

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.8  
第41卷 第8期

目次

首都重大活动与空气重污染应急减排措施效果对比分析 ..... 钟焱盛, 周颖, 程水源, 王晓琦, 邵玄逸 (3449)

基于天津市在线数据评估 ISORROPIA-II 模式结果及气溶胶 pH 的影响因素 ..... 高洁, 史旭荣, 卫昱婷, 宋少洁, 史国良, 冯银厂 (3458)

餐饮源有机颗粒物排放特征 ..... 李源逵, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭, 胡敏 (3467)

华中地区黄冈市一次重度污染期间 PM<sub>2.5</sub> 中 12 种微量元素特征及来源解析 ..... 陈展乐, 田倩, 毛瑶, 刘威杰, 石明明, 程钺, 胡天鹏, 邢新丽, 祁士华, 胡金旭 (3475)

艾比湖地区气溶胶光学特性分析 ..... 张喆, 丁建丽, 王瑾杰 (3484)

天津市冬季重污染二次有机化学污染特征及 VOCs 对 SOA 生成潜势 ..... 徐虹, 唐邈, 肖致美, 高璟贇, 杨宁, 李立伟, 郑乃源, 陈魁, 邓小文 (3492)

郑州市某城区冬季不同污染水平大气 VOCs 特征及源解析 ..... 李一丹, 尹沙沙, 张瑞芹, 于世杰, 杨健, 张栋 (3500)

长江三角洲 2010~2018 年生物质燃烧中等挥发性有机物 (IVOCs) 排放清单 ..... 朱永慧, 王倩, 黄凌, 殷司佳, 李莉, 王杨君 (3511)

北方常见绿化树种 BVOCs 排放特征及其与光合作用参数的相关性 ..... 许燕, 李双江, 袁相洋, 冯兆忠 (3518)

广州地区秋季不同站点类型地面臭氧变化特征与影响因子 ..... 高平, 庄立跃, 王龙, 陈瑜萍, 闫慧, 沈劲, 范丽雅, 叶代启 (3527)

泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析 ..... 李凯, 刘敏, 梅如波 (3539)

有色冶炼园区道路扬尘中重金属污染特征及健康风险评价 ..... 冯于耀, 史建武, 钟曜谦, 韩新宇, 封银川, 任亮 (3547)

西安市高校校园地表灰尘重金属污染来源解析 ..... 樊馨瑶, 卢新卫, 刘慧敏, 秦青 (3556)

超低排放高湿度气态颗粒物监测方法及燃气电厂实际测试 ..... 胡月琪, 颜旭, 孔川, 张虎, 郭晓东 (3563)

厦门市船舶控制区大气污染物排放清单与污染特征 ..... 王坚, 黄屋, 刘艳英, 陈森阳, 吴艳聪, 何月云, 杨心怡 (3572)

基于交通流的成都市高分辨率机动车排放清单建立 ..... 潘玉瑾, 李媛, 陈军辉, 石嘉诚, 田红, 张季, 周敬, 陈霞, 刘政, 钱骏 (3581)

基于无人机多光谱影像和 OPT-MPP 算法的水质参数反演 ..... 黄昕晰, 应晗婷, 夏凯, 冯海林, 杨根晖, 杜晓晨 (3591)

不同水体分层对沉积物间隙水氮素垂向分布影响: 以三峡水库和小湾水库为例 ..... 刘静思, 朱晓声, 胡子龙, 张思思, 杨正健, 纪道斌, 刘德富 (3601)

城市河道表层水及沉积物中微塑料的污染现状与污染行为 ..... 赵昕, 陈浩, 贾其隆, 沈忱思, 朱弈, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (3612)

上海河道浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素分析 ..... 许志, 陈小华, 沈根祥, 朱英, 钱晓雍, 张心良, 张卫, 胡双庆, 白玉杰 (3621)

过氧化钙 (CaO<sub>2</sub>) 联合生物炭对河道底泥的修复 ..... 李雨平, 姜莹莹, 刘宝明, 阮文权, 缪恒锋 (3629)

