

# 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<sub>2.5</sub>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<sub>2.5</sub>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CO<sub>2</sub>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)

# 重庆金佛山降雪中飞灰单颗粒特征及来源解析

于正良<sup>1,2</sup>, 杨平恒<sup>1,2\*</sup>, 景伟力<sup>3</sup>, 袁道先<sup>1,2</sup>, 任坤<sup>1,2</sup>, 李林立<sup>1,2</sup>

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 国土资源部岩溶生态环境-重庆南川野外基地, 重庆 408435; 3. 四川师范大学地理与资源科学学院, 成都 610068)

**摘要:** 大气降雪能够保存大气环境信息, 是研究区域环境的良好介质. 位于渝黔交接带的金佛山海拔2 251.1 m, 冬季降水以降雪的形式出现, 周边区域人类活动强烈. 关于该区域大气气溶胶中的飞灰单颗粒特征的研究比较缺乏. 本研究采集了金佛山5个降雪样品, 运用扫描电镜及X能谱分析联用系统(SEM-EDS)对样品中的132个飞灰进行单颗粒形貌、化学组成分析. 结果表明, 研究区降雪中存在大量球形飞灰, 包含光滑颗粒、粗糙颗粒及聚合体颗粒3种形态, 分别占统计颗粒的80.31%、14.39%和5.30%; 平均粒径1.64 μm, 平均环度1.09. 按主导化学元素分为富硅类、富碳类、富铁类、富铝类及富钛类5种, 所占比例分别为34.09%、49.24%、12.88%、2.27%和1.52%. 结合气象资料、气团后向运移轨迹和飞灰性质, 推测富碳类飞灰可能主要来自于生活排放源和工业活动; 富硅类飞灰可能来自于渝西、黔北、湘中、浙赣一带及粤西的火电厂等高温燃煤工业; 富铁类及富钛类飞灰则可能来源于渝西和黔北、湘中的钢铁厂、轧钢厂等金属冶炼活动.

**关键词:** 降雪; 飞灰; 单颗粒; 人类活动; SEM-EDS; 金佛山

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4381-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.12.008

## Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinfo Mountain, Chongqing

YU Zheng-liang<sup>1,2</sup>, YANG Ping-heng<sup>1,2\*</sup>, JING Wei-li<sup>3</sup>, YUAN Dao-xian<sup>1,2</sup>, REN Kun<sup>1,2</sup>, LI Lin-li<sup>1,2</sup>

(1. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Field Scientific Observation Research Base of Karst Eco-environments at Nanchuan in Chongqing, Ministry of Land and Resources, Chongqing 408435, China; 3. School of Geographical and Resources Sciences, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China)

**Abstract:** Snow can preserve the atmospheric information, which makes it become a good media in studying regional environment. Jinfo Mountain with an elevation of 2 251.1 m, located at the transition zone between Sichuan basin and Yunnan-Guizhou Plateau, is deeply affected by human activities, and snowfall is the main form of precipitation during the winter. While the literature focus on single spherical particles in this area is uncommon. Five snow samples were collected, and determined morphology and chemical composition of 132 single spherical particles by the scanning electron microscope couples with energy dispersive X-ray spectrometer (SEM-EDS). Results show that snowfall in Jinfo Mountain includes the massive fly ash particles with 1.64 μm in average diameter and 1.09 in average roundness which contains smooth particles, rough particles and soot particles, accounting for 80.31%, 14.39% and 5.30% of statistical particles respectively. Furthermore, on the basis of chemical information obtained from EDS, the fly ash particles counted in this research can be classified into 5 types, namely, Si-dominant particles, C-dominant particles, Fe-dominant particles, Al-dominant particles and Ti-dominant particles, which make up 34.09%, 49.24%, 12.88%, 2.27% and 1.52% respectively. In conclusion, it can be inferred, based on the analysis of meteorological information, the properties of fly ash particles, and backward air mass trajectory and dispersion analysis, that C-dominant fly ash mainly comes from daily life and industry activities, Si-dominant fly ash particles may originate from the plant industry located in west Chingqing, north of Guizhou province, central of Hunan province, Zhejiang province, Jiangxi province and the west of Guangdong province, while the activities of foundry and iron or steel plants in the west of Chongqing, the north of Guizhou province and the central of Hunan province may be the main sources of Fe-dominant fly ash particles in our samples.

**Key words:** snowfall; fly ash; single particle; human activity; SEM-EDS; Jinfo Mountain

随着工业发展, 城市化进程的加剧, 煤炭、石油等化石燃料消耗量迅猛增长, 大气污染问题愈发严重. 湿清除是气溶胶粒子的主要清除机制, 维持着大气中气溶胶粒子源、汇之间的平衡, 是大气自净最重要的过程之一<sup>[1]</sup>. 雪是气溶胶粒子的天然采集器和保存器, 并通过干/湿沉降过程成为记录大气成分的理想媒介<sup>[2]</sup>. 作为高温环境的产物, 飞灰被用

作指示化石燃料或生物质燃烧过程产生的大气沉降

收稿日期: 2015-05-11; 修订日期: 2015-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41103068); 重庆市基础与前沿研究计划院士专项项目(cstc2013jcyjys20001); 重庆市研究生科研创新项目(CYS14056); 重庆市国土房管科技项目(CQGT-KJ-2014056); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2016D007, XDJK2014A016)

作者简介: 于正良(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为岩溶环境, E-mail: yzlgxp@swu.edu.cn

\* 通讯联系人, E-mail: balance@swu.edu.cn

污染物<sup>[3]</sup>. 飞灰由于其细小的粒径和特殊的形成环境,成为重金属<sup>[4]</sup>、硫化物<sup>[5]</sup>及有机污染物(如 PAHs)<sup>[6]</sup>传输扩散的重要载体. 近年来,越来越多的学者开始关注降雪中球形飞灰单颗粒特征,但研究地点大多位于我国西北及青藏高原地区<sup>[3,7,8]</sup>,关于我国南方人类活动强烈区域降雪中飞灰单颗粒特征的研究较少. 以重庆为中心的四川盆地是亚洲地区大气气溶胶的强源区,已引起中外科学家的广泛关注<sup>[9]</sup>. 目前,对重庆地区大气颗粒物样品的分析主要采用全样分析的方法,无法提供单个气溶胶粒子的属性,尤其是人为源的飞灰单颗粒信息相对缺乏<sup>[10-12]</sup>. 因而对该区域大气气溶胶中飞灰进行单颗粒分析,有利于理解其对人体健康和大气环境的影响.

