

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

南京地区大气气溶胶 PM_{2.5} 中稳定碳同位素组成研究 吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 孙德玲, 卢霞, 姜文娟 (3727)

太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析 胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 韩锋, 刘效峰, 冀豪栋, 张鹏九 (3733)

交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究 罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 官兆宁, 熊秋林 (3741)

公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性 楼狄明, 陈峰, 胡志远, 谭丕强, 胡炜 (3749)

兰州及其周边区域大气降水 δ¹⁸O 特征及其水汽来源 陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲 (3755)

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析 岳晓英, 李忠勤, 张明军, 周平, 樊晋 (3764)

O₃/H₂O₂ 氧化苯乙烯气体性能及机制 何觉聪, 黄倩茹, 叶杞宏, 罗雨薇, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (3772)

马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪 关晖, 肖化云, 朱仁果, 郑能建, 瞿玲露 (3777)

江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究 李男, 肖化云, 陈永忠, 周丹, 罗笠, 吴代敏 (3782)

辽河流域非点源污染空间特征遥感解析 王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿, 姚延娟, 殷守敬, 吴迪 (3788)

景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究 杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 邹松兵, 尹振良 (3797)

金普湾海域表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征 游丽丽, 宗海波, 张淑芳, 尹国宇, 李涛, 侯立军 (3804)

崇明东滩湿地干湿交替过程脲酶活性变化初探 韩建刚, 曹雪 (3810)

FDA 水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性 刘叶, 邹立, 刘陆, 高冬梅 (3818)

中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析 袁海峰, 成杭新, 赵传冬, 刘应汉, 杨柯, 李括, 彭敏, 刘飞 (3825)

深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价 孙闰霞, 柯常亮, 谷阳光, 卢腾腾, 杜飞雁, 马胜伟, 林钦 (3832)

PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源 边璐, 李田, 侯娟 (3840)

三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究 余杨, 王雨春, 周怀东, 高博, 赵高峰 (3847)

小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究 李飞鹏, 张海平, 陈玲 (3854)

太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟 韩涛, 翟淑华, 胡维平, 张红举, 李钦钦 (3862)

湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究 陈超, 钟继承, 范成新, 孔明, 余居华 (3872)

水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究 周慧华, 宋晓光, 吴革, 谢鑫源 (3879)

底泥调控剂对感潮河涌沉积物中重金属的影响 区凤荏, 孙国萍, 许玫英 (3888)

区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究 易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 曲喜杰, 王婷婷 (3894)

4 种人工湿地填料的 f2 噬菌体吸附特性 陈迪, 郑祥, 魏源送, 杨勇 (3904)

稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究 纪菅雪, 王凤贺, 张帆, 张艳红, 王国祥, 顾中铸 (3912)

紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究 王文东, 周礼川, 丁真真, 王洪平, 孙学军 (3921)

基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较 朝木尔乐格, 冯流, 霍艳霞 (3927)

nTiO₂ 在水中的分散沉降行为研究 陈金媛, 方金凤, 魏秀珍 (3933)

微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响 谢芸芸, 陈天虎, 周跃飞, 谢巧勤 (3940)

两性离子在聚偏氟乙烯 (PVDF) 膜表面接枝改性的研究 周桂花, 肖峰, 肖萍, 王东升, 段晋明, 石健, 臧莉 (3945)

化粪池排口处土壤对典型农户生活污水氮素污染物的消减测算研究 周锋, 王文林, 王国祥, 马久远, 万寅婧, 唐晓燕, 梁斌, 季斌 (3954)

珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价 李文英, 彭智平, 于俊红, 黄继川, 徐培智, 杨少海 (3963)

污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响 金树权, 周金波, 陈若霞, 林斌, 王德耀 (3969)

活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素 李振亮, 张代钧, 卢培利, 曾善文, 杨永浩 (3975)

不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响 郭秀丽, 高大文, 卢健聪 (3981)

生物陶粒反应器的氮自养反硝化研究 陈丹, 王弘宇, 宋敏, 杨开, 刘晨 (3986)

亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究 严俊霞, 李君剑, 王洪建, 张义辉 (3992)

SiB3 模式对作物区 CO₂ 通量的模拟研究 张庚军, 卢立新, 蒋玲梅, 蒋磊, Ian Baker (4000)

缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响 徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 祝滔 (4009)

典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例 闫慧, 陈杰, 肖军 (4017)

苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯 史双昕, 董亮, 李玲玲, 张辉, 李斯明, 张天野, 黄业茹 (4024)

废旧汽车拆解区土壤中多环芳烃垂向分布特性 吴彦瑜, 胡小英, 洪鸿加, 彭晓春 (4031)

铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究 王旌, 罗启仕, 张长波, 谈亮, 李旭 (4036)

典型磺胺类抗生素在土柱中的淋溶规律研究 李曼, 陈卫平, 魏福祥, 焦文涛 (4042)

3 种金属氧化物纳米材料在不同土壤中运移行为研究 方婧, 余博阳 (4050)

多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征 李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4058)

毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究 白尚斌, 周国模, 王懿祥, 梁倩倩, 陈娟, 程艳艳, 沈蕊 (4066)

珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究 梁惜梅, 袁湘平, 施震 (4073)

江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价 刘洋, 付强, 高军, 徐网谷, 殷波, 曹亚乔, 秦卫华 (4081)

铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响 张义贤, 付亚萍, 肖志华, 张喜文, 李萍 (4090)

利用高通量测序对封存 CO₂ 泄漏情景下土壤细菌的研究 田地, 马欣, 李玉娥, 查良松, 伍洋, 邹晓霞, 刘爽 (4096)