基于双同位素 ( $\delta^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ - $\delta^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ ) 和 IsoSource 模型的岩溶槽谷区地下水硝酸盐来源的定量示踪 ..... 徐璐, 蒋勇军, 段世辉, 何瑞亮 (3637)

三峡库区规模化顺坡沟壑果园氮、磷输出过程及流失负荷 ..... 严坤, 王玉宽, 刘勤, 徐佩, 闫洋洋 (3646)

高度城镇化地区城市小区降雨径流污染特征及负荷估算 ..... 高斌, 许有鹏, 陆苗, 林芷欣, 徐兴 (3657)

Fe@GOCS 的制备及其对水中 As(III) 的吸附 ..... 赵超然, 单慧媚, 曾春芽, 张进贤, 彭三曦 (3665)

微塑料对水中铜离子和四环素的吸附行为 ..... 薛向东, 王星源, 梅雨晨, 庄海峰, 宋亚丽, 方程冉 (3675)

多孔填料特性对生物膜形成影响 ..... 江宇勤, 厉炯慧, 方治国 (3684)

硝化生物膜系统对低温的适应特性: MBBR 和 IFAS ..... 李初, 于莉芳, 张兴秀, 戴子承, 滑思思, 彭党聪 (3691)

单质硫自养短程反硝化耦合厌氧氨氧化强化脱氮 ..... 方文烨, 李祥, 黄勇, 郭超然, 胡羽婷, 陶仁杰 (3699)

间歇梯度曝气的生活污水好氧颗粒污泥脱氮除磷 ..... 张玉君, 李冬, 李帅, 张杰 (3707)

基于不同废污泥源的短程反硝化快速启动及稳定性 ..... 张星星, 王超超, 王焱, 徐乐中, 吴鹏 (3715)

基于 AHP-PROMETHEE II 法的鸟粪石磷回收污泥预处理方案决策 ..... 刘晓雷, 李安婕 (3725)

零价铁对厌氧消化过程中氨氮抑制解除的影响 ..... 刘吉宝, 牛雨彤, 郁达伟, 谭颖峰, 左壮, 魏源送 (3731)

基于厌氧膜生物反应器的剩余污泥-餐厨垃圾厌氧共消化性能 ..... 戴金金, 牛承鑫, 潘阳, 陆雪琴, 甄广印, 郑朝婷, 张瑞良, 何欣昱 (3740)

亚剂量抗生素诱导抗性基因水平迁移 ..... 袁其懿, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, 何义亮 (3748)

四环素胁迫对 *Shigella flexneri* 细菌四环素抗性基因抗性表达的影响过程 ..... 高品, 阮晓慧, 邱文婕, 薛罡, 钱雅洁 (3758)

羟胺对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的竞争性选择 ..... 乔昕, 王博, 郭媛媛, 彭永臻 (3765)

高温冲击对亚硝酸盐氧化过程中微生物菌群结构影响 ..... 侯晓薇, 牛永健, 李维维, 王光杰, 孙洪伟 (3773)

微生物种间相互作用产生锰氧化的普适性及其潜在应用 ..... 宁雪, 梁金松, 柏耀辉, 廖恺玲俐, 刘会娟, 曲久辉 (3781)

三亚河红树林表层沉积物中好氧氨氧化微生物的分布特征及潜在硝化速率 ..... 罗晴, 甄毓, 彭宗波, 贺惠 (3787)

臭氧污染对水稻生长、产量及矿质金属元素含量的影响 ..... 方笑堃, 罗小三, 张丹, 吴礼春, 邱丹, 陈志炜, 赵朕 (3797)

改变碳输入对新疆天山雪岭云杉林土壤呼吸的短期影响 ..... 邵康, 贡璐, 何学敏, 陈文静, 张雪妮, 朱海强 (3804)

有机无机肥配施对不同程度盐渍土 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 周慧, 史海滨, 郭珈玮, 张文聪, 王维刚 (3811)

原位电阻热脱附土壤升温机制及影响因素 ..... 葛松, 孟宪荣, 许伟, 施维林 (3822)

