%, Al 3%, Si 6%, Fe 1%。C 元素含量远小于 O 元素。在 PIXE 谱中,有 Ca、Ti、Mn、Fe 等金属。推测颗粒物为 Mg、Al、Si、Ca、Ti、

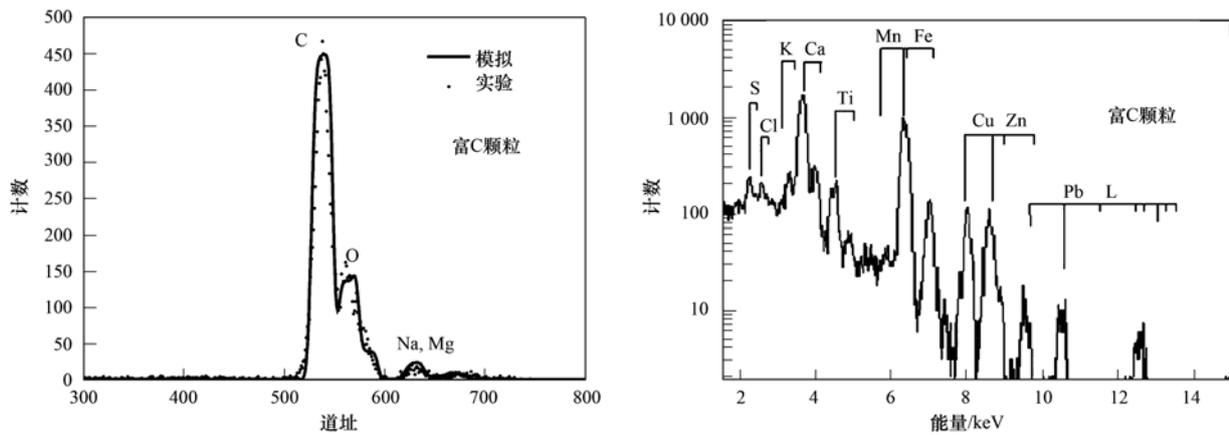


图 6 富碳颗粒物的 EBS 谱和 PIXE 谱

Fig. 6 Micro-EBS and micro-PIXE spectra of a single C-rich aerosol particle

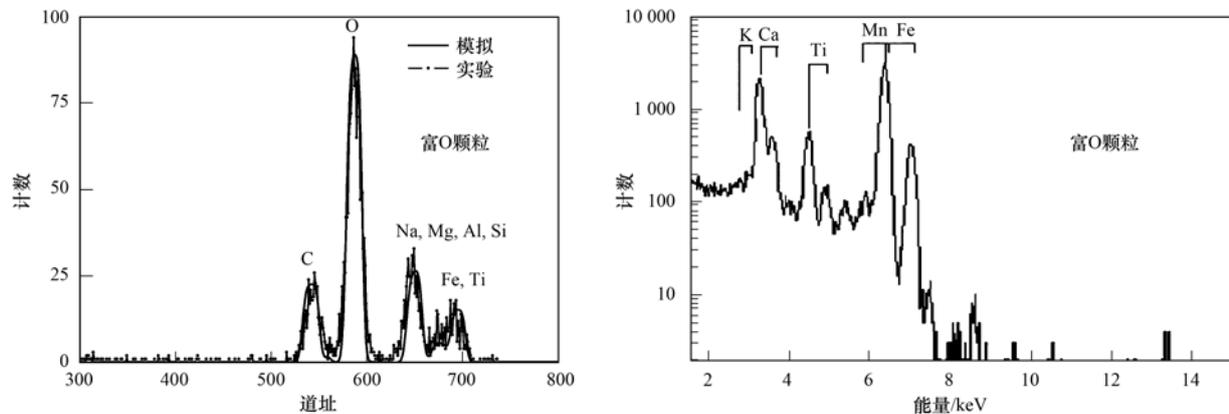


图 7 富 O 颗粒物的 EBS 谱和 PIXE 谱

Fig. 7 Micro-EBS and micro-PIXE spectra of a single O-rich aerosol particle

Fe 的氧化物,颗粒物中矿物成分多. Micro-PIXE 指纹谱源解析表明此颗粒物来源于水泥颗粒物.

