

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

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

长江三角洲 PM _{2.5} 质量浓度遥感估算与时空分布特征	徐建辉, 江洪 (3119)
宁波市 PM _{2.5} 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算	杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)
青岛大气中酸碱气体及 PM _{2.5} 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系	周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)
北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征	胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)
2015 年春节北京市空气质量分析	程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)
上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系	王红丽 (3159)
生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究	陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)
一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型	郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘阁, 王旭东, 张思敏 (3175)
巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素	叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张玫琪, 周阳 (3186)
河北洺河溶解性有机物光谱学特性	虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)
东山岛地下水“三氮”空间分布特征	吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)
重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化	梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)
硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ 的影响	黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)
阆中市思依镇水化学特征及其成因分析	张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)
东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动	陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)
水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响	胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)
溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟	杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)
坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果	李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)
典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估	李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)
南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比	张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)
臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响	刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)
含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响	吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)
厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究	王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永峰 (3298)
印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究	申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)
螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征	覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)
两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究	税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)
农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析	孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)
四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析	张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)
从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化	刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)
提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响	刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀良 (3352)
常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究: 以长江中下游地区夏玉米季为例	桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)
水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响	傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)
厌氧条件下砂壤水稻土 N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和 CH ₄ 排放特征	曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373)
黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征	陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)
生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响	郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)
宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征	倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)
石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究	胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)
江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例	王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)
缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征	李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)
西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应	聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)
电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评价	郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)
典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性	刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)
紫色土对硫丹的吸附与解吸特征	赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)
紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响	焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)
4 株外生菌根真菌对 Al ³⁺ 吸收与吸附的研究	王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)
长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评价	于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)
北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律	宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)
城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响	吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)
V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英	任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)
基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析	林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)
我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨	江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)
异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响	司友斌, 王娟 (3533)
《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)	

2015 年春节北京市空气质量分析

程念亮¹, 陈添², 张大伟^{1*}, 李云婷¹, 孙峰¹, 魏强¹, 刘嘉林¹, 刘保献¹, 孙瑞雯¹

(1. 北京市环境保护监测中心, 大气颗粒物监测技术北京市重点实验室, 北京 100048; 2. 北京市环境保护局, 北京 100048)

摘要: 对 2015 年春节(2 月 18~24 日)期间北京市 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂ 的浓度及 PM_{2.5} 组分进行了分析, 并基于 PM_{2.5}/CO 比值法定量估算了除夕夜烟花爆竹 PM_{2.5} 排放量。结果表明, 春节期间北京市 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂ 的平均浓度分别为 116.85、184.71、22.14、36.27 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 比 2014 年同期分别增长 52.61%、92.41%、-40.15%、-0.46%; 除夕夜 01:00 PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂ 峰值浓度分别为 412.69、541.63、152.73、51.09 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 比 2014 年同期峰值浓度分别增长 19.02%、14.37%、76.57%、11.35%; 污染物峰值浓度空间分布上人口密集地区浓度水平明显较高; 具有烟花燃放特征的指示性 PM_{2.5} 组分 $\rho(\text{Cl}^-)$ 、 $\rho(\text{K}^+)$ 、 $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 峰值浓度分别是 2013~2014 年各项离子年均浓度的 18.85、66.72、70.10 倍; 烟花爆竹燃放会在短时间内造成严重的大气污染, 除夕夜北京市区烟花爆竹排放 PM_{2.5} 总量约为 2.13×10^5 kg。进一步分析显示春节半月期间污染源排放量大幅降低对北京市空气质量的改善效果明显。

关键词: PM_{2.5}; 烟花爆竹; 北京; 春节; 化学组分

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3150-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.09.005

Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015

CHENG Nian-liang¹, CHEN Tian², ZHANG Da-wei^{1*}, LI Yun-ting¹, SUN Feng¹, WEI Qiang¹, LIU Jia-lin¹, LIU Bao-xian¹, SUN Rui-wen¹

(1. Key Laboratory of Airborne Particulate Matter Monitoring Technology of Beijing, Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China; 2. Beijing Environmental Protection Bureau, Beijing 100048, China)

Abstract: To analyze the impacts of emissions from fireworks on the air quality, monitoring data of PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂ chemical compositions of PM_{2.5} of automatic air quality stations in Beijing during Spring Festival (February 18th-24th) in 2015 were investigated. Moreover, we also estimated the fireworks on the New Year's Eve produced based on the ratio of PM_{2.5} to CO. Analysis results showed that the concentrations of PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂ during 2015 Spring Festival was 116.85, 184.71, 22.14, and 36.27 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively, which raised 52.61%, 92.41%, -40.15%, -0.46% respectively compared to the same period in 2014; the concentration peaks of PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO₂ at 1:00 am on 19th was 412.69, 541.63, 152.73, 51.09 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, respectively, which was increased 19.02%, 14.37%, 76.57%, 11.35% compared to that of 2014; the concentration peaks at dense population area were significantly higher than that in other districts; fireworks had great influence on the chemical compositions of PM_{2.5}, especially on the concentrations of chloride ion, potassium ion, magnesium ion, which were 18.85, 66.72, and 70.10 times than that in 2013-2014; fireworks resulted in severe air pollution in a short time and the estimated fireworks on the New Year's Eve was approximately 2.13×10^5 kg of PM_{2.5}. Reduction of pollutants during Spring Festival had a positive significant impact on air quality in Beijing.

Key words: PM_{2.5}; fireworks; Beijing; Spring Festival; chemical characteristics

春节期间大部分企业停产和半停产、机动车数量骤减、工地几乎全部停工, 本地污染源排放量大幅降低, 有利于改善本地区空气质量。但春节期间烟花爆竹燃放短时间内向大气中排放了大量的二氧化硫、氮氧化物、重金属、有机物及烟尘颗粒, 导致空气质量迅速恶化^[1]。北京市烟花爆竹燃放政策从 2006 年开始由禁放改为限放, 规定五环路以内农历除夕至正月初一、正月初二至正月十五 07:00~24:00 可以燃放烟花爆竹; 北京作为拥有 2 000 多万人口的特大城市, 鞭炮燃放的解禁由此导致的环境污染问题受到广泛关注^[2]。

国内外很多学者研究了烟花爆竹燃放对北京市空气质量的影响, Wang 等^[3]对北京市元宵节期间

PM_{2.5} 化学成分的分析表明, 燃放阶段 K⁺、Mg²⁺、SO₂ 等比非燃放阶段高出至少 5 倍以上; Fleischer 等^[4]、Dyke 等^[5]发现燃放烟花可产生致癌的二噁英(PCDDs)和多氯代二苯并呋喃(PCDFs)等有毒物质; 徐敬等^[6]研究 2003 年北京除夕夜空气质量发现燃放烟花爆竹会导致空气中 PM_{2.5} 在短时间内上升到很高的水平, 最大小时平均质量浓度达 549

