

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化 祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)

基于重庆本地碳成分谱的 PM_{2.5} 碳组分来源分析 张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)

重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究 徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)

基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析 王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)

基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价 刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)

典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析 徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)

火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究 王占山, 潘丽波 (853)

国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性 楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)

稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇 刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)

河口湿地近地面大气 CO₂ 浓度日变化和季节变化 张林海, 仝川, 曾从盛 (879)

三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量 李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)

施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH₄、N₂O 和 NH₃ 排放特征 万合锋, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)

干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响 张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)

长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究 吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)

汾河中下游浮游藻类群落特征及水质分析 王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)

基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究 陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)

三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征 李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)

黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析 于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)

太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素 揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)

黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系 董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)

纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究 杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)

铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究 唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)

磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响 张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)

预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响 赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)

陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行 付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)

冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征 黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)

烷基多苷促进污泥水解产酸的研究 陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)

高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响 操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)

兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价 李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)

珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价 郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)

海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价 李飞, 徐敏 (1035)

再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险 吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)

瓦埠湖流域庄集镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估 李如忠, 邹阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)

三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评估 张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)

基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价 陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)

干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究 薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)

缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入 孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)

三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响 韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)

黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例 师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)

天然林土壤有机碳及矿化特征研究 杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)

不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化 张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)

硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响 杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)

6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应 山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)

基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究 张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)

人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究 吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)

农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)

中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态 宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)

苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析 周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)

UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响 刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)

Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响 张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)

对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究 宋彩霞, 邓新平, 厉阆, 肖伟 (1176)

克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用 刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)

铅元素人为循环环境释放物形态分析 梁静, 毛建素 (1191)

污染排放与环境质量关系模型构建与应用 李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)

微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展 闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)

《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)

重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究

徐鹏¹, 郝庆菊¹, 吉东生², 张军科², 刘子锐², 胡波², 王跃思², 江长胜^{1*}

(1. 西南大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘要: 为了研究重庆市北碚区大气污染物浓度变化特征及其污染状况, 采用全自动在线监测仪器对重庆市北碚城区大气污染物进行连续在线监测, 分析了 2012 年 1 月~2013 年 2 月的大气污染物观测数据. 结果表明, 除 SO₂ 以外, 其它污染物均有超出国家新环境空气质量标准(GB 3095-2012)的情况出现, 其中细粒子污染最严重. 大气污染物浓度具有明显的季节变化, 2012 年春夏秋冬各季污染物平均浓度: O₃ 为 (36.1 ± 19.2)、(48.8 ± 32.6)、(29.8 ± 28.6)、(18.2 ± 15.8) μg·m⁻³, O_x 为 (77.6 ± 20.6)、(91.3 ± 37.6)、(77.5 ± 30.6)、(69.4 ± 18.2) μg·m⁻³, 表现为夏高冬低; NO 为 (11.8 ± 9.4)、(8.2 ± 4.9)、(20.7 ± 17.1)、(30.4 ± 25.1) μg·m⁻³, NO₂ 为 (42.3 ± 13.1)、(40.5 ± 9.9)、(47.2 ± 14.1)、(51.2 ± 15.9) μg·m⁻³, NO_x 为 (54.1 ± 20.8)、(48.7 ± 12.6)、(67.9 ± 25.5)、(81.6 ± 37.9) μg·m⁻³, 均表现为冬高夏低; SO₂ 为 (50.5 ± 23.3)、(26.3 ± 16.7)、(38.8 ± 18.4)、(53.7 ± 23.4) μg·m⁻³, 表现为冬春高而夏秋低; 而 PM_{2.5} 则为 (61.4 ± 28.5)、(68.1 ± 32.5)、(61.9 ± 27.1)、(89.6 ± 44.2) μg·m⁻³, 表现出冬季高而其它季节比较平稳的特征. O₃、O_x、NO、NO_x 以及 SO₂ 浓度均为单峰型的日变化形式, 其中 O₃ 和 O_x 的日变化峰值出现在午后 16:00, 而 NO、NO_x 及 SO₂ 的日最大值则出现在 08:00~11:00; NO₂ 和 PM_{2.5} 的日变化模式呈双峰型, 有早晚两个峰值. O₃ 和 O_x 在夏季日变化振幅最大, 而其它污染物则冬季日变化振幅最大. 将工作日与周末各污染物浓度的日变化相比, 成对 *t* 检验分析表明, NO 并无明显差异 (*P* = 0.14), 但 NO₂ 工作日显著高于周末 (*P* = 0.03), 而 O₃ 则为工作日极显著低于周末 (*P* < 0.001). 相关分析表明, O₃ 浓度与气温和风速呈显著或极显著正相关, 与相对湿度呈极显著负相关, 而 NO_x 则与以上各气象要素的关系正好相反; PM_{2.5} 与气温和风速呈负相关, 与相对湿度呈正相关; SO₂ 与各气象要素的关系在不同的季节表现不同. 除此之外, 风向也是影响大气污染物浓度的一个重要因素.

关键词: 重庆; 大气污染; O₃; NO_x; SO₂; PM_{2.5}

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-0820-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.2014.03.003

Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing

XU Peng¹, HAO Qing-ju¹, JI Dong-sheng², ZHANG Jun-ke², LIU Zi-rui², HU Bo², WANG Yue-si², JIANG Chang-sheng¹

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: To study the characteristics of atmospheric pollutants in the urban area of Beibei district of Chongqing, the concentrations of the atmospheric pollutants were measured by automatic on-line continuous monitoring equipments from Jan. 2012 to Feb. 2013. The results showed that the concentrations of the pollutants often exceeded the corresponding values of the new National Ambient Air Quality Standards (GB 3095-2012) except SO₂. Of these pollutants, PM_{2.5} was the most serious in this area. The concentrations of the atmospheric pollutants had significant seasonal variation. The concentrations of O₃ and O_x were both the highest in summer and the lowest in winter. The average concentrations of O₃ were (36.1 ± 19.2), (48.8 ± 32.6), (29.8 ± 28.6) and (18.2 ± 15.8) μg·m⁻³, and the average O_x concentrations were (77.6 ± 20.6), (91.3 ± 37.6), (77.5 ± 30.6) and (69.4 ± 18.2) μg·m⁻³ in spring, summer, autumn and winter in 2012, respectively. The concentrations of NO_x appeared higher in winter and lower in summer, the average concentrations of NO, NO₂ and NO_x were (11.8 ± 9.4), (42.3 ± 13.1) and (54.1 ± 20.8) μg·m⁻³ in spring, (8.2 ± 4.9), (40.5 ± 9.9) and (48.7 ± 12.6) μg·m⁻³ in summer, (20.7 ± 17.1), (47.2 ± 14.1) and (67.9 ± 25.5) μg·m⁻³ in autumn, and (30.4 ± 25.1), (51.2 ± 15.9), (81.6 ± 37.9) μg·m⁻³ in winter. The concentrations of SO₂ appeared higher in spring

收稿日期: 2013-07-04; 修订日期: 2013-10-15

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41230642); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05100100); 国家自然科学基金项目(41275160, 41005069); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2012A005, XDJK2013A009)

