

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 排放测量	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子轲, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)
黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合	陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)
沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)
南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析	秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)
太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征	曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)
2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)
机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成	袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)
DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响	楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)
紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附	李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)
三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征	江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)
三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)
高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例	孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)
不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应	季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)
丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估	赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)
滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价	王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)
粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险	阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)
鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应	刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)
周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响	贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)
溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响	王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)
微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响	李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)
城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响	唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)
两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究	孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)
巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II)	谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)
改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征	唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)
UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性	任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)
对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究	王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)
高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性	牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)
硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响	周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)
单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响	马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)
钛盐混凝剂调对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制	王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)
城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律	孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)
低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析	信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆峰 (2259)
微丝菌 (<i>Microthrix parvicella</i>) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化	王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)
基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响	吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)
1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性	黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)
长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征	韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)
有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响	张名豪, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)
生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响	张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘恩新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)
多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源	孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)
苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征	陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)
河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)
杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价	龚丹丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)
土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力	田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)
添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响	陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)
应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响	尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽蛟, 孙国新, 崔岩山 (2353)
不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系	辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)
芘胁迫对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响	潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚阗, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)
维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化	徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)
苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素	许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)
g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ 复合物的制备及可见光催化降解 MO	张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)
海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价	耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)
《环境科学》征订启事 (2130) 《环境科学》征稿简则 (2251) 信息 (2178, 2344)	

2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系

程念亮^{1,2,3}, 李云婷¹, 张大伟^{1*}, 陈添⁴, 王欣¹, 郇宁¹, 陈晨¹, 孟凡^{2,3*}

(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. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 3. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 4. 北京市环境保护局, 北京 100048)

摘要: 根据 2014 年 1~12 月北京市环境保护监测中心监测的 O_3 浓度数据, 综合探讨了北京市 O_3 的时空分布及其与气象条件的关系。结果表明: 2014 年北京市全年 O_3 小时平均浓度约为 $56.18 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, O_3 超标日小时平均浓度约为 $148.05 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 且超标日主要集中在 5~9 月; 超标日 O_3 日变化呈现单峰型分布, 06:00 或 07:00 为低谷, 15:00、16:00 左右达到峰值; 超标日 O_3 浓度在 09:00~23:00 明显高于夏季同时间段浓度平均; 空间分布上中心城区站点 O_3 浓度相对较低, 而城区西部植物园站点浓度最高; 统计的 2014 年北京市 O_3 超标日地面形势场 3 种类型高压类、低压类、均压类各占 16%、36%、48%; 超标日 O_3 浓度与气压、湿度、能见度呈负相关关系, 与风速、温度呈正相关关系; 2014 年 5 月 29 日~6 月 1 日北京市发生的一次 O_3 重污染过程是由本地光化学污染及区域输送造成的, 区域输送对北京市 O_3 浓度有着十分重要的影响。

关键词: 臭氧; 空间分布; 光化学污染; 北京; 天气型

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2041-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.06.006

Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014

CHENG Nian-liang^{1,2,3}, LI Yun-ting¹, ZHANG Da-wei^{1*}, CHEN Tian⁴, WANG Xin¹, HUAN Ning¹, CHEN Chen¹, MENG Fan^{2,3*}

(1. Beijing Key Laboratory of Airborne Particulate Matter Monitoring Technology, Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China; 2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 4. Beijing Environmental Protection Bureau, Beijing 100048, China)

Abstract: The spatial-temporal distribution characteristics of O_3 and the correlations between O_3 and meteorological elements in Beijing urban area were investigated based on the hourly O_3 monitoring data from January to December in 2014 released by Beijing Municipal Environmental Monitoring Center. The annual concentration of O_3 in Beijing was about $56.18 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in 2014. In the over polluted days during May and September, the O_3 concentration could reach as high as $148.05 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. The diurnal distribution of ozone presented a clear unimodal pattern with its peak appearing at 15:00 or 16:00 and trough at 06:00 or 07:00 and the concentrations of O_3 during 09:00 and 23:00 was significantly higher than those in the Summer time. For the spatial distribution of O_3 , the concentration was lower in central urban area with the highest concentration appearing at plant garden site in the west of the urban area. Ground weather type of O_3 over polluted days was divided into three categories including high-pressure, low-pressure, equalizing field, which accounted for 16%, 36%, 48%, respectively. The concentration of O_3 was negatively correlated with the air pressure, humidity and visibility while it was positively correlated with the wind speed and temperature. In one heavy pollution episode of O_3 caused by local photochemical pollution and regional transport from May 29th to June 1st in 2014 in Beijing, regional transport showed a very important influence on the concentration of O_3 in Beijing.

Key words: O_3 ; spatial distribution; photochemical pollution; Beijing; weather type

作为大气光化学污染的主要产物, 臭氧(O_3)是大气中微量组分之一; 高浓度 O_3 将对公众健康、农业生产、以及生态环境造成较为严重的危害^[1,2], 近地面 O_3 浓度升高及大气氧化性增强现象引起越来越多的关注^[3]。Vingarzan 等^[4]指出 O_3 的背景浓度在过去的 30 年以 0.5%~2% 每年的速率增长; Zhang 等^[5]发现中国已经成了 O_3 重灾区, O_3 污染问题较为突出; 邵敏等^[6]指出 2005~2010 年北京

收稿日期: 2015-12-28; 修订日期: 2016-01-19

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); 北京市空气质量达标规划项目(Z131100005613046); 北京市监测中心课题项目(2016-01-01); 北京市 VOCs 基准监测体系评估及环境水平状况研究项目; 北京市共青团优秀青年人才培养项目

作者简介: 程念亮(1987~), 男, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为空气质量预警预报及数值模拟, E-mail: 15001195306@163.com

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

市臭氧白天体积分数在 $40 \times 10^{-9} \sim 60 \times 10^{-9}$ 之间, 年增长率 6%。我国东部地区特别是京津冀地区的区域性光化学污染呈加重态势。

近十多年来, 国内外学者针对北京及周边地区 O_3 浓度变化特征做了大量研究。周秀骥等^[7]发现北京市近地层大气 O_3 浓度主要决定于地面总辐射量控制下的光化学反应过程; 刘小红等^[8]对影响北京市大气污染的气象因子分析后发现边界层 O_3 浓度还受到高层垂直向下输送的影响; 安俊琳等^[9]发现北京市夏季边界层 O_3 主要来源于局地光化学生成, 且夏季大气光化学污染最为严重; 王自发等^[10]利用嵌套网格空气质量预报模式系统(NAQPMS)模拟发现风场是影响周边地区 O_3 污染输送的主要气象因素, 保定市对北京市区和远郊最大落区的最大贡献率分别达到了 28.1% 和 59.5%; Tang 等^[11]对 2001~2006 年北京市 O_3 浓度特征进行分析后, 发现近 6 年间北京市 O_3 的体积分数平均为 $(26.6 \pm 5.9) \times 10^{-9}$; 唐贵谦等^[12]利用 2008 年 7 月~2008 年 9 月北京市 4 个站点的观测数据分析发现低压前部(主要是蒙古气旋)和高压前部分别是造成北京市臭氧浓度高值和低值的主要背景场; Xu 等^[13]采用 CMAQMADRID 过程分析模块 IPR 和 IRR 研究北京市区大气 O_3 的生成过程发现边界层内呈现出较强的大气氧化性且 O_3 生成由 VOCs 控制的特征; 聂滕等^[14]利用 Models-3/CMAQ 模式系统分析了北京夏季臭氧控制区空间分布的特征, 发现从北京市城近郊区到远郊区县, O_3 生成由 VOCs 控制逐渐转变为 VOCs 和 NO_x 共同控制。这些研究多基于少数几个观测站点或数值模式对 O_3 浓度及其影响因素进行分析, 且多侧重于 O_3 化学特征及案例过程分析, 而对 O_3 浓度空间分布及其与气象要素之间的关系讨论较少, 研究表明天气背景场及地面风、温、压、湿对 O_3 及前体物的浓度影响较大^[15]。目前国内针对天气型与 O_3 浓度关系的研究(国内研究主要集中在颗粒物上)更少且缺乏对北京市 O_3 多点位、长时间序列的观测分析^[16]。