酸性矿山水区域废矿石中真核生物多样性分析 李思远, 郝春博, 王丽华, 吕铮, 张丽娜, 刘莹, 冯传平 (4105)

十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析 常晶晶, 尹华, 秦华明, 叶锦韶, 彭辉, 宋小飞 (4112)

硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响 胡莹, 黄益宗, 黄艳超, 刘云霞, 梁建宏 (4119)

外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响 刘俊, 周坤, 徐卫红, 陈惠, 张明中, 江玲, 杨芸, 王崇力, 熊治庭 (4126)

电子废物排放持久性有毒污染物的控制政策分析 李力, 吕永龙, 王铁宇 (4132)

《环境科学》征稿简则 (3926) 《环境科学》征订启事 (4057) 信息 (3878, 3953, 3999, 4041)

南京地区大气气溶胶 PM_{2.1} 中稳定碳同位素组成研究

吴梦龙^{1,2}, 郭照冰^{1,2*}, 刘凤玲^{1,2}, 孙德玲³, 卢霞^{1,2}, 姜文娟^{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技术研究重点实验室, 南京 210044; 3. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 采用 EA-IRMS 测定了 2011 年四季南京市(南师)和郊区工业(南化)大气细粒子(PM_{2.1})中稳定碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$), 分析了 PM_{2.1} 中含碳物质的来源并对两地总碳(TC)污染特征进行了评价. 结果表明, TC 在市区和郊区的年平均浓度分别为 15.94 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 与 17.17 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, TC 在细粒子中比重分别为 17.18% 与 16.40%, 郊区碳质污染相对严重且细粒子中污染物组成更复杂; 冬、春、夏、秋四季市区 PM_{2.1} 中 $\delta^{13}\text{C}$ 均值分别为 $-24.42\% \pm 1.12\%$ 、 $-25.19\% \pm 1.92\%$ 、 $-25.79\% \pm 0.45\%$ 与 $-25.58\% \pm 0.65\%$, 郊区分别为 $-25.34\% \pm 1.18\%$ 、 $-25.55\% \pm 1.50\%$ 、 $-25.31\% \pm 0.55\%$ 与 $-25.38\% \pm 0.82\%$. 相关性分析和潜在污染源 $\delta^{13}\text{C}$ 值表明, 市区气溶胶 PM_{2.1} 中碳质主要源于汽油车尾气排放, 郊区工业含碳物质源于尾气及工业排放, 此外, 燃煤源、生物质燃烧源及地质源等对两地冬春季气溶胶中碳质有重要贡献; 后向轨迹分析表明, 冬春季远源输送对南京地区气溶胶中碳质有重要贡献, 夏秋季气溶胶中碳质主要来自本地排放.

关键词: PM_{2.1}; 总碳; 稳定碳同位素; 后向轨迹; 源解析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-3727-06

Stable Carbon Isotopic Composition in PM_{2.1} in Nanjing Region

WU Meng-long^{1,2}, GUO Zhao-bing^{1,2}, LIU Feng-ling^{1,2}, SUN De-ling³, LU Xia^{1,2}, JIANG Wen-juan^{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; 3. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Stable carbon isotopes ($\delta^{13}\text{C}$) in aerosol fine particles (PM_{2.1}) collected in Nanjing Normal University representing urban area, and in Nanjing College of Chemical Technology standing for suburban industrial area, were analyzed using EA-IRMS. Besides, sources of carbonaceous contents were studied and the pollution characteristics of total carbon (TC) were evaluated. The annual average concentrations of TC in urban area and suburban industrial area were 15.94 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ and 17.17 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively. The proportions for TC in PM_{2.1} were 17.18% and 16.40%, indicating that carbonaceous pollution was more serious and the pollutants were more complex in suburban industrial area. The average $\delta^{13}\text{C}$ for winter, spring, summer and autumn were $-24.42\% \pm 1.12\%$, $-25.19\% \pm 1.92\%$, $-25.79\% \pm 0.45\%$ and $-25.58\% \pm 0.65\%$, respectively in urban area and $-25.34\% \pm 1.18\%$, $-25.55\% \pm 1.50\%$, $-25.31\% \pm 0.55\%$ and $-25.38\% \pm 0.82\%$, respectively in suburban area. Correlation analysis and isotopic signatures of potential sources suggested that carbonaceous contents mainly came from gasoline vehicles exhaust in urban area, and might be attributed to the vehicle exhaust emissions and industrial emissions in suburban area. In addition, coal combustion, biomass burning and geological sources might have important contribution to aerosols in winter and spring. Back trajectory analysis implied that the long-range transport had considerable contribution to the carbonaceous aerosol in winter and spring. However, the major sources might be attributed to local emissions in the other two seasons.

