

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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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, 曾燊, 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, 蒋铁峰, 王翠翠, 黄晓楠, 吴芝菱, 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	王维斐, 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, 邓吟, 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)
氢氧化钡-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 ₂ 吸附 HgCl ₂ 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, 任佳慧, 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)
丛枝菌根真菌对镉污染土壤上玉米生长和镉吸收的影响	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, 霍旻, 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)

南京地区大气 PM_{2.5} 潜在污染源硫碳同位素组成特征

石磊^{1,2}, 郭照冰^{1,2*}, 姜文娟^{1,2}, 芮茂凌^{1,2}, 曾钢^{1,2}

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 2. 江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室, 南京 210044)

摘要: 基于南京地区大气 PM_{2.5} 潜在污染源, 采用 EA-IRMS 技术分别测定了样品中硫碳同位素组成, 并分析不同污染源之间的关联性. 结果表明, 南京地区煤炭烟灰 δ³⁴S 值范围为 1.8‰ ~ 3.7‰, δ¹³C 值范围为 -25.50‰ ~ -23.57‰; 机动车尾气 δ³⁴S 值范围为 4.6‰ ~ 9.7‰, δ¹³C 值范围为 -26.32‰ ~ -23.57‰; 生物质烟灰 δ³⁴S 值范围为 5.2‰ ~ 9.9‰, δ¹³C 值范围为 -19.30‰ ~ -30.42‰; 扬尘 δ¹³C 值为 -13.45‰. 南京地区煤炭烟灰颗粒物的硫同位素较轻, 扬尘的碳同位素较重. 对比国内外不同污染源 δ³⁴S 与 δ¹³C 值, 南京地区大气 PM_{2.5} 中的潜在污染源的 δ³⁴S 与 δ¹³C 具有明显的区域性. 因此, 潜在污染源的 δ³⁴S、δ¹³C 值可为南京地区大气 PM_{2.5} 的源解析提供同位素组成源谱支持.

关键词: 硫同位素; 碳同位素; 大气 PM_{2.5}; 潜在污染源; 南京地区

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0022-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.01.004

Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM_{2.5} in Nanjing Region

SHI Lei^{1,2}, GUO Zhao-bing^{1,2*}, JIANG Wen-juan^{1,2}, RUI Mao-ling^{1,2}, ZENG Gang^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Nanjing 210044, China)

Abstract: Potential pollution sources of atmospheric PM_{2.5} in Nanjing region were collected, and sulfur and carbon isotopic compositions were determined by EA-IRMS synchronously. The results showed that δ³⁴S and δ¹³C values ranged from 1.8‰-3.7‰ and -25.50‰- -23.57‰ in coal soot particles; 4.6‰-9.7‰ and -26.32‰- -23.57‰ in vehicle exhaust; 5.2‰-9.9‰ and -19.30‰- -30.42‰ in straw soot particles, respectively. Besides, the δ¹³C value of dust was -13.45‰. It can be observed that sulfur isotopic compositions in coal soot were lower, while the carbon isotopic composition in dust was higher. Comparing with δ³⁴S and δ¹³C values in domestic and foreign polluted sources, we found that sulfur and carbon isotopes in atmospheric PM_{2.5} in Nanjing region presented an obvious regional characteristics. Therefore, the source spectrum of sulfur and carbon isotopic compositions in Nanjing region might provide an insight into source apportionment of atmospheric PM_{2.5}.

Key words: sulfur isotope; carbon isotope; atmospheric PM_{2.5}; potential pollution sources; Nanjing region

大气 PM_{2.5} 的化学组成复杂, 粒径小, 在大气中停留时间长, 可显著降低大气能见度、改变成云过程, 并在气候变化中起到重要作用^[1]. PM_{2.5} 来源主要分为两类, 一类是各种污染源的直接排放, 另一类是大气中的化学过程将原来的气态组分氧化而形成的新颗粒物^[2]. 已有研究表明, 我国大气 PM_{2.5} 污染形势严峻, 部分城市大气 PM_{2.5} 平均浓度超过 100 μg·m⁻³, PM_{2.5} 已成为我国大气复合污染的关键污染物^[3]. 近年来, 南京地区灰霾天气污染愈发严重, 尤其 2014 年南京市承办第二届夏季青年奥林匹克运动会, 其大气环境质量成为社会关注焦点^[4].