新修订的《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)^[17]增加了 O_3 日最大 8h 浓度限值(O_3 8h)和细颗粒物($PM_{2.5}$)浓度限值, 针对目前国内 O_3 浓度变化及影响因素研究的不足, 急需开展近地层 O_3 的浓度水平、变化规律及其影响因素的相关研究。本文利用 2014 年一个完整自然年的北京市环境保护监测中心发布的城区所有站点的 O_3 监测数据, 针对

北京市 O_3 的污染问题, 从多个侧面展开分析研究, 较为全面系统地认识了北京市超标日 O_3 的浓度水平、时空分布特征, 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

北京市位于东经 $115.7^\circ E \sim 117.4^\circ E$, 北纬 $39.4^\circ N \sim 41.6^\circ N$, 地处华北平原西北端, 临近半沙漠化地带边缘, 地形为簸箕型, 三面环山, 平均海拔 43.5 m, 山地一般海拔 1 000~1 500 m, 地形较不利于污染物扩散。总面积 16 410.54 km², 国土面积 62% 为山区, 平原面积仅 6 000 km²; 森林资源总量偏低, 平原区森林覆盖率低(14.85%), 远低于全市覆盖率(37.6%), 大气自净功能较弱。位于北纬 40° 地区, 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, 又易受沙尘影响, 年均降水的 80% 集中在夏季 6、7、8 这 3 个月^[18]。

目前, 北京市的空气质量地面自动监测网络由 35 个站点组成, 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 个站点分布在城六区(东城、西城、朝阳、海淀、丰台、石景山); 西北部(昌平、延庆); 东北部(怀柔、密云、平谷、顺义); 东南部(通州、大兴、亦庄); 西南部(房山、门头沟), 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且所有站点全部经过 GPS 定位; 在 35 个站点中定陵、东四、官园、天坛、万寿西宫、奥体中心、农展馆、万柳、古城、顺义、昌平镇、怀柔镇共 12 个监测点位为国控站点, 这 12 个监测点位浓度的平均值用来评价北京市空气质量变化趋势。在 35 个站点中, 分布在城六区(城区, 下同)也共计 12 站点, 包括北部新区、香山(植物园)、东四、官园、天坛、万寿西宫、奥体中心、农展馆、万柳、古城、丰台花园、云岗, 站点位置见图 1。文中主要分析城区 12 站点(除丰台花园、云岗站点外其余均为国控站点)臭氧的浓度特征, 在定义超标日时以国控站点的浓度作为判据(国控站点臭氧超标时, 城区站点也超标), 在分析城区 12 站点空间分布时, 位于城区以外的站点的浓度作为插值边界。

1.2 监测仪器

北京市 O_3 监测数据为北京市大气环境空气自动监测网络监测的数据, 北京市周边地区 O_3 监测数

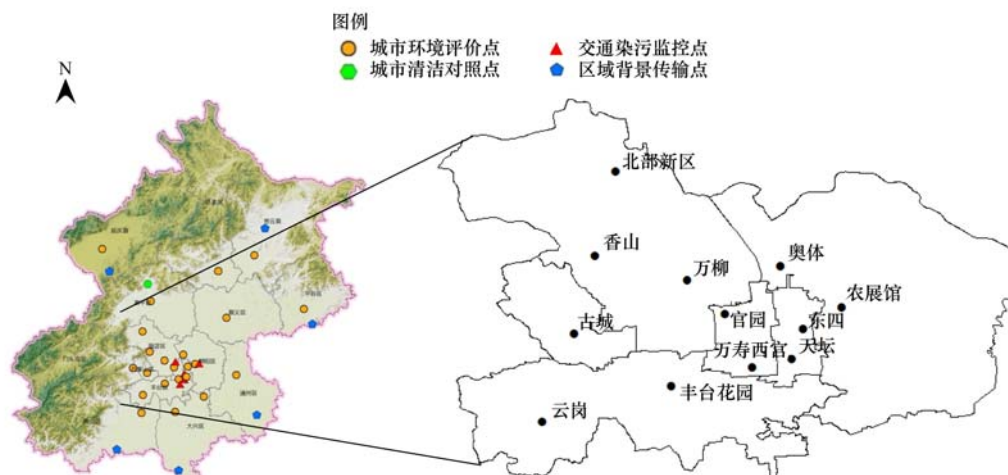


图1 观测站点分布和分类

Fig. 1 Distribution and classification of observation sites

据来自中国监测总站数据发布平台 (<http://106.37.208.233:20035/>). 北京市大气环境空气自动监测网络中 O_3 的监测仪器均为美国热电环境仪器公司 Thermo Fisher 生产的 49C O_3 分析仪, 检测方法为紫外光度法, 根据 254nm 的紫外光经过检测样品后紫外光被吸收的程度计算出 O_3 的浓度; 采用 Thermo Fisher 42C 基于化学发光法的 NO - NO_2 - NO_x 分析仪监测 NO 和 NO_2 浓度^[19]. 使用国家计量院生产的 NO 、 CO 和 SO_2 标气进行校准, 采样管路每月至少清洗一次; 根据 O_3 监测标准的质保要求, O_3 标准每年与中国计量科学研究院 O_3 一级标准 NIST SRP41 进行比对, 溯源后的 O_3 监测仪将作为 O_3 实验室标准, 对全市各子站的 O_3 标准进行传递, 此外对子站 O_3 监测仪器每 3 d 进行 1 次零跨校准、每 3 个月进行 1 次精密度审核、每 6 个月进行 1 次准确度检查以确保本市 O_3 监测工作的质量. $PM_{2.5}$ 质量浓度的监测均采用微量振荡天平 (TEOM) 方法的 Thermo 1405F 系列仪器, 每天 24 h 连续进行采样. 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)^[20] 进行, 设备由技术人员定期标定并及时维护保养. 气象资料为北京市观象台观测数据 (<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 O_3 时空分布

2.1.1 O_3 时间分布

根据环境保护部《环境空气质量指数 (AQI) 技术规范》(HJ 633-2012) 分级方法, $100 < AQI$ 即 160

$\mu g \cdot m^{-3} < O_3$ 8 h (O_3 最大 8 h 滑动平均) 或 $200 \mu g \cdot m^{-3} < O_3$ 1 h (O_3 最大 1 h 平均) 为超标日. 北京市环境保护监测中心 12 国控站点数据显示 2014 年北京市 O_3 8 h 超标日 73 d, O_3 1 h 超标日 67 d, O_3 8 h 与 O_3 1 h 同时超标 66 d. 从首要污染物变化上看, O_3 8 h 为首要污染物占全年首要污染物的 22% 左右, 其它首要污染物为 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 . 从 O_3 超标幅度上看, 超标日 O_3 1 h 均值在 $220 \sim 252 \mu g \cdot m^{-3}$ 左右, 超过 O_3 1 h 浓度标准 10% ~ 26%; 超标日 O_3 8 h 均值在 $178 \sim 211 \mu g \cdot m^{-3}$ 左右, 超过 O_3 8 h 浓度标准 11% ~ 32%; O_3 8 h 超标日 73 d 中, O_3 8 h 对应的空气质量指数为三级轻度污染的有 53 d, 四级中度污染 19 d, 五级重度污染 1 d. 从城区各站点月分布上看 (图 2), O_3 超标日主要集中在 5 ~ 9 月, 其中 2014 年城区 O_3 小时平均浓度为 $56.18 \mu g \cdot m^{-3}$, 5 ~ 9 月 O_3 小时平均浓度为 $87.83 \mu g \cdot m^{-3}$, 超标日 O_3 小时平均浓度为 $148.05 \mu g \cdot m^{-3}$. 4 月开始北京市 O_3 浓度明显上升, 5 ~ 6