羽序灯心草作为酸性矿山废弃地先锋植物潜力 ..... 黄建洪, 伏江丽, 严鑫睿, 尹凤, 田森林, 宁平, 李英杰 (3829)

滴灌方式和生物质炭对温室土壤矿质态氮及其微生物调控的影响 ..... 蔡九茂, 刘杰云, 邱虎森, 吕谋超, 周新国 (3836)

棉秆炭调控对碱性镉污染水稻根际土壤真菌群落结构和功能的影响 ..... 刘师豆, 韩耀光, 朱新萍, 吴相南 (3846)

不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响 ..... 魏宾纭, 周航, 刘佳炜, 张竞颐, 黄芳, 霍洋, 胡雨丹, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (3855)

螯合剂 GLDA 对象草修复镉污染农田的影响 ..... 覃建军, 唐盛爽, 蒋凯, 黄敬, 侯红波, 龙坚, 彭佩钦 (3862)

种植业面源污染防控技术发展历程分析及趋势预测 ..... 俞映惊, 杨林章, 李红娜, 朱昌雄, 杨祺, 薛利红 (3870)

《环境科学》征订启事 (3636) 《环境科学》征稿简则 (3764) 信息 (3538, 3628, 3724)

# 泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析

李凯, 刘敏, 梅如波

(山东省泰安生态环境监测中心, 泰安 271000)

**摘要:** 2018年5~7月对泰安市城区站点的臭氧及前体物进行在线监测,并基于特征比值法和光化学模型分析了臭氧及前体物的污染特征及臭氧生成对前体物的敏感性。结果表明,观测期间泰安市正遭受较为严重的臭氧(O<sub>3</sub>)污染,臭氧浓度的日变化呈典型的单峰型变化,15:00左右出现最高值,氮氧化物(NO<sub>x</sub>)和VOCs的日变化趋势整体呈现夜间高白天低的变化特征。由O<sub>3</sub>生成效率(OPE)、VOCs/NO<sub>x</sub>和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/NO<sub>2</sub>特征比值法及基于EKMA曲线的方法均得出观测期间泰安市大气O<sub>3</sub>光化学生成偏向于NO<sub>x</sub>敏感区及过渡区,削减NO<sub>x</sub>和VOCs均对O<sub>3</sub>生成具有控制作用。同时基于EKMA曲线的方法还得出在O<sub>3</sub>前体物浓度减排时按照丙烯等效浓度(PE)与NO<sub>x</sub>浓度比值为8:3进行VOCs(PE)和NO<sub>x</sub>削减可以达到O<sub>3</sub>浓度控制的最佳效果。

**关键词:** 臭氧(O<sub>3</sub>); 氮氧化物(NO<sub>x</sub>); 挥发性有机物(VOCs); 特征比值; EKMA曲线; 泰安市

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)08-3539-08 DOI: 10.13227/j.hjks.201912046

## Pollution Characteristics and Sensitivity Analysis of Atmospheric Ozone in Taian City

LI Kai, LIU Min, MEI Ru-bo

(Monitoring Center for Ecological Environment of Taian, Taian 271000, China)

**Abstract:** Online monitoring of ozone (O<sub>3</sub>) and its precursors was carried out at urban stations in Taian City from May to July, 2018. The pollution characteristics of O<sub>3</sub> and its precursors and the sensitivity of O<sub>3</sub> generation to its precursors were also analyzed based on the characteristic ratio method and a photochemical model. The results indicated that Taian City was suffering from serious O<sub>3</sub> pollution during the observation period. The daily variation of the O<sub>3</sub> concentration exhibited an obvious convex trend with the highest value at approximately 15:00, whereas the concentrations of nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>) and VOCs had decreasing trends during the daytime and increasing trends during the night. It was concluded from the results of the characteristic ratio methods (OPE, VOCs/NO<sub>x</sub>, and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/NO<sub>2</sub>) and the empirical kinetics modeling approach (EKMA) curve method that the photochemical generation of O<sub>3</sub> in Taian was controlled by the NO<sub>x</sub> concentration and the transition area, which means that reducing the emissions of NO<sub>x</sub> and VOCs has a controlling effect on O<sub>3</sub> pollution. Additionally, the results of the EKMA curve method also showed that the best effect of O<sub>3</sub> concentration control could be achieved by reducing the concentration of O<sub>3</sub> precursors, and reducing the concentrations of VOCs (propylene equivalent, PE) and NO<sub>x</sub> according to a PE:NO<sub>x</sub> concentration ratio of 8:3.