作者简介: 徐鹏(1988~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境, E-mail: 836289912@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: jiangcs@126.com

and winter, and lower in summer and autumn. The concentrations of SO_2 were (50.5 ± 23.3) , (26.3 ± 16.7) , (38.8 ± 18.4) and $(53.7 \pm 23.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in spring, summer, autumn and winter, respectively. The concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ appeared higher in winter and changed smoothly in other seasons, with the average concentration of (61.4 ± 28.5) , (68.1 ± 32.5) , (61.9 ± 27.1) and $(89.6 \pm 44.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in spring, summer, autumn and winter, respectively. The curves of diurnal variations of O_3 , O_x , NO , NO_x and SO_2 all showed single peak. However, the time of the peak values varied for different pollutants, 16:00 for O_3 and O_x , and 8:00-11:00 for NO , NO_x and SO_2 . The diurnal variations of NO_2 and $\text{PM}_{2.5}$ were similar to the two peaks that appeared in the morning and at night, respectively. Moreover, the diurnal ranges of O_3 and O_x concentrations were much wider in summer, while the wider ranges were observed in winter for NO , NO_2 , NO_x , SO_2 and $\text{PM}_{2.5}$. There was no difference in the diurnal pattern of NO between weekends and weekdays, the concentrations of N_2O in weekdays were much higher than those on weekends, but with O_3 the situation was the opposite. Correlation analysis indicated that the O_3 concentration was positively correlated with temperature and wind speed, while negatively correlated with relative humidity. However, the situation of NO_x was the opposite. $\text{PM}_{2.5}$ concentration was negatively correlated with temperature and wind speed, while positively correlated with relative humidity. SO_2 concentration had different correlations with the meteorological parameters in different seasons. In addition, wind direction was an important factor affecting the concentrations of the atmospheric pollutants.

Key words: Chongqing; atmospheric pollutants; O_3 ; NO_x ; SO_2 ; $\text{PM}_{2.5}$

O_3 、 NO_x 、 SO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 是影响城市大气环境质量的重要污染物,由于它们在大气光化学中的作用以及对生态环境和人体健康产生的效应而引起了科学家和公众的普遍关注^[1]. 近地面 O_3 浓度的持续升高是当今环境科学研究的前沿课题之一,随着工业和交通业的发展,城市光化学烟雾越来越严重,对人体健康造成很大影响^[2]; NO_x 和 SO_2 在大气中可以催化氧化或光化学氧化成不易挥发的硝酸和硫酸,并溶于云滴或雨滴形成酸雨,对生态系统和人类健康造成严重伤害^[3]; $\text{PM}_{2.5}$ 是指空气动力学直径小于或等于 $2.5 \mu\text{m}$ 的细颗粒物,由于其对可见光的消光作用(吸收和散射)可造成大气能见度降低^[4],并会引发呼吸道系统疾病的发病率甚至增加死亡率^[5];近年来,由于大气环境问题频发以及公众环境意识的提高,大气污染受到了越来越多地关注和重视,国内很多城市开展了针对该类污染物的大量研究. 有研究小组利用大气观测资料对北京、天津、石家庄、唐山等地的大气污染物变化特征进行了详细分析^[1, 6~8],殷永泉等^[9]利用济南市近地面大气 O_3 浓度的观测数据,分析了 O_3 浓度的分布特征及时间变化规律,安俊琳等^[10]以南京北郊大气中 O_3 质量浓度观测资料为基础,分析了 O_3 变化特征和气象要素对其影响程度. 另外,在上海、深圳以及广州等城市也开展了类似的研究^[11~13]. 重庆是我国西南地区的工业重镇,也是我国重要的老工业基地之一,大气污染比较严重,素有“雾都”之称. 目前,关于重庆大气污染状况已有一些报道,比如刘永琪等^[14]利用 2002~2007 年的重庆市环境空气质量资料(PM_{10} 、 SO_2 、 NO_x)做统计分析,发现重庆市大气污染程度呈现出明显减轻的趋势,夏季大气质量最好,而冬季大气污染状况最严重;大气首要污染

物已从 2000 年前的 SO_2 转变为 PM_{10} ,黄伟等^[15]针对重庆的区域性灰霾天气进行了初步研究,发现灰霾日主要出现在秋冬季,黑碳与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈正相关,是颗粒物中的重要组成部分,另外,还有研究分析了重庆市能源结构变化、产业结构演变及机动车尾气对大气环境的影响^[16~18]. 但总体而言,重庆已有的大气观测研究还不是很深入,研究基础还比较薄弱.

本文利用 2012-01~2013-02 月大气环境在线监测数据,研究重庆市北碚区大气污染物(O_3 、 NO_x 、 SO_2 及 $\text{PM}_{2.5}$)现状,分析大气污染物的时间变化规律,以期对重庆市北碚区的大气污染治理提供科学依据,也为区域的大气污染防控措施提供参考.

1 材料与方法

1.1 观测站点和时间

本观测站位于重庆市北碚城区的西南大学资源环境学院楼顶,东经 $106^\circ 24' 58''$,北纬 $29^\circ 48' 43''$,距地面 21 m,观测站所处地形平坦,受局地环流影响较小,周围 5 km 内多为文教,行政和居民区,无高大的建筑物和明显的局地排放源. 实验观测时间为 2012-01~2013-02. 实验观测的大气污染物有 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 O_3 和 NO_x . 重庆市作为直辖市,根据第七次全国环境保护大会的要求,已在 2012 年底在主城区实施了国家新环境空气质量标准(GB 3095-2012). 重庆市北碚区大气污染物观测站为环境功能区的二类区.

1.2 观测方法

在线观测所使用的仪器均为美国热电公司生产的环境设备,① NO_x 观测使用 TE42i 化学发光 $\text{NO}-\text{NO}_2-\text{NO}_x$ 分析仪,最低检测限为 $0.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,零漂

$< 0.5 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 跨漂: $\pm 1\% \cdot \text{d}^{-1}$; ② O_3 观测使用 TE49i 紫外光度法 O_3 分析仪, 最低检测限为 $2.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 零漂 $< 2 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 跨漂: $\pm 1\% \cdot (\text{7 d})^{-1}$; ③ SO_2 观测使用 TE43i 脉冲荧光 SO_2 分析仪, 最低检测限为 $5.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 零漂 $< 2.9 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 跨漂: $\pm 1\% \cdot \text{d}^{-1}$; ④ $\text{PM}_{2.5}$ 观测使用 RP1400a 环境颗粒物监测仪, 最低检测限: $0.06 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 质量分辨率: $0.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 精度 $\pm 1.5 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$.