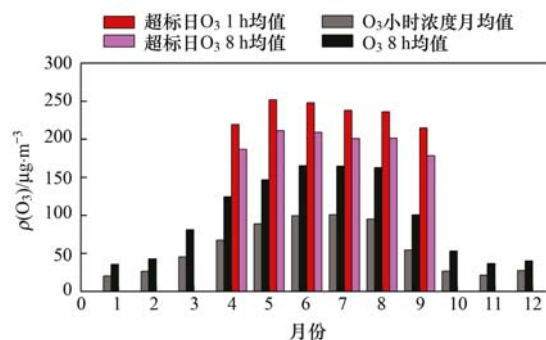
图2 2014 年北京市城区 O_3 浓度月变化曲线

Fig. 2 Monthly average concentration curve of ground level ozone in Beijing urban area in 2014

月 O₃ 维持较高的浓度,7 月 O₃ 浓度最高,7 月平均浓度为 101.00 μg·m⁻³,8~9 月 O₃ 浓度缓慢下降, O₃ 月平均浓度最低值出现在 1 月,为 20.31 μg·m⁻³. 受温度、光照和太阳辐射等气象因素影响,夏季光化学反应速率较高, O₃ 二次生成浓度相对较高^[21,22], 冬季紫外强度与平均温度均较低,光化学反应较弱;且在一定条件下,高浓度颗粒物导致气溶胶光学厚度增大,削弱 O₃ 光化学生成率,两者相互作用故冬季 O₃ 最低;此外 O₃ 浓度的高低也受其前体物浓度及颗粒物表面的非均相化学过程的影响^[23,24].

O₃ 在大气中发生复杂的光化学反应,包括自由基的生成、传递、终止反应等. 图 3 为不同季节、全年及超标日城区 O₃ 小时浓度的日变化曲线,由图 3 可知, O₃ 日分布呈现“单峰型”特点,且白天的浓度明显高于夜间. 在夜晚至清晨(22:00 至翌日 08:00) O₃ 维持较低浓度,约在 10~90 μg·m⁻³ 之间,主要是因为夜间受较弱光照较低温度影响生成 O₃ 的化学反应较弱,同时 NO 不断滴定消耗 O₃. 早上 09:00 开始受太阳辐射影响, O₃ 浓度缓慢上升,午后太阳辐射最强,在 O₃ 二次光化学反应作用下于 15:00、16:00 左右达到最大浓度,之后随着太阳辐射强度的减弱又继续降低. 从分季节来看,四季、全年及超标日 O₃ 浓度日分布均呈现规律的单峰型变化,没有出现多峰型分布. 从峰值平均浓度来看,不同季节

O₃ 浓度按升序排列依次为冬季<秋季<全年<春季<夏季<超标日,四季 O₃ 日变化曲线基本没有交叉重叠点,表明 O₃ 呈现出明显的季节差异特征,超标日 O₃ 浓度在 09:00~23:00 明显高于夏季,其它时段基本持平,这可能与超标日特殊的气象条件及污染输送有关^[25,26].

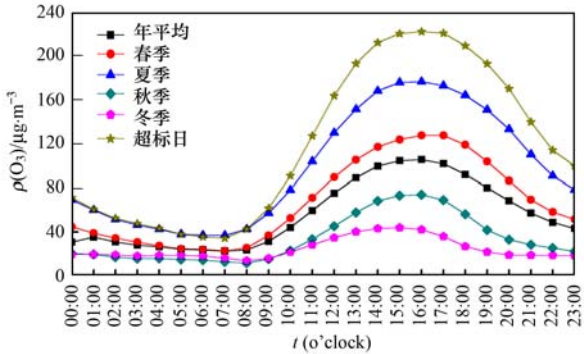


图 3 2014 年北京市城区 O₃ 小时浓度日变化曲线
Fig. 3 Diurnal variation of O₃ in Beijing urban area in 2014

总体来看,超标日 CO、NO、NO₂、O₃、OX(NO₂+O₃)浓度的日变化与夏季相似,但超标日 O₃ 浓度在 09:00~23:00 时段明显高于夏季同时间段浓度平均. 表 1 统计了超标日与夏季 O₃ 与 NO、NO₂、NO_x、OX 的平均浓度,可以发现,超标日 O₃ 与 NO、NO₂、NO_x、OX 的平均浓度均高于夏季均值,超标日 O₃ 浓度整体高于夏季可能与其特殊的气象条件与源排放的前体物浓度有关^[27],还需进一步分析研究.

表 1 北京市城区超标日与夏季 O₃ 与 NO、NO₂、NO_x、OX 的浓度统计

Table 1 Statistical results of O ₃ , NO, NO ₂ , NO _x and OX in summer and over O ₃ standard days in Beijing urban area						
项目	时间	O ₃ /μg·m ⁻³	CO/mg·m ⁻³	NO/μg·m ⁻³	NO ₂ /μg·m ⁻³	OX/μg·m ⁻³
日平均	夏季	98.62±51.94	0.88±0.05	3.52±2.89	42.43±10.54	141.05±42.30
	超标日	119.35±71.11	0.96±0.08	5.23±4.57	48.36±14.53	167.71±57.10
09:00~23:00	夏季	129.49±40.46	0.87±0.06	2.04±2.11	37.23±10.21	166.72±31.18
	超标日	162.61±53.63	0.95±0.09	2.48±2.42	40.56±13.08	203.16±40.82

2.1.2 O₃ 空间分布

图 4 为运用 Kriging 插值法得出的 2014 年北京市 O₃ 浓度空间分布,35 个监测点位中城区外监测站点浓度作为插值的边界浓度. 从中可知,从区域分布上看 O₃ 年均浓度的空间分布结构具有鲜明的特征,官园、万柳等中心城区站点浓度明显低于植物园等生态植被优良的北部、西部植物园等站点,中心城区奥体中心、东四等站点浓度水平较低;季节分布上,整体呈现出夏季>春季>秋季>冬季的特征;超标日 O₃ 浓度空间分布与夏季变化趋势基本一致,但浓度显著增大,不同站点超标日 O₃ 小时浓度是年均值的 3.3~5.5 倍,是夏季均值的 2.3~

2.6 倍.

