

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第10期

Vol.38 No.10

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国城市热岛时空特征及其影响因子的分析 曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 徐家平 (3987)
卫星遥感在 NO_x 总量控制中的应用 武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇 (3998)
京津冀城市群空气污染的模式总结与治理效果评估 王振波, 梁龙武, 林雄斌, 刘海猛 (4005)
南京北郊冬春季气溶胶数浓度变化特征分析 吴丹, 张璠, 刘刚, 吴明, 夏俊荣, 盖鑫磊, 李凤英, 杨孟 (4015)
冬季临安大气本底站气溶胶来源解析及其粒径分布特征 施双双, 王红磊, 朱彬, 林旭, 郭婷, 沙丹丹, 蒋琳, 张玉欣, 师远哲 (4024)
成都市大气颗粒物粒径分布及水溶性离子组成的季节变化特征 陶月乐, 李亲凯, 张俊, 李斯奇, 李晓东 (4034)
泉州市大气 PM_{2.5} 中水溶性离子季节变化特征及来源解析 张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 张棕巍, 许文质 (4044)
2011~2012 年北京大气 PM_{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析 周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 段菁春, 谭吉华, 张元勋, 贺克斌, 马永亮 (4054)
厦门海沧区 PM_{2.5} 中金属元素污染评价及来源分析 赵莉斯, 于瑞莲, 徐玲珍, 胡恭任, 吴鑫, 陈衍婷 (4061)
道路扬尘 PM_{2.5} 中金属元素污染特征及健康风险评价 张静, 张衍杰, 方小珍, 李风华, 吴琳, 毛洪钧 (4071)
福建九仙山大气 PM₁₀ 及部分化学组成的季节变化 魏雅, 林长城, 胡清华, 吴水平 (4077)
北京城区冬季空气污染时期 C2~C6 碳氢化合物含量特征 李月, 魏巍, 杨干, 陈东升, 程水源, 韩力慧 (4084)
2016 年北京市春节大气颗粒物污染特征激光雷达监测分析 石琳琳, 李令军, 李倩, 姜磊, 周一鸣, 李云婷, 刘保献, 张大伟 (4092)
廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性 李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4100)
人类活动对漓江地表水体水-岩作用的影响 李磊, 赵玉梅, 王旭光, 刘炜, 佟洁, 宋丽芸, 李怀瑞, 王清川 (4108)
岩溶区水库冬季溶解有机质组成特征及来源:以桂林五里峡水库为例 卢晓漩, 彭文杰, 李强, 房君佳, 靳振江, 宋昂, 黄炳惠, 于爽 (4120)
岩溶关键带微量元素运移的时空变化:以豫西鸡冠洞为例 梁沙, 杨琰, 张娜, 孙喆, 张萍, 田宁, 凌新有, 任小敏 (4130)
龟石水库夏季富营养化状况与蓝藻水华暴发特征 苟婷, 马千里, 王振兴, 王丽, 姚玲爱, 许振成, 赵学敏, 梁荣昌, 蓝郁 (4141)
阿哈水库叶绿素 a 时空分布特征及其与藻类、环境因子的关系 罗宜富, 李磊, 李秋华, 焦树林, 李红梅, 陈峰峰 (4151)
天目湖沙河水库浮游植物群落结构的时空异质性 孙祥, 朱广伟, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 史浩辰, 杭心语, 徐涤非 (4160)
程海沉积物重金属时空变化及人为污染与潜在生态风险 于真真, 刘恩峰, 张恩楼, 林琪, 沈吉, 王荣, 李艳玲 (4169)
自然降雨条件下红壤坡地磷素随径流垂向分层输出特征 左继超, 郑海金, 奚同行, 王凌云, 聂小飞, 刘昭 (4178)
邻苯二甲酸酯在三峡库区消落带非淹水期土壤中污染特征及健康风险 杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4187)
滦河干流水体多环芳烃与有机氯农药季节性分布、组成及源解析 王乙震, 张世禄, 孔凡青, 袁媛 (4194)
潍坊滨海经济技术开发区饮用水中有机磷酸酯的水平及人体暴露风险评估 董政, 马玉龙, 李珺琪, 袁浩东, 金军, 王英 (4212)
道路灰尘中有机磷阻燃剂污染特征及人体暴露 李静, 王俊霞, 许婉婷, 尚荣双, 顾海东, 温耀进, 张丽君 (4220)
居民经手口途径摄入含 PAHs 颗粒物的致癌风险评价 佟瑞鹏, 杨校毅, 张磊, 程蒙召 (4228)
基于空间自相关的地下水脆弱性时空演变 刘宇, 兰双双, 张永祥, 李芳春, 侯树楷 (4236)
Ag-AgI/CN/MA 复合物的制备及其可见光催化性能 张塞, 张丽丽, 胡春 (4245)
凤眼莲对富营养化水体中氨氮化和反硝化微生物的影响 李洁, 蒋丽娟, 王晓琳, 肖琳 (4253)
利用含 Cu(II) 废水强化微生物燃料电池处理含 Cr(VI) 废水 熊晓敏, 吴夏芈, 贾红华, 雍晓雨, 周俊, 韦萍 (4262)
生态高负荷土地快速渗滤系统处理猪场废水的效能及微生态 宿程远, 刘凡凡, 钟余, 黄智, 郑鹏, 农志文, 卢宇翔 (4271)
细菌对城市污水中小球藻生长和油脂积累的影响 涂仁杰, 金文标, 韩松芳, 陈洪一 (4279)
污水处理厂消毒技术对抗生素抗性菌的强化去除 刘亚兰, 马岑鑫, 丁河舟, 邱勇, 李冰, 王硕, 李激 (4286)
AnMBR-A-MBR 和 A²-MBR 工艺处理焦化废水效果与急性毒性物质特征对比 朱佳迪, 李菲菲, 陈吕军 (4293)
基于实时控制技术的 CANON 工艺稳定性运行 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (4302)
新型硫铁复合填料强化再生水深度脱氮除磷 周彦卿, 郝瑞霞, 刘思远, 王丽莎 (4309)
连续流亚硝化中试反应器的启动及其能力提升 朱强, 刘凯, 董石语, 顾澄伟, 王凡, 李祥, 黄勇 (4316)
基于不同接种污泥复合型厌氧氨氧化反应器的快速启动特征 阎刚, 李田, 徐乐中, 沈耀良, 吴鹏, 张婷, Samwine Thomas (4324)
两段式曝气对好氧颗粒污泥脱氮性能的影响 王文啸, 卞伟, 王盟, 阚睿哲, 赵青, 梁东博, 李军 (4332)
醋糟高效厌氧消化体系构建 周云龙, 许之扬, 赵明星, 施万胜, 黄振兴, 何迪, 阮文权 (4340)
基于总量及形态的土壤重金属生态风险评价对比:以龙岩市适中镇为例 王蕊, 陈明, 陈楠, 刘冠男, 张二喜, 刘晓端, 张佳文 (4348)
锌冶炼区耕地土壤和农作物重金属污染状况及风险评价 陈凤, 董泽琴, 王程程, 韦雪花, 胡宇, 张丽娟 (4360)
三峡库区典型消落带 CH₄ 排放的变化特征及影响因素 柴雪思, 郝庆菊, 黄哲, 范志伟, 江长胜 (4370)
地膜覆盖对菜地生态系统 N₂O 排放的影响 冯迪, 郝庆菊, 张凯莉, 石将来, 石孝均, 江长胜 (4380)
不同用量竹炭对污泥堆肥过程温室气体排放的影响 向秋洁, 杨雨洽, 张成, 相欣奕, 木志坚 (4390)
半固态培养条件下烟曲霉去除土壤中镉 陈耀宁, 汪元南, 黎媛萍, 李辉, 陈艳容, 伍艳馨, 苟宇, 朱福造, 张道利, 刘耀, 曾光明 (4398)
猪粪堆肥过程中金霉素去除及重金属形态变化 温沁雪, 曹永森, 陈志强 (4405)
堆肥-生物强化对重度石油污染土壤的修复作用 吴蔓莉, 陈凯丽, 叶茜琼, 祁燕云, 徐会宁, 王卓, 薛鹏飞, 朱常琳 (4412)
微生物多样性对土壤碳代谢特征的影响 安丽芸, 李君剑, 严俊霞, 李洪建 (4420)
冬小麦田 O₃ 气孔与非气孔沉降及风险评估 徐静馨, 郑有飞, 赵辉, 储仲芳, 黄积庆, 袁月 (4427)
中国西南酸雨区降水化学特征研究进展 周晓得, 徐志方, 刘文景, 武瑶, 赵童, 蒋浩 (4438)
《环境科学》征稿简则(4261) 《环境科学》征订启事(4270) 信息(4186, 4404, 4446)