利用质子微探针的 EBS 可测量颗粒物中的 O 和 C,结合 PIXE,利用 C/O 比值可区分有机颗粒物和无机颗粒物,判别颗粒物的来源. 对大量颗粒物分析,发现 O 含量高的颗粒物中,Na、Mg、Al、Si、K、Ca、Ti 等元素含量较高. 表明这类颗粒为无机颗粒物,矿物成分较高,主要由氧化物组成,这类颗粒主要来源于地面扬尘、建筑扬尘、土壤等源. C 含量高的颗粒物中,Na、Mg、Al、Si、K、Ca 等元素含量较低,而 Mn、Cr、Ni、V、Cu、Zn、Pb 等金属元素含量相对较高. 表明碳质成分较多的颗粒中,矿物成分较少,而有害金属含量较高. 含碳质成分较多的颗粒物,大多源于燃烧过程,如燃煤、燃油及机动车尾气排放等.

### 2.3 含碳颗粒物的硫化反应

宝山区含 C 颗粒物的 EBS 谱和 PIXE 谱如图 8 所示. EBS 谱表明颗粒物中 C 含量超过了 O 含量,

含有较多的碳质成分. PIXE 谱表明颗粒物富含 S、Ca、Fe,还含有 K、Ti、V、Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、Pb 等金属. 图 9 是颗粒中 S、Ca、Fe 的元素分布图,S、Ca 的分布类似,富集在颗粒物表面,表明 S 和 Ca 以某种化合物的形式存在. 大气颗粒中 S 和 Ca 通常以  $\text{CaSO}_4$  形式存在. 对 PIXE 能谱分析计算得到 S、Ca、Fe 的含量之比约为 2:1:2. 说明颗粒物中不仅含有  $\text{CaSO}_4$ ,还有其他形式的硫酸盐,如硫酸铵等. 颗粒物中 S 的含量高,这与宝山工业区的火力发电燃煤排放有关,对颗粒物进行了 micro-PIXE 源解析,表明颗粒物来源于燃煤排放.

燃煤电厂飞灰颗粒物的 PIXE 谱表明飞灰中存在 S、Ca、Ti、Fe,EBS 谱表明颗粒物中含 C、O、Al、Si 等轻元素(图 10). 元素分布(图 11)表明 Ca 富集,与 S 和 Fe 的分布差异很多. 对 PIXE 能谱分析计算得到飞灰中 S、Ca、Fe 的含量之比约为 1:32:2,Ca 的含量远高于 S 和 Fe 的含量. 研究表明<sup>[21]</sup>,飞灰中主要矿物为含 Si、Ca、Na 和 K 的铝硅酸盐

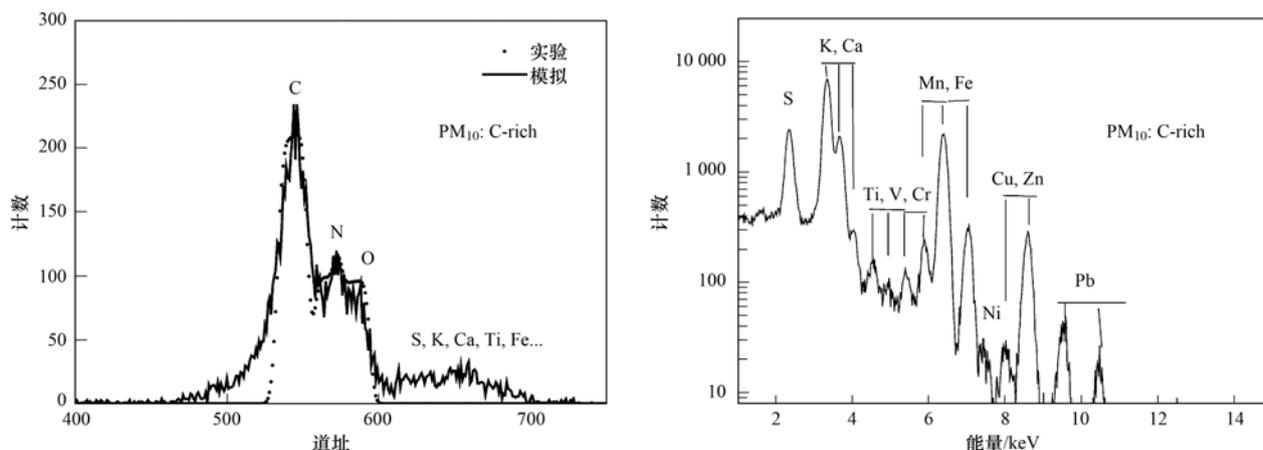
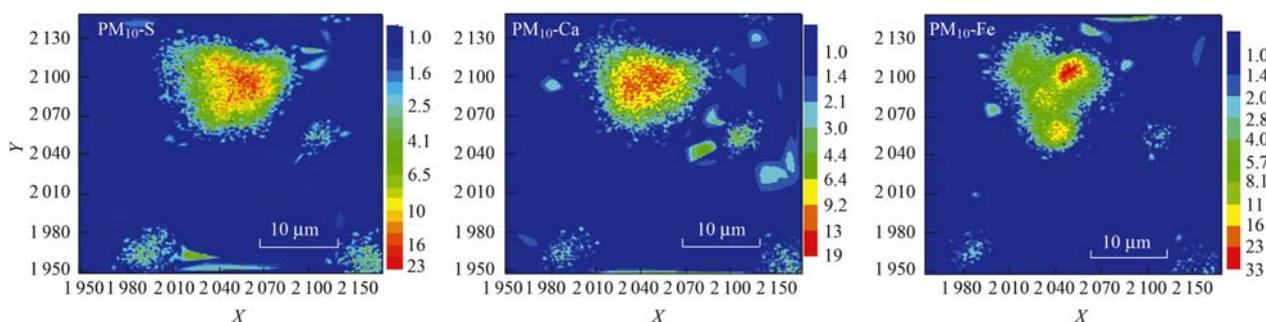
图 8 宝山区含硫颗粒物  $PM_{10}$  单颗粒的 EBS 谱和 PIXE 谱Fig. 8 Micro-EBS and micro-PIXE spectra of a single  $PM_{10}$  particle in Baoshan industrial area