金佛山处于四川盆地、云贵高原的交界处,周边区域日常生活、工业生产等人类活动比较强烈. 较大的山体高度造就了山顶区域冬季平均气温 0℃ 以下的低温环境,降水多以降雪的形式出现. 独特的地理环境为研究人类活动强烈区域大气降雪中飞灰单颗粒特征提供了有利条件.

本研究于 2014-12-15 对金佛山降雪进行了取样,通过 SEM-EDS 对降雪中的飞灰进行了单颗粒形貌、化学组成的测定分析,以期探究人类活动强烈区域的大气降雪中飞灰单颗粒特征及其来源,增加人类活动产生的粉尘对区域大气环境影响的认识.

## 1 研究区概况

金佛山自然保护区(28°50′~29°20′N,107°00′~107°20′E)位于四川盆地东南部的渝黔交接带,属

于大娄山东段. 总面积约 1 300 km<sup>2</sup>,主峰风吹岭海拔 2 251.1 m. 在地质构造上,金佛山为宽缓的向斜,轴部是二叠系碳酸盐岩地层,形成了海拔 2 000 m 左右的较大面积的缓坡平台,并发育了大型岩溶洼地、落水洞、洞穴系统等岩溶形态. 受山体较大相对高差的影响,金佛山形成了垂直气候分带,山体上部具有温带湿润气候的某些特征,云雾多、日照少、雨量丰沛,空气湿度大,多年平均气温、降水量分别为 8.2℃、1 434.5 mm,降水集中于 4~10 月<sup>[13,14]</sup>. 冬季气温较低,降水以降雪的形式为主并形成短期积雪. 金佛山周边区域人口众多,城镇密集,人类活动强烈,居民日常生活及各种工农业活动排放了大量的粉尘. 金佛山由于其独特的高山岩溶生态,成为中国西南地区的旅游胜地,旅游活动一定程度上加剧了该区域的空气污染.

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集

金佛山于 2014-12-09 开始降雪,积雪厚度 13~14 cm,于当月 15 日进行雪样采集工作. 采样时,积雪保存完好. 共采集 5 个降雪样品,分别位于:杜鹃林、药池坝、假日酒店、观景台及风吹岭(图 1). 采集各点表层积雪(0~5 cm)时,用聚乙烯铲将雪样装入 1.5 L 聚乙烯瓶;小铲和聚乙烯瓶均提前用浓度为 1:3 HNO<sub>3</sub> 浸泡 48 h,之后用超纯水润洗 5~6 次,置于烘箱烘干. 取样点选在较为空旷的区域,远离树木、岩石等局部污染源. 每个取样点取 4~5 处的雪混装,减少因局部污染造成的数据失真. 获取的样品保持冷冻状态直至运回实验室,存储于冷冻

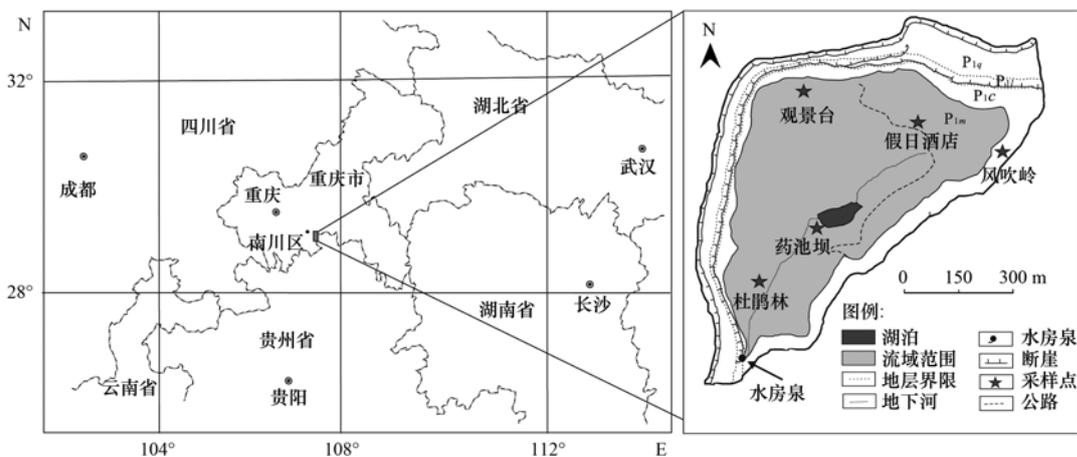


图 1 研究区位置及采样点分布示意

Fig. 1 Location of research area and sampling sites

室(-18℃)直至分析。

将雪样置于室温下自然融化,使用蠕动泵过滤融雪样品,每个样品过滤水样 225 mL,所用滤膜为聚碳酸酯膜(直径 47 mm、孔径 0.45 μm,美国 Millipore 公司,聚碳酸酯膜表面光滑且质地均匀,比其它类型的滤膜更适合进行 SEM 分析<sup>[15]</sup>),之后将滤膜烘干并保存于干燥箱中。以上预处理过程在西南大学地理科学学院超净实验室进行。