图 5 显示了北京市城区不同站点 O₃ 浓度统计分布,各站点 O₃ 小时年均值在 40~74 μg·m⁻³ 左右, O₃ 8 h 年均值在 76~115 μg·m⁻³ 左右;不同站点超标日 O₃ 1 h 均值在 212~260 μg·m⁻³ 左右,是 O₃ 1 h 国家二级标准值(200 μg·m⁻³) 的 1.1~1.3 倍;不同站点超标日 O₃ 8 h 均值在 171~219 μg·m⁻³ 左右,是 O₃ 8 h 年均值的 1.9~2.3 倍,同时超过 O₃ 8 h 国家二级标准值 6.8%~36.9%. 超标日 O₃ 8 h 城区西部植物园站点浓度最高,万柳浓度最低,植物园站点 O₃ 8 h 浓度约为万柳站点的 1.3 倍. 局部地区站点 O₃ 浓度较高可能与背景浓

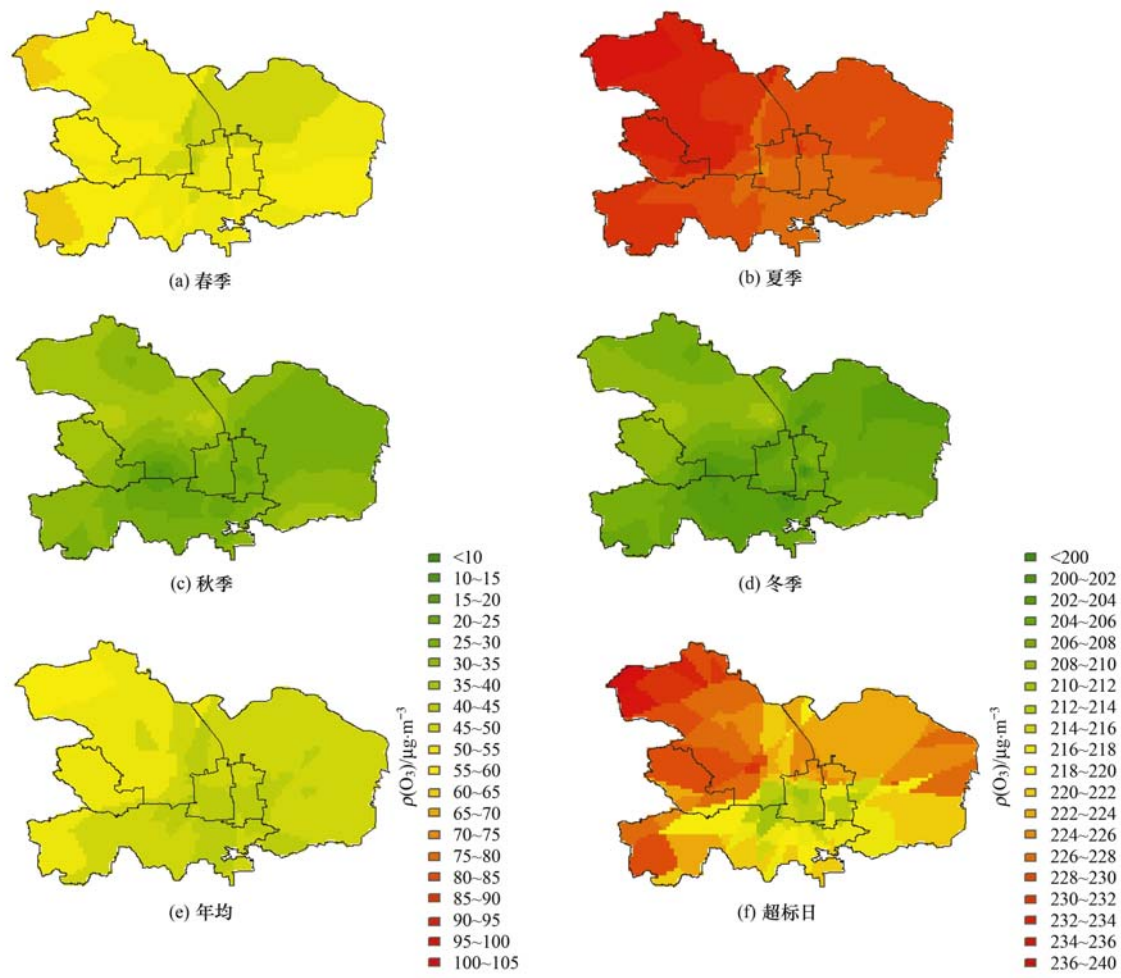


图 4 2014 年北京市城区 O_3 小时浓度空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of average ground level ozone concentration in Beijing in 2014

度、传输、主导风向及植物 VOCs 排放促进 O_3 生成有关^[28].

中心城区附近站点 O_3 浓度水平较低可能与机动车 NO_2 排放对 O_3 的消耗有关^[29].

安俊琳等^[30]发现受上游污染源的影响,当北京盛行东南、偏南和偏西气流时,容易造成高 O_3 体积分数;徐敬等^[31]研究发现当北京地区受西南气流

影响时,往往会导致下风向清洁地区出现极高的 O_3 浓度;Meng 等^[32]发现城市地区的气团在向下风向传输的过程中,经过“老化”,导致下风向的 O_3 浓度水平往往高于市区;Wang 等^[33]发现北京周边地形复杂,山谷风气流引起的南北风昼夜更替对 O_3 及其前体物分布及传输产生很大的影响. O_3 浓度空间分布与其前体物 NO_x 与 VOCs 空间分布有着密切的联

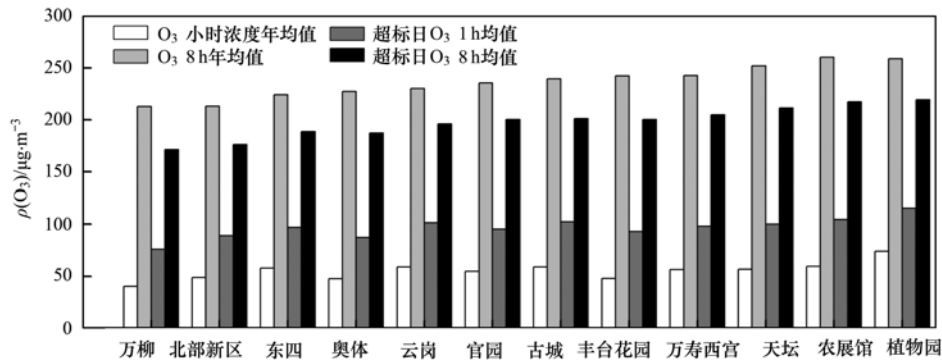


图 5 2014 年北京市城区不同站点 O_3 浓度统计分布

Fig. 5 Statistical results of average ground level ozone concentration in Beijing at different sites in Beijing in 2014

系. 在北京, NO_x 中心城区浓度水平较高, 消耗滴定了一定量的 O_3 , 存在由市中心的 NMHC 控制区向城郊、乡村 NO_x 控制区移动的特征^[14]; 而由于缺乏 VOCs 监测数据, 且研究表明不同方法统计的不同地区挥发性有机物的源排放量相差较大^[34]、不同方位低污染地区与高污染地区之间挥发性有机物的浓度存在较大差异^[35]、城市近地面 O_3 对 VOCs 浓度变化较为敏感等导致 VOCs 浓度分布对北京市 O_3 浓度空间分布的影响研究较为困难^[36], 在今后的工作中对 O_3 浓度的空间分布应深入分析, 并开展 VOCs 对北京地区 O_3 的光化学影响系统性研究, 量化 VOCs 各物种在 O_3 生成中的作用并识别来源.

2.2 O_3 超标日气象条件

2.2.1 O_3 超标日天气分型

由于天气系统是移动及演变的, 本研究在划分天气系统时一个自然日里绝大部分时间为某系统控制就定义它为该系统类型. 分析 O_3 超标日的地面和

高空天气形势发现, 北京市 O_3 超标日 500 hPa 高空形势多为纬向环流控制(平直环流, 弱脊, 弱西北气流等), 地面多处于弱气压梯度场或低压辐合区, 中低空风场以偏南风为主, 地面日均相对湿度较小、温度较高, 天气多为晴间多云. 本研究将影响北京市 O_3 超标日的地面天气形势分析归纳为以下 3 种天气类型: 高压类(高压后部、弱高压); 低压类(低压、低压底部、低压后部、低压前部); 均压类(均压场). 表 2 统计了 2014 年北京市 O_3 超标日(臭氧 3、4、5 级)地面天气类型出现的次数, 可以看出超标日地面气压形势场高压类、低压类、均压类这 3 种类型各占 16%、36%、48%, 各种地面天气形势中以均压(35 d)、低压前部(12 d)、弱高压(8 d)为主. 由于臭氧 3 级天数较多, 研究重点针对 2014 年北京市臭氧 4~5 级超标天的天气形势及臭氧浓度进行了逐日统计, 见表 3, 可以看出臭氧 4~5 级超标天地面及高空天气形势配置的特征与本研究总结的一致.