大气 PM_{2.5} 来源复杂, 通过常规方法无法准确分析其来源. 近年来, 稳定同位素技术逐渐应用于大气污染物来源与转化的示踪^[5~8]. 陈颖军等^[9] 对比不同污染源的碳同位素组成, 研究了不同污染源黑

碳的排放行为. 魏英等^[10] 通过测定大气 PM_{2.5} 硫同位素组成追溯了南京地区冬季大气的主要硫源. 由于不同污染源的硫、碳同位素数值可能存在重叠, 且不同地区污染源的硫碳同位素数值存在差异, 致使利用同位素技术溯源具有较大不确定性. 因此, 系统研究特定区域的大气潜在污染源的硫同位素源谱对溯源有重要意义. 本研究首次对南京地区大气 PM_{2.5} 潜在污染源硫、碳同位素的组成进行分析, 以期为准确示踪大气 PM_{2.5} 的污染源提供依据.

收稿日期: 2015-07-08; 修订日期: 2015-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41373023); 教育部留学回国人员启动基金项目(2012s001); 江苏省“333 高层次人才培养工程”项目; 江苏省“六大人才高峰”项目; 江苏省高校产业化推进项目; 江苏省大学生创新创业训练计划项目(201410300011Z); 江苏省环境保护科研课题项目(2014056); 江苏省高校优势学科建设工程项目

作者简介: 石磊(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境, E-mail: shileiing@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: guocumt@nuist.edu.cn

1 材料与方法

1.1 样品采集

大气 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度主要受工业燃煤、道路交通尾气排放和道路扬尘的影响,且生物质燃烧在特定季节对大气 $\text{PM}_{2.5}$ 存在显著影响,因此本研究将南京地区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 主要潜在污染源选定为工业燃煤、道路交通尾气排放、扬尘以及生物质燃烧四类。

南京工业企业,尤其热电、石化、钢铁等大型工业企业用煤主要包括内蒙古高硫煤、大同低硫煤、徐州气煤、安徽无烟煤与吉林焦煤这 5 种。在研究煤中硫同位素组成时,将煤炭样品与艾士试剂混合,放入 850°C 的马弗炉加热 2 h,得到燃烧后的颗粒物再进行测定;研究煤中碳同位素时,将煤炭放置在自制电炉上,接通电源,将电炉电压调至 250 V,待煤炭完全燃烧后启动采样器,通过采样器将烟气颗粒物采集到滤膜上,滤膜用锡纸包裹后备用。汽油车尾气主要取自 93 号汽油轿车以及大众汽车,柴油车尾气主要采于 -10 号卡车及公交车、-10 号及 0 号混合公交车、0 号公交车以及 0 号拖拉机。机动车尾气直接采集较为困难,本研究采集了机动车尾气管道里残留物颗粒。采集方法:用小药勺刮取机动车尾气管道内颗粒物,用锡纸包裹好,再将尾气颗粒物与艾士试剂混合,放入 850°C 的马弗炉加热 2 h,得到颗粒物再进行研究。扬尘采集方法:用药勺采集道路边扬尘与土壤表层混合物等,经筛滤后用锡纸包裹,再用于同位素测定分析。生物质包括 C_3 植物和 C_4 植物, C_3 植物主要有梧桐树叶与树枝(主要行道树),小麦秸秆;矮抗 58、温州六号、盘城麦秆、扬麦 10 号,水稻和大豆秸秆; C_4 植物为玉米秸秆。生物质燃烧生成颗粒物的采集方法:将生物质样品放置在煤炉中,用明火点燃后,打开采样器,通过采样器将生物质烟气颗粒物收集在滤膜上,其燃烧与采集过程如图 1 所示。