## 2.2 雪样分析

剪取约 1/8 载有降雪悬浮颗粒物的滤膜,用黑色碳质导电胶粘贴在 12.5 mm SEM 标准载物台上,用高真空电弧法给样品镀上铂膜,使用扫描电子显微镜(JSM-6510LV 型,日本电子公司)与 X 射线能谱联用系统(SEM-EDS)对滤膜上的颗粒物进行单颗粒分析。工作条件为 20 kV 加速电压,单颗粒能谱采集时间 40~90 s。

在 2 000 倍的低放大倍率下查找球形颗粒,一旦发现,采用 3 000~30 000 倍的放大倍率查看颗粒细节特征,保存扫描图像的同时对球形颗粒进行能谱分析。仪器定量分析软件为 Aztec version 2.0 OXFORD,通过无标 ZAF 校正法计算单颗粒中各化学元素的质量分数。单颗粒中各种氧化物的丰度通过 EDX 的标准氧化法获取<sup>[16]</sup>。获取的 SEM 图像使用 Image-Pro Plus 6.0 (Media Cybernetics 公司,美国)进行处理、分析。通过定标尺、手工描绘等步骤完成球形颗粒的粒径、周长、面积以及环度等参数的后续测量。通过 SEM 的观察发现,降雪中存在大量形态不一的颗粒物,对其中 132 个球形颗粒进行了 X 射线能谱分析。以上测试分析在西南大学洁净能源与先进材料学院 SEM 实验室完成。

## 2.3 气象数据的获取

风吹岭安装了小型气象站(Wireless Vantage Pro206163 型,美国 Davis 公司),提供了本次降雪前后的气象数据,并通过 NOAA HYSPLIT 气团后向轨迹模型模拟金佛山降雪前后的气团运移路径<sup>[17]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 形貌特征

形貌是飞灰的外在形态,可以反映颗粒物的形成、运移、后生反应等多方面信息<sup>[7]</sup>。自然来源的颗粒物主要由地表矿物颗粒、生物颗粒组成。一般而言,矿物颗粒是岩石沿着裂隙或者节理破解而成,具有尖锐的边缘,虽然经过长距离搬运,会出现一定程度的磨圆,但形成像球形飞灰那样规则的形貌是

非常困难的;而孢粉、动植物残片等生物颗粒一般具有对称和类似组织的形貌<sup>[3]</sup>。

高温环境下形成的颗粒物,当温度达到某些矿物的熔点时便发生融化,在表面张力的作用下收缩为球形<sup>[18]</sup>,特殊的形貌使得它与自然来源的颗粒能较为清楚地区分开。

金佛山降雪中飞灰直径介于 0.16~4.88 μm,平均粒径 1.64 μm。相比张学磊等<sup>[3]</sup>、董志文等<sup>[7]</sup>在西北地区的研究结果(两者均为 3.21 μm)整体偏小。颗粒物的形状可使用环度(roundness)表示<sup>[19]</sup>,计算公式为:

$$R = P^2(4\pi A)^{-1}$$

式中, $R$  为环度, $P$  为飞灰颗粒周长(μm), $A$  为电子扫描图像中飞灰的面积(μm<sup>2</sup>)。

正圆颗粒物的环度为 1,正方形颗粒的环度为 1.27,环度越大则说明颗粒物形状越不规则<sup>[20]</sup>。若颗粒物粒径太小,测量误差较大,可能会导致周长小于面积,出现  $R < 1$  的情况,在此不列入统计范畴。金佛山降雪中飞灰颗粒环度值分布在 1~1.28 之间,平均值 1.09。图 2 展示了降雪中飞灰颗粒的环度分布,有 80.16% 分布在 1.05~1.15 之间,表明降雪中大部分的飞灰颗粒比较规则平整,接近于正球体。