表 2 2014 年北京市臭氧超标日天气类型统计/d

分类	高压类		低压类				均压类
	高压控制 (弱高压+高压)	高压后部	低压	低压前部	低压后部	低压底部	
臭氧 3 级	7	1	5	10	2	2	26
臭氧 4~5 级	2	2	3	2	1	1	9
总计	12			26			35

表 3 2014 年北京市臭氧中度污染级别以上天气形势统计

Table 3 Statistics results of weather conditions over O_3 unhealthy standard in Beijing in 2014					
月份	日期	O_3 8 h 浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	地面天气形势	500 hPa 天气形势	地面天气
5	18	235	低压后部	偏西北气流	晴转多云
5	21	238	均压	偏西北气流	晴间多云
5	31	256	低压底部	偏西气流	多云转阴
6	5	222	低压	偏西北气流	晴转多云
6	14	227	均压	弱脊	晴转多云
6	15	243	均压	弱脊	多云转阴
6	24	223	均压	偏西气流	晴间多云
6	29	226	均压	偏西气流	多云间晴
6	30	249	均压	弱脊	多云
7	1	229	低压前部	偏西北气流	阴
7	14	221	低压	偏西气流	晴转多云
7	26	257	高压后部	弱脊	晴
7	27	257	低压前部	弱脊	多云转晴
8	2	217	均压	偏西气流	多云
8	7	227	高压	弱脊	多云转晴
8	16	224	高压	偏西气流	多云
8	20	229	均压	偏西气流	多云
8	21	228	均压	偏西气流	多云
8	23	220	低压	偏西气流	阴
5	30	311	高压后部	弱脊	晴间多云

2.2.2 O₃ 超标日气象要素

为进一步了解 O₃ 超标日形成的外部环境条件, 本研究在天气分型的基础上对 O₃ 超标日气象要素进行了初步统计(见表 4、图 6), O₃ 超标日气象要素特征主要表现为: ①O₃ 超标日地面风速表现为偏南风, 平均为 1.63 m·s⁻¹, 略小于全年平均风速 1.65 m·s⁻¹; ②地面相对湿度一般偏高, 超标日相对湿度多数在 26% ~ 77% 范围内, 平均为 56.7%, 比全年 54.4% 高约 2%; ③温度较高, 平均温度为 26.66℃, 高温有利于促进光化学反应生成臭氧, 24 h 平均变温为正变温(0.54℃), 正变温有利于维

持边界层稳定的结构^[37]; ④24h 地面变压相对比较平稳, 平均为负变压(−0.55 hPa), 负变压有利于臭氧及臭氧前体物汇聚; ⑤能见度与全年及达标日相比明显降低, 与 O₃ 达标天和全年相比, 能见度分别下降 29%、25%; ⑥O₃ 超标日 PBL 在 1 100 m 左右, 与 PM_{2.5} 重污染日 PBL 高度(300 ~ 600 m)明显增大; ⑦O₃ 超标日中均存在不同程度的逆温现象, 有时存在两重逆温, 平均贴地逆温强度为 1.1℃/100 m; 与 PM_{2.5} 对应的逆温情况相比, 逆温强度明显降低; 逆温引起的稳定层结不利于污染物的垂直扩散, 导致污染的持续^[38].

表 4 不同 O₃ 污染状况下北京市地面气象要素及 NO、NO₂、NO_x、OX、PM_{2.5} 的浓度统计

Table 4 Statistical results of O ₃ , NO, NO ₂ , NO _x , OX, PM _{2.5} and meteorological elements at different ozone concentrations													
项目	天数 /d	风速 /m·s ⁻¹	海平面气压 /hPa	相对湿度 /%	温度 /℃	24 h 变压 /hPa	24 h 变温 /℃	CO /mg·m ⁻³	O ₃ (8 h) /μg·m ⁻³	NO /μg·m ⁻³	NO _x /μg·m ⁻³	能见度 /km	PBL /m
O ₃ 达标天	292	1.67	1 015.85	52.10	14.90	0.07	-0.09	1.22	90.27	26.52	77.54	17.5	1 015.71
O ₃ 超标天	73	1.63	1 006.42	56.70	26.66	-0.55	0.54	1.25	207.30	13.41	62.26	12.4	1 108.15
O ₃ 全年	365	1.65	1 011.13	54.40	20.78	-0.24	0.22	1.23	148.79	19.96	69.90	16.6	1 061.93
PM _{2.5} 重污染日	44	1.69	1 014.49	68.63	7.54	-2.43	0.31	2.69	73.43	23.75	91.87	3.41	561.12

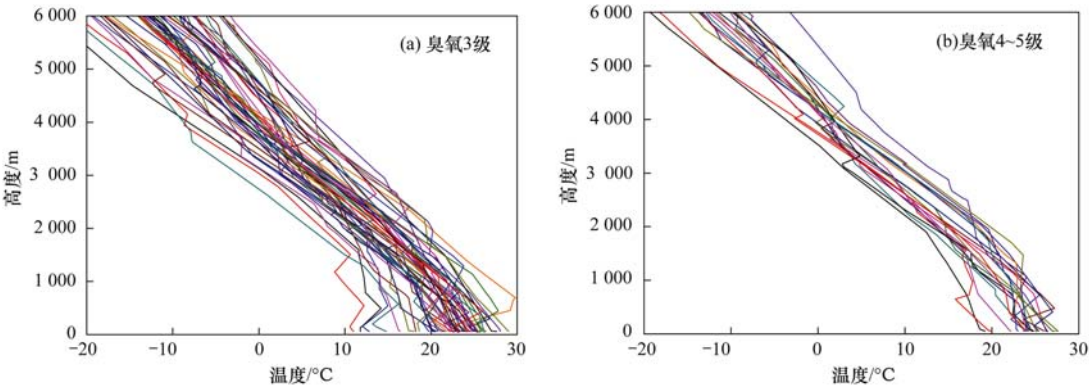


图 6 2014 年北京市臭氧超标日 08:00 温度廓线

Fig. 6 Temperature profiles at 08:00 on over O₃ standard days in Beijing in 2014

2.2.3 超标日 O₃ 浓度与气象要素关系

风速一定程度上反映了大气边界层湍流的强度. 从地面风速可以看出(图 7), 年均及超标日 O₃ 浓度随着风速的增大而升高, 超标日 O₃ 浓度上升趋势更明显, 风速每增大 1.0 m·s⁻¹, O₃ 8 h 浓度上升 11.63 μg·m⁻³. 且 O₃ 8 h 浓度在不同风速范围间的变化较大, 当地面风速在 1.1 ~ 2.0 m·s⁻¹ 范围内时, O₃ 8 h 浓度是 200.5 μg·m⁻³, 当地面风速在 2.1 ~ 3.0 m·s⁻¹ 范围内时, O₃ 8 h 浓度是 212.6 μg·m⁻³. 由于高浓度 O₃ 发生在较为稳定的天气状况下, 地面多为偏南风且平均风速低于 2.0 m·s⁻¹, 风速越大, 区域高浓度 O₃ 及其前体物易向北京输送, 导致北京 O₃ 浓度上升; 且风速较大还有利于降低 NO 对 O₃