收稿日期: 2015-03-12; 修订日期: 2015-04-16

基金项目: 北京市科技计划项目(Z131100006113009); 环境保护公益性行业科研专项(201409005); 国家科技支撑计划项目(2014BAC23B03); 北京市环境保护监测中心课题项目(2015-01-02)

作者简介: 程念亮(1987~), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为大气环境预警预报及模拟, E-mail: 15001195306@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhangdawei@bjmemc.com.cn

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均每小时质量浓度增加 $100\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右; 李令军等^[7]对 2000~2006 年春节期间空气污染状况研究发现燃放鞭炮对不同大气污染物的影响存在差异, PM_{10} 污染最严重; SO_2 、 NO_x 浓度也有明显升高, CO 则存在一定滞后, 甚至没有明显响应; 金军等^[8]估算了 2006 年北京市除夕夜 00:00~01:00 市区 PM_{10} 排放量约为 $3.0\times 10^4\ \text{kg}$; 何松洁等^[9]利用 2011 年元宵节前后北京市主要大气污染物(PM_{10} 、 SO_2 、 NO_x 、 CO 和 O_3) 的浓度数据分析后发现元宵节大量鞭炮的集中燃放导致了全市 PM_{10} 最高小时浓度平均达到 $469.3\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 单站最高达到 $1307\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 王哲等^[10]发现 2013 年北京除夕烟花爆竹燃放使 $\text{PM}_{2.5}$ 单站 1 小时平均浓度最大增加 $709\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (石景山古城监测点), 全市 24 h 平均浓度增加 $88\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 空气质量由良好升级为重度污染; 王占山等^[11]发现 2013 年北京除夕烟花爆竹的燃放造成凌晨 01:00 监测中心和良乡的能见度分别降至 2 422 m 和 3 591 m 且 2010~2014 年春节半月污染源减排对空气质量的正影响非常明显。

目前, 针对北京市春节期间大气污染物多站点、多角度、连续时间的研究较为缺乏, 本研究对 2015 年北京春节期间多个监测站点的常规污染物浓度、 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分进行分析, 并量化估算了烟花爆竹燃放排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 总量, 以期管理部门提供准确、及时、全面的信息。

1 材料与方法

1.1 站点分布

北京位于东经 $115.7^\circ\sim 117.4^\circ\text{E}$, 北纬 $39.4^\circ\sim 41.6^\circ\text{N}$, 地处华北平原西北端, 地形为簸箕型, 平均海拔 43.5 m, 总面积 $16\,410.54\ \text{km}^2$, 国土面积 62% 为山区, 全市森林覆盖率为 37.6%; 属温带大陆性季风气候, 四季分明, 夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥, 近 10 年年降水量平均不足 450 mm, 年均降水的 80% 集中在夏季 6、7、8 这 3 个月^[12]。

1984 年北京市建立了我国第一套环境空气质量自动监测系统, 随着城市发展监测站点不断增加, 截至目前, 北京市的空气质量地面自动监测网络由 35 个站点 (见图 1) 组成, 包括 1 个城市清洁对照点, 23 个城市环境评价点, 6 个区域背景传输点, 5 个交通污染监控点; 35 个站点覆盖所有区县, 包括区域背景、郊区、城镇、交通干道、居住区等不同的环境类型, 所有站点全部经过 GPS 定位^[13,14]。本文研究污染物空间分布时使用的是 35 监测站点监

测数据, 其它污染物研究数据为东四、官园、天坛、万寿西宫、奥体中心、农展馆、万柳、古城、顺义、昌平、怀柔这 11 个监测点的浓度均值。

1.2 监测仪器

采用 Thermo Fisher 42C 化学发光 $\text{NO}-\text{NO}_2-\text{NO}_x$ 分析仪监测 NO 和 NO_2 浓度, 该分析仪最低检测限 0.05×10^{-9} (体积分数), 零漂小于 $0.025\times 10^{-9}/24\ \text{h}$, 跨漂: $\pm 1\%/24\ \text{h}$ 。采用基于气体滤波红外吸收法 Thermo Fisher 48C 分析仪测量 CO 浓度, 仪器最低检测限为 40×10^{-9} (体积分数), 零漂小于 $100\times 10^{-9}/24\ \text{h}$, 跨漂为 $\pm 1\%/24\ \text{h}$ 。 SO_2 监测采用 Thermo Fisher 43i 脉冲紫外荧光法分析仪, 最低检测限为 0.5×10^{-9} (体积分数), 精度为 1×10^{-9} (体积分数), 零漂小于 $1\times 10^{-9}/24\ \text{h}$, 跨漂为 $\pm 0.5\%/24\ \text{h}$ 。采用基于微量振荡天平法的 Thermo 1405F 系列仪器监测 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度, 采用 Thermo 1400F 监测仪监测 PM_{10} 浓度, 24 h 连续采样, 设备定期检查并及时维护保养。操作流程严格按照《环境空气质量自动监测技术规范》(HJ/T 193-2005)^[15]进行。 $\text{PM}_{2.5}$ 组分数据为监测中心综合观测实验平台分析的结果, 采用大气 $\text{PM}_{2.5}$ 水溶性离子在线测量仪 (URG-9000B) 对水溶性离子 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 NH_4^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 进行在线观测, 其化学成分分析系统主要为两台离子色谱仪, 均为美国

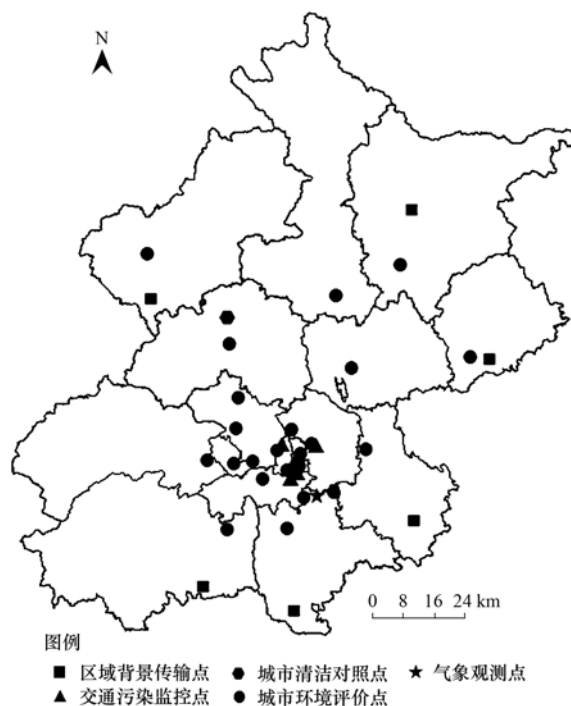


图 1 监测站分布和分类

Fig. 1 Distribution and classification of the observation sites

DIONEX 公司的 Dionex ICS-90 型离子色谱仪;使用在线 OC/EC 分析仪分析 $PM_{2.5}$ 中有机碳元素碳浓度. 气象资料为北京市观象台地面观测数据 (<http://cdc.cma.gov.cn/>), 仪器为荷兰 WAISALA 公司的 WXT520 气象观测仪.