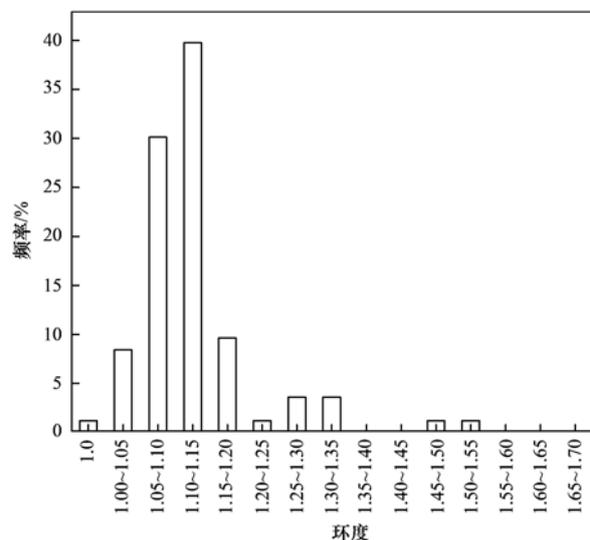


图 2 降雪中球形飞灰颗粒的环度分布频率

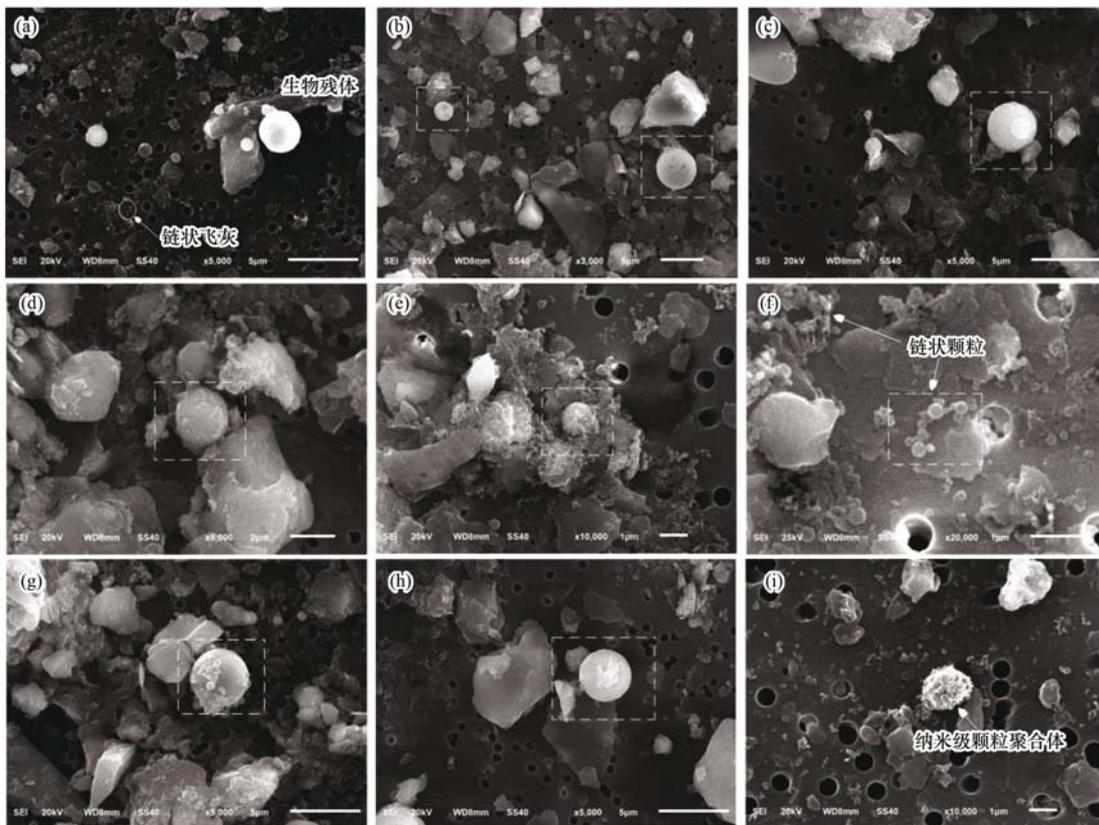
Fig. 2 Roundness distribution of fly ash in snow samples

图 3 为部分飞灰的形貌展示。降雪中飞灰主要有光滑颗粒、粗糙颗粒及聚合体颗粒等 3 种类型。通过统计发现(表 1),光滑颗粒占主导,占统计颗粒的 80.31% [如图 3(a)],其平均环度 1.08;粗糙颗粒相对较少 [如图 3(d)],占统计颗粒的 14.39%,平均环度 1.14。聚合体颗粒占 5.30% [如图 3(f)、

表 1 飞灰颗粒信息统计

Table 1 Information of single fly ash particles

分类原则	类型	质量分数 /%	粒径/ $\mu\text{m}$			环度		
			最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
表面形态	光滑颗粒	80.31	0.18	4.77	1.56	1.01	1.19	1.08
	粗糙颗粒	14.39	0.21	4.26	2.03	1.05	1.27	1.14
	聚合体	5.30	0.16	0.92	0.50	1.00	1.12	1.08
化学组成	富硅类	34.09	0.92	4.88	2.59	1.00	1.22	1.11
	富碳类	49.24	0.16	3.18	0.84	1.00	1.27	1.09
	富铁类	12.88	0.56	4.26	1.72	1.02	1.18	1.09
	富铝类	2.27	2.28	2.90	2.59	1.09	1.22	1.15
	富钛类	1.52	0.51	4.17	2.34	1.05	1.11	1.07



(a) 光滑飞灰; (b) 带斑点的飞灰; (c) 光滑颗粒与粗糙颗粒的结合体; (d) 粗糙飞灰; (e) 飞灰被杂质覆盖; (f) 链状颗粒;  
(g) 飞灰上附带更小的颗粒; (h) 表面沾有碎片的飞灰; (i) 细小颗粒聚合体

图 3 降雪中球形飞灰颗粒的形貌

Fig. 3 Morphology of fly ash in the snow

3(i)], 平均环度 1.08. 光滑颗粒反映其生成温度高于所含矿物的熔点, 但有些光滑颗粒内部存在斑点 [如图 3(b)], 说明颗粒内部物质不均匀, 导电性存在差异, 因而在 SEM 下显现出不同的亮度.

粗糙颗粒则反映其形成环境温度稍低, 不足以完全熔融, 其环度大于光滑颗粒. 还有一些颗粒介于光滑与粗糙之间 [如图 3(c), 颗粒左侧较为光滑, 右侧粗糙, 并可清晰地看到颗粒内部的层状结构]. 该类颗粒可能形成于高温熔炉中, 但滞留时间过短, 还未完全融化就被排出.

部分颗粒表面粘有更加细小的球体或者片状物体 [如图 3(g)、3(h)]. 分别对球体和粘附物进行能谱分析, 发现两者化学成分的相似程度分别高达 98.48%、99.91%, 可推断它们来源相同. 较小的球形颗粒或片状物体在熔炉内与较大的颗粒碰并, 之后进入大气环境, 沉降于雪冰中. 烟尘集合体由细小的纳米级颗粒聚合而成, 主要来自于燃煤、汽车尾气及生物质的燃烧等<sup>[21]</sup>, 在此不做详细讨论.