廊坊市夏季臭氧体积分数影响因素及生成敏感性

李磊¹, 赵玉梅^{2*}, 王旭光¹, 刘炜¹, 佟洁¹, 宋丽芸², 李怀瑞², 王清川³

(1. 河北省廊坊市环境保护局, 廊坊 065000; 2. 智慧环境生态产业研究院(廊坊), 廊坊 065000; 3. 河北省廊坊市气象局, 廊坊 065000)

摘要: 基于廊坊市夏季近地面 O₃ 体积分数及其前体物 VOCs 和 NO_x 体积分数数据, 结合气温、风速风向、总云量和太阳辐射强度等气象资料, 分析了 O₃ 体积分数的日变化规律以及气象因素对其的影响; 利用 VOCs/NO_x 比值法和 EKMA 曲线法分析了 O₃ 的生成敏感性. 结果表明: ①廊坊市夏季 O₃ 生成速率及其体积分数与太阳辐射强度为显著正相关, 皮尔森相关系数 r 分别为 0.61 和 0.48, 其中 O₃ 生成速率和太阳辐射强度都在 12:00 左右达到峰值, 而 O₃ 体积分数在 16:00 达到峰值, 滞后太阳辐射强度峰值 4 h; ② O₃ 生成速率及其体积分数与气温呈正相关, 皮尔森相关系数分别为 0.44 和 0.68; 与总云量呈负相关, 皮尔森相关系数分别为 -0.24 和 -0.45; ③风向为偏西风、偏南风或东南风时, 廊坊市夏季 O₃ 体积分数易出现高值; ④廊坊市夏季整体处于 VOCs 控制区, O₃ 体积分数的最优控制措施为短期内优先削减 VOCs, 中长期协同减排 NO_x 和 VOCs.

关键词: 廊坊; 臭氧; 气象因素; VOCs; NO_x; 控制区

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)10-4100-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201703270

Influence Factors and Sensitivity of Ozone Formation in Langfang in the Summer

LI Lei¹, ZHAO Yu-mei^{2*}, WANG Xu-guang¹, LIU Wei¹, TONG Jie¹, SONG Li-yun², LI Huai-rui², WANG Qing-chuan³

(1. Langfang Bureau of Environmental Protection, Langfang 065000, China; 2. Academy of Ecology Industrialization for Wisdom Environment (Langfang), Langfang 065000, China; 3. Langfang Bureau of Meteorology, Langfang 065000, China)

Abstract: The diurnal variations in ozone concentrations in the summer were studied using the temperature, wind speed and direction, total cloud cover, and solar radiation intensity data collected in Langfang, China. The ratio of volatile organic compounds to nitrogen oxides (VOCs/NO_x) and the EKMA curve were studied to analyze the sensitivity of ozone formation. The results showed that: ① The ozone generation rate and ozone concentrations were positively correlated with the solar radiation intensity with Pearson correlation coefficients of 0.61 and 0.48, respectively. Both the ozone generation rate and the solar radiation intensity reached their peak at about 12:00, while the ozone concentration reached its peak at about 16:00, which lagged behind the peak of the solar radiation intensity by 4 h. ② The correlation coefficient between the ozone generation rate and the temperature was 0.44, between the ozone concentration and temperature was 0.68. The ozone generation rate and ozone concentrations were inversely correlated with total cloud cover with correlation coefficients of -0.24 and -0.45, respectively. ③ The ozone concentrations in Langfang were high when the winds were from the west, south, or southeast. ④ The ozone concentrations in Langfang were more sensitive to VOCs than to NO_x; thus, they can be reduced efficiently by controlling the VOCs emissions.

Key words: Langfang; O₃; meteorological factors; VOCs; NO_x; control area

近年来, 大气污染问题日益突出, 表现为由传统单一的煤烟型污染转化为以煤烟型污染和臭氧、二次气溶胶污染并存的复合型污染特征^[1-3]. 2014~2016 年空气质量监测数据显示, 京津冀地区 O₃ 已连续 3 a 不降反升(环境保护部数据中心: <http://datacenter.mep.gov.cn/>). 2016 年, 京津冀 13 个城市中 O₃ 日体积分数超过 GB 3095-2012《环境空气质量标准》二级标准的平均天数达 50 d, 在全年总天数中的占比达 13.7%, 其中 2016 年北京、天津和廊坊的 O₃ 为首要污染物的天数平均为 91 天, 在全年中的占比达到了 24.8%. 研究发现, 近地面高体积分数 O₃ 会损害人体健康, 影响植物生长, 是

影响城市大气环境质量的重要气体^[4-6]. 同时 O₃ 的减排对 PM_{2.5} 等污染物的减排也有一定的影响, 需要进行深入研究和分析^[7].

目前, 针对北京市、天津市等城市的臭氧问题已有较多研究. 王占山等^[8,9]曾对北京市 O₃ 的日变化和时空变化特征及与前体物的相关性关系进行了研究; 宋从波等^[10]曾对廊坊市 O₃ 的周末效应和其与 NO_x 日体积分数的关系进行了研究; 田溢等^[11]也对

收稿日期: 2017-03-30; 修订日期: 2017-04-17

作者简介: 李磊(1981~), 男, 工程师, 主要研究方向为环境工程, E-mail: lilei-2000@163.com

* 通信作者, E-mail: zhao1989@mail.ustc.edu.cn

廊坊市 O_3 的季节变化规律进行了分析阐述, 但对廊坊市 O_3 的生成敏感性分析却鲜有报道. 本文首先分析了太阳辐射强度、气温、总云量和风速风向等气象因素对 O_3 生成速率和小时平均体积分数的影响, 然后通过 $VOCs/NO_x$ 比值法、EKMA 曲线法研究了廊坊市 O_3 与其前体物的敏感性关系, 最后利用 2014 ~ 2016 年连续 3 a 的实测数据对理论结果进行了验证, 以期为京津冀大气复合污染研究和廊坊市 O_3 的防治提供一定的理论支持和技术建议.

1 材料与方 法

廊坊市 O_3 、 NO_x 体积分数数据来源于廊坊市环境保护监测中心监测记录, 其中 O_3 分析仪 Thermo Fisher 49C 紫外光度法分析仪, NO_x 分析仪采用采用 Thermo Fisher 42C 化学发光 $NO-NO_2-NO_x$ 分析仪, 各仪器均两天校准一次, 采样管路至少每月清洗一次, 保证了监测数据的准确性和有效性; 气温、风向、风速数据来源于廊坊市气象局的监测记

录; 太阳辐射强度数据来源于廊坊市灰霾超级监测站太阳辐射计(品牌: 荷兰/KIPP ZONEN; 型号规格: CMP6)监测数据; 总云量数据来源于 Micaps 系统^[12].