滴定与消耗. 另外较高的风速抬高了大气边界层高度, 引起的上层 O₃ 向下输送也起着一定的作用^[25].
O₃ 和温度的日变化规律大致相似, 均在午后达到峰值且存在较好的正相关性; 夏季超标日 O₃ 浓度对温度的敏感性明显高于其它气象要素; 而从全年逐日 O₃ 浓度与温度的相关性上也可以看出, 温度每升高 1℃, O₃ 8 h 浓度上升 4.84 μg·m⁻³; 而查看超标日 O₃ 前体物 NO、NO₂ 和 CO 浓度发现, 其在低温时浓度较大, 高温时浓度较小, 这与安俊琳等^[30]的结论是一致的. O₃ 浓度受温度影响较大可能与温度越高、太阳辐射越强, 导致二次光化学反应越强, 二次生成的 O₃ 浓度越高有关^[31].
地面气压与 O₃ 的低浓度水平为明显的负相关

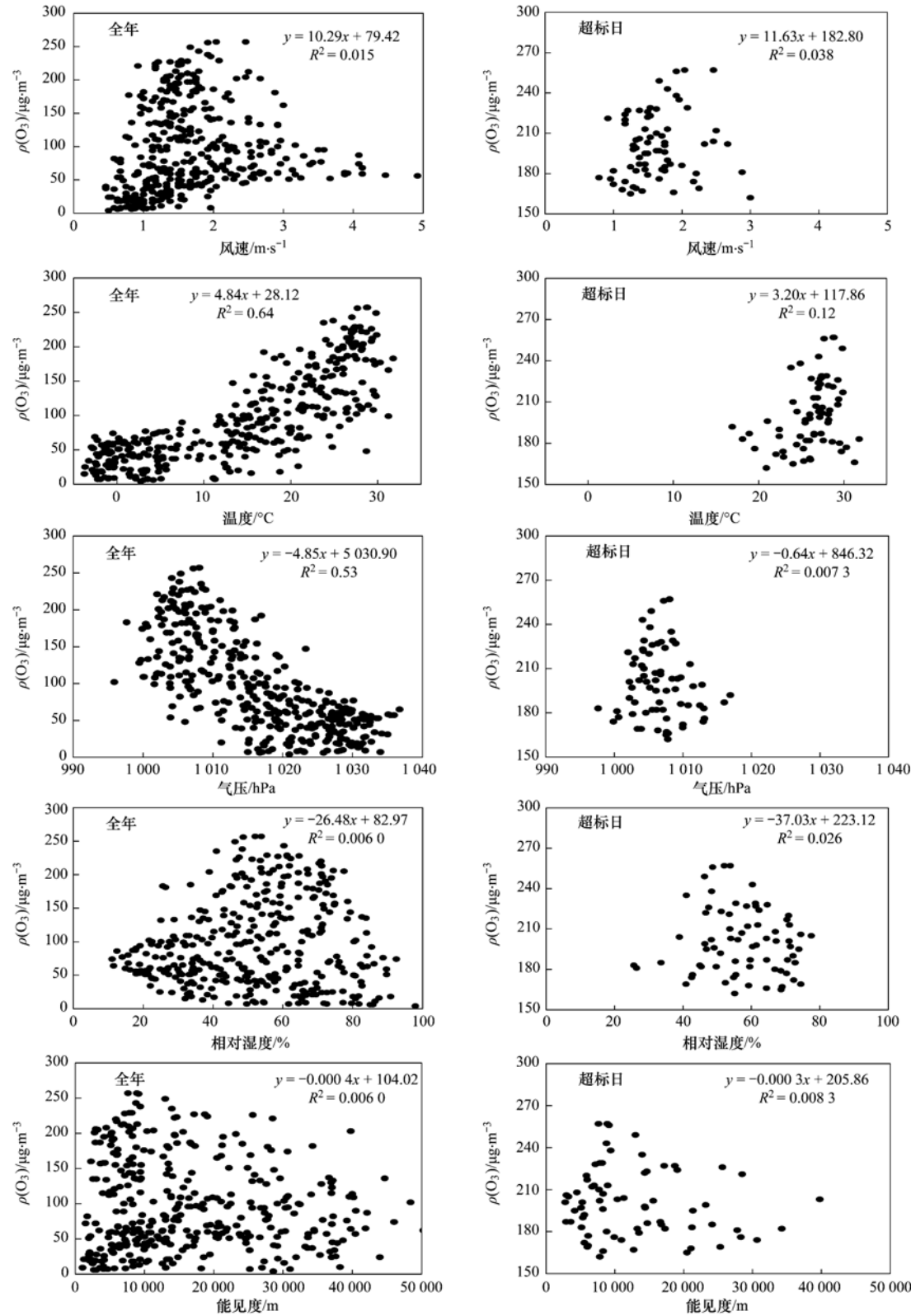


图 7 O_3 8 h 浓度与气象要素的散点图

Fig. 7 Scatter diagrams of O_3 8 h concentrations and meteorological elements

性,即气压越低, O_3 浓度水平越高,气压越高, O_3 浓度水平越低.从全年逐日 O_3 浓度与气压的相关关系上看,其相关性仅次于温度.但超标日天气形势稳

定,一定程度上导致 O_3 浓度与气压相关性(与全年平均相比)有所下降.

湿度也是影响 O_3 浓度水平的重要的气象要素,

湿度与 O_3 浓度整体表现为负相关性,即湿度越大, O_3 浓度越低. 大气中的水汽可影响太阳紫外辐射强度,在湿度较高情况下,空气中水汽所含的自由基 H 、 OH 等迅速将 O_3 分解为氧分子,降低 O_3 浓度. O_3 的高污染水平发生在较为干燥的气象条件下,这与高温条件是一致的. 安俊琳等^[30] 研究发现相对湿度 60% 左右存在光化学反应强度临界值, O_3 及其前体物在 60% 之后随相对湿度的增加而减小,高相对湿度将不利于 O_3 体积分数的积累.

O_3 浓度随能见度升高而增大;能见度高时,天气晴朗、云量少、太阳辐射较强,利于促进光化学反应生成 O_3 , O_3 浓度也随之增加;能见度低时,太阳辐射较弱,光化学反应速率降低. 唐贵谦等^[12] 分析了天气型对北京地区近地面 O_3 的影响发现,处于低压前部控制时,高温、低湿以及局地环流形成的山谷风造成区域 O_3 累积;王闯等^[38] 分析气象条件对沈阳市环境空气 O_3 浓度影响研究发现:受温度、风速、湿度、能见度、天气情况影响, O_3 浓度变化是多因素共同作用的结果;王宏等^[39] 分析天气条件对福州近地层 O_3 分布的影响发现,臭氧浓度与气象要素关系密切,与温度、日照、太阳辐射显著正相关,与云量、相对湿度、降水量显著负相关,受偏南和偏东风影响,平均风速较大时, O_3 浓度较高;严茹莎等^[40] 分析了北京市夏季典型 O_3 污染分布特征及影响因子发现,稳定边界层对大气扩散的不利影响是形成 O_3 污染的重要原

因且 O_3 日变化趋势与温度的日变化趋势呈显著正相关;本研究的结果与这些研究结论^[12,38~41] 基本一致.

2.3 案例分析

近年来北京市夏季 O_3 污染较重,大气呈复合污染特征, O_3 浓度高低直接影响到北京市整体空气质量的排名,因此 O_3 浓度的研究及治理尤为重要. 理论上控制 NO_x 和 VOCs 等的排放量可以大大降低 O_3 的浓度,但实际上 O_3 的生成与前体物浓度之间并不是简单的线性关系, O_3 近年来逐渐呈现出影响范围广、浓度高且逐年上升的特征, O_3 控制途径越来越复杂. 本文选取 2014 年 5 月 29 日至 6 月 1 日北京发生一次 O_3 重污染过程(表 5),运用 2.1、2.2 节研究方法综合分析其天气形势、 O_3 浓度时空分布特征及其成因.