**Key words:** ozone (O<sub>3</sub>); nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>); volatile organic compound (VOCs); ratios method; empirical kinetics modeling approach (EKMA); Taian City

近年来,中国主要城市区域O<sub>3</sub>浓度呈持续上升趋势,部分城市地区O<sub>3</sub>污染逐渐取代颗粒物污染成为首要污染物<sup>[1-3]</sup>。国内关于大气O<sub>3</sub>的监测研究主要集中在京津冀<sup>[4-6]</sup>、长江三角洲<sup>[7-9]</sup>和珠江三角洲<sup>[10-12]</sup>等地区。Sun等<sup>[1]</sup>的研究发现2003~2015年,泰山夏季O<sub>3</sub>浓度呈现逐年增长的态势,在7~8月的平均增长速率为 $2.1 \times 10^{-9}$ 。

对流层O<sub>3</sub>主要由挥发性有机物(VOCs)与氮氧化物(NO<sub>x</sub>)的光化学反应产生。O<sub>3</sub>的生成与其前体物存在着非线性关系,判明O<sub>3</sub>生成敏感性对制定O<sub>3</sub>控制对策十分重要<sup>[13,14]</sup>。中国多地开展了O<sub>3</sub>生成机制研究,以探讨局地O<sub>3</sub>生成敏感性<sup>[15]</sup>。广州<sup>[16]</sup>、香港<sup>[17]</sup>、北京<sup>[18]</sup>、贵阳<sup>[19]</sup>和舟山<sup>[20]</sup>等地城区O<sub>3</sub>为VOCs控制;泰山<sup>[21]</sup>、贵阳郊区<sup>[19]</sup>和燕山<sup>[6]</sup>等郊区或乡村地区因为生物源VOCs排放量较高,O<sub>3</sub>多为NO<sub>x</sub>控制;马伟等<sup>[22]</sup>的研究表明威海

市环翠区O<sub>3</sub>为VOCs控制,经济开发区的O<sub>3</sub>为NO<sub>x</sub>和VOCs共同控制。

泰安市位于山东省中部的泰山南麓,三面环山,有着与平原城市显著不一样的地形地貌和气象条件。2015~2018年,泰安市O<sub>3</sub>最大8h平均浓度(O<sub>3</sub>-8h)超过文献[23]中规定的一级浓度限值的天数分别为145、195、176和178d,在山东省位居前列。揭示泰安地区O<sub>3</sub>污染特征及与前体物VOCs和NO<sub>x</sub>之间敏感性关系有助于泰安市制定相应的减排策略。

本研究在泰安市城区设置观测站点,采用在线观测法分析了环境中的O<sub>3</sub>及前体物的变化规律,并利用特征比值法和光化学模型分析了该地区2018年6~7月部分时段O<sub>3</sub>生成过程对O<sub>3</sub>前体物的敏

收稿日期: 2019-12-06; 修订日期: 2020-03-04

作者简介: 李凯(1989~),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向为环境污染监测与治理,E-mail: jk\_likai@126.com

感性.

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集分析

本研究采样点位于泰安市泰山区的山东电力高等专科学校(泰安校区)校内(36.18°N, 117.11°E),距泰山脚下约4 km,站点周围分布着校园、商区、交通干道及居民区,是个典型的城市中心站点,同时该站点也是泰安市的国控监测点,监测点位置如图1(a)所示.