环境观测仪器安放在专门设计的站点房屋内, 室内配有空调, 使温度保持在 25°C . 仪器采样管用保温管包裹, 使采气不受屋内空调影响, RP1400a 配有气水分离器, 其它仪器使用硅胶和活性炭过滤水汽. 观测期间每天检查, 定时更换分离器滤芯、硅胶、活性炭, 定时更换气体膜及 RP1400a 天平膜. 仪器的标定系统由 111 型零空气发生器 (TEI 111)、146 型多点校准仪 (TEI, 146i) 和 49iPS 型标准校准仪组成, 每月标定一次仪器, 标准气体由国家标准物质中心提供. 数据质量控制是根据每个月标定仪器的零点检查与多点校正结果, 结合仪器日常状况对原始数据进行修正. 如果仪器零点漂移或跨度漂移超出漂移控制限, 则从发现超出控制限的时刻开始, 至仪器恢复到调剂控制限以下这段时间内的监测数据作为无效数据; 若遇到临时停电或断电, 则从停电或断电时起, 至恢复供电后仪器完成预热为止的时段内数据作为无效数据, 无效数据不参加统计. 根据环境监测质量管理技术导则 (HJ 630-2011) 的规定来判断和处理异常值. 原始数据记录为 5 min 平均值, 文中所采用的数据是质控后小时平均值.

2 结果与讨论

2.1 污染物变化特征

图 1 展示了 2012-01 ~ 2013-02 重庆市北碚地区 NO 、 NO_2 、 NO_x ($\text{NO} + \text{NO}_2$)、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 O_3 、 O_x

($\text{NO}_2 + \text{O}_3$) 和 $\text{O}_{3-8\text{hmax}}$ (指 8 h 滑动平均最大值) 的变化趋势. 由于 2012 年 7 月 2 日 ~ 8 月 21 日臭氧仪器出现故障, 导致该时段内的臭氧观测数据缺失. 观测期间, 臭氧的 1 h 平均浓度有 48 h 超过国家新二级标准, 超标率为 0.6%, 最高小时浓度达到 $323.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. $\text{O}_{3-8\text{hmax}}$ 有 11 d 超过国家新二级标准, 超标率为 3.2%, 最高浓度达到 $267.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 由图 1 可以看出, O_3 、 $\text{O}_{3-8\text{hmax}}$ 及 O_x 日均浓度均呈现出明显且一致的峰型变化, 从 2012 年 4 月开始浓度逐渐升高, 于 8 月达到顶峰, 然后持续下降, 并在 12 月降到最低, O_3 及 O_x 在 8 月的月平均浓度分别为 $(94.5 \pm 27.7) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(145.8 \pm 32.6) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 根据气象学方法把重庆市的四季划分为春季 (3 ~ 5 月)、夏季 (6 ~ 8 月)、秋季 (9 ~ 11 月) 和冬季 (12 月 ~ 次年 2 月), 2012 年 O_3 表现出明显的夏高冬低的季节变化 (表 1), 这与安俊琳等^[19] 在北京以及殷永泉等^[9] 在济南的观测结果一致. 安俊琳等^[19] 研究表明, 地面最高气温是影响臭氧出现高浓度的最重要因素, 夏季高温和强太阳辐射等有利于光化学反应的气象条件导致了臭氧的高浓度. O_x 代表大气氧化性, 监测期间, O_x 日均浓度介于 $30.3 \sim 182.9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, 夏季大气氧化性明显高于其它季节 (表 1), 说明夏季的重庆山城地带是高浓度臭氧生成和储存地区, 在区域静稳天气、城市热岛环流和城市风的控制下, 容易造成高浓度臭氧污染.

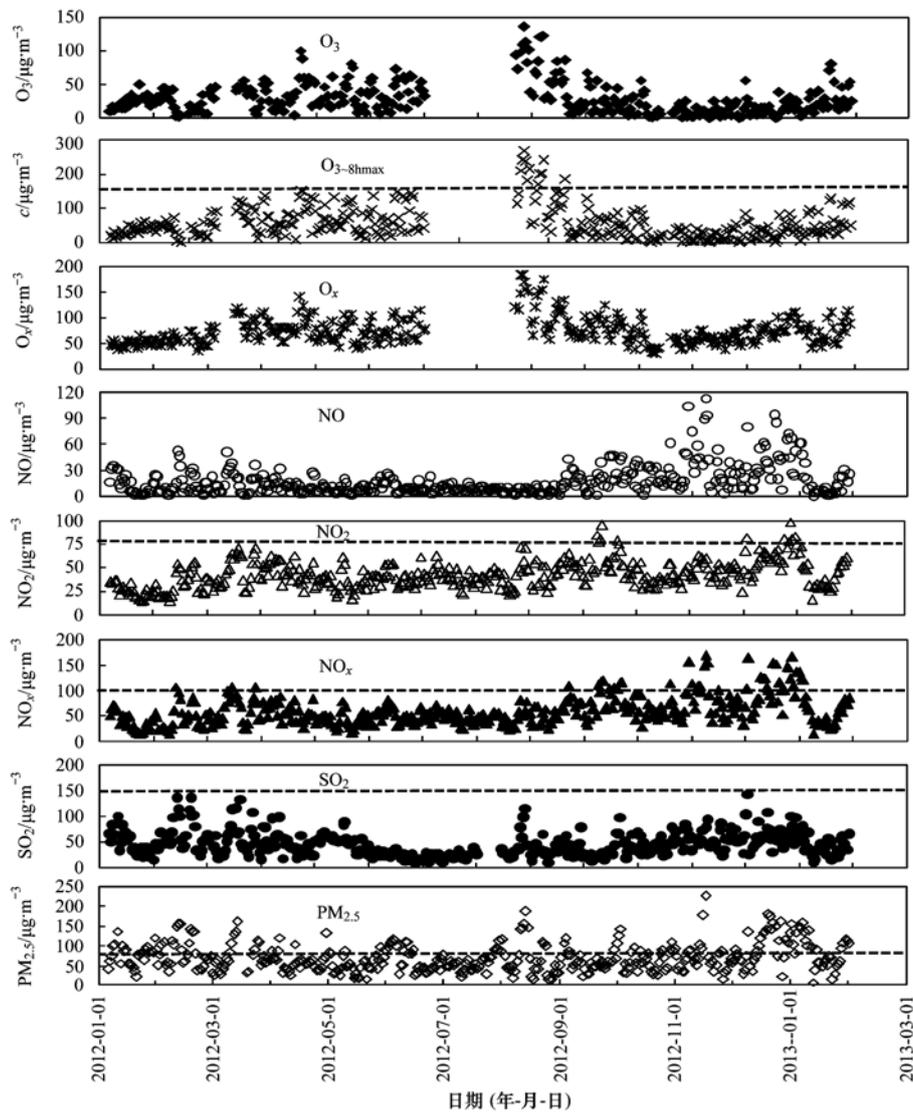
观测期间 NO_2 的 1 h 平均浓度有 1 次超过国家新二级标准, 出现在 2012 年 12 月 5 日 10:00, 浓度为 $217.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 略高于国家新二级标准 1 h 平均浓度限值的 $200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; NO_2 日平均浓度有 8 d 超过国家新二级标准, 超标率为 2.0%, 最高浓度达到 $99.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 超标日期出现在 2012 年 10 月及 2013 年 1 月; 2012 年 NO_2 年平均浓度为 $(41.5 \pm 13.3) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 略高于国家新二级标准年均浓度限值的 40

表 1 2012 年各大气污染物的季节浓度值¹⁾/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

Table 1 Seasonal concentrations of some atmospheric pollutants in 2012/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