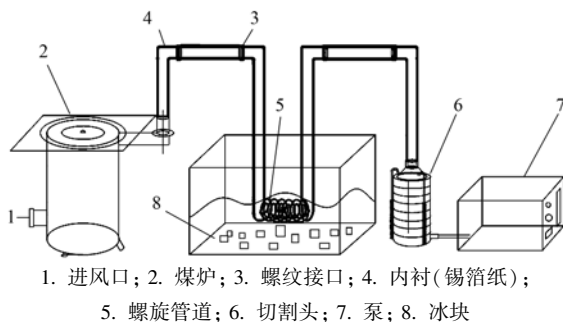


图 1 生物质燃烧采样示意

Fig. 1 Schematic diagram of the sampling set up used for biomass combustion

1.2 样品预处理

1.2.1 硫同位素组成测定的预处理

采用艾士卡法将煤炭及机动车尾气里的硫转化成 BaSO_4 。先称取质量比为 2:1 的轻质氧化镁以及无水碳酸钠混匀,将煤炭与机动车尾气颗粒物磨细,粒度小于 0.2 mm。称取 1 g 样品与 2 g 艾氏剂混匀放入 30 mL 的陶瓷坩埚,再用 1 g 艾氏剂覆盖在混匀的样品上。将坩埚移至马弗炉,在 850°C 加热 2 h,取出坩埚,将冷却后样品移入 400 mL 烧杯中,用热水洗净坩埚,再加入 100 mL 热蒸馏水,充分搅拌。用中性滤纸将样品以倾泻法过滤,并小心将残渣移至滤纸上,再用热水冲洗烧杯多次,样品溶液体积不超过 300 mL。滴加甲基橙指示剂 2~3 滴,用盐酸中和使溶液呈酸性($\text{pH } 1 \sim 2$)以消除碳酸根离子的影响。加入 3 mL $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ BaCl_2 溶液,充分振荡后静置,用 0.22 μm 醋酸纤维滤膜过滤获得 BaSO_4 沉淀,用去离子水反复清洗排除 Cl^- 干扰,将过滤后得滤膜转移至坩埚中,放入 800°C 的马弗炉中灼烧 2 h,获取纯净的 BaSO_4 粉末。

取 1/2 生物质烟灰颗粒物样品滤膜剪碎后放塑料离心管中,加入 50 mL 去离子水,搅拌混匀,恒温超声 40 min,离心后的溶液先用 0.45 μm 滤头过滤,再用 0.22 μm 滤头过滤。再向离心管中加入 50 mL 去离子水,重复以上操作 2~3 次,保证滤膜上的硫酸盐完全溶解。向滤液中加入 3 mL $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ BaCl_2 溶液,充分振荡后静置,用 0.22 μm 醋酸纤维滤膜过滤获得 BaSO_4 沉淀,后清洗、灼烧,得到纯净 BaSO_4 粉末。

1.2.2 碳同位素组成测定的预处理

将机动车尾气颗粒物与扬尘分别置于锡杯内,用镊子小心将锡杯捏成粒状,待测碳同位素组成。

将煤炭放置在自制电炉上,将电炉电压调至 250 V,待煤炭完全燃烧后,打开采样器,通过采样器将烟气颗粒物采集到滤膜上,取 1/4 样品滤膜用球磨机粉碎后,置于锡杯内,用镊子小心将锡杯捏成粒状,待测碳同位素组成。

将不同生物质放置在煤炉中,用明火点燃后,打开采样器,通过采样器将烟气颗粒物采集到滤膜上,取 1/4 样品滤膜用球磨机粉碎后,置于锡杯内,用镊子将锡杯捏成粒状,待测碳同位素组成。

1.3 样品测定

硫同位素组成测定在中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室完成。采用元素分析仪(EA, Flash 2000, Thermo)、同位素质谱仪(IRMS,

Delta VPlus, Finnigan) 联合技术测定 $\delta^{34}\text{S}$ 值. BaSO_4 作为大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中硫同位素组成的分析样品, 采用热解法将 BaSO_4 中的硫与 Cu_2O 在真空状态下加热进行氧化反应, 生成工作气体 SO_2 , 硫同位素在气体稳定同位素质谱仪上进行分析. 测定结果相对于国际标准 V-CDT, 测试精度优于 $\pm 0.2\text{‰}$.

碳同位素组成测定在中国科学院南京土壤研究所完成. 采用元素分析仪、同位素质谱仪 (EA/IRMS) 联合技术测定 $\delta^{13}\text{C}$. 分析测定 $\delta^{13}\text{C}$ 过程中, 样品先到达元素分析仪氧化塔, 通入过量的氧将样品中元素碳转化为 CO_2 , 为了得到纯二氧化碳, 含 C、N、O、S 和其他成分的混合气体依次进入还原柱、吸附柱, 然后通过色谱柱 (45°C) 分离, 除去杂质气体, EA 中的氧化和还原管的温度维持在 1020°C 和 870°C . 分析过程中超高纯度氦气的流速保持在 $100\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 来自 EA 的 CO_2 被电离, 通过 IRMS 测量其碳同位素值, 测试精度优于 $\pm 0.2\text{‰}$.