2018年5月29日~7月16日使用在线监测仪监测 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_y$ (表示所有活性氮化合物)、 $\text{O}_3$ 和 $\text{H}_2\text{O}_2$ 等数据;于6月11日~7月16日采集VOCs样品.采样分析仪器设备如图1(b)所示.VOCs的观测采用由中国科学院生态研究中心自主

研发的GC-FID-VOCs在线监测仪进行连续监测,采样频率为1 h.环境空气VOCs样品通过采样泵以 $50 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 的流速进入初始温度为 $-80^\circ\text{C}$ 的吸附管中完成预浓缩,然后加热至 $100^\circ\text{C}$ 进行热脱附,持续6 min;热脱附开始5 s后,用载气 $\text{N}_2$ 以 $5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 的流速将解吸的VOCs载入毛细管柱(OV-1, 30 m柱长 $\times 0.32 \text{ mm}$ 直径 $\times 1.0 \mu\text{m}$ 厚度)中进行分离.毛细管柱的温度程序如下:初始温度为 $-60^\circ\text{C}$ ,保持3 min;以 $12^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温至 $-20^\circ\text{C}$ ;以 $6^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温至 $30^\circ\text{C}$ ;以 $10^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温至 $170^\circ\text{C}$ ,保持2 min.氢火焰离子化检测器(FID)的温度为 $250^\circ\text{C}$ .为了保证观测数据的有效性和可靠性,观测期间每2 d进行一次校准,采用美国环保署认可的Linde SPECTRA Environmental Gases标准气体进行5点校准,校准时相关系数均在0.992~0.995.

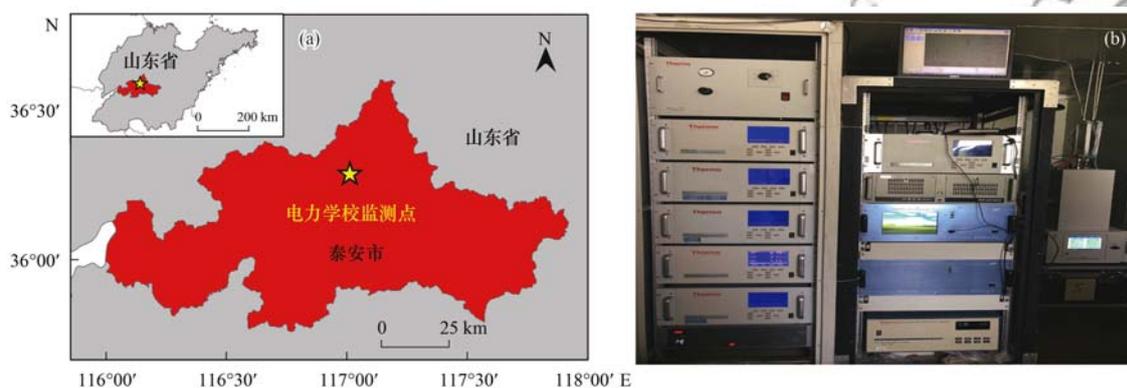


图1 监测点位及采样分析仪器设备

Fig. 1 Bitmap of monitoring points and an image of sampling and analysis instruments and equipment

### 1.2 特征比值法判断 $\text{O}_3$ 生成敏感性

基于同步观测的方法,可以获取某种类似指标的物质浓度或者物质浓度比值来判断该地区 $\text{O}_3$ 生成是VOCs敏感还是 $\text{NO}_x$ 敏感.总结文献[24~28],判断 $\text{O}_3$ 生成敏感性的特征比值法包括 $\text{O}_3$ 生成效率(ozone production efficiency, OPE,  $\Delta\text{O}_3/\Delta\text{NO}_2$ )、 $\text{VOCs}/\text{NO}_x$ 和 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{NO}_2$ 等,其中 $\text{NO}_2$ 表示 $\text{NO}_y$ 与 $\text{NO}_x$ 的差值,其判断标准见表1.