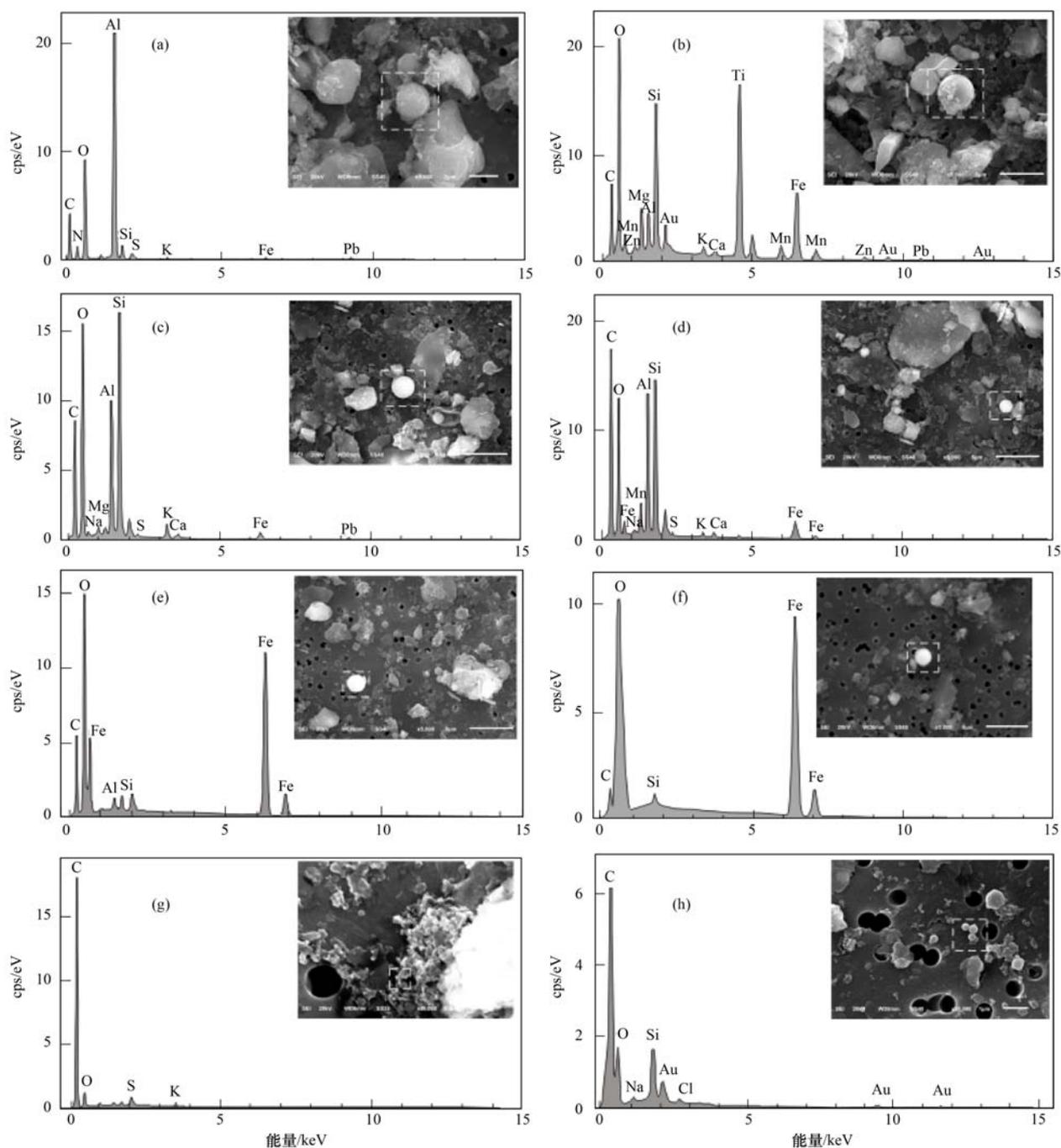
### 3.2 化学组成特征

EDS 技术可对降雪中的飞灰进行单颗粒元素组

成分析. 本研究统计的飞灰化学组成表明, 飞灰包含 C、O、Si、Al、K、Ca、Mg 等多种元素, 部分样品还包括 S、Cl 以及 Mn、Ti、Fe、Pb、Au 等重金属元素. 为了统计降雪中不同化学类型飞灰所占的比例, 依据元素组成及相对含量对飞灰进行分类: 当  $C + O \geq 90\%$  时, 将其划为富碳颗粒<sup>[22]</sup>, 当  $C + O < 90\%$  时, 以其它占主导的化学元素确定其化学类型.

根据以上方法, 将降雪中的飞灰颗粒划分为以

下几类: 富硅颗粒、富碳颗粒、富铁颗粒、富铝颗粒及富钛颗粒, 所占质量分数分别为: 34.09%、49.24%、12.88%、2.27%、1.52% (表 1). 富硅颗粒与富碳颗粒是最主要的类型 (共占 82.71%), 富铝颗粒与富钛颗粒较少. 富碳颗粒所含元素种类较少, C 占据绝对优势, 仅有少量的 Si、Al、S、K 等其它元素 [图 4(a)、4(b)]. 富硅颗粒中, Si 占主导, Al 常与之伴生, 并含有少量的 K、Ca、Fe、Pb 等元



(a)、(b)富碳类飞灰; (c)、(d)富硅类飞灰; (e)富铝类飞灰; (f)富钛类飞灰; (g)、(h)富铁类飞灰

图 4 不同类型飞灰颗粒的 EDX 谱图及其形貌特征

Fig. 4 EDS spectra of different kinds of fly ash particles and their morphology characteristics

素[图 4(c)、4(d)]. 富钛颗粒所含元素种类众多, Fe、Mn、Zn、Au 等金属元素含量较高[图 4(f)]. 富铁颗粒与富铝颗粒包含的元素种类均较少[图 4(e)、4(g)、4(h)].

### 3.3 粒径分布特征

燃烧过程中释放的飞灰粒径取决于设备类型、燃烧条件、操作条件、自然条件等因素,因此飞灰的粒径分布成为精确定位污染源的重要参数<sup>[3]</sup>.

本研究中的飞灰平均粒径小于西北地区. 一般而言,距飞灰排放源地越远、传输距离越长则粒径越小. 但研究区离人类工业活动区相对较近,且燃烧技术、工业条件与西北地区差别不大,基本可以排除燃烧工艺不同造成的粒径差别;金佛山地处四川盆地东南缘,周边地形相对封闭,而四川盆地是全国有名的静风区,较小的风力使得较大粒径的飞灰难以到达相对较远的山地区域,加上该区域降雨频繁,较大颗粒在传播过程中更容易被清除,因而导致研究区的飞灰粒径小于西北地区.