2 结果与讨论

2.1 春节空气质量总体情况

表 1 为 2013 ~ 2015 年北京市春节期间空气质量级别变化, 2015 年春节期间 (2 月 18 ~ 24 日) 北京市空气质量二级良 2 d, 四级中度污染 3 d, 五级重度污染 2 d. 除夕 (2 月 18 日) 当天空气质量较好; 初一 (2 月 19 日) 受除夕夜间烟花爆竹燃放及不利扩散条件影响, 空气质量为重度污染; 初二至初三 (2 月 20 ~ 21 日) 空气质量维持在四级中度污染水平; 初四 (2 月 22 日) 白天我市又遭遇了外来沙尘天气, PM_{10} 浓度较高, 空气质量为中度污染; 初五 (2 月 23 日) 空气质量为良; 初六 (2 月 24 日) 扩散条件迅速转差, 空气质量为重度污染. 经计算 2 月 18 ~ 24 日北京市 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 的平均浓度分别为 116.85、184.71、22.14、36.27 $\mu g \cdot m^{-3}$, 比 2014 年同期分别增长 52.61%、92.41%、-40.15%、-0.46%, 比 2013 ~ 2014 年同期分别

增长 27.71%、71.82%、-48.33%、-17.70%, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 的同比上升和 SO_2 、 NO_2 浓度同比下降可能与节日期间污染物排放量及特殊气象条件有关, 还需进一步研究.

受特殊的地理位置、地形、产业结构及周边污染水平影响, 当北京市的主导风向为偏北风时, 大气污染物容易得到清除, 浓度水平较低, 认为扩散条件较好; 当北京市的主导风向为偏南风时, 易引起周边省市高浓度污染物向北京传输, 北京市污染物浓度较高, 认为扩散条件相对较为不利^[16]. 图 2 为 2015 年春节期间北京市地面污染物浓度与气象要素的变化, 从中可知除夕白天地面为偏北风, 相对湿度在 35% 左右, 入夜北转南风, 扩散条件转差, 除夕烟花爆竹燃放又加重了空气污染, 短时烟花爆竹燃放叠加不利气象形势, 造成初一至初三污染物浓度持续较高, $PM_{2.5}$ 日均值维持在 140 ~ 216 $\mu g \cdot m^{-3}$ 之间; 初四受蒙古国和内蒙古中北部大面积沙尘随高空西北气流进入北京, 造成持续十几个小时的 PM_{10} 高污染水平 (峰值浓度 714 $\mu g \cdot m^{-3}$); 初五晚间, 北转南风, 扩散条件将再次转差, 与除夕夜间形势相似, 但初五夜间烟花爆竹燃放强度相对较弱, 部分地区短时间空气质量达到重度污染水平.

表 1 2013 ~ 2015 年北京市春节期间空气质量级别变化

Table 1 Air quality trends during Spring Festival from 2013 to 2015

日期	2015 年首要污染物	2015 年空气质量指数	2015 年空气质量级别	2014 年同期空气质量级别	2013 年同期空气质量级别
除夕	$PM_{2.5}$	73	2	2	5
初一	$PM_{2.5}$	267	5	4	2
初二	$PM_{2.5}$	186	4	4	2
初三	$PM_{2.5}$	200	4	2	3
初四	PM_{10}	158	4	1	6
初五	PM_{10}	86	2	1	2
初六	$PM_{2.5}$	207	5	3	2

春节期间, 大量人口离京, 车流量明显降低, 区域工业生产活动水平大幅下降, 工地基本全部停工, 常规污染源排放水平明显降低. 一般情况下, 春节期间污染物浓度应比污染源没有削减时低, 而由表 1、图 2 可知 2015 年春节期间北京市空气质量与 2013 ~ 2014 年同期相比较差, 可见不利扩散条件下烟花爆竹燃放是空气质量同比较差的主要原因.

2.2 除夕夜污染物浓度变化

除夕 (2 月 18 日) 白天, 各监测子站 $PM_{2.5}$ 浓度基本保持在 20 $\mu g \cdot m^{-3}$ 以下, 空气质量处于优的水平 (图 3). 18:00 $PM_{2.5}$ 的浓度仅为 18 $\mu g \cdot m^{-3}$, 约 19:00 开始, 烟花爆竹燃放量逐步增加, 污染物浓度

总体呈现上升趋势, 21:00 ~ 00:00 $PM_{2.5}$ 浓度则超过 160 $\mu g \cdot m^{-3}$. 00:00 ~ 01:00 由于烟花爆竹集中燃放, 全市 $PM_{2.5}$ 小时浓度跃升至峰值 413 $\mu g \cdot m^{-3}$. 后半夜浓度下降缓慢, 19 日 06:00 $PM_{2.5}$ 浓度仍在 250 $\mu g \cdot m^{-3}$ 左右. 除夕夜 18:00 至初一 06:00, $PM_{2.5}$ 小时平均浓度同比 2014 年和 2013 年分别上升 23% 和 14%; 其它大气污染物如 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 等浓度均出现不同程度的抬升, $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 与烟花爆竹的燃放频率符合较好且响应最明显, NO_2 的浓度变化不如 SO_2 那样明显, CO 浓度起伏变化较稳定, 受烟花爆竹影响程度较小, 可见鞭炮燃放对不同大气污染物影响存在明显差别. 经计算除夕夜 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、

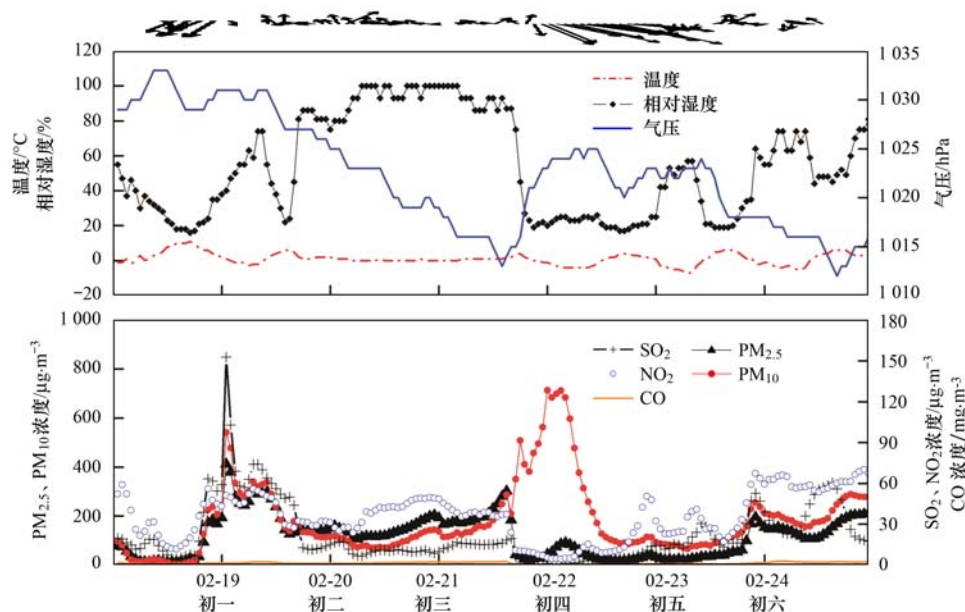


图2 2015 年春节期间北京市地面污染物浓度与气象要素的变化

Fig. 2 Variation of air pollutant concentrations and meteorological conditions during Spring Festival in 2015