2 结果与讨论

2.1 南京地区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 潜在污染源硫同位素组成特征

不同地区各种污染源的 $\delta^{34}\text{S}$ 值可能会出现重叠效应^[11], 所以在研究不同地区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 来源时, 应同步分析其潜在污染源的 $\delta^{34}\text{S}$ 值. 本研究重点对南京地区 3 种潜在污染源烟灰颗粒物的硫同位素组成进行测定, 结果见表 1, 相对其他污染源, 安徽与吉林煤炭烟灰中 $\delta^{34}\text{S}$ 值较低; 93 号汽油轿车尾气与 0 号柴油公交车和拖拉机尾气 $\delta^{34}\text{S}$ 值差距大, 0 号柴油卡车尾气的 $\delta^{34}\text{S}$ 值处于两者之间; 玉米秸秆烟灰 $\delta^{34}\text{S}$ 值在所有潜在污染源中最高, 与小麦与大豆秸秆 $\delta^{34}\text{S}$ 值相差较大, 而水稻秸秆烟灰 $\delta^{34}\text{S}$ 值处于两者之间.

表 1 南京地区 $\text{PM}_{2.5}$ 潜在污染源的硫同位素组成

Table 1 Sulfur isotopic composition of potential pollution sources in $\text{PM}_{2.5}$ of Nanjing region

观测种类	观测对象	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
汽油/柴油	93 号汽油轿车	9.7
	0 号柴油公交车	4.6
	0 号柴油卡车	7.4
	0 号柴油拖拉机	4.7
煤炭	安徽无烟煤	3.7
	吉林焦煤	1.8
生物质	玉米秸秆	9.9
	水稻秸秆	7.9
	大豆秸秆	5.2
	扬麦 10 号秸秆	6.0
	梧桐树枝	6.8
	梧桐树叶	7.4

2.1.1 煤炭燃烧

本研究使用的煤种主要是在南京企业用量相对较大的安徽无烟煤与吉林焦煤, 其烟灰颗粒物 $\delta^{34}\text{S}$ 值分别为 3.7‰ 与 1.8‰ . 洪业汤等^[12] 研究了我国安徽地区和吉林地区煤中硫同位素的组成, 测得其硫同位素组成分别为 3.79‰ 和 1.73‰ , 这与本研究结果接近. 洪业汤等^[12]、Xiao 等^[13] 测定了中国南北各省份的硫同位素的组成, 发现四川南桐煤炭 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 10.19‰ , 江西省煤炭 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -5.7‰ , 江西莲化煤炭 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -3.06‰ , 云南昆明煤炭 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -0.65‰ , 贵州煤炭 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -7.52‰ , 浙江煤炭 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 2.53‰ , 广州市煤炭 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -7.5‰ , 湖南省煤炭 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 1.8‰ , 黑龙江大兴安岭煤炭 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 1.4‰ , 内蒙古煤炭 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 0.8‰ , 辽宁丹东煤炭 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 11.22‰ , 河北煤田与邯郸煤炭 $\delta^{34}\text{S}$ 值分别为 2.3‰ 与 -3.88‰ , 京西煤炭 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 4.75‰ , 山西大同煤炭 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 6.43‰ , 河南义马煤炭 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 7.33‰ , 山东坊子煤炭 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 4.69‰ . $\delta^{34}\text{S}$ 值较低的煤炭主要分布在南方, $\delta^{34}\text{S}$ 平均值为 -1.24‰ , 中国北方煤炭 $\delta^{34}\text{S}$ 值相对较高, 平均值为 3.89‰ . 中国煤炭中硫同位素组成存在明显的区域性差异^[14], 这与不同的地理背景, 煤系含煤多少、煤炭形成过程以及开采工艺等因素相关^[12]. 煤炭燃烧是大气环境的主要污染源, 因此, 确定南京地区煤炭 $\delta^{34}\text{S}$ 值对追踪南京地区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中的污染源具有重要作用.