图 5 为降雪中各种化学类型飞灰的粒径分布. 降雪中总飞灰粒径分布表现为 4 个峰值区. 为了便于区分,分别标记为峰 1、峰 2、峰 3 和峰 4. 峰 1 出现于 0.3~0.6  $\mu\text{m}$ ,峰 2、峰 3、峰 4 分别出现于 0.9~1.2、1.8~2.1 和 3.3~3.6  $\mu\text{m}$ . 反映降雪中的飞灰主要来自 4 个区域. 富碳类飞灰的粒径分布仅表现出一个峰值:0.3~1.2  $\mu\text{m}$ ;富硅类飞灰的粒径表现出 3 个峰值,分别为 0.9~1.2、1.5~2.1 和 3.3~3.6  $\mu\text{m}$ ,第二个峰最高;富铁类飞灰表主要现为两个峰值,分别位于 1.2~1.5  $\mu\text{m}$ 、1.8~2.1

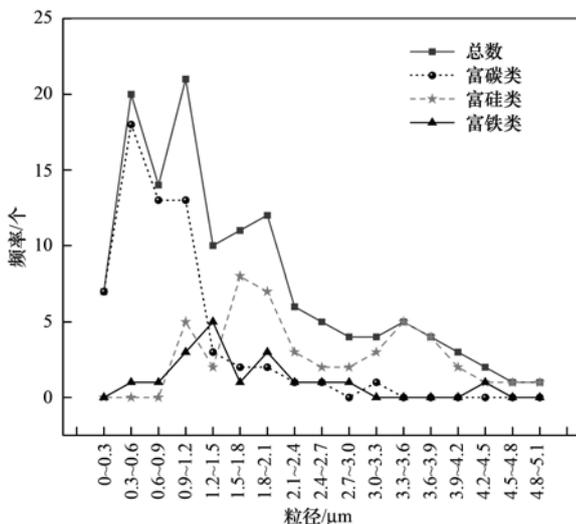


图 5 降雪中不同化学类型飞灰的粒径分布

Fig. 5 Size distribution of different chemical type fly ashes in the snow

$\mu\text{m}$ .

综合观察图 5,富碳类粒径分布的峰值与总飞灰粒径分布的峰 1 一致,表明富碳类飞灰是降雪中较细颗粒最主要的贡献者;峰 2 与富硅类飞灰和富铁类飞灰粒径最小的峰值吻合,说明传输距离较远的富硅类和富铁类对总飞灰粒径的第二个峰贡献较大;峰 3 与富硅类飞灰和富铁类飞灰的第二个峰一致,粒径较大的富硅类飞灰与峰 4 吻合,说明峰 4 主要来自距离较近的飞灰排放源.

## 4 讨论

### 4.1 飞灰的人类活动来源

$\text{SiO}_2$  及  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的熔点分别为 1 725 $^\circ\text{C}$ 、2 050 $^\circ\text{C}$ ,因此,富硅类和富铝类飞灰可以作为燃煤工业高温过程的指示器<sup>[23]</sup>. 富硅类飞灰来源的典型代表包括燃煤供热站或者火电厂<sup>[24]</sup>. 中国南方供热站较少,却有着大量规模不等的燃煤火电厂分布. 大多数燃煤工业都装有静电除尘装置,但 Seames<sup>[25]</sup>的研究表明:虽然大颗粒的飞灰可被去除,但对细小颗粒(直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ )的清除效果并不理想. 其他燃煤工业温度较低(如水泥厂分解炉温度仅为 850~900 $^\circ\text{C}$ <sup>[26]</sup>),未能达到硅铝矿物的熔点,难以形成富硅或者富铝类飞灰. 因此研究区富硅类颗粒主要来自火力发电厂.

降雪中发现了 3 个富铝类飞灰,平均粒径、平均环度分别为: 2.56  $\mu\text{m}$ 、1.14,表面粗糙,含有一定量的 Fe、Pb 等重金属元素,Si 含量较少. 较好的环度及较高的重金属含量排除了自然来源的可能性,较粗的粒径指示其为近源排放,因此推测该类颗粒可能来源于重庆南川区南平镇的某氧化铝公司. 但数量较少的富铝类飞灰说明该公司对金佛山此次降雪中的飞灰贡献不大.

$\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{TiO}_2$  的熔点分别为 1 560 $^\circ\text{C}$  和 1 859 $^\circ\text{C}$ ,总体低于  $\text{SiO}_2$  及  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的熔点,因而富铁类和富钛类可用于指示温度稍低的燃煤过程,例如钢铁厂和铸造厂<sup>[27]</sup>. 富铁类飞灰与富钛类飞灰共占本次实验统计飞灰的 15.03%.

富碳类球形颗粒在本研究中所占的比例可达 49.24%,其粒径变化于 0.15~2.54  $\mu\text{m}$ ,其中  $< 1 \mu\text{m}$  的颗粒占 70.49%,说明以细颗粒为主,平均粒径 0.84  $\mu\text{m}$ . 杨书申等<sup>[28]</sup>认为,富碳类飞灰是工业活动中未燃尽煤炭的有机组分在高温热动力条件下经分解、熔融和相变,之后随烟气散出,冷却形成球形颗粒. 邵龙义等<sup>[29]</sup>对焦化厂炼焦炉排放的颗粒

物进行了研究,发现排放的颗粒物多为粒径在  $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$  之间的球状燃煤飞灰,其它工业燃煤(如火电厂)也有碳质飞灰产生. 生物质燃料燃烧形成的焦油球(Tar ball)形态多为球形,C、O 是其最主要的元素<sup>[30]</sup>. 柴薪是我国西南地区居民日常生活的重要燃料,且冬季有熏制腊肉、香肠的习俗,加上较低的气温,增加了柴薪的消耗量,因而生物质燃烧形成的焦油球也构成碳质颗粒的潜在来源. 工业活动产生的富碳类飞灰和生物质燃烧形成的焦油球可能共同组成了本研究中丰富的富碳类颗粒,至于如何划分两者的贡献比例,有待进一步的研究.