Key words: PM_{2.1}; total carbon; stable carbon isotope; back trajectory; source apportionment

碳质气溶胶是大气气溶胶的重要组成部分, 在大气气溶胶中所占质量分数为 10% ~ 50%^[1]. 它是广泛存在于低对流层大气气液介质中的微小固体颗粒^[2]. 气溶胶中碳组分主要包括有机碳 (organic carbon, OC)、元素碳 (elemental carbon, EC) 和碳酸盐碳 (carbonate carbon, CC), CC 在城市气溶胶中含量很低, 通常忽略不计^[3]. 含碳组分能够降低大气能见度^[4], 并且对人体健康产生巨大危害, 可诱发呼吸系统、心血管疾病和机体突变等^[5]. 气溶胶中碳组分来源复杂且有机碳易发生光化学反应变

为二次有机碳^[6~8], 所以对其准确示踪有一定的困难. 不同来源的稳定碳同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}$) 存在差异, 所以利用 $\delta^{13}\text{C}$ 作为碳的特征化学指纹来对含碳

收稿日期: 2013-01-30; 修订日期: 2013-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41240025, 41373023); 教育部留学回国人员启动基金项目 (20124001); 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; 南京信息工程大学科研启动费项目 (S8111031001); 江苏省大学生实践创新计划项目 (2012JSSPITP0787)

作者简介: 吴梦龙 (1989 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境监测, E-mail: ayls8088@163.com

* 通讯联系人, E-mail: guocumt@nuist.edu.cn

气溶胶进行示踪成为可能. 近年来, 稳定碳同位素比值法作为一种可靠的示踪手段在大气气溶胶碳质来源解析方面已得到了越来越广泛的运用, 曹军骥等^[9]应用稳定碳同位素法分析了大气中碳酸盐特征, 认为稳定碳同位素组成对指示粉尘来源有很好的潜力, 可为沙尘暴源区提供一个新的示踪工具. Kawashima 等^[10]对日本秋田县气溶胶 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 中元素碳 δ¹³C 进行了测定, 推知日本冬季气溶胶中元素碳主要来自亚洲大陆燃烧源越洋输送.

近几年, 南京空气复合型污染愈发严重, 灰霾日逐年上升^[11,12]. 本研究运用元素分析仪-同位素质谱仪(EA-IRMS)对南京城市和郊区 2011 年四季大气气溶胶细粒子(PM_{2.1})中稳定碳同位素组成、时空变化特征进行分析, 从而准确判断南京市大气细粒子来源, 以期南京市及其周边地区空气污染控制提供可靠资料和科学依据.

1 材料与方法

1.1 实验仪器

FA-3 型气溶胶粒度分布采样器; 元素分析仪-同位素质谱仪(EA-IRMS, Thermo Fisher); XQM 变频行星式球磨机; 马弗炉; 十万分之一电子天平; 恒温恒湿箱.

1.2 样品采集

2011 年 1 月、4 月、7 月、10 月(分别代表冬、春、夏、秋四季)在南京师范大学随园校区(南师, NS)和南京江北化工职业技术学院(南化, NH)教学楼楼顶(距地约 20 m)各设一个采样点进行同步采样, 采样器流速为 28.3 L·min⁻¹. 南师地处市区(鼓楼区, E117°10', N34°17'), 交通繁忙、人口密集, 代表着典型的集居住、商业、交通、餐饮以及办公于一体的混合区; 南化地处郊区(浦口区, E118°37', N32°3'), 地处国道附近且化工企业居多, 代表着交通和工业区.

采样所用玻璃纤维滤膜预先置于马弗炉 450℃ 焙烧 4 h, 冷却后放入干燥器平衡 24 h, 用电子天平称重后放入铝箔中. 每天 08:00~20:00 持续采样 12 h, 每月连续采样 15 d, 每次采样结束, 将滤膜折叠放回原铝箔中, 放入干燥器保持 24 h 称重, 然后置于冰箱避光保存至分析. FA-3 型气溶胶粒度分布采样器是一种 9 级多孔联级式撞击器, 其四级和五级切割粒径范围分别为 2.1~3.3 μm 和 1.1~2.1 μm, 故本研究以 2.1 μm 作为粗细粒子的界线粒径.

1.3 样品预处理与测定方法

切取 1/4 样品滤膜, 用球磨机将滤膜磨成粉末, 然后用锡杯将样品粉末包成小球状. 分析时, 样品到达元素分析仪氧化柱, 在过量氧气存在下瞬间高温分解, 含有 C、N、O、S 等成分的混合气依次经过还原柱、吸水柱, 然后经色谱柱(45℃)分离去除杂质气体得到纯净的 CO₂ 气体, 其中氧化和还原温度分别维持在 1 020℃ 和 680℃. 然后高纯 CO₂ 气体被高纯 He 送入 IRMS 进行稳定碳同位素组成测定. 测定结果与美国南卡罗来纳州箭石中碳同位素丰度(PDB)进行比较, 以 δ¹³C 计:

$$\delta^{13}\text{C} = (R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1) \times 1000\text{‰}$$

式中, R_{sample} 和 R_{standard} 分别代表样品和 PDB 标准中 ¹³C/¹²C 比值. 仪器误差在 ±0.2‰ 以内.

2 结果与讨论

2.1 PM_{2.1} 含量特征

南师和南化 PM_{2.1} 浓度特征见表 1. 南师冬、春、夏、秋四季 PM_{2.1} 平均浓度分别为 (117.71 ± 58.39)、(98.33 ± 50.24)、(74.73 ± 24.50)、(80.33 ± 31.68) μg·m⁻³, 年平均浓度为 (92.78 ± 19.44) μg·m⁻³; 南化四季 PM_{2.1} 平均浓度分别为 (122.38 ± 55.01)、(109.13 ± 57.34)、(82.87 ± 39.76)、(104.43 ± 33.16) μg·m⁻³, 年平均浓度为 (104.70 ± 16.42) μg·m⁻³. GB 3095-2012 规定环境空气中 PM_{2.5} 浓度限值 24 h 平均为 75 μg·m⁻³, 年平均浓度限值为 35 μg·m⁻³, 南师和南化细粒子日平均和年平均浓度均超过了国家 PM_{2.5} 浓度限值, 说明南京地区大气细粒子污染较严重, 主要是由于南京市发展迅速, 人为源污染如化石燃料燃烧、尾气排放等加重, 此情况下产生的多为细粒子^[13]. 相比于市区, 郊区细粒子污染更为严重, 这与江北地区工业排放加上尾气排放密切相关.