SO₂、NO₂ 浓度峰值分别为 412.69、541.63、152.73、51.09 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 比 2014 年同期分别增长 19.02%、14.37%、76.57%、11.35%, 比 2013 年同期分别增长 0.73%、-2.89%、-26.20%、3.78%, 不同年份峰值浓度的高低与当时的气象条件和烟花爆竹燃放量密切相关。

采用克里格 (Kriging) 插值法对除夕夜北京市 PM_{2.5} 和 SO₂ 逐时浓度进行空间插值 (图 4), 克里格插值法应用广泛且插值准确性取决于点的分布及个数^[17]。从全市 PM_{2.5} 浓度空间分布来看, 烟花爆竹集中燃放造成城区、城关镇等地区 00:00~01:00 由于烟花爆竹集中燃放, 污染物排放量在 0~300m 高度突然增大, 当夜地面风速较小, 天气较为静稳, 污染物短时不易扩散, PM_{2.5} 小时浓度急剧跃升, 将全市空气质量“推入”重度污染水平; SO₂ 浓度空间分布演变与 PM_{2.5} 分布基本一致。从全市各监测点位来看, 人口居住比较集中的地区受燃放影响明显, PM_{2.5} 单站峰值 (01:00) 浓度出现在平谷镇, 达到 1000 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (图 5), 而同期远离燃放区域的八达岭子站浓度仅为 75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。SO₂ 单站峰值 (01:00) 浓度在平谷镇, 达到 700 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 峰值最低浓度出现在八达岭, 浓度仅 23 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。中心城区、首都机场 PM_{2.5}、SO₂ 浓度明显低于附近周边地区可能与局地烟花爆竹燃放量及限放政策有关, 整体来看春节期间燃放烟花爆竹对城市空气质量的影响具有一定的地域性和实效性。

本研究插值后污染物浓度空间分布不确定性主要为: ①“簸箕状”的特殊地形影响, 山间河谷等地区风向转换快且风速偏大, 污染物扩散速率较大, 降低了周围污染物浓度; ②在无风、高湿天气下, 气体、液体多附着、溶解或混合于凝结核中, 易发生二次化学反应, 增加 PM_{2.5} 浓度; ③插值方法误差, 由于 35 站点较集中分布在城六区, 郊区点个数较少, 插值受采样点范围、采样点密度等参数影响^[18,19]。

2.3 PM_{2.5} 组分变化

研究表明^[20] 烟花爆竹的主要成分是硫磺、木炭粉、硝酸钾 (氯酸钾), 以及镁、铝、铁等使燃放产生颜色的金属等。图 6 显示了除夕夜 17:00 至初一 06:00 PM_{2.5} 主要化学组分的变化情况, 表 2 统计了不同时间段 PM_{2.5} 水溶性无机离子 (NO₃⁻、NH₄⁺、SO₄²⁻、Cl⁻、K⁺、Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺) 及 OC、EC 的浓度。由图 6 和表 2 可知除夕夜间 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 、 $\rho(\text{Cl}^-)$ 、 $\rho(\text{K}^+)$ 、 $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 值明显增大, $\rho(\text{OC})$ 值略有增大; 其它各项组分浓度变化不明显, 特别是 NO₃⁻、NH₄⁺ 在燃放时段的浓度增幅相对较小, 且时间变化与其他水溶性离子组分并不一致, 说明这两种离子主要来自其他源, 烟花爆竹对其影响尚不明确, 这与上海^[21]、成都^[22]、无锡^[23] 等观测结果一致。除夕夜间 01:00 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 、 $\rho(\text{Cl}^-)$ 、 $\rho(\text{K}^+)$ 、 $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 浓度分别跃升至 92.24、57.43、95.63、5.90 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 分别占该时刻 PM_{2.5} 浓度的 30.40%、18.93%、31.52%、1.94%; 除夕夜间 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 、