项目	春	夏	秋	冬	年平均
O_3	36.1 ± 19.2	48.8 ± 32.6	29.8 ± 28.6	18.2 ± 15.8	31.0 ± 25.1
O_x	77.6 ± 20.6	91.3 ± 37.6	77.5 ± 30.6	69.4 ± 18.2	72.5 ± 27.8
NO	11.8 ± 9.4	8.2 ± 4.9	20.7 ± 17.1	30.4 ± 25.1	15.4 ± 14.1
NO_2	42.3 ± 13.1	40.5 ± 9.9	47.2 ± 14.1	51.2 ± 15.9	41.5 ± 13.3
NO_x	54.1 ± 20.8	48.7 ± 12.6	67.9 ± 25.5	81.6 ± 37.9	56.9 ± 24.5
SO_2	50.5 ± 23.3	26.3 ± 16.7	38.8 ± 18.4	53.7 ± 23.4	43.3 ± 24.0
$\text{PM}_{2.5}$	61.4 ± 28.5	68.1 ± 32.5	61.9 ± 27.1	89.6 ± 44.2	67.6 ± 31.9

1) 表格中数值为各大气污染物的季节平均值 \pm 标准偏差



图中虚线表示该污染物在国家新环境空气质量二级标准中浓度限值

图1 2012-01~2013-02的 O_3 、 O_x 、 $O_{3-8hmax}$ 、 NO 、 NO_2 、 NO_x 、 SO_2 、 $PM_{2.5}$ 浓度逐日变化

Fig. 1 Concentration variation of O_3 , O_x , $O_{3-8hmax}$, NO , NO_2 , NO_x , SO_2 and $PM_{2.5}$ during 2012-01—2013-02

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 观测期间, NO_x 的1 h平均浓度有21 h超过国家新二级标准,基本出现在冬季;日均浓度有41 d超过国家新二级标准,超标率为9.9%,其中有26 d出现在2012年冬季,12 d出现在秋季;2012年 NO_x 年平均浓度为 $(56.9 \pm 24.5) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,也稍高于国家新二级标准的浓度限值. 由图1可以看出, NO_x 逐日浓度表现出与 O_3 相反的夏低冬高的季节变化模式. NO 在2012年1~3月变化平缓,从4月开始逐渐降低,直到8月22日降到最低值 $1.60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,然后又逐渐升高,于2013年1月16日达到最高值 $93.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. NO_2 浓度在2012年1~4月变化比较缓慢,到5月份浓度有稍微的降低,并一直平稳地保持到10月份,11月突然出现了一个骤

然的下降,然后又升高并持续到2013年1月, NO_2 浓度峰值出现在2013年1月27日,为 $99.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. NO_x 浓度变化趋势与 NO_2 相同,最高值出现在2012年12月8日,最低值出现在2013年2月9日,浓度分别为 $169.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $15.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 由表1可以看出, NO 的季节变化最明显,冬季 NO 、 NO_2 及 NO_x 的平均浓度分别是夏季的3.7、1.3和1.7倍. NO_x 主要来源于机动车和燃烧排放^[20],冬季大气氧化性低,光化学反应最弱,通过光化学反应消耗的 NO_x 减少;另外,冬季大气层结稳定,不利于污染物的扩散而导致其累积在大气底层.

观测期间 SO_2 1 h平均浓度、日平均浓度以及年平均浓度均在国家新二级标准之下,2012年 SO_2

年平均浓度为 $(43.3 \pm 24.0) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 低于国家新二级标准浓度限值的 $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 但 SO_2 日均浓度超过 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的天数有16d, 主要出现在冬季和春季. 由图1可见, SO_2 逐日浓度呈现出两头高中间低季节变化态势, 2012年初大气 SO_2 浓度较高, 2月平均浓度为 $(65.4 \pm 32.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 然后开始逐渐降低, 于7月降至谷底, 平均为 $(22.1 \pm 6.7) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 之后又逐渐升高, 2013年1月平均浓度为 $(65.9 \pm 26.1) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 2012年夏秋季 SO_2 浓度低于春季和冬季(表1), 夏秋季大气氧化性强, SO_2 参与气粒转化形成硫酸盐的速度快, 而且夏季大气对流强且降雨较多, 不利于污染物的累积. 重庆作为老工业基地, 一直以来都是我国重要的硫酸型酸雨区, 但此次观测期间却发现, 相对于新的国家二级标准而言, 大气 SO_2 浓度并不是很高. 导致这种现象的原因可能有两点: ①重庆市产业结构调整以及能源结构改善使得 SO_2 污染源得以有效的治理和转移, 以及近年来重庆市控制燃煤 SO_2 污染的各项管理措施和办法取得了明显效果, 削减了 SO_2 排放量并降低了其大气浓度, 重庆市统计信息网资料查阅发现, 重庆市工业 SO_2 排放量呈逐年下降趋势(www.cqjtj.gov.cn). 刘永琪等^[14]通过统计分析2002~2007年重庆市环境空气质量资料, 发现 SO_2 已不再是重庆的首要污染物; ②此次观测地点是重庆市北碚区, 在地理位置上, 北碚位于重庆市区西北郊, 是重庆市的一个卫星城区; 而且, 北碚自然环境状况良好, 位于国家级自然保护区缙云山, 被誉为重庆的后花园, 是重庆的风景旅游区和智力型清洁工业基地. 由此推断北碚的 SO_2 排放量可能并不高且拥有较高的环境容量, 因此, 大气中 SO_2 的浓度较低.

观测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度的变化范围非常大, 为 $8.5 \sim 225.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 有154d超过了国家新二级标准, 超标率为37.9%, 其中有81d超过 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 占超标天数52.6%. 2012年 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度为 $(67.6 \pm 31.9) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 远远超过了国家新二级标准浓度限值的 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度冬季最高, 其它季节变化比较平稳(图1), 高浓度出现在2012年的12月8日, 浓度为 $225.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 次高浓度出现在2012年8月28日, 浓度为 $187.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 2012年 $\text{PM}_{2.5}$ 的季节平均浓度参见表1, 春、夏、秋、冬季分别有20、29、27和46d超标, 超标率分别为5.7%、8.3%、7.7%和13.1%. 重庆市北碚区

$\text{PM}_{2.5}$ 浓度冬季高于夏季, 与在深圳、广州和上海的研究结果一致^[11~13]. 重庆是我国著名的“雾都”, 一直以来, 该地区的细粒子污染都非常严重. 随着经济的快速发展, 重庆的城市化规模不断扩大, 城市机动车保有量迅速增加, 尾气排放成为 $\text{PM}_{2.5}$ 的一个重要来源; 另外, 重庆十二五期间的减排目标只有化学需氧量、氨氮、 SO_2 和氮氧化物这4种, 悬浮颗粒物由于城市化进程的加快并未得到有效的控制, 而悬浮颗粒物也是 $\text{PM}_{2.5}$ 的一个重要来源. 本研究的观测数据表明, 冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染最严重, 并引发了恶劣的环境空气质量. 可能主要原因有二: ①有研究表明^[21], 降雨对大气悬浮颗粒物具有较好的清除效果, 不同等级降雨的清除能力大小排序为: 大雨 > 小雨 > 中雨 > 微雨. 重庆雨季集中在夏秋两季且降雨强度较大, 冬季降水较少且降雨强度小, 导致冬季降水对 $\text{PM}_{2.5}$ 的清洗能力下降; ②重庆春夏大气混合层高度较高, 而冬季最低^[14], 大气稳定度过于稳定, 不利于大气颗粒物的扩散.