2.2 总碳含量特征

南师和南化四季 PM_{2.1} 中总碳(TC)含量特征见表 1, 南师 TC 年平均浓度为 15.94 μg·m⁻³, 南化 TC 年平均浓度为 17.17 μg·m⁻³, 南师低于南化, 说明郊区工业区含碳物质污染更严重, 由于碳质主要由 OC 和 EC 组成, 南化地处南京市重工业区, 工业燃料及工厂排放必然产生较多的 EC 和 OC, 这与包春晓^[14]研究的南京北郊气溶胶中多环芳烃浓度高于市区相符. TC 在 PM_{2.1} 中所占比例南师和南化分别为 17.18% 和 16.40%, 南师略高于南化, 说明郊区工业区细粒子中包含的污染物质更复杂, 含碳组分所占比

例相应略小. 南师四季 TC 浓度冬 > 春 > 秋 > 夏, 南化四季 TC 浓度春 > 冬 > 秋 > 夏, 两地 TC 浓度均是冬春季较高, 夏季最低, 这可能是由于冬春季天气寒

冷, 燃煤增多贡献了更多的 TC 且冬春季存在逆温现象致使污染物不易扩散, 而夏季因台风登陆与降水量增加, 对含碳气溶胶起到了稀释清除作用.

表 1 南师和南化四季 PM_{2.1} 中 TC 含量特征

采样地点	季节	PM _{2.1} 含量 /μg·m ⁻³	PM _{2.1} 平均 /μg·m ⁻³	TC 含量 /μg·m ⁻³	TC 年平均 /μg·m ⁻³	(TC/PM _{2.1}) /%	(TC/PM _{2.1}) _{average} /%
南师	冬	117.71 ± 58.39	92.78 ± 19.44	18.18 ± 8.83	15.94 ± 7.08	15.44	17.18
	春	98.33 ± 50.24		17.63 ± 6.26		17.93	
	夏	74.73 ± 24.50		13.58 ± 5.50		18.17	
	秋	80.33 ± 31.68		14.50 ± 6.84		18.05	
南化	冬	122.38 ± 55.01	104.70 ± 16.42	17.83 ± 6.03	17.17 ± 7.73	14.57	16.40
	春	109.13 ± 57.34		23.64 ± 6.35		21.66	
	夏	82.87 ± 39.76		11.30 ± 6.26		13.64	
	秋	104.43 ± 33.16		15.93 ± 7.24		15.25	

2.3 δ¹³C 变化特征

图 1 是南师和南化四季 PM_{2.1} 中 δ¹³C 值日变化和季节变化特征. 南师冬、春、夏、秋四季 δ¹³C_{TC} 值变化范围分别为: -25.96‰ ~ -21.81‰、-26.79‰ ~ -19.19‰、-26.47‰ ~ -24.99‰、-26.32‰ ~ -24.34‰, 平均值分别为 -24.42‰ ± 1.12‰、-25.19‰ ± 1.92‰、-25.79‰ ± 0.45‰、-25.58‰ ± 0.65‰. 市区四季 δ¹³C_{TC} 均值总体差异不大, 冬季 δ¹³C_{TC} 值比其它三季略微偏大. 冬春两季, δ¹³C_{TC} 值波动较夏秋两季更大, 可能由于冬春季污染物来源复杂且冬春季易出现逆温

现象致使不同源排放的污染物相对集中且不易扩散.

南化冬、春、夏、秋四季 δ¹³C_{TC} 值变化范围分别为: -26.62‰ ~ -21.72‰、-27.28‰ ~ -21.57‰、-26.15‰ ~ -24.39‰、-26.09‰ ~ -23.01‰, 平均值分别为 -25.34‰ ± 1.18‰、-25.55‰ ± 1.50‰、-25.31‰ ± 0.55‰、-25.38‰ ± 0.82‰. 四季气溶胶中碳质 δ¹³C_{TC} 均值基本相同, 说明郊区工业区 PM_{2.1} 中含碳物质主要来源基本一致. 与市区类似, 冬春季 δ¹³C_{TC} 值波动较大, 两地 δ¹³C_{TC} 值均在冬春季达到了极值.