2.1.2 机动车尾气

南京地区主要交通工具以轿车与公交车为主, 汽油与柴油是主要的燃料. 本研究首次测定了南京地区 93 号汽油轿车尾气 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 9.7‰ , 0 号柴油公交车与拖拉机尾气 $\delta^{34}\text{S}$ 值分别为 4.6‰ 与 4.7‰ , 0 号柴油卡车尾气 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 7.4‰ . 可见两种燃油机动车尾气的 $\delta^{34}\text{S}$ 值差别较大, 卡车与公交车、拖拉机均采用柴油作为燃料, 其尾气 $\delta^{34}\text{S}$ 值也存在差异, 这可能与柴油的燃烧过程相关. Norman 等^[15] 分析了温哥华和阿尔伯特地区不同硫源的同位素组成, 发现当地汽油和柴油中 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值为 $9\text{‰} \pm 1.5\text{‰}$, 与本研究结果基本吻合. 此外, 他们还发现当地石油相对富集轻硫同位素, $\delta^{34}\text{S}$ 值约为 $1.6\text{‰} \pm 1.5\text{‰}$. McArdle 等^[16] 研究了发电厂原油 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 -1.6‰ . Graham 等^[17] 对加拿大 British Columbia 省某地隧道内采集的机动车尾气 $\delta^{34}\text{S}$ 值进行分析, 其值为 5‰ . 重油是原油提取汽油、柴油后的剩余重质油, 其 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 13.6‰ , 重油在燃烧过程中发生硫同位素分馏效应, 固体颗粒物富集重硫同位素, 燃烧产物 SO_2 气

体富集轻硫同位素^[18]。因此,燃油种类不同,其 $\delta^{34}\text{S}$ 值也不同,通过研究本区域机动车尾气 $\delta^{34}\text{S}$ 对追踪大气 PM_{2.5}中污染源也具有重要作用。

2.1.3 生物质秸秆燃烧

生物质燃烧对区域空气质量、全球气候变化以及公众健康都有着重要的影响。Wang 等^[19]研究了中国小麦收获季节生物质燃烧对区域气溶胶性能的影响,发现每年都会有小麦秸秆燃烧的现象。本文选取南京周边常见生物质秸秆进行研究,首次测得南京地区小麦秸秆烟灰 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 6.0‰,大豆秸秆烟灰 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 5.2‰,水稻秸秆烟灰 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 7.9‰,玉米秸秆烟灰 $\delta^{34}\text{S}$ 值为 9.9‰,树枝与树叶烟灰 $\delta^{34}\text{S}$ 值分别为 6.8‰和 7.4‰,树枝与树叶、小麦与大豆秸秆 $\delta^{34}\text{S}$ 值差异较小,玉米秸秆烟灰 $\delta^{34}\text{S}$ 值最大,而水稻秸秆烟灰 $\delta^{34}\text{S}$ 值处于两者之间。大气中的 SO₂ 主要通过植物气孔进入生物质的叶肉细胞并发生水合作用,形成 SO₃²⁻、HSO₃⁻ 和 SO₄²⁻ 等,其中 SO₄²⁻ 易于被植物吸收、转化、累积和利用^[20]。大多数植物都有吸收 SO₂ 的能力,植物组织在吸收气态和可溶性硫化物一般不会伴随同位素的选择吸收,基本不发生同位素分馏。关晖等^[21]对马尾松针叶里的硫同位素进行了研究,测得贵阳地区针叶中无机硫同位素与总硫硫同位素分别为 -7.22‰和 -5.12‰,云南地区针叶中无机硫同位素与总硫硫同位素分别为 3.85‰和 5.73‰。研究表明,植物中的 $\delta^{34}\text{S}$ 值比环境中的 $\delta^{34}\text{S}$ 值低 1.5‰^[22],因此植物组织中硫同位素组成可以用于指示区域硫源的影响。