选取臭氧污染高发时段(6 ~ 8 月), 以廊坊市第十中学教学楼顶为采样点(见图 1), 按照 USEPA TO-15 方法^[13]进行采样罐的实验室处理和室外 $VOCs$ 样品采集, 采用 1 h 的限流阀将空气样品采集到已抽真空的、体积为 3.2 L 的不锈钢采样罐中, 定点采集 30 d 的环境空气样品(每月采集 10 d, 每天采集 2 个样品)进行 $VOCs$ 成分分析, 在采样期间, 按照质量控制程序, 每 10 个样品进行一个平行采样, 平行样中目标物的相对偏差确保小于等于 30%. 具体的采样时段、采样点和采样方法见表 1. 所有采集的空气样品使用预浓缩仪(Entech7100 Pre-concentrator, En-tech Instruments Inc., California, USA)和气相色谱-质谱/火焰离子化检测器/电子捕获检测器联用系统(Agilent 6890 GC-

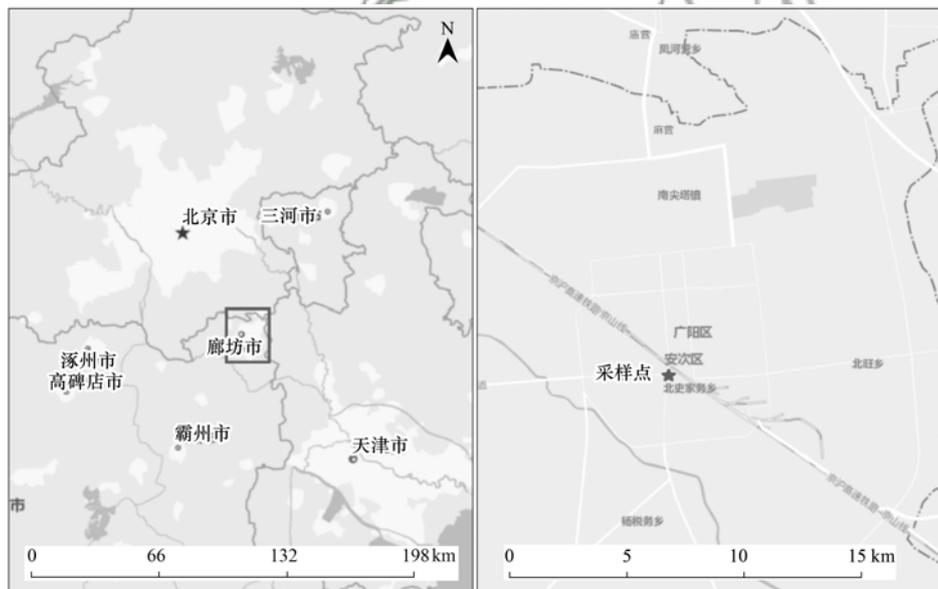


图 1 廊坊市采样点位置示意

Fig. 1 Locations of sampling sites in Langfang City

5973N MSD/FID/ECD)进行分析, 化合物的定性依据色谱保留时间和质谱图, 建立工作曲线来对目标化合物进行定性和定量分析. 分析过程中采用了质谱调谐、系统标定、空白实验及日校准等质量控制程序. 参照 USEPA 中 TO-15 对应的检测方法, 分析了大气 $VOCs$ 中作为 O_3 前体物的 97 种 C2 ~ C12 非甲烷烃类. 主要包括 49 种烷烃、30 种芳香烃、18 种烯烃和 1 种炔烃等.

分析方法: 先利用 $VOCs/NO_x$ 比值法和 EKMA

曲线法对 O_3 体积分数与 $VOCs$ 和 NO_x 等前体物的

表 1 $VOCs$ 采样时间和频次

Table 1 Descriptions of $VOCs$ sampling		
采样时间段	采样方法	样品数/个
6 月 21 ~ 30 日	每天 09:00 ~ 10:00 和 14:00 ~ 15:00 各采集 1 个样品	20
7 月 18 ~ 27 日	每天 09:00 ~ 10:00 和 14:00 ~ 15:00 各采集 1 个样品	20
8 月 20 ~ 29 日	每天 09:00 ~ 10:00 和 14:00 ~ 15:00 各采集 1 个样品	20

敏感性关系进行了定量评估,最后利用近 3 a 实测数据对理论结果进行验证.

2 结果与讨论

根据廊坊市气候交替特征,全年可划分为四季,其中 3~5 月为春季,6~8 月为夏季,9~11 月为秋季,12 月~次年 2 月为冬季^[14].廊坊市 O_3 的季节变化规律总体表现为夏季最高,秋季和春季次之,冬季最低的特点(图 2).因此,本文选取体积分数最高的夏季作为研究重点,分析 O_3 体积分数同气象因素和前体物的关系.

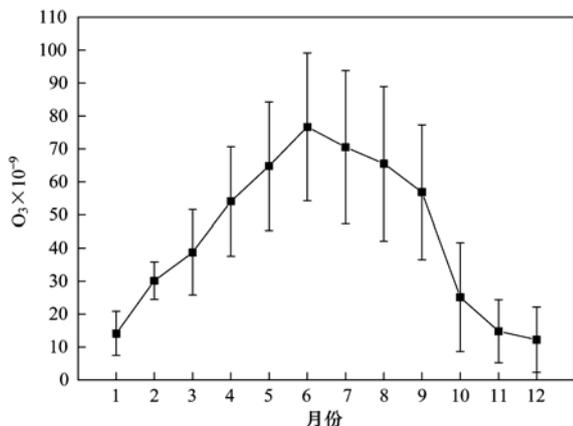


图 2 2016 年 O_3 月均体积分数和标准偏差

Fig. 2 Monthly volume fraction and standard deviation of O_3 in 2016

2.1 气象因素对 O_3 体积分数的影响

2.1.1 太阳辐射强度、气温和总云量对 O_3 生成速率和体积分数的影响

通过统计 2016 年夏季 O_3 体积分数及其生成速率与太阳辐射强度(RS)、气温(T)和总云量的小时数据规律发现(表 2), O_3 生成速率 $d(O_3)/dt$ 及其体积分数与 3 个气象要素存在一定相关性.

表 2 O_3 生成速率及其体积分数与气象因素的皮尔森相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficient of O_3 and its formation rate with meteorological parameters

项目	太阳辐射强度	气温	总云量
O_3 生成速率	0.61	0.44	-0.24
O_3 体积分数	0.48	0.68	-0.45

O_3 生成速率和体积分数同太阳辐射强度的皮尔森相关性系数 r 分别为 0.61 和 0.48,呈显著正相关($P < 0.05$).其中 O_3 生成速率和太阳辐射强度均为 06:00 开始上升,并于 12:00 左右达到峰值; O_3 体积分数也为 06:00 开始上升,但其峰值出现在 16:00,滞后太阳辐射强度峰值 4 h 左右(图 3).这是因为近地面 O_3 主要来自光化学反应的二

次生成,受光照影响强烈,随着太阳光辐射强度增大, O_3 生成速率增大^[15],并与太阳辐射强度同时达到峰值,但由于 O_3 体积分数为累积变量,在太阳辐射强度开始下降时,其仍在累积,因此其峰值要滞后于太阳辐射强度.