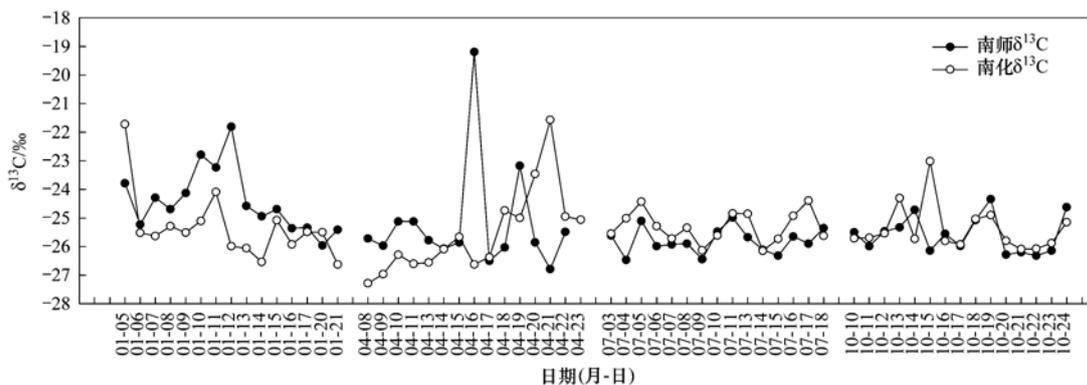


图 1 南师和南化 PM_{2.1} 中 δ¹³C 季节和日变化

Fig. 1 Diurnal and seasonal variation of δ¹³C in PM_{2.1} in NS and NH

2.4 相关性分析

利用 δ¹³C 和 TC 相关性可以有效区分空气中碳质的不同来源^[15,16]. 图 2 是南师和南化 PM_{2.1} 中 δ¹³C 和 TC 的相关性分析. 可见在市区和郊区, 秋季 δ¹³C 和 TC 均表现出了弱的正相关性, R² 分别为 0.1404 和 0.2557, 说明不同源排放的碳质增加导致稳定碳同位素的富集, 郊区 R² 大于市区, 体现

了市区气溶胶中碳质来源的多重性与复杂性. 市区和郊区其它三季 δ¹³C 和 TC 相关性非常贫乏, 这与 Agnihotri 等^[17] 的研究结果相符, 其认为 δ¹³C 和 TC 相关性的贫乏可能与环境空气中无机碳的存在有关, 但本研究认为, 城市气溶胶中碳质主要包括 OC 和 EC, OC、EC 都是组分异常复杂的混合物且 OC 易发生光化学反应转化为二次有机碳^[18], 其

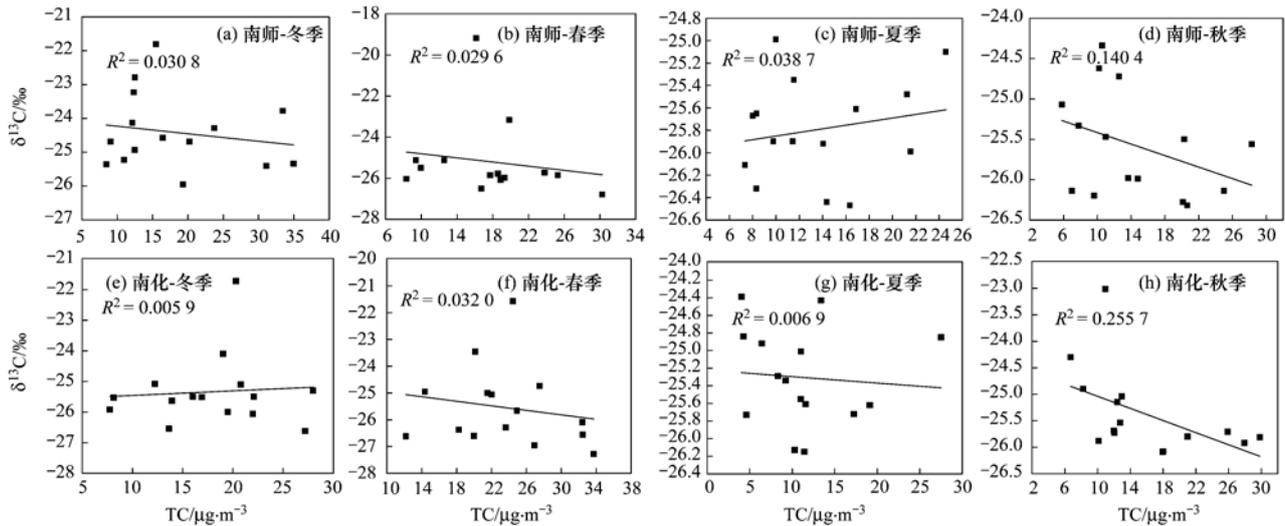


图 2 南师和南化四季 $\text{PM}_{2.1}$ 中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 TC 相关性

Fig. 2 Correlations between $\delta^{13}\text{C}$ and TC in $\text{PM}_{2.1}$ in NS and NH for different seasons

次,不同污染源排放的碳质 $\delta^{13}\text{C}$ 组成存在差异^[19],因此, $\delta^{13}\text{C}$ 的差异性以及 TC 组成的复杂性造成 $\delta^{13}\text{C}$ 和 TC 相关性微弱。

图 3 给出了南师和南化四季 $\delta^{13}\text{C}$ 之间的关系,南师和南化四季 $\delta^{13}\text{C}$ 之间相关性均十分贫乏,说明两地之间不存在共同的碳质来源。

2.5 $\text{PM}_{2.1}$ 中碳质源解析

南师四季 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 平均值没有显著差异,陈颖军等^[20]曾对我国典型排放源稳定碳同位素特征做了研究,发现柴油车尾气中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 为 $-25.23\text{‰} \pm 0.35\text{‰}$,汽油车尾气 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 为 -25.41‰ ,本研究市区四季 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 均值 ($-24.42\text{‰} \pm 1.12\text{‰}$ 、 $-25.19\text{‰} \pm 1.92\text{‰}$ 、 $-25.79\text{‰} \pm 0.45\text{‰}$ 、 $-25.58\text{‰} \pm 0.65\text{‰}$) 与我国汽车尾气排放接近,通常汽油燃烧和柴油燃烧因有着相似的碳同位素组成而难以辨别^[3,21],但结合南师地理位置,可以推知市区碳质气溶胶主要以汽油车尾气排放为主。由图 1 可见冬春季 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 值波动较大,说明这两季气溶胶中碳质除主要的来源外,还存在其它复杂来源,1 月 10 日和 12 日 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$