#### 4.2 飞灰颗粒的地域来源

统计气象站获取的降雪前后 5 d 的地面气象资料(2014-12-05 ~ 2014-12-15),数据显示:该时段内,平均气温  $-2.57^\circ\text{C}$ ,降水以降雪形式为主,未能记录降水数据,平均风速  $3.21 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (轻风),风向 SE 及 SSE 占绝对优势(图 6).

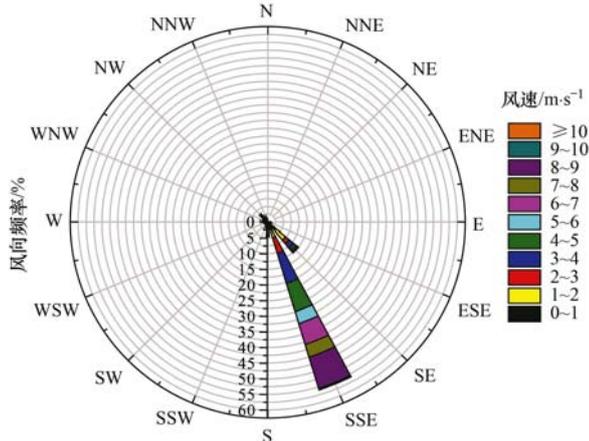


图 6 金佛山降雪前风频、风向

Fig. 6 Wind directions and wind speed before snowfall in Jinfo Mountain

图 7 为金佛山取样点地面上空 500 m 处降雪时为期 3 d 的后向气团反演轨迹 (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>). 可以看出,到达金佛山的气团主要有三支:东支气流运移轨迹最长,途经浙江中部、江西北部、湖南中北部及贵州北部;南支起始于广东西部、广西东部,途径湖南、贵州北部;西支最短,起源于四川东南部,历经重庆西南部到达金佛山. 东支气流、南支气流与研究区气象站观测的风向数据比较吻合.

如前所述,富碳类飞灰主要来自于居民日常生活及工业活动排放. 代表“高温工业”的富硅类飞灰表现出 3 个峰值(图 5),根据飞灰的扩散分选原理,推测峰 1 指示飞灰颗粒来自距离最远的浙赣一带和

广东西部的火力发电站,峰 2 指示来自于贵州北部及湖南中西部,峰 3 可能来源于较近的重庆西部. 富铁颗粒由于密度较大,其运移的范围相对较小,粒径细小的第一个峰指示贵州北部、湖南中西部,第二个峰指示重庆西部的钢铁厂、轧钢厂等金属冶炼活动.

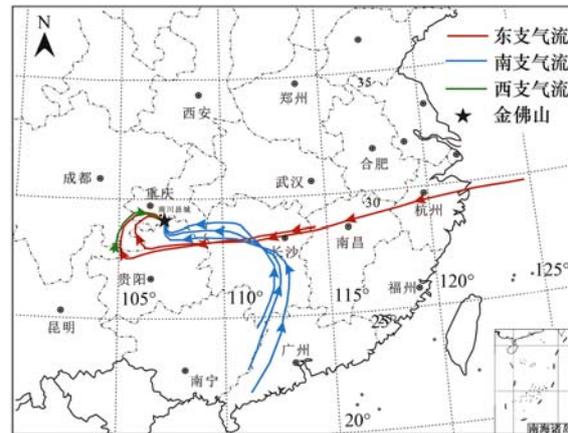


图 7 金佛山地面上空 500 m 处降雪前 3 d 后向气团反演轨迹  
Fig. 7 Three days before snowfall backward trajectories terminated at 500 m above the ground level of Jinfo Mountain

## 5 结论

(1)应用 SEM-EDS 联用系统,发现金佛山降雪中存在大量的球形飞灰. 从外形来看,降雪中的飞灰可分为光滑颗粒、粗糙颗粒及聚合物颗粒这 3 种,光滑颗粒占据主导. 飞灰颗粒平均粒径  $1.64 \mu\text{m}$ ,较小的粒径可能与该区域地形封闭、风力搬运能力偏弱有关. 平均环度 1.09,表明飞灰颗粒整体圆度较好,接近正球体.

(2)飞灰按主导元素划分为富硅类、富碳类、富铁类、富铝类及富钛类 5 种,富碳类与富硅类为最主要的类型,富铝类、富钛类偏少. 富碳类飞灰所占比例最大,指示该区域大气环境受居民生活、工业活动影响深刻.

(3)结合气象数据、气团后向运移轨迹和飞灰颗粒的性质,初步认为:富碳类飞灰主要来自生活排放源及工业活动;富硅类飞灰可能来自于重庆西部、贵州北部及湖南中西部、浙赣一带和广东西部的火力发电厂等高温燃煤工业;富铁类飞灰则可能来源于重庆西部和贵州北部、湖南中西部的钢铁厂、轧钢厂等金属冶炼活动.

致谢:本实验得到了西南大学地理科学学院葛晓培同学及材料学院刘定宇助理实验员的大力帮助,在此一并致谢!