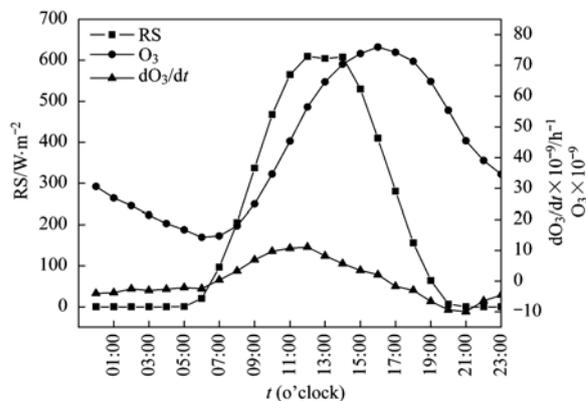


图 3 夏季 O_3 小时体积分数, O_3 生成速率与太阳辐射强度的日变化规律

Fig. 3 Diurnal variation of hourly O_3 volume fraction, O_3 formation rate, and solar radiation intensity in summer

O_3 生成速率和体积分数同气温的皮尔森相关性系数 r 分别为 0.44 和 0.59,为显著正相关($P < 0.05$),其中 O_3 体积分数同气温的日变化规律基本一致,均在 16:00 左右达到峰值(图 4).这可能是由于随着气温的升高,太阳辐射增强^[16], O_3 的生成速率加快. O_3 生成速率和体积分数同总云量的皮尔森相关性系数 r 分别为 -0.24 和 -0.82,为明显的负相关($P < 0.05$).这可能是由于随着总云量的增加,太阳辐射强度减弱^[17],导致其生成速率和体积分数均有所下降.

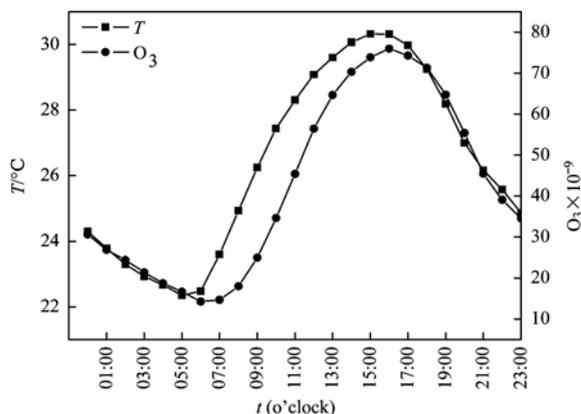


图 4 夏季臭氧小时体积分数与气温的日变化规律

Fig. 4 Diurnal variations in hourly O_3 volume fraction and temperature in summer

2.1.2 风速和风向对廊坊市 O_3 体积分数的影响

风对大气污染物起到整体输送作用和冲淡扩散

作用^[18]. 由 2016 年夏季廊坊市 O_3 体积分数的风玫瑰图可知(图 5), 当风向为西南风、南风 and 东南风时, 风速在 $1.5 \sim 3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (轻风) 时, O_3 体积分数易出现大于 70×10^{-9} 的高值. 这可能是由于上风向城市的 VOCs 体积分数较高, 光化学反应剧烈, 产生 O_3 多; 同时风速相对较小, O_3 体积分数不断积累, 体积分数升高^[19]. 本文选取 2016 年 6 ~ 8 月廊坊市 O_3 日体积分数在区域(北京、天津、唐山)最高的日期绘制了后向聚类轨迹^[20](图 6). 分析发现, 来自西南部、南部和东南部的气团占比 95.2%, 这也从侧面说明了廊坊市 O_3 体积分数受河北南部区域和天津的输送影响较为显著, 受北京区域输送的影响相对较弱, 这与文献[10 ~ 11]的研究结果一致.

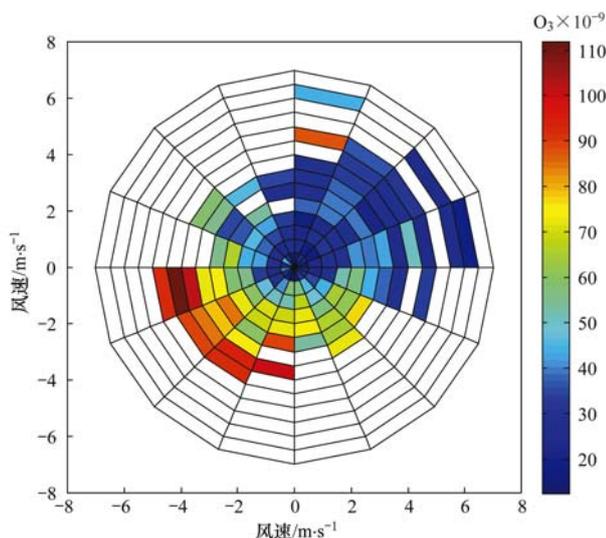


图 5 2016 年廊坊市夏季 O_3 体积分数风玫瑰图

Fig. 5 Wind dependency map of O_3 in summer

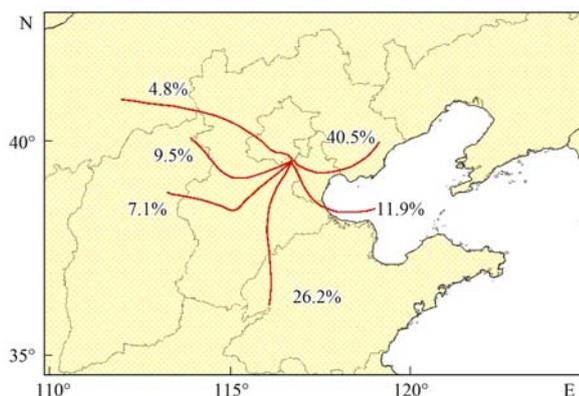


图 6 2016 年 6 ~ 8 月廊坊市夏季后向轨迹聚类

Fig. 6 Cluster analysis of air mass backward trajectories in summer

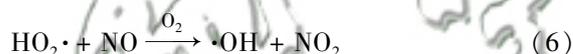
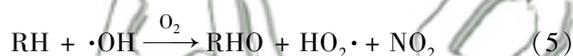
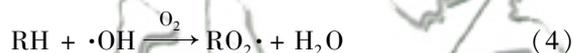
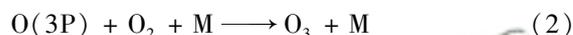
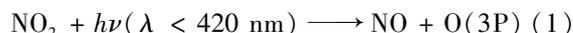
2.2 廊坊市 O_3 与前体物的敏感性分析

大气对流层中的 O_3 来自于平流层的向下输

送^[21]以及人类活动排放的前体物的光化学反应^[22]. 其中光化学反应主要涉及到两种重要的前体物, 即氮氧化物 (NO_x) 和挥发性有机物 (VOCs)^[23]. O_3 的生成与其前体物之间存在典型的非线性关系^[24]. 一个地区的 O_3 污染控制措施的科学制定依赖于其生成敏感性的分析结果^[25]. 本文对廊坊市 O_3 体积分数对 NO_x 和 VOCs 敏感性进行分析, 以期找到一些规律, 为廊坊市地区的 O_3 控制提供科学指导.

2.2.1 VOCs/ NO_x 比值法分析

目前普遍认为大气边界层内臭氧主要由 VOCs 和 NO_x 发生光化学反应生成, 其链反应过程如式 (1) ~ (9)^[26,27].