2.2 污染物春夏秋冬季日变化分析

O_3 春夏秋冬季的日变化均呈现明显的单峰型变化规律(图2), 峰值出现在15:00~16:00, 谷值出现在早上的06:00~09:00, 各时刻的平均浓度均为夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季, 这与殷永泉等^[9]对济南大气臭氧的观测结果一致. O_3 日变化振幅夏季最大, 为 $94.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 冬季最小, 为 $37.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. O_3 浓度的日变化与近地面大气光化学过程密切相关, 日出后随着太阳辐射强度的增大, O_3 前体物的光化学反应增强, 造成 O_3 浓度持续升高, 并在午后15:00左右出现最大值^[22], 然后逐渐降低, 由于在夜间大气化学对 O_3 的消耗以及近地面 O_3 的沉积作用, 导致 O_3 浓度在08:00之前形成低值区. O_x 在春、夏、秋、冬季的日变化规律与 O_3 相似(图2), 最大值出现在15:00~16:00, 最小值出现在05:00~06:00, 夏季日变化的振幅最大, 春秋季节次之, 冬季最小, 与安俊琳等^[19]在北京的观测结果一致.

由图2可以看出, NO_x 和 SO_2 在日变化形式上两个共同的特征: ①冬季的日变化振幅最大, NO 、 NO_2 、 NO_x 、 SO_2 分别为57.7、24.5、63.3、 $38.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 而夏季的日变化幅度最小, 各污染物分别为23.4、21.0、39.3、 $10.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; ②冬季上午的浓度峰值比其它季节要延后一两个小时. 这主要是由于冬季气温较低, 人们出行和生产活动较春夏秋季晚, 还有冬季大气扩散能力差, 夜间逆温严重, 大

气污染物浓度在区域内聚集增多。

NO 呈单峰型分布,表现出“早峰午谷”的变化特征. 峰值出现在早上的 08:00~09:00,该峰值主要是由于城市交通高峰期造成的,之后 NO 浓度迅速下降,一方面是由于太阳辐射增强,光化学反应加剧,NO 迅速消耗;另一方面大气对流层混合增强,近地面 NO 快速扩散稀释^[6],午后 16:00 浓度达到最低值,然后浓度又逐渐升高,夜间 NO 浓度变化不大,比较平稳. NO₂ 浓度的日变化特征大体上呈双峰型,上午峰值出现在 09:00~11:00,晚间峰值出现在 19:00~22:00. 上午的峰值主要来源于城市的

交通高峰排放,夜间的峰值主要来源于 NO 和 O₃ 的转化,夜间由于太阳辐射的消失,NO₂ 的光解反应停止,同时 NO 和 O₃ 反应生成 NO₂,由此造成夜间 NO₂ 的高值. NO_x 日变化模态与 NO 一致,在 15:00 左右出现低值,主要是由于这个时段 NO_x 向亚硝酸(HNO₂)的转化造成的^[23].

SO₂ 日变化特征与 NO 相似,呈单峰型变化模态. SO₂ 在上午 10:00~12:00 之间浓度最高,而后随着空气对流加强以及早高峰过后机动车流量的减少,浓度逐渐降低,并在 17:00~20:00 之间降到最低值,然后略有升高并在整个夜间维持相对稳定.

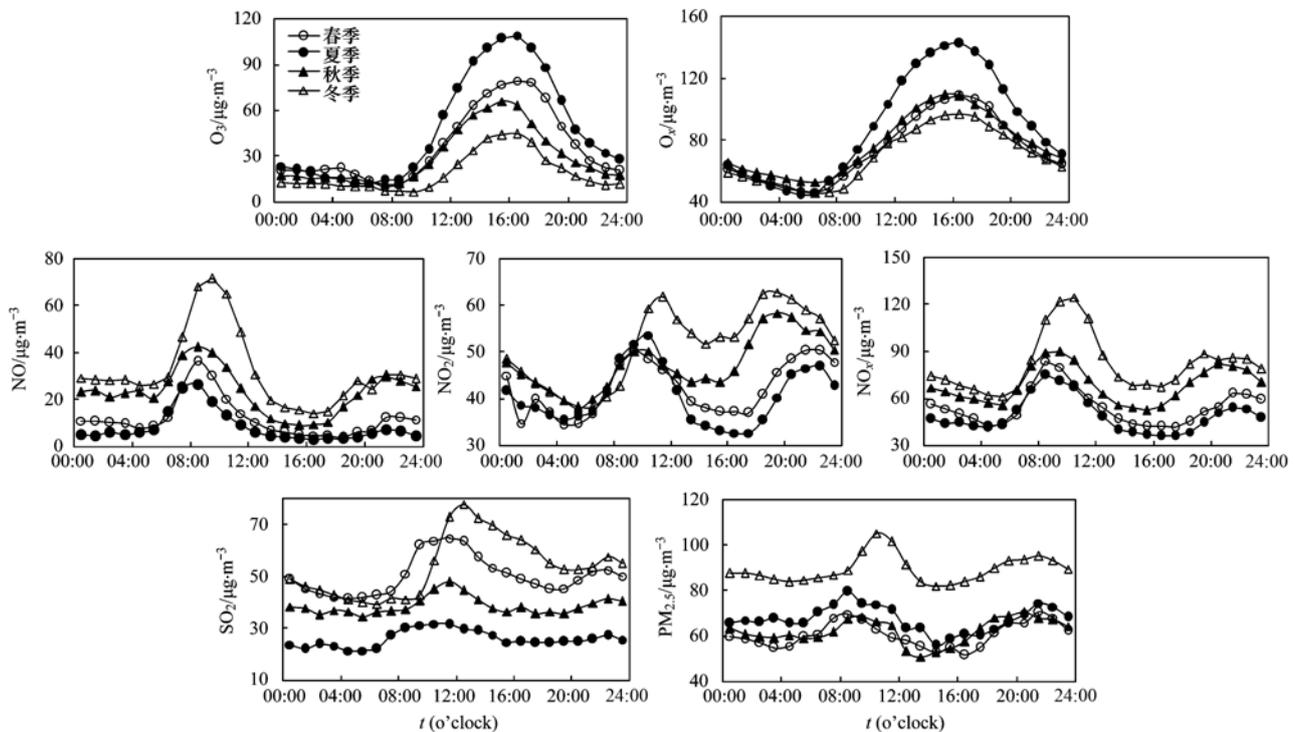


图 2 2012 年春夏秋冬四季 NO、NO₂、NO_x、O₃、O_x、SO₂ 和 PM_{2.5} 浓度日变化趋势

Fig. 2 Daily variation of NO, NO₂, NO_x, O₃, O_x, SO₂ and PM_{2.5} during different seasons in 2012

由图 2 可以看出,PM_{2.5} 日变化特征与 NO₂ 相似,呈双峰型. 冬季 PM_{2.5} 浓度明显高于其它 3 个季节,春、夏、秋季峰值出现在早上的 8:00,冬季峰值出现在早上的 10:00,早上的峰值主要来源于城市出行高峰期机动车尾气排放向大气环境中不断输入细颗粒物,以及道路扬尘等^[24-25],而后逐渐降低,在午后 14:00 左右浓度降到最低,然后持续升高并在 21:00 达到夜间峰值.