## 参考文献:

- [ 1 ] 康汉青, 朱彬, 樊曙先. 南京北郊冬季大气气溶胶及其湿清除特征研究[J]. 气候与环境研究, 2009, **14**(5): 523-530.
- [ 2 ] Schöner W, Staudinger M, Winiwarter W, *et al.* Dating of snow samples from snow pits at Sonnblick, Austrian Alps as a tool for interpretation of chemical analysis [ A ]. In: The Proceedings of EUROTRAS Symposium 92, SPB [ C ]. The Hague Academic Publishing, 1993. 753-756.
- [ 3 ] 张学磊, 郭光剑, 姚檀栋, 等. 天山乌鲁木齐 1 号冰川表雪中飞灰单颗粒特征[J]. 科学通报, 2011, **56**(34): 2906-2916.
- [ 4 ] 梁红姬. 燃煤飞灰中汞的赋存状态及其在热处理过程中释放特征的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [ 5 ] 刘彦飞, 邵龙义, 程晓霞. 大气可吸入颗粒物(PM<sub>10</sub>)单颗粒硫化特征[J]. 环境科学, 2010, **31**(11): 2555-2562.
- [ 6 ] 董洁. 煤热解过程中 PAHs 的形成及其催化裂解特性[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- [ 7 ] 董志文, 秦大河, 秦翔, 等. 祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 504-512.
- [ 8 ] Cong Z Y, Kang S C, Qin D H. Seasonal features of aerosol particles recorded in snow from Mt. Qomolangma (Everest) and their environmental implications [ J ]. Journal of Environmental Sciences, 2009, **21**(7): 914-919.
- [ 9 ] 彭中贵, 陈军, 孟小星, 等. 重庆大气气溶胶污染现状与回顾[J]. 重庆环境科学, 2000, **22**(1): 39-41.
- [ 10 ] 张灿, 周志恩, 翟崇治, 等. 基于重庆本地碳成分谱的 PM<sub>2.5</sub> 碳组分来源分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(3): 810-819.
- [ 11 ] 吴健生, 廖星, 彭建, 等. 重庆市 PM<sub>2.5</sub> 浓度空间分异模拟及影响因子[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 759-767.
- [ 12 ] 任丽红, 周志恩, 赵雪艳, 等. 重庆主城区大气 PM<sub>10</sub> 及 PM<sub>2.5</sub> 来源解析[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(12): 1387-1394.
- [ 13 ] 李林立, 况明生, 蒋勇军, 等. 金佛山岩溶生态系统初步探讨——岩溶泉水化学特征分析[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2003, **26**(2): 201-204.
- [ 14 ] Wu Y X, Jiang Y J, Yuan D X, *et al.* Modeling hydrological responses of karst spring to storm events: example of the Shuifang spring (Jinfo Mt., Chongqing, China) [ J ]. Environmental Geology, 2008, **55**(7): 1545-1553.
- [ 15 ] Zamengo L, Barbiero N, Gregio M, *et al.* Combined scanning electron microscopy and image analysis to investigate airborne submicron particles: A comparison between personal samplers [ J ]. Chemosphere, 2009, **76**(3): 313-323.
- [ 16 ] Goldstein J, Newbury D, Joy D, *et al.* Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis [ M ]. New York: Kluwer Academic, 2003. 688.
- [ 17 ] Draxler R R, Hess G D. An overview of the HYSPLIT\_4 modelling system of trajectories, dispersion, and deposition [ J ]. Australian Meteorological Magazine, 1998, **47**: 295-308.
- [ 18 ] Fisher G L, Prentice B A, Silberman D, *et al.* Physical and morphological studies of size-classified coal fly ash [ J ]. American Chemical Society, 1978, **12**(4): 447-451.
- [ 19 ] Gao Y, Anderson I R, Hua X. Dust characteristics over the North Pacific observed through shipboard measurements during the ACE-Asia experiment [ J ]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(36): 7907-7922.
- [ 20 ] 赵淑慧, 李忠勤, 周平, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川大气气溶胶的微观形貌及元素组成分析[J]. 冰川冻土, 2010, **32**(4): 714-722.
- [ 21 ] 邵龙义, 杨书申, 李卫军, 等. 大气颗粒物单颗粒分析方法的应用现状及展望[J]. 古地理学报, 2005, **7**(4): 535-548.
- [ 22 ] Ro C U, Kim H, Oh K Y, *et al.* Single-particle characterization of urban aerosol particles collected in three Korean cities using low-Z electron probe X-ray microanalysis [ J ]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(22): 4770-4776.
- [ 23 ] Neinavaie H, Pirkel H, Trimbacher C. Herkunft und Charakteristik von Stäuben: Research report [ R ]. Wien: Umweltbundesamt, 2000. 1-61.
- [ 24 ] Sokol E V, Kalugin V M, Nigmatulina E N, *et al.* Ferrospheres from fly ashes of Chelyabinsk coals: Chemical composition, morphology and formation conditions [ J ]. Fuel, 2002, **81**(7): 867-876.
- [ 25 ] Seames W S. An initial study of the fine fragmentation fly ash particle mode generated during pulverized coal combustion [ J ]. Fuel Processing Technology, 2003, **81**(2): 109-125.
- [ 26 ] 蒋妍妍, 李洪林. 基于变论域模糊 PID 的分解炉温度控制研究[J]. 测控技术, 2014, **33**(10): 72-75.
- [ 27 ] 孙俊民, 温茂, 刘慧永, 等. 燃煤排放可吸入颗粒物的显微结构与物质组成研究[J]. 地球化学, 2007, **36**(1): 55-61.
- [ 28 ] 杨书申, 邵龙义, 李卫军, 等. 煤炭燃烧对上海市大气质量影响的分析[J]. 煤炭学报, 2007, **32**(10): 1070-1074.
- [ 29 ] 邵龙义, 杨书申, 时宗波, 等. 城市大气可吸入颗粒物物理化学特征及生物活性研究 [ M ]. 北京: 气象出版社, 2006. 52-53.
- [ 30 ] Pósfai M, Gelelencsér A, Simónics R, *et al.* Atmospheric tar balls: particles from biomass and biofuel burning [ J ]. Journal of Geophysical Research, 2004, **109**(D6): D06213.

## CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> of Beijing During 2014 APEC .....	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM <sub>2.5</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sub>4</sub> 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