2.2 南京地区大气 PM_{2.5}潜在污染源碳同位素组成特征

为准确分析南京地区大气 PM_{2.5}中碳质来源,采集 4 种主要潜在的污染源样品,并测定了其碳同位素组成,结果见表 2。可以发现,机动车尾气与煤炭烟灰 $\delta^{13}\text{C}$ 值较为接近,平均值分别为 -25.34‰和 -24.24‰。然而,C₃ 和 C₄ 植物烟灰 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异较大,前者较轻,平均值为 -29.55‰,后者却富集重碳,平均值为 -19.3‰。此外,扬尘 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -13.45‰,比其他污染源的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均高。

2.2.1 煤炭燃烧

本研究使用的煤种主要是内蒙古高硫煤、大同低硫煤与徐州气煤 3 种。高硫煤与低硫煤烟灰 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别为 -25.50‰±0.3‰和 -25.39‰±0.6‰,这表明煤炭的含硫量对 $\delta^{13}\text{C}$ 值影响不显著。与高硫煤与低硫煤相比,气煤 $\delta^{13}\text{C}$ 富集重碳,其值增加到 -23.57‰±0.9‰,这可能与煤炭的种类与煤炭形

成过程的环境相关。本研究的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与陈颖军等^[9]的研究结果相似(-23.63‰±0.44‰)。因此,中国不同地区气煤烟灰 $\delta^{13}\text{C}$ 值的一致性有利于追踪大气碳源。

表 2 南京地区 PM_{2.5}潜在污染源的碳同位素组成

Table 2 Carbon isotopic composition of potential pollution sources in PM_{2.5} of Nanjing region

观察种类	观察对象	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$
煤炭	内蒙高硫煤	-25.50
	大同低硫煤	-25.39
	徐州气煤	-23.57
生物质	矮抗 58 秸秆	-28.83
	温州六号秸秆	-28.86
	扬麦 10 号秸秆	-30.42
	盘城麦秆	-29.81
	梧桐树叶	-29.83
	玉米秸秆	-19.30
汽油	93 号汽油轿车	-25.19
	93 号汽油大众车	-26.26
柴油	-10 号柴油公交车	-26.32
	-10 号+0 号柴油公交车	-24.97
	0 号柴油卡车	-23.57
地质源	扬尘	-13.45

2.2.2 机动车尾气

从表 2 可知,轿车尾气 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -25.19‰±0.5‰,93 号汽油大众尾气 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-26.26‰±0.4‰)与-10 号柴油公交车尾气 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-26.32‰±0.5‰)相似,因此,难以区分这些污染源的类型。然而,0 号柴油卡车尾气 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-23.57‰±1.2‰)明显重于从上述汽油和柴油机动车尾气 $\delta^{13}\text{C}$ 值,这可能与汽油与柴油形成过程和不同的燃烧工艺相关。Court 等^[23]研究发现,原油 $\delta^{13}\text{C}$ 值均比石油燃料重,原油在蒸馏石油燃料过程中发生了碳同位素分馏。Widory 等^[24]研究了巴黎机动车尾气 $\delta^{13}\text{C}$ 值,发现汽油与柴油燃烧后 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值分别为 -24.2‰±0.6‰与 -26.5‰±0.5‰,汽油和柴油车之间的存在差异,由此可以用 $\delta^{13}\text{C}$ 来区分这些污染源。陈颖军^[9]等曾对我国典型排放源稳定碳同位素特征做了研究,发现柴油车尾气 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -25.23‰±0.35‰,汽油车尾气 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -25.41‰,与本研究结果相似。

2.2.3 生物质燃烧

本研究采集 C₃ 植物有矮抗秸秆、温州秸秆、扬麦秸秆、盘城麦秆以及梧桐树叶,C₃ 植物烟灰 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化范围为 -30.42‰~ -28.83‰,明显轻于 C₄ 植物玉米秸秆烟灰的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-19.3‰)。 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差异可能与 C₃ 和 C₄ 植物的不同内部结构相

关, C_4 植物的碳链通常长于 C_3 植物. 此外, 植物的生长环境也可能影响碳同位素组成, 大气 CO_2 浓度越高, 光照越强, 越有利于 C_4 植物生长. Liu 等^[25] 研究了杭州作物秸秆的碳同位素组成, $\delta^{13}C$ 值 (-18.94%) 与本研究结论相似. 然而国外研究表明, C_4 植物烟灰 $\delta^{13}C$ 值的范围在 -11.5% ~ -13.5% 之间, 比 C_3 植物烟灰 $\delta^{13}C$ 值重得多 (-29.0% ~ -32.0%)^[26,27]. 本研究 C_3 植物烟灰 $\delta^{13}C$ 值与国外类似, 但 C_4 植物烟灰的 $\delta^{13}C$ 值远大于国外的数值. 因此, 不同区域生物质秸秆的碳同位素组成有明显区别.