值正偏达到较大值,分别为 -22.79‰ 和 -21.81‰ ,4 月 16 日 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 值正偏达到最大值 -19.19‰ 。

López-Veneroni^[22]曾对墨西哥都市区 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中碳质的潜在来源进行了碳同位素组成分析,发现地质源包括农业土壤、扬尘会富集重碳,分别为 $-20.7\text{‰} \pm 1.5\text{‰}$ 和 $-17.0\text{‰} \pm 0.1\text{‰}$,研究表明 C_4 植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值 ($-11.5\text{‰} \sim -13.5\text{‰}$) 较 C_3 植物 $\delta^{13}\text{C}$ 值 ($-29.0\text{‰} \sim -32.0\text{‰}$) 偏重很多^[23-26],而我国 4 种烟煤同样富集重碳^[20], $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 均值为 $-23.63\text{‰} \pm 0.44\text{‰}$,考虑到 Vega 等^[27]报道的地质源排放对细粒子有部分贡献,但贡献率远比粗粒子低,所以可推断,冬春季市区碳质气溶胶除主要来自汽油车尾气外,进一步富集 $\delta^{13}\text{C}$ 的样品与燃煤源及 C_4 植物燃烧密切相关,地质源排放起到了部分贡献作用,因为 1 月 9 日南京出现大风降温天气,4 月 15 日晚南京市出现 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 偏北大风天气,这对 $\delta^{13}\text{C}$ 升高起到了一定的影响。相比冬春季,夏秋季 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化趋势较平稳,均值与汽车尾气 $\delta^{13}\text{C}$ 值接近,说明这两季碳质气溶胶主要源于汽油车尾气排放。

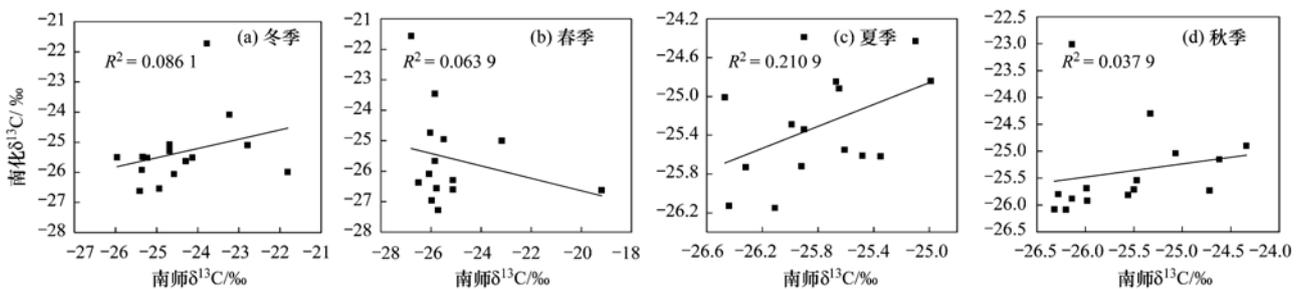


图 3 南师 $\delta^{13}\text{C}$ 和南化 $\delta^{13}\text{C}$ 相关性

Fig. 3 Correlations of $\delta^{13}\text{C}$ between NS and NH in different seasons

南化四季 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 均值 ($-25.34\text{‰} \pm 1.18\text{‰}$ 、 $-25.55\text{‰} \pm 1.50\text{‰}$ 、 $-25.31\text{‰} \pm 0.55\text{‰}$ 、 $-25.38\text{‰} \pm 0.82\text{‰}$) 总体变化不大且与我国汽车尾气排放 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 均值接近^[20]. 工业低硫柴油的燃烧排放会对大气细粒子有一定的贡献^[22], 考虑到南化处于南京工业园区与国道附近, 可以推断南化四季碳质气溶胶主要来自汽油车、柴油车尾气排放以及工业排放. 与市区变化规律相似, 南化冬春季 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 值波动较大, 说明冬春两季碳质气溶胶来源复杂, 1月5日 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 达到较大值 -21.72‰ , 4月21日 $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 正偏达到最大值 -21.57‰ , $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 的富集可能与燃煤排放以及 C₄ 植物燃烧密切相关. 而在4月9日, $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 达到了采样期间的较小值 -26.96‰ , 4月8日, $\delta^{13}\text{C}_{\text{TC}}$ 达到了采样期间的最小值 -27.28‰ . 由于 C₃ 植物燃烧后 $\delta^{13}\text{C}$ 偏轻, 所以推断 C₃ 植物燃烧也是冬春季南化地区碳质气溶胶的可能来源.

3 后向轨迹分析

为了分析南京地区气溶胶中碳质的远距离输送

来源, 本研究使用 HYSPLIT 4 后向轨迹模式进行计算, 选取高度距地面 1 000 m (位于本地边界层中上部), 时间为 96 h, 每日取 06:00 和 18:00 进行聚类分析, 得到采样期间气团后向轨迹, 如图 4 所示. 冬春季气团主要来自中国北方 [如图 4(a)、4(b)], 北方冬春季天气严寒且以燃煤集中供暖为主, 可以推断, 北方燃煤通过远距离输送对南京地区冬春季气溶胶中碳质有重要贡献. 夏季气团主要经西南方向到达南京 [如图 4(c)], 秋季气团主要来自东南太平洋 [如图 4(d)], 夏秋季长距离输送气团相对洁净, 因此, 南京地区夏秋季大气气溶胶中碳质主要以本地污染源贡献为主.