图 9 宝山区含 C 颗粒物中的 S、Ca、Fe 元素 micro-PIXE 分布

Fig. 9 Micro-PIXE distribution of S, Ca and Fe in individual aerosol particle in Baoshan industrial area

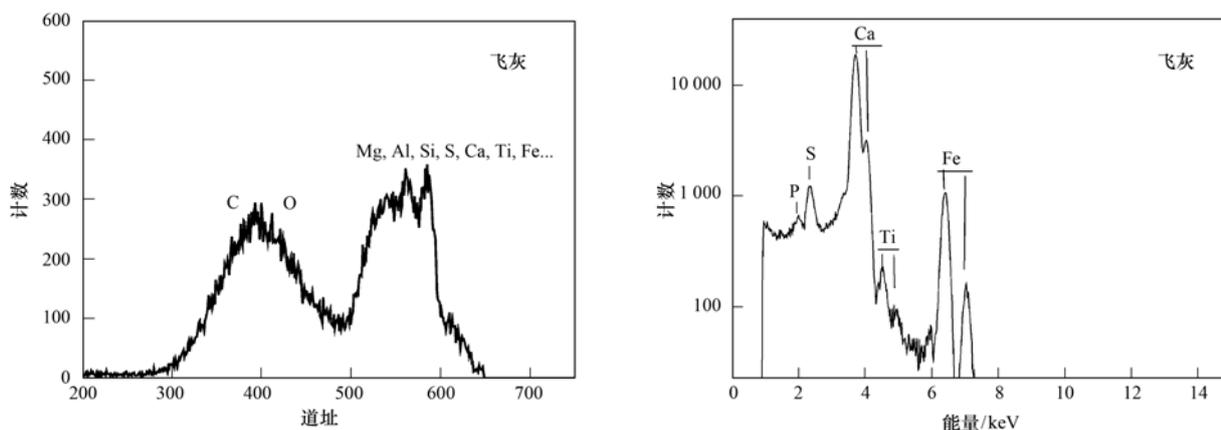


图 10 燃煤飞灰颗粒物的 EBS 谱和 PIXE 谱

Fig. 10 Micro-EBS and micro-PIXE spectra of a single fly ash particle of coal combustion

类矿物, Ca 主要以  $CaO$  形式存在。

燃煤排放的大气颗粒物元素分布及含量明显不同于排放源颗粒物, 可归因为颗粒物在迁移过程中在大气环境中发生了化学反应。电厂排放的碱性矿物颗粒排入大气后, 由于水的湿润作用, 颗粒物容易吸附  $SO_2$  和大气中的  $H_2SO_4$  等, 吸附物和颗粒物发

生化学反应生成硫酸盐, 形成非均质的混合颗粒。在合适的气象条件下, 当颗粒物在大气停留时间较长, 空气湿度大, 酸性气体浓度高, 这种反应可以深入颗粒物内部, 形成完全均质的混合颗粒。此外, 燃煤排放颗粒物中的 Fe、Zn、Cr、Mn 等金属元素的催化加速了  $SO_2$  向硫酸盐的转化<sup>[22]</sup>。