2.3 潜在污染源硫碳同位素组成特征分析

南京地区潜在污染源的硫碳同位素组成存在明显差异, 煤炭烟灰 $\delta^{34}S$ 值范围为 1.8% ~ 3.7% , $\delta^{13}C$ 值范围为 -25.50% ~ -23.57% , 机动车尾气的 $\delta^{34}S$ 值范围为 4.6% ~ 9.7% , $\delta^{13}C$ 值范围为 -26.32% ~ -23.57% , 秸秆烟灰 $\delta^{34}S$ 值范围为 5.2% ~ 9.9% , $\delta^{13}C$ 值范围为 -19.30% ~ -30.42% , 扬尘的 $\delta^{13}C$ 值为 -13.45% . 不同潜在污染源的硫、碳同位素数值范围存在部分重叠, 煤炭烟灰中硫同位素组成较轻, 扬尘的碳同位素组成较重. 南京地区大气 $PM_{2.5}$ 的硫、碳同位素组成若与这两种污染源接近, 则可判断主要受到两种污染源的影响. 否则需要结合颗粒物粒径大小、化学成分分析等方法共同判断大气 $PM_{2.5}$ 中的污染源. 此外, 93 号汽油尾气 $\delta^{34}S$ 与 $\delta^{13}C$ 值分别为 9.7% 与 -25.19% , 0 号柴油卡车尾气 $\delta^{34}S$ 与 $\delta^{13}C$ 值分别为 7.4% 与 -25.37% , 玉米秸秆烟灰 $\delta^{34}S$ 与 $\delta^{13}C$ 值分别为 9.9% 与 -19.30% , 梧桐树叶扬尘 $\delta^{34}S$ 与 $\delta^{13}C$ 值分别为 7.4% 与 -29.83% , 扬麦 10 号秸秆烟灰 $\delta^{34}S$ 与 $\delta^{13}C$ 值分别为 6.0% 与 -30.42% . 由此可见, 不同污染源的硫、碳同位素组成存在一定相关性, $\delta^{34}S$ 值大, 其 $\delta^{13}C$ 值也较重, 这在生物质烟灰中表现尤为明显.

3 结论

(1) 南京地区大气 $PM_{2.5}$ 中不同潜在污染源的硫、碳同位素组成存在一定差异, 这有助于利用同位素技术追溯大气 $PM_{2.5}$ 中的污染源.

(2) 南京地区大气 $PM_{2.5}$ 部分潜在污染源的硫、碳同位素组成存在正相关性.

(3) 不同地区大气潜在污染源的硫、碳同位素组成具有明显的区域性, 使得研究特定地区不同污染源的硫、碳同位素组成源谱具有重要意义.

参考文献:

- [1] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006. 268-327.
- [2] 黄晓锋, 云慧, 宫照恒, 等. 深圳大气 $PM_{2.5}$ 来源解析与二次有机气溶胶估算[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, **44**(4): 723-734.
- [3] Yang F M, Tan J H, Zhao Q, *et al.* Characteristics of $PM_{2.5}$ speciation in representative megacities and across China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(11): 5207-5219.
- [4] 姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 等. 南京地区大气 $PM_{1.1}$ 中 OC, EC 特征及来源解析[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 774-779.
- [5] Guo Z B, Wu M L, Liu F L, *et al.* Multiple sulfur and oxygen isotope compositions in Beijing aerosol[J]. Science China Earth Sciences, 2014, **57**(11): 2671-2675.
- [6] Guo Z B, Li Z Q, Farquhar J, *et al.* Identification of sources and formation processes of atmospheric sulfate by sulfur isotope and scanning electron microscope measurements[J]. Journal of Geophysical Research, 2010, **115**(D7), doi: 10.1029/2009JD012893.
- [7] 李瑞, 肖琼, 刘文, 等. 运用硫同位素、氮氧同位素示踪里湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2877-2886.
- [8] 李男, 肖化云, 陈永忠, 等. 江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(10): 3782-3787.
- [9] 陈颖军, 蔡伟伟, 黄国培, 等. 典型排放源黑碳的稳定碳同位素组成研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(3): 673-678.
- [10] 魏英, 郭照冰, 葛鑫, 等. 硫氧同位素示踪南京北郊大气 $PM_{2.5}$ 中硫酸盐来源[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1182-1186.
- [11] Proemse B C, Mayer B, Fenn M E. Tracing industrial sulfur contributions to atmospheric sulfate deposition in the Athabasca oil sands region, Alberta, Canada[J]. Applied Geochemistry, 2012, **27**(12): 2425-2434.
- [12] 洪业汤, 张鸿斌, 朱咏焯, 等. 中国煤的硫同位素组成特征及燃煤过程硫同位素分馏[J]. 中国科学 B 辑, 1992, (8): 868-873.
- [13] Xiao H W, Xiao H Y, Long A M, *et al.* Sources and meteorological factors that control seasonal variation of $\delta^{34}S$ values in rainwater[J]. Atmospheric Research, 2014, **149**: 154-165.
- [14] Xiao H Y, Liu C Q. The elemental and isotopic composition of sulfur and nitrogen in Chinese coals[J]. Organic Geochemistry, 2011, **42**(1): 84-93.
- [15] Norman A L, Belzer W, Barrie L. Insights into the biogenic contribution to total sulphate in aerosol and precipitation in the Fraser Valley afforded by isotopes of sulphur and oxygen[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, **109**(D5): 5311.
- [16] McArdle N, Liss P, Dennis P. An isotopic study of atmospheric sulphur at three sites in Wales and at Mace Head, Eire[J]. Journal Of Geophysical Research: Atmospheres, 1998, **103**

- (D23): 31079-31094.
- [17] Graham L, Gray C. Pacific 2001: Cassiar Tunnel study-gaseous emissions measurements, 2002 [A]. In: Presentation at the Symposium on Atmospheric Aerosols and Pacific 2001 Field Study, 85th CSC Conference[C]. Vancouver, Canada. 2002.
- [18] 张鸿斌, 陈毓蔚, 刘德平. 广州地区酸雨硫源的硫同位素示踪研究[J]. 地球化学, 1995, **24**(增刊): 126-133.
- [19] Wang L L, Xin J Y, Li X R, *et al.* The variability of biomass burning and its influence on regional aerosol properties during the wheat harvest season in North China[J]. Atmospheric Research, 2015, **157**: 153-163.
- [20] Hüve K, Dittrich A, Kindermann G, *et al.* Detoxification of SO₂ in conifers differing in SO₂ tolerance: A comparison of *Picea abies*, *Picea pungens* and *Pinus sylvestris*[J]. Planta, 1995, **195**(4): 578-585.
- [21] 关晖, 肖化云, 朱仁果, 等. 马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪[J]. 环境科学, 2013, **34**(10): 3777-3781.
- [22] 张苗云, 王世杰, 马国强. 植物硫同位素与大气环境变化[J]. 同位素, 2010, **23**(1): 59-63.
- [23] Court J D, Goldsack R J, Ferrari L M, *et al.* The use of carbon isotopes in identifying urban air particulate sources[J]. Clean Air, 1981, **15**(1): 6-11.
- [24] Widory D, Roy S, Moullec Y L, *et al.* The origin of atmospheric particles in Paris: a view through carbon and lead isotopes[J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(7): 953-961.
- [25] Liu L X, Zhou L X, Vaughn B, *et al.* Background variations of atmospheric CO₂ and carbon-stable isotopes at Waliguan and Shangdianzi stations in China [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, **119**(9): 5602-5612.
- [26] Moura J M S, Martens C S, Moreira M Z, *et al.* Spatial and seasonal variations in the stable carbon isotope composition of methane in stream sediments of eastern Amazonia[J]. Tellus, 2008, **60**(1): 21-31.
- [27] Martinelli L A, Camargo P B, Lara L B L S, *et al.* Stable carbon and nitrogen isotopic composition of bulk aerosol particles in a C₄ plant landscape of southeast Brazil [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(14): 2427-2432.

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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 _{2.5} 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 Shao-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 ₂	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 ₂ with Nano-TiO ₂	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