当大气中无 VOCs 时, 此反应仅进行前三步, 不会产生富余的 O_3 . 而当 VOCs 加入此链反应时, 会与 $\cdot OH$ 反应生成 $RO_2 \cdot$ 和 $HO_2 \cdot$, 它们会代替 O_3 使 NO 转化为 NO_2 , 破坏了 NO_2 - NO - O_3 的光解循环, 使 O_3 体积分数得以累积. 因此, $\cdot OH$ 与 VOCs 的反应为 O_3 体积分数累积的关键因素, 是大气光化学系列反应的开始. 但在此过程中 NO_x 会与 VOCs 争夺 $\cdot OH$ ^[28] 发生如式 (7)、式 (8) 所示的反应. 一天之中臭氧前体物发生光化学反应产生日臭氧最大值与前体物 VOCs 和 NO_x 初始体积分数的比值有非常密切的关系, 采用 VOCs/ NO_x 比值法可粗略判断区域 O_3 生成的敏感性. 在城市典型大气条件下, VOCs + $\cdot OH$ 与 NO_2 + $\cdot OH$ 反应速率常数的比值约为 8.0^[29,30]. 当 VOCs/ NO_x 小于 8.0 时, 臭氧生成对 VOCs 体积分数比较敏感; 当 VOCs/ NO_x 大于 8.0 时, 臭氧生成对 NO_x 体积分数比较敏感. 图 7 对廊坊市 VOCs (VOCs 体积分数以碳的数体积分数计) 和 NO_x 初始体积分数 (09:00) 实测结果的比值进行分析, 其实测数据拟合值为 4.5, 低于 VOCs/ NO_x =

8.0 的比值线, 说明廊坊市处于 VOCs 控制区。

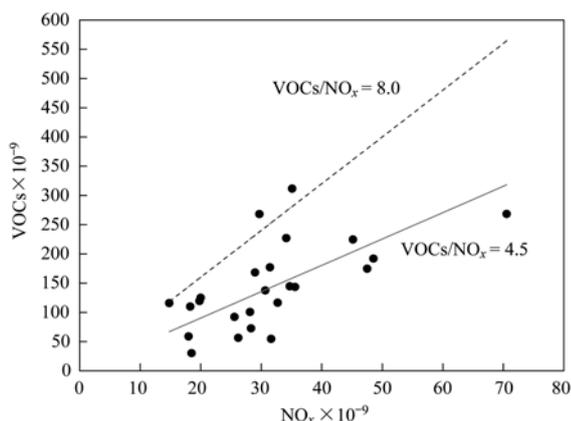


图7 廊坊市 VOCs 与 NO_x 体积分数关系

Fig. 7 Correlation of VOCs and NO_x in Langfang City

2.2.2 EKMA 曲线法分析

EKMA 曲线法是将 O_x (总氧化剂) 生成速率与前体物 VOCs 和 NO_x 联系起来, 画出一系列以 VOCs 和 NO_x 为坐标轴的 O_x 等体积分数曲线^[31]. 运用 EKMA 曲线可将 O_x 的环境目标转化为 VOCs 和 NO_x 的环境目标值, 为 O_x 特别是 O_3 的区域总量控制提供依据。

本文绘制了廊坊市 6~8 月正午时刻的 $P(\text{O}_x)$ 总氧化剂生成速率 EKMA 曲线(图 8). 绘图所需要的 $P(\text{O}_x)$ 数据运用 Cardelion 等^[32]开发的 OBM 模型进行计算。

图 8 中蓝点即为 6~8 月实测的 VOCs 和 NO_x 平均体积分数所在的位置. 其中 VOCs 和 NO_x 体积分数比值均处在脊线以上, 当削减 VOCs 排放时, VOCs 体积分数下降, 蓝点向左移动, $P(\text{O}_x)$ 降低; 当削减 NO_x 排放时, NO_x 体积分数下降, 蓝点将向下移动, $P(\text{O}_x)$ 反而会升高. 因此, 廊坊市实际处在 VOCs 控制区内, 要降低 O_3 体积分数, 应该优先削减 VOCs 的排放。

图 8 中红点为 6~8 月采样期间周末的 VOCs 和 NO_x 平均体积分数所在位置, 也均处于脊线以上. 其中 6、8 月周末的 $P(\text{O}_x)$ 大于全月平均 $P(\text{O}_x)$, 这符合 O_3 的周末效应^[33]; 而 7 月周末的 $P(\text{O}_x)$ 小于全月的 $P(\text{O}_x)$, 这应该与周末(7 月 23~24 日)经历雷阵雨天气, 太阳辐射强度减弱和污染物湿沉降有关^[34].

2.2.3 廊坊市臭氧达标路径分析

在利用 VOCs/ NO_x 比值法和 EKMA 曲线法对廊坊市 O_3 的生成敏感性进行分析的基础上, 本文进一步对廊坊市近 3 a(2014~2016 年)白天(08:00

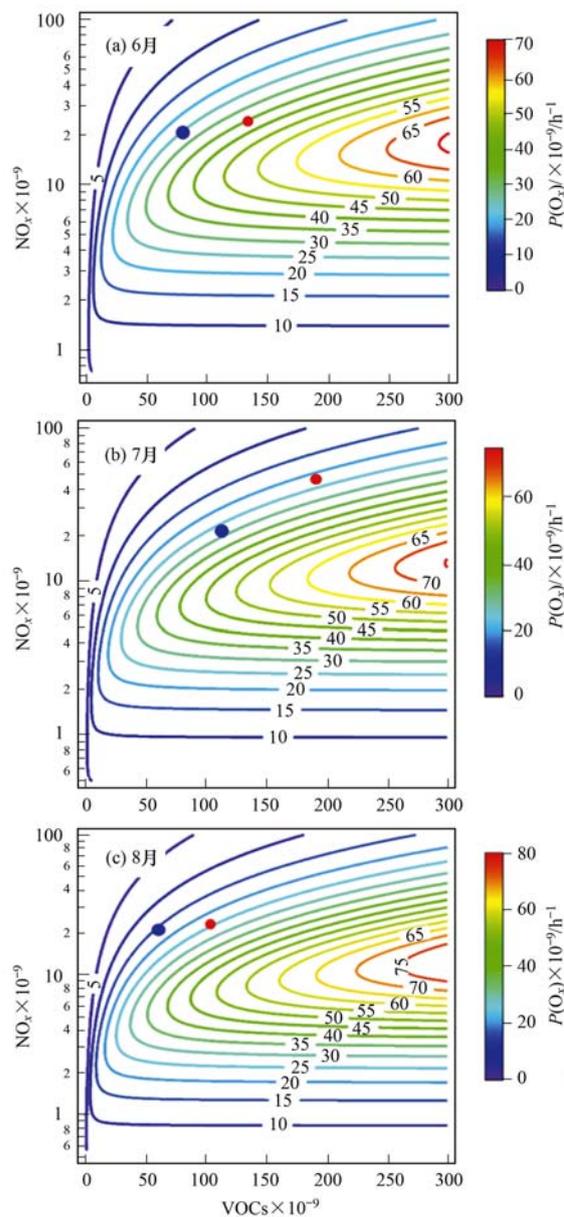


图8 2016年6~8月廊坊市总氧化剂生成速率 $P(\text{O}_x)$ 与前体物关系

Fig. 8 Relationship of $P(\text{O}_x)$ and its precursors from June to August 2016

~19:00)的 O_{3-8h} 体积分数、 NO_x 体积分数的小时数据进行了分组统计分析(图 9). 通常气温越高, VOCs 的反应活性越强^[35], 因此按照温度的高低分出 VOCs 活性高低不同的 3 组, 分别为 low-VOCR (22~27.3℃)、mid-VOCR (27.3~30.3℃) 和 high-VOCR (30.3~39.8℃), 因数据分布的不均匀性(多集中在 25~35℃), 在此采用不等间距进行分组, 以确保不同 VOCs 活性区间内数据量的一致性和统计的有效性. 在此基础上统计了不同 VOCs 活性下 O_{3-8h} 体积分数超标(国家二级标准)频率同

NO_x 体积分数的关系. 当 NO_x 体积分数大于 28×10^{-9} 时, 在不同 VOCs 活性区间内, 降低 NO_x 体积分数会促进 O_3 生成, 使其超标频率增大; 当 NO_x 体积分数小于 28×10^{-9} 时, 在不同 VOCs 活性区间内, 降低 NO_x 体积分数会抑制 O_3 的生成, 导致其超标频率降低.