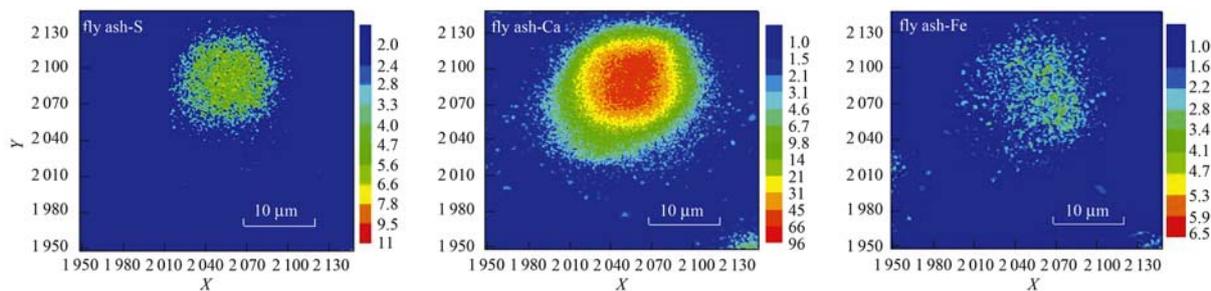


图 11 燃煤飞灰颗粒物中 Ca、S、Fe 元素分布

Fig. 11 Micro-PIXE distribution of S, Ca and Fe in individual fly ash particle of coal combustion

### 3 结论

碳质成分的测定是有机大气颗粒物研究中一个关键点. 利用扫描质子微探针的 EBS 谱, 可以直接无损测定单个颗粒物中的碳质成分, 结合 PIXE 谱, 利用 C/O 比值可以区分有机颗粒物和无机颗粒物. 发现燃煤烟尘、燃油烟尘、汽车尾气、柴油公交车尾气等污染源中碳质颗粒物占优, 即有机颗粒物多. 水泥尘、钢铁工业尘、土壤尘中无机颗粒物占优. 中心城区的大气颗粒物中, 有机颗粒物占优, 而工业区的大气颗粒物中无机颗粒物多. 利用 micro-PIXE, 得到了大气颗粒物的元素分布图, 发现含 Ca 颗粒在大气中发生了硫化反应, 使 S 含量升高. 本研究结果也表明, 质子微探针的 EBS 谱和 PIXE 谱结合, 是研究大气颗粒物有机颗粒物及颗粒物化学反应的一个好方法, 有助于识别有机颗粒物的来源及评估颗粒物的毒性, 有助于研究大气颗粒物的化学形成过程.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Gouw J D, Jimenez J L. Organic aerosols in the earth's atmosphere[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43** (20): 7614-7618.
- [ 2 ] Mauderly J L, Chow J C. Health effects of organic aerosols[J]. *Inhalation Toxicology*, 2008, **20**(3): 257-288.
- [ 3 ] Schneidmesser E V, Monks P S, Allan J D, *et al.* Chemistry and the linkages between air quality and climate change[J]. *Chemical Reviews*, 2015, **115**(10): 3856-3897.
- [ 4 ] Wang J Z, Ho S S H, Cao J J, *et al.* Characteristics and major sources of carbonaceous aerosols in PM<sub>2.5</sub> from Sanya, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **530-531**: 110-119.
- [ 5 ] 段凤魁, 贺克斌, 刘咸德, 等. 含碳气溶胶研究进展: 有机碳和元素碳[J]. *环境工程学报*, 2007, **1**(8): 1-8.
- [ 6 ] Cheng Y, He K B, Duan F K, *et al.* Characterization of carbonaceous aerosol by the stepwise-extraction thermal-optical-transmittance (SE-TOT) method[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **59**: 551-558.
- [ 7 ] Van Malderen H, Hoornaert S, Injuk J, *et al.* Individual particle characterization of Siberian aerosols by micro-PIXE and backscattering spectrometry[J]. *X-Ray Spectrometry*, 2001, **30** (5): 320-329.
- [ 8 ] 芦亚玲, 常加敏, 赵立宁, 等. 庐山地区大气气溶胶单颗粒研究[J]. *中国科技论文*, 2013, **8**(3): 255-259.
- [ 9 ] Li W J, Wang T, Zhou S Z, *et al.* Microscopic observation of metal-containing particles from Chinese continental outflow observed from a non-industrial site[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(16): 9124-9131.
- [ 10 ] Li W J, Shao L Y. Transmission electron microscopy study of aerosol particles from the brown hazes in northern China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, **114** (D9), doi: 10.1029/2008JD011285.
- [ 11 ] Grime G W. Analysis of individual environmental particles using microPIXE and nuclear microscopy [J]. *X-Ray Spectrometry*, 1998, **27**: 221-231.
- [ 12 ] Wang J, Guo P, Li X, *et al.* Source identification of lead pollution in the atmosphere of Shanghai City by analyzing single aerosol particles (SAP) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, **34**(10): 1900-1905.
- [ 13 ] 王广甫, 鲁永芳, 朱光华. 质子非卢瑟福背散射测量气溶胶样品中氢、碳、氮和氧的含量[J]. *原子能科学技术*, 2007, **41**(5): 628-632.
- [ 14 ] 岳伟生, 李晓林, 李燕, 等. 用质子微探针研究上海吴淞空气含铅颗粒物来源[J]. *中国环境科学*, 2003, **23**(6): 614-617.
- [ 15 ] 朱节清, 李民乾, 毛羽, 等. 一台新建成的长焦距扫描质子微探针[J]. *核技术*, 1991, **14**(9): 525-531.
- [ 16 ] Mayer M. Improved physics in SIMNRA 7 [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 2014, **332**(1): 176-180.
- [ 17 ] Nguyen H N, Martinsson B G. Analysis of C, N and O in aerosol collected on an organic backing using internal blank measurements and variable beam size [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 2007, **264**(1): 96-102.
- [ 18 ] Fang G C, Wu Y S, Chou T Y, *et al.* Organic carbon and elemental carbon in Asia: a review from 1996 to 2006 [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **150**(2): 231-237.
- [ 19 ] 田柳青, 叶代启. 柴油车排气颗粒物的后处理技术[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2003, **4**(10): 74-77.