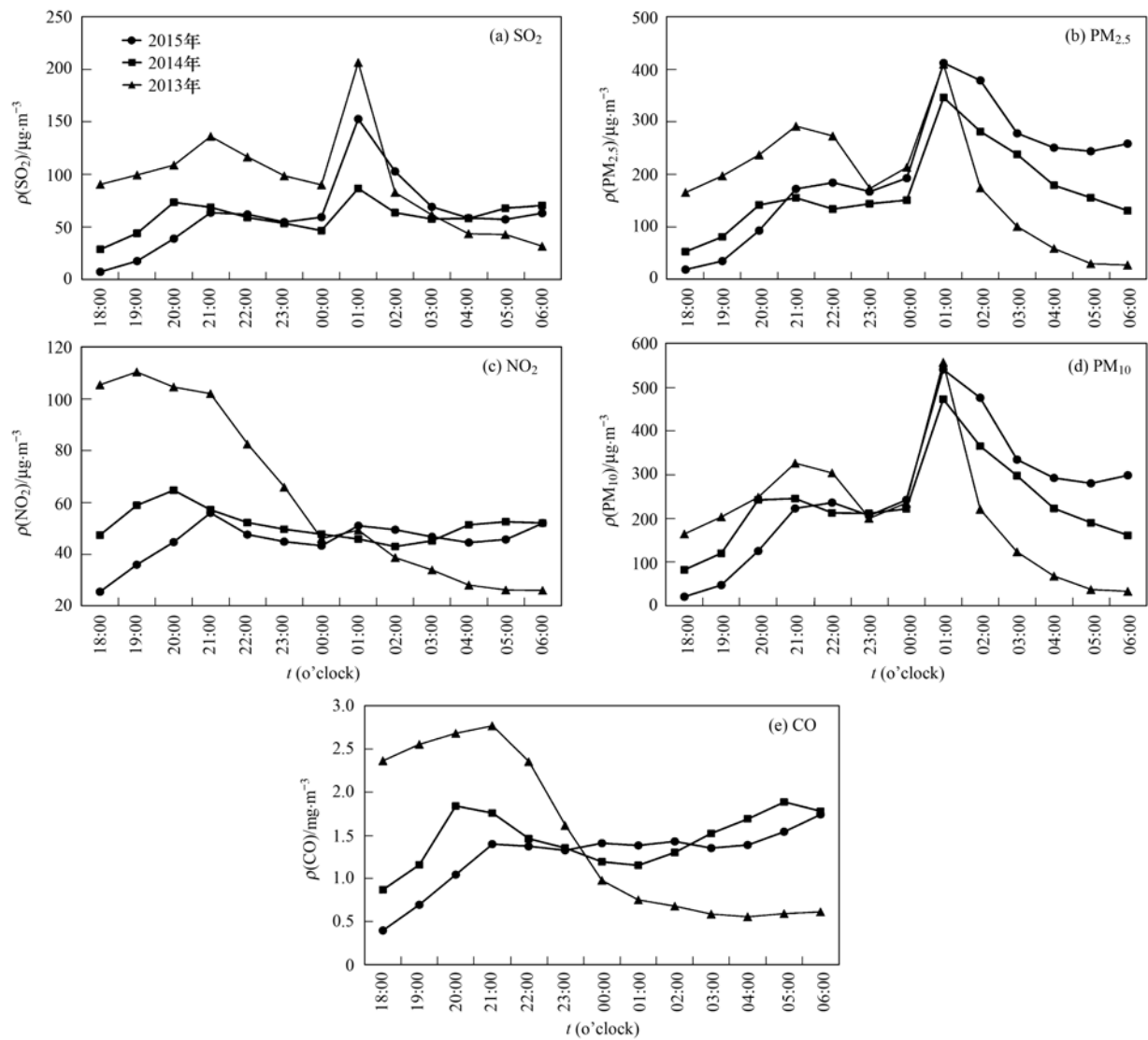


图3 2013~2015年除夕夜污染物浓度变化

Fig. 3 Variation of air pollutant concentrations on New Year's Eve in 2013-2015

表2 不同时间段PM_{2.5}组分平均浓度统计/μg·m⁻³

项目	$\rho(\text{NO}_3^-)$	$\rho(\text{SO}_4^{2-})$	$\rho(\text{NH}_4^+)$	$\rho(\text{OC})$	$\rho(\text{Na}^+)$	$\rho(\text{K}^+)$	$\rho(\text{Ca}^{2+})$	$\rho(\text{Mg}^{2+})$	$\rho(\text{EC})$	$\rho(\text{Cl}^-)$
2015年峰值	12.64	92.24	9.08	25.60	2.18	95.63	0.38	5.90	1.69	57.43
2015年除夕至初六	8.93 ± 8.79	18.11 ± 15.64	23.27 ± 20.70	1.51 ± 0.31	12.77 ± 8.48	15.59 ± 14.36	0.54 ± 0.38	0.72 ± 0.63	24.63 ± 17.02	0.98 ± 0.67
2015年1~2月	5.36 ± 4.09	14.73 ± 14.26	16.05 ± 9.51	1.91 ± 0.94	3.05 ± 2.28	12.09 ± 9.45	0.46 ± 0.37	0.19 ± 0.09	26.57 ± 21.75	2.30 ± 2.07
2013~2014年均值	11.97 ± 10.81	25.11 ± 22.63	9.63 ± 8.93	17.25 ± 12.65	0.62 ± 0.55	1.43 ± 0.86	0.46 ± 0.37	0.08 ± 0.03	1.98 ± 1.64	3.04 ± 2.68

$\rho(\text{Cl}^-)$ 、 $\rho(\text{K}^+)$ 、 $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 峰值浓度分别是 2015 年 1~2 月各项平均浓度的 6.26、24.93、7.90、30.72 倍,是 2013~2014 年各项离子年均浓度的 3.67、18.85、66.72、70.10 倍; $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 、除夕夜间 $\rho(\text{Cl}^-)$ 、 $\rho(\text{K}^+)$ 、 $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 峰值浓度占 PM_{2.5} 质量浓度的百分比达到平时的十几倍至几十倍,证明烟花爆竹燃放是除夕夜空气质量恶化的主导因素。

而春节 7 d 的 $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 、 $\rho(\text{Cl}^-)$ 、 $\rho(\text{K}^+)$ 、 $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 平均值分别为 (18.11 ± 15.64) 、 (0.98 ± 0.67) 、 (15.59 ± 14.36) 、 $(0.72 \pm 0.63) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,与峰值浓度相比明显下降。