2014 年 5 月 29 日至 6 月 1 日北京发生一次 O_3 重污染过程,其中 5 月 29 日空气质量为轻度污染;5 月 30 日上升至重度污染; $\rho(O_3, 8\text{ h})$ 达 $311\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,5 月 31 日空气质量转为中度污染;6 月 1 日空气质量降至为良;重污染过程结束. 经计算 5 月 30~31 日这 2 d 平均风速为 $2.19\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,相对湿度平均为 43%;温度较高为 30°C 左右,地面气压变化较为平稳,边界层高度较低. 污染期间 500 hPa 以偏南、偏西气流为主,地面天气形势以均压、低压为主,为 O_3 污染的形成及维持提供了稳定的大气环境背景.

表 5 2014 年 5 月 29 日至 6 月 1 日臭氧浓度与逐日天气状况

Table 5 Variations of O_3 and weather conditions from May 29th to June 1st in 2014

时间 (月-日)	地面 气压场	高空 高度场	平均风速 $/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	相对湿度/%	PBL $/\text{m}$	温度/ $^\circ\text{C}$	主导 风向	$O_3\ 8\text{ h}$ $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	AQI	NO_x $/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
05-29	高压后部	偏西北气流	1.46	26	1 085	31.8	东南风	183	121	82
05-30	低压前部	槽前	2.46	36	1 347	29.5	偏东风	311	209	63
05-31	低压前部	槽前	1.92	49	849	27.7	偏南风	256	191	65
06-01	低压前部	槽前	1.96	59	952	24.6	偏南风	157	98	29
06-02	高压	槽后	1.92	52	953	22.4	西北风	151	93	34

图 8 为 2014 年 5 月 29 日至 6 月 1 日北京及周边地区 O_3 IAQI 空间分布,图 9 为北京及周边城市 O_3 浓度等级时空变化,可以看出 5 月 29 日 O_3 高值区主要集中在山东临沂、日照等地区,30 日高值范围明显扩大,山东中部、河北大部、北京、天津等地区 O_3 浓度明显上升,31 日 O_3 高值区主要集中在北京、沧州和山东省大部分地区,6 月 1 日区域 O_3 高值区明显消失. 输送方向上(图 9),北京东南方向明显存在 O_3 输送现象,淄博、聊城、沧州、天津、廊坊、北京、张家口等方向 O_3 随着时间的变化明显

上升;由此可见 O_3 污染过程是在本地光化学污染较重的水平上,次叠加区域输送的影响,造成北京 O_3 浓度居高不下.

关于北京市 O_3 区域输送分析,国内外学者做了较为丰富的案例研究,文献^[10,30~33,41,42] 都分析了北京市周边地区对北京市 O_3 浓度的贡献. 其中 Streets 等^[41] 对北京地区 2001 年 7 月 O_3 污染的模拟研究发现,周边地区污染源对北京市高浓度 O_3 的贡献率在 35%~60%,河北省的贡献可达 20%~30%;王自发等^[10] 指出 2006 年 8 月周边地

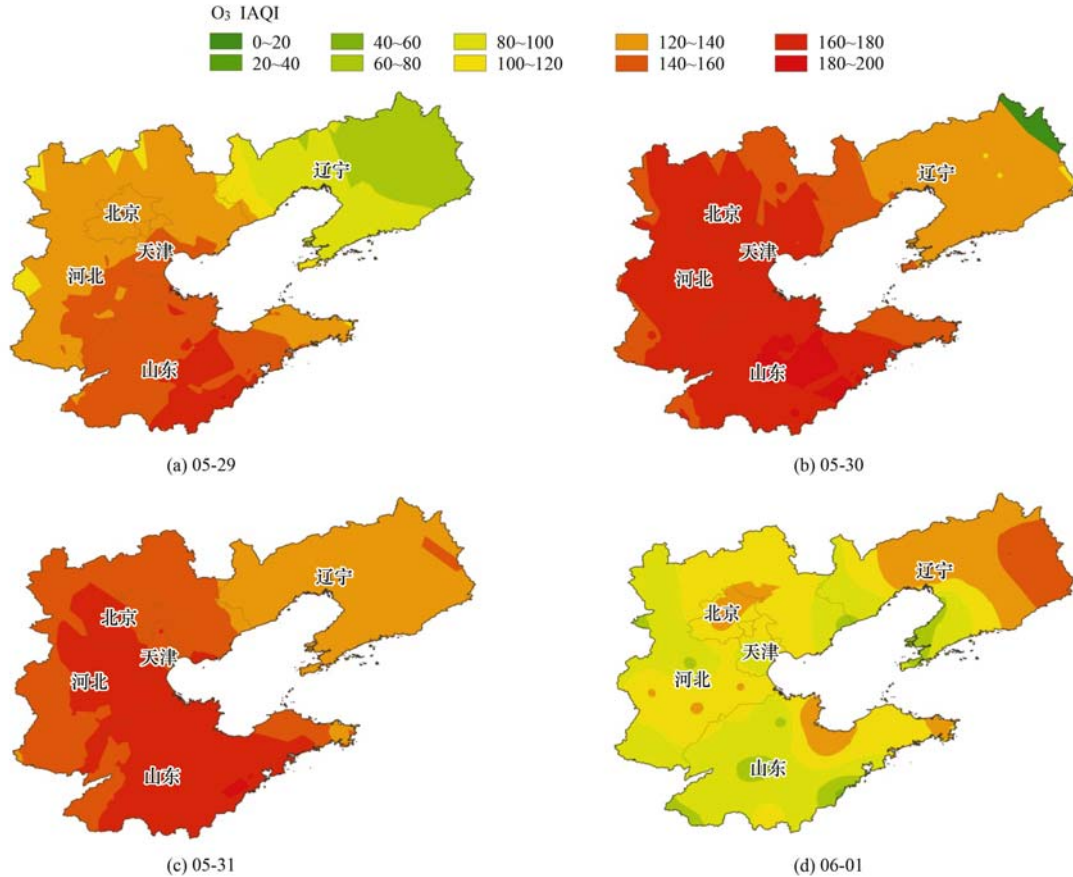


图 8 2014 年 5 月 29 日至 6 月 1 日北京及周边地区 O₃ IAQI 空间分布

MFig. 8 Spatial distribution of O₃ IAQI in Beijing and its surrounding areas from May 29th to June 1st in 2014

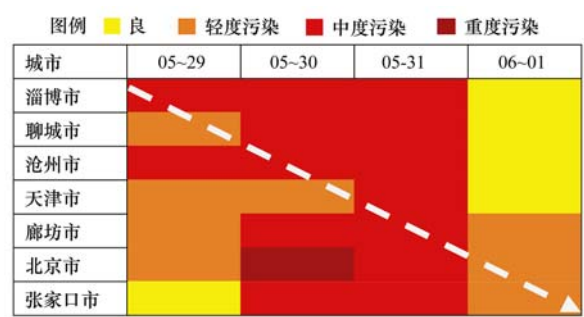


图 9 2014 年 5 月 29 日至 6 月 1 日北京及周边城市
臭氧浓度等级时空变化

Fig. 9 Spatial distribution of O₃ in Beijing and its
surrounding cities from May 29th to June 1st in 2014

区排放对北京市城近郊区 O₃ 浓度的月均贡献率为 30.0%；王雪松等^[42]利用 CAMx 模型对 2000 年 6 月底至 7 月初发生在北京地区的 O₃ 污染过程进行模拟分析,发现周边地区对北京市城近郊区的贡献中直接输入的 O₃ 约占 7 成,其余部分以输入前体物的方式贡献 O₃. 本研究发现再一次证明了北京市 O₃ 浓度分布的区域性特征,因此治理北京市臭氧必须关注周边地区排放的影响. 受各种条件制约等因

素的影响,本研究没有使用数值模型对 O₃ 的区域输送贡献率进行计算. 今后,在研究北京市 O₃ 多个站点较长时间序列观测的基础上,还应结合数值模型全面解释区域 O₃ 形成的复杂问题,以制定切实有效的 O₃ 污染防治对策.