目前廊坊市夏季大气环境 NO_x 白天的平均体积分数为 38.1×10^{-9} , 大于 28×10^{-9} , 处于图 9 中 1 所在位置, 单独降低 NO_x 体积分数, 反而会增大廊坊市地区的 O_3 体积分数超标频率, 也证明了廊坊市目前处于 VOCs 控制区, 这与 VOCs/ NO_x 比值法和 EKMA 曲线法的研究结果一致.

以 NO_x 体积分数为 38.1×10^{-9} 代表廊坊市的基准情景, 为 O_3 设置 3 种减排情景, 见图 9: ①减排路径 1→2→3, 在不削减 VOCs 活性的情况下持续减排 NO_x , 此路径会导致廊坊市的 O_3 体积分数长时间处于不降反升的状态, 不可行; ②减排路径 1→4, 在不削减 NO_x 的情况下进行 VOCs 活性的持续减排, 此方法虽可使 O_3 体积分数在短期内明显降低, 但考虑到 VOCs 源的复杂性和无组织性, 通过单独对 VOCs 活性的减排难以实现 O_3 稳定达标, 非最终减排路径; ③减排路径 1→4→5→6, 在现有基础上优先对 VOCs 活性进行减排 (1→4), VOCs 降到其低活性区后进行 NO_x 协同减排 (4→5→6). 此方法与 EKMA 曲线结果相一致, 对于 O_3 减排的费效比和可操作性更强, 且在实现最终 O_3 达标目标的同时, 也可满足 NO_x 达标的要求, 为最优减排路径. 综上, 廊坊市 O_3 体积分数的最优控

制措施为短期内优先削减 VOCs, 中长期协同减排 NO_x 和 VOCs.

3 结论

(1) 廊坊市夏季 O_3 体积分数及其生成速率与太阳辐射强度均呈明显的正相关, 且都表现出单峰型日变化规律. 其中 O_3 生成速率峰值较太阳辐射强度峰值均出现在 12:00 左右, 而 O_3 体积分数峰值则滞后于太阳辐射强度峰值 4 h 左右.

(2) O_3 体积分数及其生成速率与气温呈现明显的正相关, 而与总云量呈现明显的负相关.

(3) 廊坊市夏季 O_3 体积分数易受河北南部区域和天津的传输影响, 当近地面风向为偏西风和偏南风时, 廊坊市 O_3 体积分数易出现 70×10^{-9} 的高值.

(4) 廊坊市夏季 O_3 体积分数处于 VOCs 控制区, O_3 体积分数的最优控制措施为短期内优先削减 VOCs, 中长期协同减排 NO_x 和 VOCs.

参考文献:

- [1] He J J, Gong S L, Yu Y, *et al.* Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014-2015 in major Chinese cities [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 484-496.
- [2] 李令军, 王占山, 张大伟, 等. 2013~2014 年北京大气重污染特征研究 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(1): 27-35.
Li L J, Wang Z S, Zhang D W, *et al.* Analysis of heavy air pollution episodes in Beijing during 2013~2014 [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(1): 27-35.
- [3] 周雪明, 项萍, 段菁春, 等. 佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4124-4132.
Zhou X M, Xiang P, Duan J C, *et al.* Pollution characteristics of non-methane hydrocarbons during winter and summer in Foshan city [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4124-4132.
- [4] 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.
Yi R, Wang Y L, Zhang Y J, *et al.* Pollution characteristics and influence factors of ozone in Yangtze River Delta [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(8): 2370-2377.
- [5] Wang Y X, Song Q L, Frei M, *et al.* Effects of elevated ozone, carbon dioxide, and the combination of both on the grain quality of Chinese hybrid rice [J]. *Environmental Pollution*, 2014, **189**: 9-17.
- [6] Jerrett M, Burnett R T, Pope III C A, *et al.* Long-term ozone exposure and mortality [J]. *The New England Journal of Medicine*, 2009, **360**(11): 1085-1095.
- [7] Jia M W, Zhao T L, Cheng X H, *et al.* Inverse relations of $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 in air compound pollution between cold and hot seasons over an urban area of East China [J]. *Atmosphere*, 2017, **8**(3): 59.
- [8] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 北京城区臭氧日变化特征及与

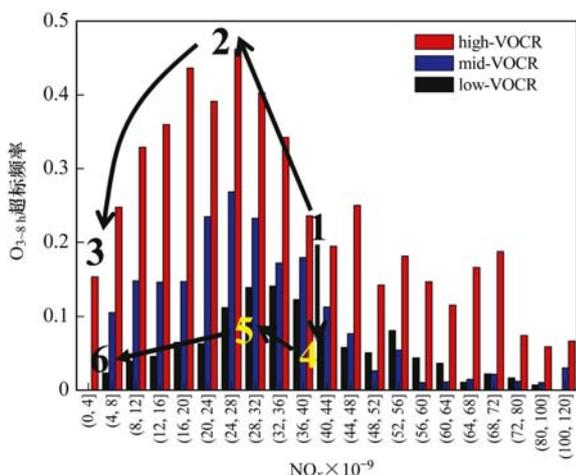


图 9 2014~2016 年不同 NO_x 体积分数、温度范围内 O_3 日体积分数超标频率

Fig. 9 Concentrations exceeding the frequency of O_3 in different ranges of NO_x concentration and temperature