2.4 爆竹燃放 PM_{2.5} 总量估算

由于烟花爆竹燃放期间 CO 浓度变化较小,而 PM_{2.5} 浓度明显上升,因此可将 CO 作为参考标准污

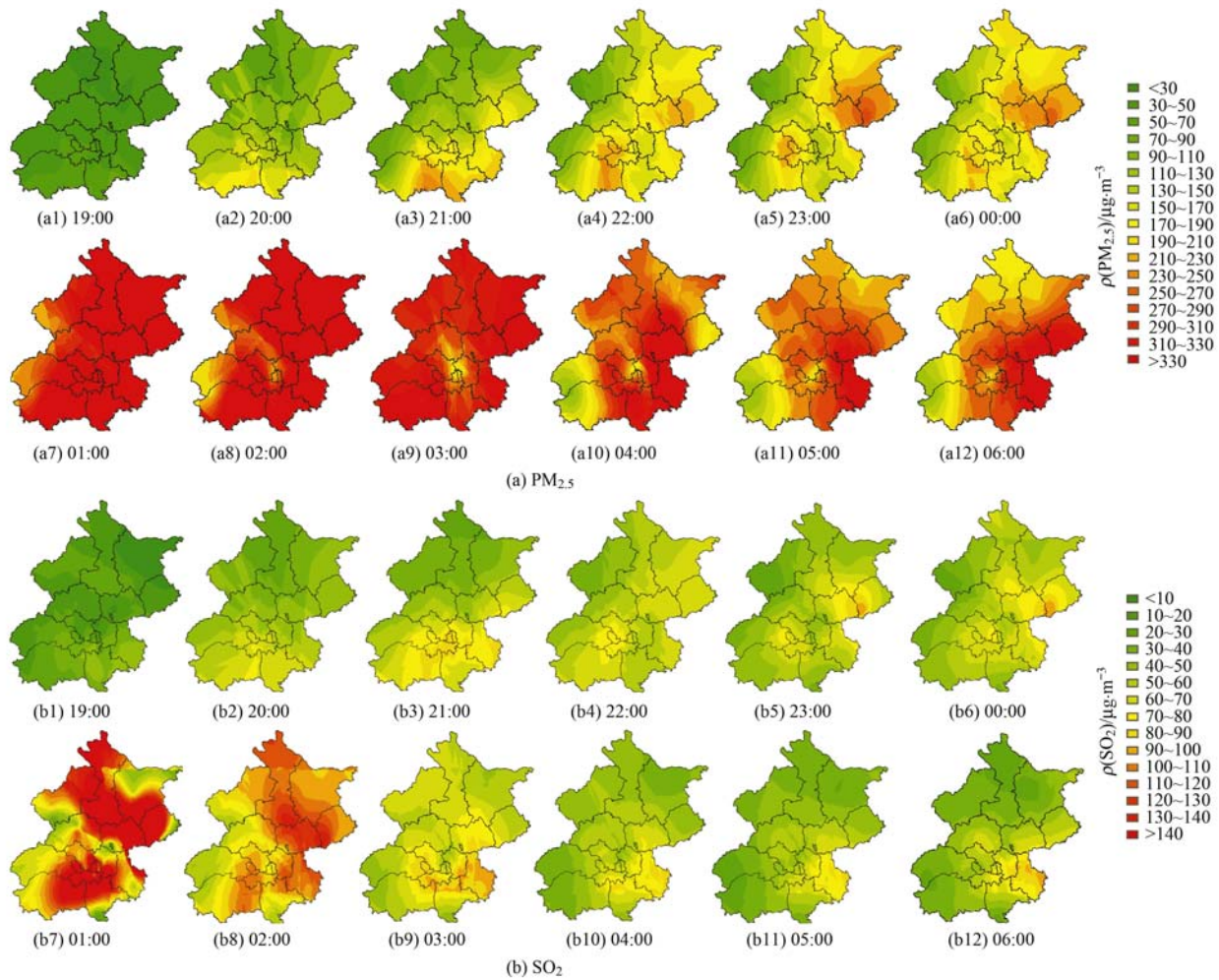


图 4 2015 年除夕夜北京 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 空间变化

Fig. 4 Spatial distribution of $\text{PM}_{2.5}$ and SO_2 at Beijing on New Year's Eve in 2015

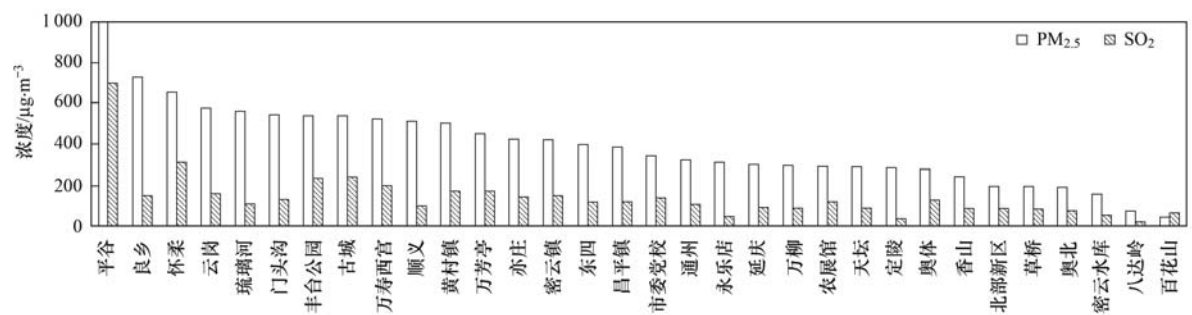


图 5 2015 年除夕夜 01:00 各监测点 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 浓度

Fig. 5 Concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ and SO_2 at different sites in Beijing on New Year's Eve of 2015

染物,利用 $\text{PM}_{2.5}/\text{CO}$ 比值分析^[10] 烟花爆竹燃放对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献. 图 7 给出了 2013 ~ 2014 年非燃放时段、除夕夜北京市各站点 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度和 CO 平均浓度的相关关系. 从中可以看出,2013 ~ 2014 年非燃放时段 (nsf) $\text{PM}_{2.5}$ 与 CO 浓度呈很好的正比关系,相关系数分别为 0.76、0.82,置信度都在

99.99% 以上;而除夕夜 (sf) $\text{PM}_{2.5}/\text{CO}$ 明显升高,与以往研究结果^[24~27] 吻合,因此根据式 (1) 可以利用逐时 CO 浓度回归得到逐时 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度.

式 (1) 中 $(\overline{\text{PM}_{2.5}}/\overline{\text{CO}})_{\text{nf}}$ 为非燃放时段平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与平均 CO 浓度的比值,本研究采用 2013 ~ 2014 年非燃放时段 (nsf) $\text{PM}_{2.5}$ 与 CO 浓度的比值,

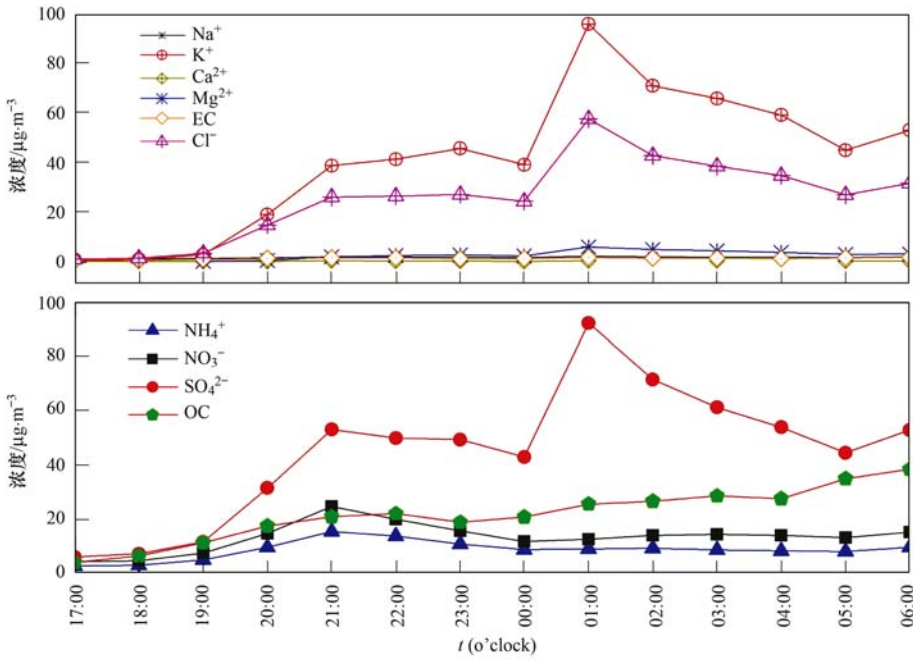


图 6 2015 年 2 月 18 日 17:00 至 19 日 06:00 PM_{2.5}组分小时浓度

Fig. 6 Hourly concentration of chemical compositions of PM_{2.5} from 17:00 on February 18th to 06:00 on February 19th, 2015

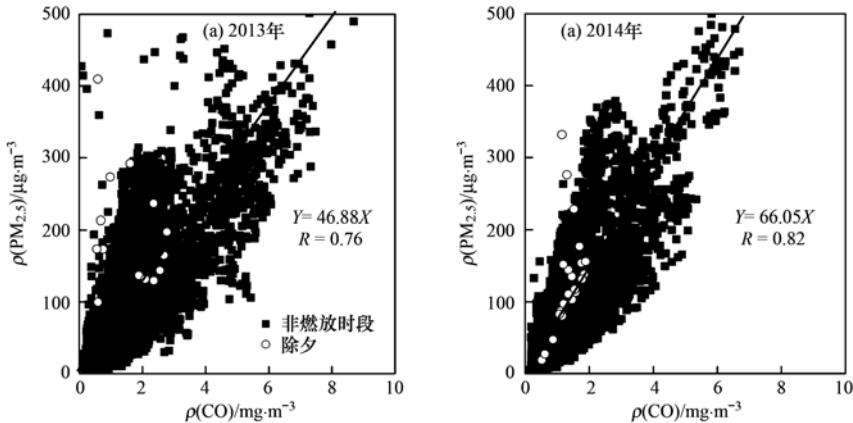


图 7 2013 ~2014 年非燃放时段、除夕 PM_{2.5}与 CO 相关关系

Fig. 7 Relationship between PM_{2.5} and CO at discharge time and on New Year's Eve in 2013-2014