3 结论

- (1) 2014 年北京市全年 O₃ 平均浓度为 56.18 μg·m⁻³,超标日 O₃ 平均浓度为 148.05 μg·m⁻³,超标日主要集中在 5~9 月.
- (2) 超标日 O₃ 日变化呈现单峰型分布,超标日 O₃ 浓度在 09:00~23:00 明显高于夏季同时间段浓度平均;空间分布上中心城区 O₃ 浓度相对较低,而城区西部植物园站点浓度最高.
- (3) 2014 年北京市 O₃ 超标日地面气压形势场高压类、低压类、均压类这 3 种类型各占 16%、36%、48%;超标日 O₃ 浓度与气压、湿度、能见度呈负相关关系,与风速、温度呈正相关关系.
- (4) 2014 年 5 月 29 日至 6 月 1 日北京市发生的一次 O₃ 重污染过程是由本地光化学污染及区域

输送造成的.

参考文献:

- [1] Tie X X, Brasseur G P, Zhao C S, *et al.* Chemical characterization of air pollution in eastern China and the eastern United States[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(14): 2607-2625.
- [2] Geng F H, Zhao C S, Tang X, *et al.* Analysis of ozone and VOCs measured in Shanghai: a case study[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(5): 989-1001.
- [3] 任阵海, 万本太, 苏福庆, 等. 当前我国大气环境质量的几个特征[J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(1): 1-6.
- [4] Vingarzan R. A review of surface ozone background levels and trends[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(21): 3431-3442.
- [5] Zhang Q, Yuan B, Shao M, *et al.* Variations of ground-level O₃ and its precursors in Beijing in summertime between 2005 and 2011[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(1): 6089-6101.
- [6] 邵敏, 董东. 我国大气挥发性有机物污染与控制[J]. *环境保护*, 2013, **41**(5): 25-28.
- [7] 周秀骥, 罗超, 丁国安, 等. 中国东部地区大气臭氧及前体物本底变化规律的初步研究[J]. *中国科学(B 辑)*, 1994, **24**(12): 1323-1330.
- [8] 刘小红, 洪钟祥, 李家伦, 等. 北京地区严重大气污染的气象和化学因子[J]. *气候与环境研究*, 1999, **4**(3): 231-236.
- [9] 安俊琳, 李昕, 王跃思, 等. 北京气象塔夏季大气 O₃, NO_x 和 CO 浓度变化的观测实验[J]. *环境科学*, 2003, **24**(6): 43-47.
- [10] 王自发, 李丽娜, 吴其重, 等. 区域输送对北京夏季臭氧浓度影响的数值模拟研究[J]. *自然杂志*, 2008, **30**(4): 194-198.
- [11] Tang G, Li X, Wang Y, *et al.* Surface ozone trend details and interpretations in Beijing, 2001- 2006 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(22): 8813-8823.
- [12] 唐贵谦, 李昕, 王效科, 等. 天气型对北京地区近地面臭氧的影响[J]. *环境科学*, 2010, **31**(3): 573-578.
- [13] Xu J, Ma J Z, Zhang X L, *et al.* Measurements of ozone and its precursors in Beijing during summertime: impact of urban plumes on ozone pollution in downwind rural areas[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(23): 12241-12252.
- [14] 聂滕, 李璇, 王雪松, 等. 北京市夏季臭氧前体物控制区的分布特征[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2014, **50**(3): 557-564.
- [15] Zhao P S, Zhang X L, Xu X L, *et al.* Long-term visibility trends and characteristics in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. *Atmospheric Research*, 2011, **101**(3): 711-718.
- [16] 陆克定, 张远航, 苏杭, 等. 珠江三角洲夏季臭氧区域污染及其控制因素分析[J]. *中国科学: 化学*, 2010, **40**(4): 407-420.
- [17] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [18] 《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, 2014.
- [19] 程念亮, 李军杰, 李云婷, 等. 基于 Matlab 北京市 PM_{2.5} 动态分区统计预报模型的开发[J]. *环境工程学报*, 2015, **9**(10): 4965-4970.
- [20] HJ/T 193-2005, 环境空气质量自动监测技术规范[S].
- [21] Cogliani E. Air pollution forecast in cities by an air pollution index highly correlated with meteorological variables[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(16): 2871-2877.
- [22] Seinfeld J H, Pandis S N. *Atmospheric chemistry and physics* [M]. New York: A Wiley Interscience Publication, 1998.
- [23] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理与方法[M]. (第四版). 北京: 气象出版社, 2000.
- [24] 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.
- [25] 易睿, 王亚林, 张殷俊, 等. 长江三角洲地区城市臭氧污染特征与影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(8): 2370-2377.
- [26] 刘洁, 张小玲, 张晓春, 等. 上甸子本底站地面臭氧变化特征及影响因素[J]. *环境科学研究*, 2006, **19**(4): 19-25.
- [27] 刘峰, 朱永官, 王效科. 我国地面臭氧污染及其生态环境效应[J]. *生态环境*, 2008, **17**(4): 1674-1679.
- [28] Lal S, Naja M, Subbaraya B H. Seasonal variations in surface ozone and its precursors over an urban site in India [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(17): 2713-2724.
- [29] Sillman S, Logan J A, Wofsy S C. The sensitivity of ozone to nitrogen oxides and hydrocarbons in regional ozone episodes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, **95**(D2): 1837-1851.
- [30] 安俊琳, 王跃思, 孙扬. 气象因素对北京臭氧的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(3): 944-951.
- [31] 徐敬, 张小玲, 赵秀娟, 等. 夏季局地环流对北京下风向地区 O₃ 输送的影响[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(11): 1140-1146.
- [32] 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.
- [33] Wang T, Ding A J, Gao J, *et al.* Strong ozone production in urban plumes from Beijing, China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**(21): 21806.
- [34] 邵敏, 付琳琳, 刘莹, 等. 北京市大气挥发性有机物的关键活性组分及其来源[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2009, **35**(增刊 1): 123-130.
- [35] 段青春, 彭艳春, 谭吉华, 等. 北京市冬季灰霾期 NMHCs 空间分布特征研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(12): 4552-4557.
- [36] Cheung V T F, Wang T. Observational study of ozone pollution at a rural site in the Yangtze Delta of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(29): 4947-4958.
- [37] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2013 ~ 2014 年北京市 NO₂ 时空分布研究[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(1): 18-26.
- [38] 王闯, 王帅, 杨碧波, 等. 气象条件对沈阳市环境空气臭氧浓度影响研究[J]. *中国环境监测*, 2015, **31**(3): 32-37.
- [39] 王宏, 林长城, 陈晓秋, 等. 天气条件对福州近地层臭氧分布的影响[J]. *生态环境学报*, 2011, **20**(8-9): 1320-1325.
- [40] 严茹莎, 陈敏东, 高庆先, 等. 北京夏季典型臭氧污染分布特征及影响因子[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(1): 43-49.
- [41] Streets D G, Fu J S, Jang C J, *et al.* Air quality during the 2008 Beijing Olympic Games [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(3): 480-492.
- [42] 王雪松, 李金龙, 张远航, 等. 北京地区臭氧污染的来源分析[J]. *中国科学 B 辑: 化学*, 2009, **39**(6): 548-559.

CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM ₁₀ and PM _{2.5} Emissions from Stationary Sources	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities	JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Flocs	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH)	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu ²⁺ -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i>	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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