- 前体物的相关性分析[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(12): 3001-3008.
- Wang Z S, Li Y T, Chen T, *et al.* Analysis on diurnal variation characteristics of ozone and correlations with its precursors in urban atmosphere of Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(12): 3001-3008.
- [9] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 北京市臭氧的时空分布特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4446-4453.
- Wang Z S, Li Y T, Chen T, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics of ozone in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4446-4453.
- [10] 宋从波, 李瑞芑, 何建军, 等. 河北廊坊市区大气中 NO₂ 和 O₃ 污染特征研究[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(10): 2903-2912.
- Song C B, Li R P, He J J, *et al.* Analysis of pollution characteristics of NO, NO₂ and O₃ at urban area of Langfang, Hebei[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(10): 2903-2912.
- [11] 田谧, 吉东生, 王跃思, 等. 河北廊坊地区大气污染物变化特征与来源追踪[J]. 环境工程学报, 2013, **7**(12): 4895-4903.
- Tian M, Ji D S, Wang Y S, *et al.* Characteristics of atmospheric pollutants and their sources in Langfang of Hebei[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, **7**(12): 4895-4903.
- [12] 中国气象局. MICAPS3.0 用户使用手册[M]. 北京: 中国气象局, 2008.
- [13] HJ 759-2015, 环境空气 挥发性有机物的测定 罐采样/气相色谱-质谱法[S].
- HJ 759-2015, Ambient air-determination of volatile organic compounds-collected by specially-prepared canisters and analyzed by gas chromatography/mass spectrometry[S].
- [14] 赵好希, 陈义珍, 杨欣, 等. 北京市中心城区 PM_{2.5} 长期变化趋势和特征[J]. 生态环境学报, 2016, **25**(9): 1493-1498.
- Zhao Y X, Chen Y Z, Yang X, *et al.* Long-term trend and characteristics of PM_{2.5} in the central urban area of Beijing[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2016, **25**(9): 1493-1498.
- [15] Jasaitis D, Vasiliauskiene V, Chadyšienė R, *et al.* Surface ozone concentration and its relationship with UV radiation, meteorological parameters and radon on the eastern coast of the Baltic Sea[J]. *Atmosphere*, 2016, **7**(2): 27.
- [16] Bloomer B J, Stehr J W, Piety C A, *et al.* Observed relationships of ozone air pollution with temperature and emissions[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**(9): L09803.
- [17] 齐月, 房世波, 周文佐. 近 50 年来中国东、西部地面太阳辐射变化及其与大气环境变化的关系[J]. 物理学报, 2015, **64**(8): 089201.
- Qi Y, Fang S B, Zhou W Z. Correlative analysis between the changes of surface solar radiation and its relationship with air pollution as well as meteorological factor in East and West China in recent 50 years[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(8): 089201.
- [18] Tong L, Zhang H L, Yu J, *et al.* Characteristics of surface ozone and nitrogen oxides at urban, suburban and rural sites in Ningbo, China[J]. *Atmospheric Research*, 2017, **187**: 57-68.
- [19] 邵平, 安俊琳, 杨辉, 等. 南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4031-4043.
- Shao P, An J L, Yang H, *et al.* Variation characteristics of surface ozone and its precursors during summertime in Nanjing northern suburb[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4031-4043.
- [20] Wang Y Q. MeteoInfo: GIS software for meteorological data visualization and analysis[J]. *Meteorological Applications*, 2014, **21**(2): 360-368.
- [21] 胡建林, 张远航. 长江三角洲地区臭氧生成过程分析[J]. 环境科学研究, 2005, **18**(2): 13-18.
- Hu J L, Zhang Y H. Process analysis of ozone formation in the Yangtze river delta[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, **18**(2): 13-18.
- [22] 吴方堃, 王跃思, 安俊琳, 等. 北京奥运时段 VOCs 浓度变化、臭氧产生潜势及来源分析研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(1): 10-16.
- Wu F K, Wang Y S, An J L, *et al.* Study on concentration, ozone production potential and sources of VOCs in the atmosphere of Beijing during Olympics period[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(1): 10-16.
- [23] Yan Y L, Peng L, Li R M, *et al.* Concentration, ozone formation potential and source analysis of volatile organic compounds (VOCs) in a thermal power station centralized area: a study in Shuozhou, China[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 295-304.
- [24] 梁永贤, 尹魁浩, 胡泳涛, 等. 深圳地区臭氧污染来源的敏感性分析[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(6): 1390-1396.
- Liang Y X, Yin K H, Hu Y T, *et al.* Sensitivity analysis of ozone precursor emission in Shenzhen, China[J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(6): 1390-1396.
- [25] 李用宇, 朱彬, 安俊琳, 等. 南京北郊秋季 VOCs 及其光化学特征观测研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 2933-2942.
- Li Y Y, Zhu B, An J L, *et al.* Characteristics of VOCs and their photochemical reactivity in autumn in Nanjing northern suburb[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 2933-2942.
- [26] 邹宇. 广州大气挥发性有机物对 EKMA 曲线特征影响的研究[D]. 广州: 暨南大学, 2013.
- Zou Y. Study on the effect of volatile organic compounds on EKMA characterizations in Guangzhou[D]. Guangzhou: Jinan University, 2013.
- [27] 陈宜然, 陈长虹, 王红丽, 等. 上海臭氧及前体物变化特征与相关性研究[J]. 中国环境监测, 2011, **27**(5): 44-49.
- Chen Y R, Chen C H, Wang H L, *et al.* Analysis on concentration variety characteristics of ozone and correlations with its precursors in Shanghai[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2011, **27**(5): 44-49.
- [28] 王红丽. 上海市大气挥发性有机物化学消耗与臭氧生成的关系[J]. 环境科学, 2015, **36**(9): 3159-3167.
- Wang H L. Chemical loss of volatile organic compounds and its impact on the formation of ozone in Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3159-3167.
- [29] Liu B S, Liang D N, Yang J M, *et al.* Characterization and source apportionment of volatile organic compounds based on 1-year of observational data in Tianjin, China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **218**(2): 757-769.
- [30] Zou Y, Deng X J, Zhu D, *et al.* Characteristics of 1 year of

- observational data of VOCs, NO_x and O_3 at a suburban site in Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(12): 6625-6636.
- [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, 1992. 232-236.
- [32] Cardelino C A, Chameides W L. An observation-based model for analyzing ozone precursor relationships in the urban atmosphere [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1995, **45**(3): 161-180.
- [33] 雷瑜, 张小玲, 唐宜西, 等. 北京城区 $\text{PM}_{2.5}$ 及主要污染气体“周末效应”和“假日效应”研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(5): 1520-1528.
- Lei Y, Zhang X L, Tang Y X, *et al.* Holiday effects on $\text{PM}_{2.5}$ and other major pollutants in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(5): 1520-1528.
- [34] 周婕成, 史贵涛, 陈振楼, 等. 上海大气氮湿沉降的污染特征[J]. *环境污染与防治*, 2009, **31**(11): 30-34.
- Zhou J C, Shi G T, Chen Z L, *et al.* Contamination characteristics of nitrogen in rainwater of Shanghai [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2009, **31**(11): 30-34.
- [35] Pusede S E, Cohen R C. On the observed response of ozone to NO_x and VOC reactivity reductions in San Joaquin Valley California 1995-present [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(18): 8323-8339.