2.3 工作日与周末 O₃、NO 及 NO₂ 日变化分析

有研究指出^[26,27],受人们活动规律的影响,NO、NO₂ 和 O₃ 浓度在周末(周六、周日)和工作日(周一~周五)变化规律不同. 图 3 展示了重庆市北碚

区 NO、NO₂ 和 O₃ 在 2012-01~2013-02 工作日和周末的变化情况,从图 3 看出,工作日及周末 NO、NO₂ 和 O₃ 浓度的日变化规律非常相似(相关系数分别为 0.977、0.989 和 0.996),但通过对 *t* 检验分析表明,NO 工作日与周末相比,并无明显差异($P = 0.14$),N₂O 工作日显著高于周末($P = 0.03$),而 O₃ 则为工作日极显著低于周末($P < 0.001$).

Solomon 等^[28]研究发现由于人们在工作日的活动大于周末,排放的汽车尾气和工业废气较多,工作日大气中的 NO_x 浓度一般高于周末,与本研究相似,但安俊琳等^[27]通过对北京大气资料的分析却发现了相反的研究现象,即周末大气中 NO_x 的浓度高

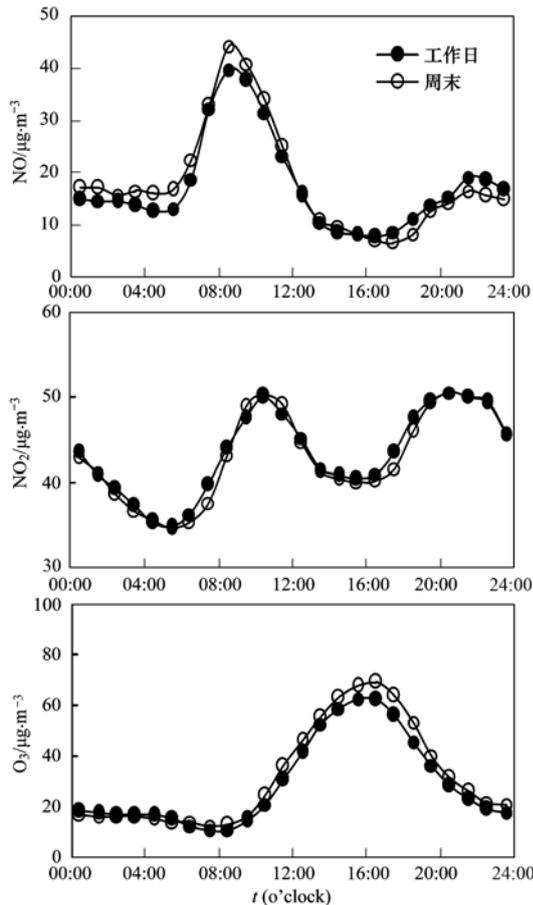


图3 2012-01 ~ 2013-02 工作日和周末 NO、NO₂、O₃ 浓度的日变化趋势

Fig. 3 Daily variation of NO, NO₂ and O₃ in weekdays and on weekends during 2012-01-2013-02

于工作日,并认为这是由城市车流量差异造成的。数据分析表明,北碚大气 O₃ 浓度工作日极显著低于周末,造成这种现象的原因可能与大气能见度有关^[29],工作日由于机动车尾气及工业废气排放量大,颗粒物排放源强,浓度较高使得大气能见度降低,大气光化学反应减弱,从而导致 O₃ 浓度下降。殷永泉等^[9]通过对济南市大气 O₃ 观测发现,12:00 ~ 19:00 周末 O₃ 浓度高于平日,而 20:00 ~ 次日 11:00 平日 O₃ 浓度高于周末; Atkinson-Palombo 等^[26]利用美国亚利桑那州 2001 ~ 2003 年的观测资料,发现周末 O₃ 浓度显著高于工作日,而安俊琳等^[27]利用北京 2004 ~ 2005 年的观测资料,发现周末与工作日 O₃ 浓度并不存在显著性差异,由此可见,不同城市因为 O₃ 前体物排放源及大气环境变化规律各异,导致 NO_x 和 O₃ 浓度的变化也不完全一致。

2.4 各污染物以及气象因素之间的相关性分析

气象条件是影响近地面大气中各污染物浓度的重要因素之一^[30],表 2 给出了春、夏、秋、冬季各污染物浓度小时平均值与气象要素小时均值相关系数的统计结果。相关分析表明,在一年四季,气温、风速及相对湿度都是影响大气 O₃ 浓度的重要因素,其中,气温和相对湿度与 O₃ 的相关系数大于风速,表明气温和相对湿度的贡献远高于风速,说明近地层 O₃ 浓度主要受局地气象要素影响,在高温干燥的大气条件下,容易出现 O₃ 的高值。NO_x 和气象要素的关系与 O₃ 正好相反,表明低温、高湿、大风条件下,容易导致 NO_x 的累积。大气中过氧自由基 HO₂、RO₂ 引起了 NO 向 NO₂ 转化,NO₂ 的光解导致了 O₃ 的生成,这是对流层中 O₃ 产生的关键性反应^[31]。气温高时太阳辐射强度较大,大气光化学反应增强;而相对湿度高时由于大气中的水汽影响太阳紫外辐射在光化学反应的作用,导致大气光化学反应减弱。NO_x 作为臭氧的前体物,与 O₃ 呈此消彼长的关系(一年四季 NO、NO₂、NO_x 和 O₃ 均呈极显著负相关,数据未列出)。漏嗣佳等^[32]研究表明,在中国西部 NO_x 的减少会使得 O₃ 浓度显著降低,因此可通过 NO_x 的减排控制地面 O₃ 浓度。PM_{2.5} 与气温的相关性并不大,但与相对湿度呈极显著正相关,并表现为在冬季最强,夏季较弱(表 2)。重庆由于特殊的自然地理环境,空气湿度大而风速较小,尤其是在冬季山谷风的作用下,大气中的水汽过于充沛,而多发大雾天气,从而加剧细颗粒物的污染。SO₂ 与各气象要素的关系在不同的季节表现不同,可能是由于在不同的大气环境条件下,气象因素对 SO₂ 的排放、传输、扩散及转化等方面的影响机制不同所致。

为了分析风向对污染物的影响,图 4 给出了不同季节风向的频率、风速及对应污染物的浓度平均值。风向频率统计显示,北碚在全年四季上静风出现的频率均最高,主导风向春冬季为东南风、东南偏南风以及南风,夏季为西北偏北风和北风,秋季为东南偏南风、南风及西南偏南风。不同季节在同一风向上风速变化较小,而同一季节在不同风向上风速则有明显差异,风速总体上呈现为春季 > 夏季 > 秋季 > 冬季。