冬春季 $\delta^{13}\text{C}$ 值波动较大, 本研究根据 NOAA 数据库对各极值点当日气团后向轨迹进行模拟 (高度分为 100、500、1 000 m), 发现除 4 月 21 日气团主要来自正南方以外, 其他均来自北方, 说明两地气溶胶中 $\delta^{13}\text{C}$ 取得极值当日除受本地排放源影响外, 远源 (包括燃煤源、C₃ 及 C₄ 植物燃烧源、浮尘等) 输送也起到了重要作用.

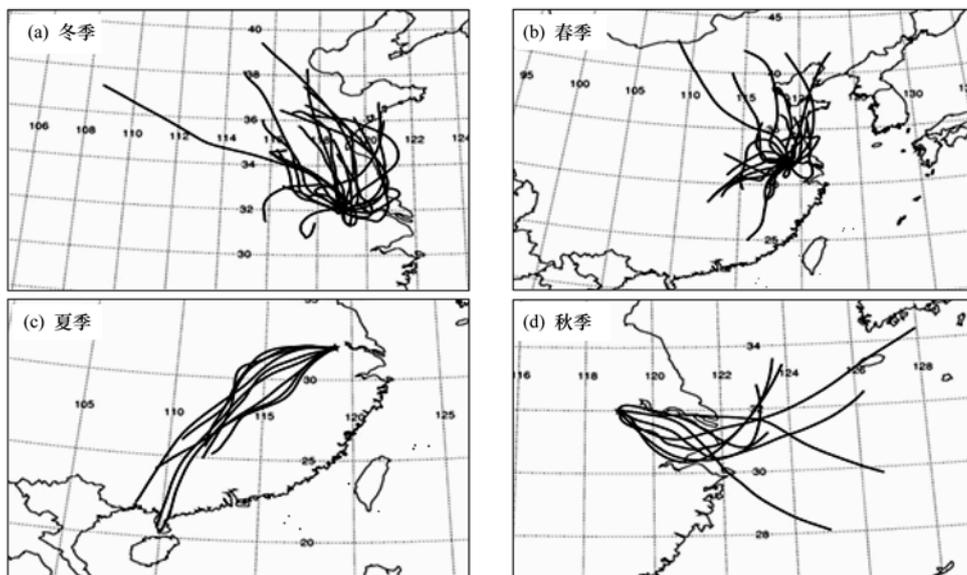


图 4 采样期间大气气团后向运动轨迹

Fig. 4 Back trajectories of air masses during the sampling period

4 结论

(1) 南京市区和郊区细粒子污染严重; 相比于城区, 郊区大气细粒子污染更为明显.

(2) 南京市气溶胶细粒子中碳质主要源于汽油车尾气排放, 郊区工业区细粒子中碳质主要源于尾气和工业排放; 冬春季还与燃煤排放、C₃ 和 C₄ 植物燃烧排放及地质源排放等来源有关.

(3) 南京地区冬春两季气溶胶中碳质主要来自本地排放和远距离输送, 而夏秋两季气溶胶中碳质以本地排放源贡献为主.

致谢: 本实验采样工作由南京师范大学和南京化工职业技术学院同学协助完成, 在此表示感谢.

参考文献:

- [1] Schauer J J, Mader B T, Deminter J T, et al. ACE-Asia intercomparison of a thermal-optical method for the determination of particle-phase organic and elemental carbon [J].