环境科学

CONTENTS

Correlation Analysis of the Urban Heat Island Effect and Its Impact Factors in China	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3987)
Application of Satellite Remote Sensing in NO _x Emission Control	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (3998)
Control Models and Effect Evaluation of Air Pollution in Jing-Jin-Ji Urban Agglomeration	WANG Zhen-bo, LIANG Long-wu, LIN Xiong-bin, <i>et al.</i> (4005)
Pollution Characteristics of Aerosol Number Concentration in Winter and Spring in a Northern Suburb of Nanjing	WU Dan, ZHANG Fan, LIU Gang, <i>et al.</i> (4015)
Source Apportionment and Size Distribution of Aerosols at Lin'an Atmosphere Regional Background Station During Winter	SHI Shuang-shuang, WANG Hong-lei, ZHU Bin, <i>et al.</i> (4024)
Seasonal Variations in Particle Size Distribution and Water-soluble Ion Composition of Atmospheric Particles in Chengdu	TAO Yue-le, LI Qin-kai, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4034)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Quanzhou City	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4044)
Chemical Characteristics and Sources of Heavy Metals in Fine Particles in Beijing in 2011-2012	ZHOU Xue-ming, ZHENG Nai-jia, LI Ying-hong, <i>et al.</i> (4054)
Pollution Assessment and Source Analysis of Metals in PM _{2.5} in Haicang District, Xiamen City, China	ZHAO Li-si, YU Rui-lian, XU Ling-ling, <i>et al.</i> (4061)
Characteristics and Health Risk Assessment of Metallic Elements in PM _{2.5} Fraction of Road Dust	ZHANG Jing, ZHANG Yan-jie, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4071)
Seasonal Variations in PM ₁₀ and Associated Chemical Species in Jiuxian Mountain in Fujian Province	WEI Ya, LIN Chang-cheng, HU Qiong-hua, <i>et al.</i> (4077)
Characteristics of C2-C6 Hydrocarbons During the Winter Air Pollution Period in Beijing Urban Area	LI Yue, WEI Wei, YANG Gan, <i>et al.</i> (4084)
Analysis of Atmospheric Particulate Matter Pollution Characteristics by LIDAR in Beijing During Spring Festival, 2016	SHI Lin-lin, LI Ling-jun, LI Qian, <i>et al.</i> (4092)
Influence Factors and Sensitivity of Ozone Formation in Langfang in the Summer	LI Lei, ZHAO Yu-mei, WANG Xu-guang, <i>et al.</i> (4100)
Impact of Human Activities on Water-Rock Interactions in Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (4108)
Distinguishing the Properties and Sources of the Dissolved Organic Matter in Karst Reservoir Water During Winter Using Three-Dimensional Fluorescence Spectrum Technology: A Case Study in Wulixia Reservoir of Guangxi Province	LU Xiao-xuan, PENG Wen-jie, LI Qiang, <i>et al.</i> (4120)
Analysis of Temporal and Spatial Variations in Trace Element Migration in Karst Critical Zone: An Example of Jiguan Cave, Henan	LIANG Sha, YANG Yan, ZHANG Na, <i>et al.</i> (4130)
Eutrophication and Characteristics of Cyanobacteria Bloom in the Summer in Guishi Reservoir	GOU Ting, MA Qian-li, WANG Zhen-xing, <i>et al.</i> (4141)
Spatial and Temporal Distribution of Chlorophyll a and Its Relationship to Algae and Environmental Factors in Aha Reservoir	LUO Yi-fu, LI Lei, LI Qiu-hua, <i>et al.</i> (4151)
Spatio-temporal Variations in Phytoplankton Community in Shahe Reservoir, Tianmuhu, China	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4160)
Spatio-temporal Variations, Contamination and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in the Sediments of Chenghai Lake	YU Zhen-zhen, LIU En-feng, ZHANG En-lou, <i>et al.</i> (4169)
Characteristics of Phosphorus Output Through Runoff on a Red Soil Slope Under Natural Rainfall Conditions	ZUO Ji-chao, ZHENG Hai-jin, XI Tong-hang, <i>et al.</i> (4178)
Occurrence, Distribution and Health Risk of the Phthalate Esters in Riparian Soil in the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (4187)
Seasonal Distribution, Composition, and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in the Main Stream of the Luanhe River	WANG Yi-zhen, ZHANG Shi-lu, KONG Fan-qing, <i>et al.</i> (4194)
Occurrence and Human Exposure Risk Assessment of Organophosphate Esters in Drinking Water in the Weifang Binhai Economic-Technological Development Area	DONG Zheng, MA Yu-long, LI Jun-qi, <i>et al.</i> (4212)
Contamination Characteristics and Human Exposure to Organophosphate Flame Retardants in Road Dust from Suzhou City	LI Jing, WANG Jun-xia, XU Wan-ting, <i>et al.</i> (4220)
Cancer Risk of Human Intake of PAH-Contaminated Particles Based on Hand-to-Mouth Activities	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (4228)
Spatio-temporal Evolution of Groundwater Vulnerability Based on Spatial Autocorrelation	LIU Yu, LAN Shuang-shuang, ZHANG Yong-xiang, <i>et al.</i> (4236)
Preparation of Ag-AgI/CN/MA Composites and Their Visible-light Photocatalytic Performance	ZHANG Sai, ZHANG Li-li, HU Chun (4245)
Effect of <i>Eichhornia crassipes</i> on Ammonification and Denitrification Microorganisms in Eutrophic Freshwaters	LI Jie, JIANG Li-juan, WANG Xiao-lin, <i>et al.</i> (4253)
Utilization of Copper (II) Wastewater for Enhancing the Treatment of Chromium (VI) Wastewater in Microbial Fuel Cells	XIONG Xiao-min, WU Xia-yuan, JIA Hong-hua, <i>et al.</i> (4262)
Efficiency and Microecology of a Soil Infiltration System with High Hydraulic Loading for the Treatment of Swine Wastewater	SU Cheng-yuan, LIU Fan-fan, ZHONG Yu, <i>et al.</i> (4271)
Effects of Bacteria on the Growth of and Lipid Accumulation in <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivated in Municipal Wastewater	TU Ren-jie, JIN Wen-biao, HAN Song-fang, <i>et al.</i> (4279)
Enhanced Antibiotic Resistant Bacteria Removal from Wastewater Treatment Plant by Different Disinfection Technologies	LIU Ya-lan, MA Cen-xin, DING He-zhou, <i>et al.</i> (4286)
Coking Wastewater Treatment Efficiency and Comparison of Acute Toxicity Characteristics of the AnMBR-A-MBR and A ² -MBR Processes	ZHU Jia-di, LI Fei-fei, CHEN Li-jun (4293)
Stability of the CANON Process Based on Real-Time Control Technologies	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (4302)
Improving Nitrogen and Phosphorus Removal from Reclaimed Water Using a Novel Sulfur/Iron Composite Filler	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (4309)
Start-up and Capacity Enhancement of a Partial Nitrification Pilot Reactor in Continuous Flow	ZHU Qiang, LIU Kai, DONG Shi-yu, <i>et al.</i> (4316)
Quick Start-up Performance of Combined ANAMMOX Reactor Based on Different Inoculated Sludge Types	LÜ Gang, LI Tian, XU Le-zhong, <i>et al.</i> (4324)
Effect of Two-Stage Aeration on Nitrogen Removal Performance of Aerobic Granular Sludge	WANG Wen-xiao, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (4332)
Construction of a High Efficiency Anaerobic Digestion System for Vinegar Residue	ZHOU Yun-long, XU Zhi-yang, ZHAO Ming-xing, <i>et al.</i> (4340)
Comparison of Ecological Risk Assessment Based on the Total Amount and Speciation Distribution of Heavy Metals in Soil: A Case Study for Longyan City, Fujian Province	WANG Rui, CHEN Ming, CHEN Nan, <i>et al.</i> (4348)
Heavy Metal Contamination of Soils and Crops near a Zinc Smelter	CHEN Feng, DONG Ze-qin, WANG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4360)
Characteristics and Influencing Factors of CH ₄ Emissions from the Drawdown Area of the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (4370)
Effects of Plastic Film Mulching on Nitrous Oxide Emissions from a Vegetable Field	FENG Di, HAO Qing-ju, ZHANG Kai-li, <i>et al.</i> (4380)
Effects of Bamboo Biochar on Greenhouse Gas Emissions During the Municipal Sludge Composting Process	XIANG Qiu-jie, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4390)
Removal of Cd from Soil by <i>Aspergillus fumigatus</i> in a Semi-solid Culture	CHEN Yao-ning, WANG Yuan-nan, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4398)
Removal of Chlortetracycline and Morphological Changes in Heavy Metals in Swine Manure Using the Composting Process	WEN Qin-xue, CAO Yong-sen, CHEN Zhi-qiang (4405)
Remediation of Petroleum-Contaminated Soil Using a Bioaugmented Compost Technique	WU Man-li, CHEN Kai-li, YE Xi-qiong, <i>et al.</i> (4412)
Effects of Microbial Diversity on Soil Carbon Mineralization	AN Li-yun, LI Jun-jian, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4420)
Ozone Deposition and Risk Assessment for a Winter Wheat Field; Partitioning Between Stomatal and Non-stomatal Pathways	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (4427)
Progress in the Studies of Precipitation Chemistry in Acid Rain Areas of Southwest China	ZHOU Xiao-de, XU Zhi-fang, LIU Wen-jing, <i>et al.</i> (4438)