- [20] 万天敏, 李晓林, 岳伟生, 等. 基于 Micro-PIXE 能谱的大气单颗粒物污染源模式识别研究[J]. 核技术, 2005, 28(12): 904-908.
- [21] 赵永椿, 张军营, 王宗华, 等. 高钙飞灰的矿物学组成及微区特征研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(8): 1427-1430.
- [22] 丁杰, 朱彤. 大气中细颗粒物表面多相化学反应的研究[J]. 科学通报, 2003, 48(19): 2005-2013.

## 欢迎订阅 2016 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》2016 年为 16 开本,120 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

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe .....	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> ( 1 )
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure .....	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> ( 10 )
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou .....	..... HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> ( 16 )
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in Nanjing Region .....	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> ( 22 )
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games .....	..... ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> ( 28 )
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM <sub>2.5</sub> in Autumn in Nanchang City .....	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> ( 35 )
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring .....	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> ( 41 )
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM <sub>2.5</sub> Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism .....	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> ( 51 )
Characteristics of Chemical Components in PM <sub>2.5</sub> from the Coal Dust of Power Plants .....	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> ( 60 )
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014 .....	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> ( 66 )
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing .....	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> ( 74 )
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng .....	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> ( 82 )
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing .....	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> ( 88 )
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region .....	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> ( 94 )
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China .....	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> ( 102 )
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn .....	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> ( 112 )
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China .....	..... SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> ( 123 )
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River .....	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> ( 132 )
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff .....	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> ( 141 )
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban .....	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> ( 148 )
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River .....	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shu-wei, <i>et al.</i> ( 156 )
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir .....	..... HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao ( 166 )
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir .....	..... YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> ( 173 )
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing .....	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> ( 180 )
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism .....	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> ( 187 )
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO <sub>2</sub> .....	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> ( 193 )
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV .....	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> ( 198 )
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution .....	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> ( 208 )
Experimental Research of Hg( II ) Removal from Aqueous Solutions of HgCl <sub>2</sub> with Nano-TiO <sub>2</sub> .....	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> ( 220 )
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters .....	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> ( 228 )
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System .....	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> ( 240 )
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate .....	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> ( 247 )
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta .....	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> ( 253 )
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization .....	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang ( 262 )
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City .....	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> ( 270 )
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration .....	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> ( 280 )
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil .....	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min ( 288 )
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil .....	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> ( 293 )
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings .....	..... PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> ( 301 )
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils .....	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> ( 309 )
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China .....	..... LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> ( 317 )
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors .....	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> ( 325 )
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland .....	..... JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> ( 335 )
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill .....	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> ( 342 )
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction .....	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> ( 350 )
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy .....	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> ( 359 )
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying .....	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> ( 366 )
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter .....	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> ( 377 )
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens .....	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> ( 384 )
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants .....	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> ( 391 )
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact .....	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> ( 397 )

# 《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)

2016年1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 15, 2016

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