通过表 2 可以看出,风速对不同的大气污染物具有不同的效应。风速除与 O₃ 呈正相关外,与其它污染物均呈负相关。风速一般对污染物具有稀释扩散的作用,因此风速一般与污染物呈负相关,但与 O₃ 呈正相关,可能是大风引起了 O₃ 的动力输送,因

表 2 2012 年春夏秋冬各污染物浓度小时均值以及气象要素小时均值相关系数统计¹⁾

Table 2 Correlation coefficients among pollutants and meteorological parameters based on hourly mean data during different seasons in 2012

季节	气象要素	NO	NO ₂	NO _x	O ₃	SO ₂	PM _{2.5}
春季	气温	-0.21 **	-0.08 **	-0.17 **	0.60 **	0.11 **	-0.02
	风速	-0.14 **	-0.25 **	-0.22 **	0.26 **	0.00	-0.08 **
	相对湿度	0.13 **	0.15 **	0.16 **	-0.60 **	-0.23 **	0.16 **
夏季	气温	-0.17 **	-0.18 **	-0.20 **	0.62 **	-0.23 **	-0.05
	风速	-0.11 **	-0.19 **	-0.19 **	0.07 *	-0.02	-0.12 **
	相对湿度	0.25 **	0.24 **	0.28 **	-0.59 **	0.08 **	0.08 **
秋季	气温	-0.33 **	-0.18 **	-0.28 **	0.70 **	-0.18 **	-0.01
	风速	-0.14 **	-0.26 **	-0.19 **	0.25 **	-0.05	-0.10 *
	相对湿度	0.30 **	0.23 **	0.30 **	-0.50 **	0.28 **	0.18 **
冬季	气温	-0.31 **	-0.25 **	-0.32 **	0.64 **	-0.35 **	-0.01
	风速	-0.13 **	-0.18 **	-0.13 **	0.15 *	0.06	-0.04
	相对湿度	0.24 **	0.18 **	0.25 **	-0.56 **	0.35 **	0.33 **

1) * 表示显著; ** 表示极显著

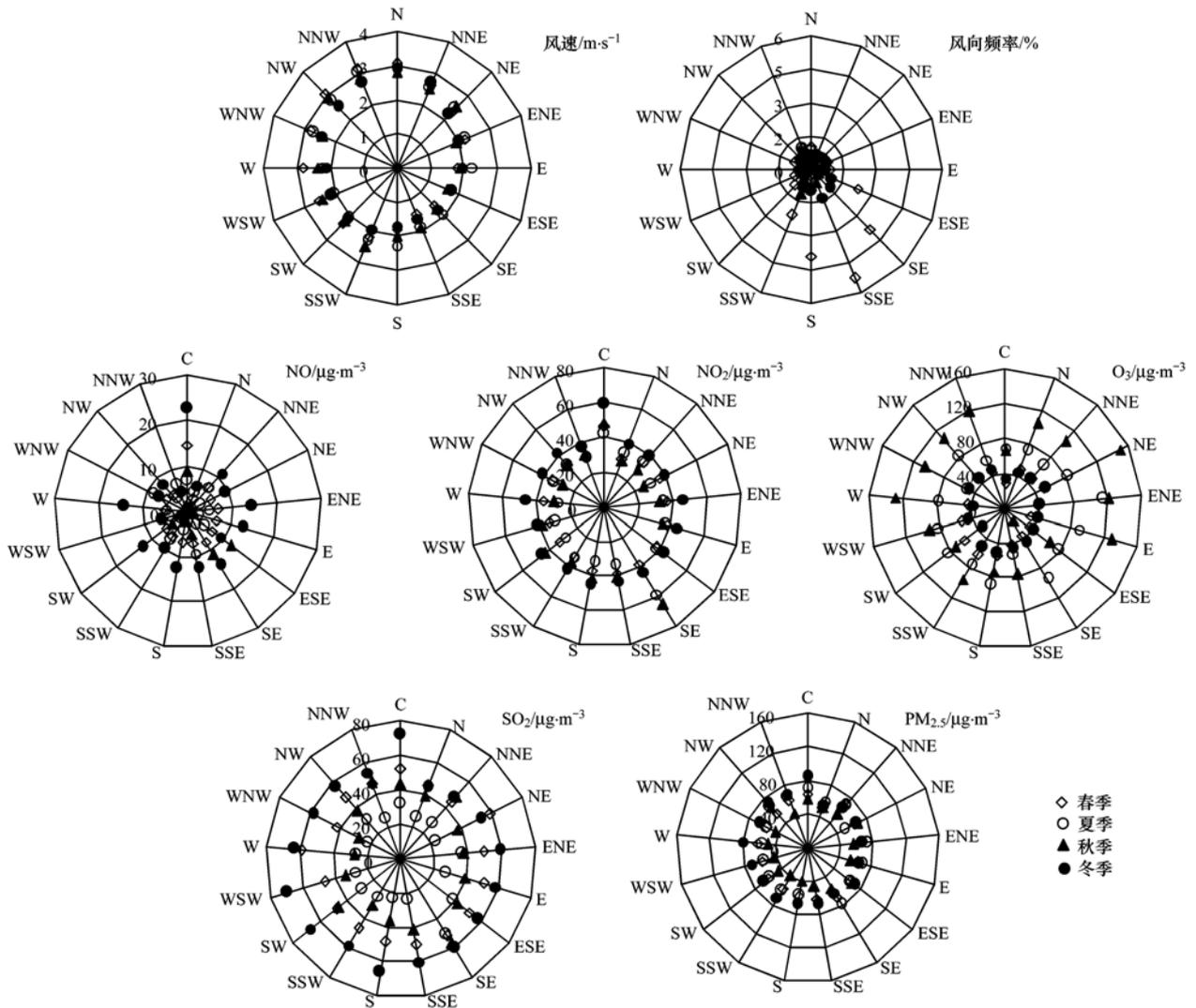


图 4 污染物浓度与风向的关系

Fig. 4 Relationship between the atmospheric pollutants and wind directions

为气流来源不同也是影响大气污染物浓度的一个重要因素^[33,34]。静风和不同风向污染物的浓度值可以在一定程度上反映污染物的局地排放和区域输送的相对贡献^[35],静风时 NO、NO₂、SO₂ 和 PM_{2.5} 浓度高于主导风向上污染物的浓度,臭氧相反,表明 NO_x、SO₂ 和 PM_{2.5} 主要是由局地排放产生,而臭氧除了本地产生外,大气输送也是一个重要来源。由图 4 风向频率可以看出,北碚年盛行风向为南偏东风,北碚的东南和南面为重庆市的重工业区域,污染排放较重,北碚处在盛行风向的下风向,通过大气输送为北碚带来高浓度的臭氧气团。但本研究关于风向与污染物浓度的关系主要为定性分析,如果要确定二者之间的定量关系,还必须要搞清楚输送途径、条件及协同作用等,还需要结合轨迹模式及化学模式等进一步的分析来进行理论推断和验证。