约为 52.59; $\overline{\text{CO}_{\text{sf}}} \times (\overline{\text{PM}_{2.5}}/\overline{\text{CO}})_{\text{nf}}$ 为用逐 CO 浓度乘以比值回归得到逐时 PM_{2.5} 浓度, PM_{2.5sf} 为除夕夜实测 PM_{2.5} 浓度, PM_{2.5f} 则认为是烟花爆竹之外的排放源所贡献的地面 PM_{2.5}; 假定鞭炮对 PM_{2.5} 贡献量随高度按负指数规律递减^[28,29], 高度 Z 处 PM_{2.5fZ} 浓度见式(2), 若按烟花爆竹最大发射高度 300 m 计且 PM_{2.5fZ} 在水平方向混合较为均匀, 烟花爆竹排放的 PM_{2.5} 总量 M 则可用式(3)表示, 式中, S 为北京市国土面积, 约为 16 410 km²; t₁、t₂ 分别为烟花爆竹燃放的开始和结束时间, 以 t₁ 为 18:00, t₂ 为 02:00 参加计算, 则 2013 年除夕夜烟花爆竹排放 PM_{2.5} 总

量分别为 2.13 × 10⁵ kg, 烟花爆竹最大小时 PM_{2.5} 排放量分别为 4.78 × 10⁴ kg. 研究结果与金军等^[8] 估算的 2006 年除夕 00:00 ~ 01:00 烟花爆竹排放 PM₁₀ 总量 3.0 × 10⁴ kg、王哲等^[10] 估算的除夕夜间 PM_{2.5} 总量分别约为 1.91 × 10⁵ kg 基本一致.

$$\text{PM}_{2.5}^{\text{sf}} = \text{PM}_{2.5\text{sf}} - \overline{\text{CO}_{\text{sf}}} \times (\overline{\text{PM}_{2.5}}/\overline{\text{CO}})_{\text{nf}} \quad (1)$$

$$\text{PM}_{2.5}^{\text{sfZ}} = \text{PM}_{2.5}^{\text{sf}} \times e^{-0.015Z} \quad (2)$$

$$M = \int_{t_1}^{t_2} \int_0^Z \text{PM}_{2.5}^{\text{sfZ}} \times S dZ dt \quad (3)$$

报告显示北京市 2013 年 PM_{2.5} 排放量为 7.34 × 10⁷ kg^[30], 平均每天为 2.01 × 10⁵ kg, 每小时 8.38

$\times 10^3$ kg,春节期间工业、机动车等 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量明显较小,而烟花爆竹最大小时 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量分别为 4.78×10^4 kg,是平常排放的 5.7 倍,尽管 2014 年烟花爆竹销量与 2013 年同期相比下降 3 成^[31],但在不利于污染物扩散的气象条件下烟花爆竹燃放持续时间和影响程度均高于去年同期,造成今年春节期间空气质量偏差。

2.5 北京“春节半月”期间空气质量分析

每年的农历腊月二十五开始,已经出现部分企业放假和人员离京现象,正月初八、初九开始,大批人员返京,工地和工厂开工,机动车的出行数量也开始增加,因此,腊月二十五至正月初九的半个月时间最能反映北京春节期间的污染源排放特征,在此称为“春节半月”^[11]。对 2013 ~ 2015 年“春节半月”北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 的浓度与每年 1 ~ 2 月的平均值及年均值进行对比,结果见表 3,从中可知

对于 2013 ~ 2014 年春节半月”期间,除了 SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 的浓度均明显低于同年的 1 ~ 2 月的平均值及年均值, SO_2 浓度较高很可能受到局地燃煤采暖、烟花爆竹燃放和气象条件的影响;对于 2015 年春节半月, SO_2 、 NO_2 分别低于同年 1 ~ 2 月平均值的 11.65%、17.73%,但 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 分别高于同年的 1 ~ 2 月的平均值的 18.90%、31.52%,这很可能与 2 月 14 ~ 15 日、19 日、22 日 3 次空气重污染及 24 日外来沙尘天气有关,造成 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 1 ~ 2 月的平均值较高,若去掉这 3 次空气重污染及 1 次外来沙尘天气过程,则 2015 年春节半月 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 分别低于同年的 1 ~ 2 月的平均值的 53.97%、48.17%;整体来看春节半月期间的空气质量优于 1 ~ 2 月平均值及年均水平,表明污染源排放量大幅降低对空气质量改善起到明显效果。

表 3 北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 春节半月、1 ~ 2 月的平均及年均浓度统计/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
Table 3 $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , and NO_2 concentrations of the half month of Spring, January to February and whole year/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

项目	2013 年			2014 年			2015 年	
	春节半月	年均值	1 ~ 2 月	春节半月	年均值	1 ~ 2 月	春节半月	1 ~ 2 月
$\rho(\text{PM}_{2.5})$	84.86	89.50	134.25	75.73	89.50	126.61	113.85	95.75
$\rho(\text{PM}_{10})$	93.29	108.00	146.14	90.27	116.00	141.64	150.46	114.40
$\rho(\text{SO}_2)$	42.50	27.00	62.10	41.40	22.00	57.20	26.55	30.05
$\rho(\text{NO}_2)$	48.21	56.00	74.53	44.00	56.70	68.17	49.69	60.40

3 结论

(1)春节(2 月 18 ~ 24 日)期间北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 的浓度分别为 116.85、184.71、22.14、36.27 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,比 2014 年同期分别增长 52.61%、92.41%、-40.15%、-0.46%。

(2)除夕夜 01:00 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 浓度峰值分别为 412.69、541.63、152.73、51.09 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,比 2014 年同期分别增长 19.02%、14.37%、76.57%、11.35%;空间分布上人口密集地区污染水平明显偏高;具有烟花燃放特征的指示性 $\text{PM}_{2.5}$ 组分 $\rho(\text{Cl}^-)$ 、 $\rho(\text{K}^+)$ 、 $\rho(\text{Mg}^{2+})$ 峰值浓度分别是 2013 ~ 2014 年各项离子年均浓度的 18.85、66.72、70.10 倍。

(3)烟花爆竹燃放会在短时间内造成严重的大气污染,除夕北京市区烟花爆竹排放 $\text{PM}_{2.5}$ 总量约为 2.13×10^5 kg,最大小时排放量约为 4.78×10^4 kg;春节半月期间的污染源排放量降低对空气质量的改善效果明显。

参考文献:

[1] Moreno T, Quevol X, Alasluey A, et al. Recreational atmospheric pollution episodes: Inhalable metalliferous particles from firework displays[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(5): 913-922.