- Environmental Science and Technology, 2003, **37**(5): 993-1001.
- [2] Blanchard C L, Hidy G M, Tanenbaum S, *et al.* Carbon in southeastern U. S. aerosol particles; Empirical estimates of secondary organic aerosol formation [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(27): 6710-6720.
- [3] Huang L, Brook J R, Zhang W, *et al.* Stable isotope measurements of carbon fractions (OC/EC) in airborne particulate; A new dimension for source characterization and apportionment [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(15): 2690-2705.
- [4] Reddy M S, Venkataraman C. Atmospheric optical and radiative effects of anthropogenic aerosol constituents from India [J]. Atmospheric Environment, 2000, **34**(26): 4511-4523.
- [5] Matsumoto H, Inoue K. Mutagenicity of a polar portion in the neutral fraction separated from organic extracts of airborne particulates [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 1987, **16**(4): 409-416.
- [6] Pathak R K, Wang T, Ho K F, *et al.* Characteristics of summertime PM_{2.5} organic and elemental carbon in four major Chinese cities; Implications of high acidity for water-soluble organic carbon (WSOC) [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(2): 318-325.
- [7] Kundu S, Kawamura K, Andreae T W, *et al.* Diurnal variation in the water-soluble inorganic ions, organic carbon and isotopic compositions of total carbon and nitrogen in biomass burning aerosols from the LBA-SMOCC campaign in Rondonia, Brazil [J]. Journal of Aerosol Science, 2010, **41**(1): 118-133.
- [8] Rizzo L V, Artaxo P, Karl T, *et al.* Aerosol properties, in-canopy gradients, turbulent fluxes and VOC concentrations at a pristine forest site in Amazonia [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(4): 503-511.
- [9] 曹军骥, 王亚强, 张小曳, 等. 大气中碳酸盐的碳同位素分析及其来源指示意义[J]. 科学通报, 2004, **49**(17): 1785-1788.
- [10] Kawashima H, Haneishi Y. Effects of combustion emissions from the Eurasian continent in winter on seasonal $\delta^{13}\text{C}$ of elemental carbon in aerosols in Japan [J]. Atmospheric Environment, 2012, **46**: 568-579.
- [11] 杨军, 牛忠清, 石春娥, 等. 南京冬季雾霾过程中气溶胶粒子的微物理特征[J]. 环境科学, 2010, **31**(7): 1425-1431.
- [12] 尚倩, 李子华, 杨军, 等. 南京冬季大气气溶胶粒子谱分布及其对能见度的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(9): 2750-2760.
- [13] 汤莉莉, 牛生杰, 樊曙先, 等. 瓦里关及西宁 PM₁₀ 和多环芳烃谱分布的观测研究[J]. 高原气象, 2010, **29**(1): 236-243.
- [14] 包春晓. 南京地区大气气溶胶化学成分与硫同位素组成特征研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012. 45-57.
- [15] Widory D, Javoy M. The carbon isotope composition of atmospheric CO₂ in Paris [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, **215**(1-2): 289-298.
- [16] Widory D, Roy S, Le Moullec Y, *et al.* The origin of atmospheric particles in Paris: a view through carbon and lead isotopes [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(7): 953-961.
- [17] Agnihotri R, Mandal T K, Karapurkar S G, *et al.* Stable carbon and nitrogen isotopic composition of bulk aerosols over India and northern Indian Ocean [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(17): 2828-2835.
- [18] Kleefeld S, Hoffer A, Krivácsy Z, *et al.* Importance of organic and black carbon in atmospheric aerosols at Mace Head, on the West Coast of Ireland (53°19'N, 9°54'W) [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(28): 4479-4490.
- [19] Widory D. Combustibles, fuels and their combustion products; A view through carbon isotopes [J]. Combustion Theory and Modelling, 2006, **10**(5): 831-841.
- [20] 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.
- [21] Nakagawa F, Tsunogai U, Komatsu D D, *et al.* Automobile exhaust as a source of ^{13}C - and D-enriched atmospheric methane in urban areas [J]. Organic Geochemistry, 2005, **36**(5): 727-738.
- [22] López-Veneroni D. The stable carbon isotope composition of PM_{2.5} and PM₁₀ in Mexico City Metropolitan Area air [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(29): 4491-4502.
- [23] Cao J J, Chow J C, Tao J, *et al.* Stable carbon isotopes in aerosols from Chinese cities; Influence of fossil fuels [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(6): 1359-1363.
- [24] Ballentine D C, Macko S A, Turekian V C. Variability of stable carbon isotopic compositions in individual fatty acids from combustion of C₄ and C₃ plants; implications for biomass burning [J]. Chemical Geology, 1998, **152**(1-2): 151-161.
- [25] 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.
- [26] Moura J M S, Martens C S, Moreira M Z, *et al.* Spatial and seasonal variations in the stable carbon isotopic composition of methane in stream sediments of eastern Amazonia [J]. Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology, 2008, **60**(1): 21-31.
- [27] Vega E, Reyes E, Sánchez G, *et al.* Basic statistics of PM_{2.5} and PM₁₀ in the atmosphere of Mexico City [J]. Science of the Total Environment, 2002, **287**(3): 167-176.

CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in PM _{2.5} in Nanjing Region	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (3727)
Distribution and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China	HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (3733)
Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size	LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, <i>et al.</i> (3741)
Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel	LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (3749)
Characteristics of δ ¹⁸ O in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area	CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (3755)
Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China	YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (3764)
Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by O ₃ /H ₂ O ₂	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, <i>et al.</i> (3772)
Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of <i>Pinus massoniana</i> Lamb. and Source Apportionment	GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, <i>et al.</i> (3777)
Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province	LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, <i>et al.</i> (3782)
Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin	WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, <i>et al.</i> (3788)
Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region	YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, <i>et al.</i> (3797)
Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay	YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, <i>et al.</i> (3804)
Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat; Results of a Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)
Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis	LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, <i>et al.</i> (3818)
Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin	NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, <i>et al.</i> (3825)
Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen	SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, <i>et al.</i> (3832)
Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China	BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)
Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment	YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3847)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake	LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)
Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu	HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, <i>et al.</i> (3862)
Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake	CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (3872)
Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases	ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, <i>et al.</i> (3879)
Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments	OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)
Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas	YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, <i>et al.</i> (3894)
Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland	CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3904)
Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash	Ji Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3912)
Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light	WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, <i>et al.</i> (3921)
Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material	Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)
Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO ₂ in Aquatic System	CHEN Jun-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)
Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess	XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (3940)
Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance	ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, <i>et al.</i> (3945)
Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage	ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (3954)
Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment	LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, <i>et al.</i> (3963)
Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, <i>et al.</i> (3969)
Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge	LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, <i>et al.</i> (3975)
Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge	GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)
Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor	CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, <i>et al.</i> (3986)
Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow	YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (3992)
Modeling of CO ₂ Fluxes at Cropland by Using SIB3 Model	ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, <i>et al.</i> (4000)
Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain	XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4009)
Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City	YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)
Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong	SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, <i>et al.</i> (4024)
Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil	WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, <i>et al.</i> (4031)
Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil	WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, <i>et al.</i> (4036)
Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column	LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, <i>et al.</i> (4042)
Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils	FANG Jing, YU Bo-yang (4050)
Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4058)
Allelopathic Potential of <i>Phyllostachys edulis</i> on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process	BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4066)
Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary	LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)
Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province	LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, <i>et al.</i> (4081)
Effects of Cu ²⁺ Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes	ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, <i>et al.</i> (4090)
Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO ₂ Leakage by High-throughput Sequencing Technology	TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, <i>et al.</i> (4096)
Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake	LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, <i>et al.</i> (4105)
Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain	CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, <i>et al.</i> (4112)
Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, <i>et al.</i> (4119)
Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato	LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4126)
Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China	LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2013年10月15日 34卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 10 Oct. 15, 2013

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行