3 结论

(1) 在 2012-01 ~ 2013-02 观测期间,北碚大气中细粒子污染最严重,其次为 NO_x、O₃ 污染状况较轻,SO₂ 质量状况最好。

(2) 大气污染物日变化特征不尽相同。O₃ 与 O_x 为单峰型,峰值出现在下午 16:00; NO 和 NO_x 表现为“早峰午谷”的单峰型; SO₂ 呈“早峰晚谷”的单峰型; NO₂ 及 PM_{2.5} 为早晚两个峰值的双峰型。

(3) NO 浓度工作日和周末的日变化没有明显差异,NO₂ 浓度为工作日显著高于周末,O₃ 则是工作日极显著低于周末。

(4) 气温、风速以及相对湿度是影响 NO_x 和 O₃ 的重要气象因素,高温、大风以及低湿条件下,容易出现 O₃ 的高值,而 NO_x 则正好相反; PM_{2.5} 与气温和风速呈负相关,而与相对湿度呈正相关; SO₂ 与各气象要素的关系在不同的季节表现不同。

参考文献:

- [1] 潘月鹏,王跃思,胡波,等. 北京奥运时段河北香河大气污染观测研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(1): 1-9.
- [2] 殷永泉,李昌梅,马桂霞,等. 城市臭氧浓度分布特征[J]. 环境科学, 2004, **25**(6): 16-20.
- [3] 吉东生. 北京及周边地区大气污染联网观测与研究[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2008.
- [4] 林海峰,辛金元,张文煜,等. 北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(3): 826-834.
- [5] 陶俊,柴发合,高健,等. 16 届亚运会期间广州城区 PM_{2.5} 的化学组分特征及其对霾天气的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 409-415.
- [6] 杜吴鹏,王跃思,宋涛,等. 夏秋季石家庄大气污染变化特征观测研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(7): 1409-1416.
- [7] 辛金元,王跃思,唐贵谦,等. 2008 年奥运期间北京及周边地区大气污染物消减变化[J]. 科学通报, 2010, **55**(15): 1510-1519.
- [8] 周瑞,辛金元,邢立亭,等. 唐山工业新区冬季采暖期大气污染变化特征研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 1874-1880.
- [9] 殷永泉,单文坡,纪霞,等. 济南大气臭氧浓度变化规律[J]. 环境科学, 2006, **27**(11): 2299-2302.
- [10] 安俊琳,杭一纤,朱彬,等. 南京北郊大气臭氧浓度变化特征[J]. 生态环境学报, 2010, **26**(6): 1383-1386.
- [11] 王杨君,董亚萍,冯加良,等. 上海市 PM_{2.5} 中含碳物质的特征和影响因素分析[J]. 环境科学, 2010, **31**(8): 1755-1761.
- [12] 朱李华,陶俊,张仁健,等. 冬夏季广州城区碳气溶胶特征及其与 O₃ 和气象条件的关联[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(10): 1942-1949.
- [13] 戴伟,高佳琪,曹罡,等. 深圳市郊区大气中 PM_{2.5} 的特征分析[J]. 环境科学, 2012, **33**(6): 1952-1957.
- [14] 刘永祺,李大鹏,倪长健. 重庆市大气污染特征及其影响因素分析[J]. 四川环境, 2009, **28**(3): 28-32.
- [15] 黄伟,翟崇治,余家燕,等. 重庆区域性灰霾天气下大气污染分析初探[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2012, **37**(7): 142-146.
- [16] 刘彦蓉. 重庆市能源结构变化对大气环境质量的影响[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2006, **23**(1): 35-39.
- [17] 傅强,陈雪娇. 重庆市产业结构演变对大气环境的影响分析[J]. 中国科技论坛, 2011, (8): 36-41.
- [18] 刘成伦,杜嫔. 重庆市机动车尾气对大气环境的影响分析及减缓措施[J]. 环境污染与防治, 2005, **27**(7): 523-525.
- [19] 安俊琳,王跃思,李昕,等. 北京大气中 NO、NO₂ 和 O₃ 浓度变化的相关性分析[J]. 环境科学, 2007, **28**(4): 706-711.
- [20] Streets D G, Waldhoff S T. Present and future emissions of air pollutants in China: SO₂, NO_x, and CO [J]. Atmospheric Environment, 2000, **34**(3): 363-374.
- [21] 王艳秋,杨晓丽. 哈尔滨市降水形势对大气污染物浓度稀释的影响[J]. 自然灾害学报, 2007, **16**(5): 65-68.
- [22] Leighton P A. Photochemistry of air pollution[M]. New York: Academic Press, 1961.
- [23] Clapp L J, Jenkin M E. Analysis of the relationship between ambient levels of O₃, NO₂ and NO as a function of NO_x in UK [J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**(36): 6391-6405.
- [24] Louie P K K, Watson J G, Chow J C, et al. Seasonal characteristics and regional transport of PM_{2.5} in Hong Kong[J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(9): 1695-1710.
- [25] Duan F K, Liu X D, Yu T, et al. Identification and estimate of biomass burning contribution to the urban aerosol organic carbon concentrations in Beijing[J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(9): 1275-1282.
- [26] Atkinson-Palombo C M, Miller J A, Robert C Jr. Quantifying the ozone “weekend effect” at various location in Phoenix, Arizona [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(39): 7644-7658.

- [27] 安俊琳, 王跃思, 李昕, 等. 北京大气 O_3 与 NO_x 的变化特征 [J]. 生态环境, 2008, **17**(4): 1420-1424.
- [28] Solomon P, Cowling E, Hidy G, *et al.* Comparison of scientific findings from major ozone field studies in North America and Europe [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34** (12-14): 1885-1920.
- [29] Qin Y, Tonnesen G S, Wang Z. Weekend/weekday differences of ozone, NO_x , CO, VOCs, PM_{10} and the light scatter during ozone season in southern California [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38** (19): 3069-3087.
- [30] 王莉莉, 王跃思, 王迎红, 等. 北京夏末秋初不同天气形势对大气污染物浓度的影响 [J]. 中国环境科学, 2010, **30** (7): 924-930.
- [31] 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.
- [32] 漏嗣佳, 朱彬, 廖宏. 中国地区臭氧前体物对地面臭氧的影响 [J]. 大气科学学报, 2010, **33**(4): 451-459.
- [33] Li C, Marufu L T, Dickerson R R, *et al.* *In situ* measurements of trace gases and aerosol optical properties at a rural site in northern China during East Asian Study of Tropospheric Aerosols: An International Regional Experiment 2005 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112** (D22): D22S04, doi: 10.1029/2006JD007592.
- [34] Wang W T, Primbs T, Tao S, *et al.* Atmospheric particulate matter pollution during the 2008 Beijing Olympics [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, **43** (14): 5314-5320.
- [35] 刘洁, 张晓玲, 徐晓峰, 等. 北京地区 SO_2 、 NO_x 、 O_3 和 $PM_{2.5}$ 变化特征的城郊对比分析 [J]. 环境科学, 2008, **29** (4): 1059-1065.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron: Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangnu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Xiong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《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)

2014年3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 15, 2014

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