[2] Wehner B, Wiedensohler A, Heintzenberg J. Submicrometer aerosol size distributions and mass concentration of the millennium fireworks 2000 in Leipzig, Germany[J]. Journal of Aerosol Science, 2000, 31(12): 1489-1493.

[3] Wang Y, Zhuang G S, Xu C, et al. The air pollution caused by the burning of fireworks during the lantern festival in Beijing[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(2): 417-431.

[4] Fleischer O, Wichmann H, Lorenz W. Release of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans by setting off fireworks[J]. Chemosphere, 1999, 39(6): 925-932.

[5] Dyke P, Coleman P, James R. Dioxins in ambient air, bonfire night 1994[J]. Chemosphere, 1997, 34(5-7): 1191-1201.

[6] 徐敬,丁国安,颜鹏,等.燃放烟花爆竹对北京城区气溶胶细粒子的影响[J].安全与环境学报,2006,6(5): 79-82.

[7] 李令军,李金香,辛连忠,等.北京市春节期间大气污染分析[J].中国环境科学,2006,26(5): 537-541.

[8] 金军,王英,李令军,等.北京春节期间大气颗粒物污染及影响[J].环境污染与防治,2007,29(3): 229-232.

- [9] 何松洁, 王英, 李令军, 等. 元宵节燃放烟花爆竹对北京市空气质量的影响[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2012, **21**(1): 22-27.
- [10] 王哲, 王自发, 郑海涛. 一种评估烟花爆竹燃放对大气 $\text{PM}_{2.5}$ 影响的新方法[J]. 中国环境监测, 2014, **30**(3): 31-36.
- [11] 王占山, 张大伟, 李云婷, 等. 2014 年春节期间北京市空气质量分析[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(2): 371-378.
- [12] 《中国环境年鉴》编辑委员会. 中国环境年鉴[M]. 北京: 中国环境年鉴社, 2011. 2001-2013.
- [13] 潘本锋, 郑皓皓, 李莉娜, 等. 空气自动监测中 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} “倒挂”现象特征及原因[J]. 中国环境监测, 2014, **30**(5): 90-95.
- [14] 谢淑艳, 王晓彦, 吴迺名, 等. 环境空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 自动监测方法比较及应用[J]. 中国环境监测, 2013, **29**(2): 150-155.
- [15] HJ/T 193-2005, 环境空气质量自动监测技术规范[S].
- [16] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2014 年 10 月北京市 4 次典型空气重污染过程成因分析[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(2): 163-170.
- [17] Davis J C. Statistics and data analysis in geology[M]. (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002. 57-61.
- [18] 李璇, 聂滕, 齐峻, 等. 2013 年 1 月北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 区域来源解析[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1148-1154.
- [19] He K B, Yang F M, Ma Y L, *et al.* The characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ in Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**(29): 4959-4970.
- [20] 李杏茹, 郭雪清, 刘欣然, 等. 2007 年春节期间北京大气颗粒物中多环芳烃的污染特征[J]. 环境科学, 2008, **29**(8): 2099-2104.
- [21] 乔利平. 利用在线高分辨观测手段研究烟花爆竹燃放的大气污染物理化特征[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(9): 2398-2406.
- [22] 贺光艳, 罗彬, 陈建文, 等. 成都市城区春节期间燃放烟花爆竹对空气质量的影响[J]. 四川环境, 2014, **33**(1): 67-72.
- [23] 曹兰. 春节期间燃放烟花爆竹对无锡市空气质量的影响研究[J]. 污染防治技术, 2014, **27**(3): 5-8, 27.
- [24] Yao X H, Chan C K, Fang M, *et al.* The water-soluble ionic composition of $\text{PM}_{2.5}$ in Shanghai and Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(26): 4223-4234.
- [25] Sun Y L, Zhang G S, Tang A H, *et al.* Chemical characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} in haze-fog episodes in Beijing[J]. Environmental Science and Technology, 2006, **40**(10): 3148-3155.
- [26] Chao J J, Wu F, Chow J C, *et al.* Characterization and source apportionment of atmospheric organic and elemental carbon during fall and winter of 2003 in Xi'an, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2005, **5**(11): 3127-3137.
- [27] 杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 等. 2012 ~ 2013 年间北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 768-773.
- [28] 章澄昌, 周文贤. 大气气溶胶教程[M]. 北京: 气象出版社, 1995. 181-182.
- [29] Meng Z Y, Xu X B, Yan P, *et al.* Characteristics of trace gaseous pollutants at a regional background station in Northern China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussion, 2008, **8**(3): 9405-9433.
- [30] 北京市环保局. 基于 AQI 标准及三维立体监测的空气质量预报技术体系研究和应用示范[R]. 北京: 2014.
- [31] 卢国强. 北京羊年春节烟花爆竹销量减少三成[EB/OL]. (2015-02-26) [2015-03-02]. http://news.xinhuanet.com/city/2015-02/26/c_127520160.htm.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations	XU Jian-hui, JIANG Hong (3119)
Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon	DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, <i>et al.</i> (3128)
Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM _{2.5} and Gas-Particle Partitioning in Qingdao	ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, <i>et al.</i> (3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, <i>et al.</i> (3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (3150)
Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai	WANG Hong-li (3159)
Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter	CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, <i>et al.</i> (3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, <i>et al.</i> (3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (3194)
Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island	WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3203)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3212)
Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, <i>et al.</i> (3230)
Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China	CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, <i>et al.</i> (3248)
Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment	YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, <i>et al.</i> (3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, <i>et al.</i> (3269)
Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes	ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, <i>et al.</i> (3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, <i>et al.</i> (3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, <i>et al.</i> (3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, <i>et al.</i> (3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, <i>et al.</i> (3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggery Wastewater	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, <i>et al.</i> (3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, <i>et al.</i> (3339)
Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation	LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, <i>et al.</i> (3345)
Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge	LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (3352)
Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, <i>et al.</i> (3358)
Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH ₄ and N ₂ O Emission from Double-Season Rice Paddy Field	FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, <i>et al.</i> (3365)
Characteristics of N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil	CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (3373)
Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau	CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, <i>et al.</i> (3393)
Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia	NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, <i>et al.</i> (3401)
Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification	HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (3411)
Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City	WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (3422)
Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (3429)
Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China	NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, <i>et al.</i> (3438)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, <i>et al.</i> (3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, <i>et al.</i> (3464)
Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil	JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, <i>et al.</i> (3471)
Al ³⁺ Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, <i>et al.</i> (3479)
Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China	YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, <i>et al.</i> (3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, <i>et al.</i> (3493)
Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables	LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, <i>et al.</i> (3501)
Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ Catalyst and Activated Carbon	REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, <i>et al.</i> (3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, <i>et al.</i> (3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, <i>et al.</i> (3522)
Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil	SI You-bin, WANG Juan (3533)

《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9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 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