表1 判断 $\text{O}_3$ 生成敏感性的特征比值

方法	VOCs 敏感	过渡区	$\text{NO}_x$ 敏感
OPE	<4.0	4.0~7.0	>7.0
$\text{VOCs}/\text{NO}_x$	<4.0	4.0~8.0	>8.0
$\text{H}_2\text{O}_2/\text{NO}_2$	<0.15	0.15~0.2	>0.2

### 1.3 丙烯等效浓度

丙烯等效浓度(PE,以碳原子数计,下同)是评估VOCs的光化学反应活性的方法<sup>[29]</sup>,其定义如下:

$$\text{PE}(j) = \text{Conc.}(j) \times k_{\cdot\text{OH}}(j)/k_{\cdot\text{OH}}(\text{丙烯}) \quad (1)$$

式中,Conc.( $j$ )是物种 $j$ 的浓度(单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ); $k_{\cdot\text{OH}}(j)$ 和 $k_{\cdot\text{OH}}(\text{丙烯})$ 分别为物种 $j$ 和丙烯与 $\cdot\text{OH}$ 的反应速率常数.不同VOCs物种对光化学的贡献是不同的,这主要决定于其光化学活性.低反应活性的VOCs物种即使其大气浓度很高,也未必是 $\text{O}_3$ 的重要前体物;高反应活性的VOCs物质即使浓度很低,也有可能对 $\text{O}_3$ 生成具有重要贡献.因此分析VOCs丙烯等效浓度比分析实际浓度对于有效控制 $\text{O}_3$ 污染更有意义<sup>[30]</sup>.

### 1.4 光化学模型判断 $\text{O}_3$ 生成敏感性

经典动力学模拟法(empirical kinetics modeling approach, EKMA)是通过美国环保署的EKMA模型建立起的用于诊断臭氧敏感性的方法,是最早将 $\text{NO}_x$ 、VOCs与 $\text{O}_3$ 三者建立关系的模型方法.通过使用未进行光化学反应前不同浓度的 $\text{NO}_x$ 及VOCs浓度,计算臭氧最大生成质量浓度 $\rho(\text{O}_3)$ ,通过式(2)定量 $\text{O}_3$ 、 $\text{NO}_x$ 和VOCs三者之间复杂的非线性关系.

$$\rho(\text{O}_3) = f(\text{NO}_x \pm \Delta\text{NO}_x, \text{VOCs} \pm \Delta\text{VOCs}) \quad (2)$$

EKMA曲线指的是使用该模型方法由不同的

$\text{NO}_x$  和 VOCs 初始浓度对应的  $\text{O}_3$  生成所绘制而成的  $\text{O}_3$  等浓度曲线. EKMA 曲线作为一种联系一次污染物与二次污染物的纽带,用于研究城市臭氧浓度与前体物敏感性关系.

经典的 EKMA 法中,使用了 CB-IV 机制作为臭氧形成的化学机制进行了 EMKA 曲线的计算与绘制<sup>[31]</sup>. 相较于 CB-IV 化学机制,现今有更为精细全面的主化学机制(MCM 机制),涵盖了上万种气相化学反应,反应机制相较 CB-IV 机制更能有效代表真实的大气化学活动<sup>[32]</sup>,本研究采用了 MCM 机制作为主化学机制替代了经典 EMKA 方法中的化学机制.

## 2 结果与讨论

### 2.1 泰安市大气臭氧及相关物种的浓度变化特征

图 2 利用国控监测数据,给出了泰安市 2018 年

该观测点  $\text{O}_3$  和  $\text{NO}_x$  的时间序列及月均值变化规律. 2018 年,该观测点  $\text{NO}_x$  年均值为  $61 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,超过环境空气质量标准规定的二级浓度限值( $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ );  $\text{NO}_x$  日均值超过环境空气质量标准规定的二级浓度限值( $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )的总天数为 58 d,主要发生在秋季和冬季;  $\text{NO}_x$  日均值最大为  $271 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,发生在 12 月 18 日;  $\text{NO}_x$  月均值最低为  $22.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,发生在 8 月,6~8 月  $\text{NO}_x$  总体浓度较低,主要原因为光照充足,光化学反应强烈导致  $\text{NO}_x$  被大量消耗. 2018 年,该观测点  $\text{O}_3$  日均值最大为  $207 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,发生在 6 月 3 日,月均值最大为  $143 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,发生在 6 月.  $\text{O}_3$  浓度有明显的季节变化,夏季高,冬季低,超标多发生在夏季,主要原因是高温和强太阳辐射有利于光化学反应的进行.

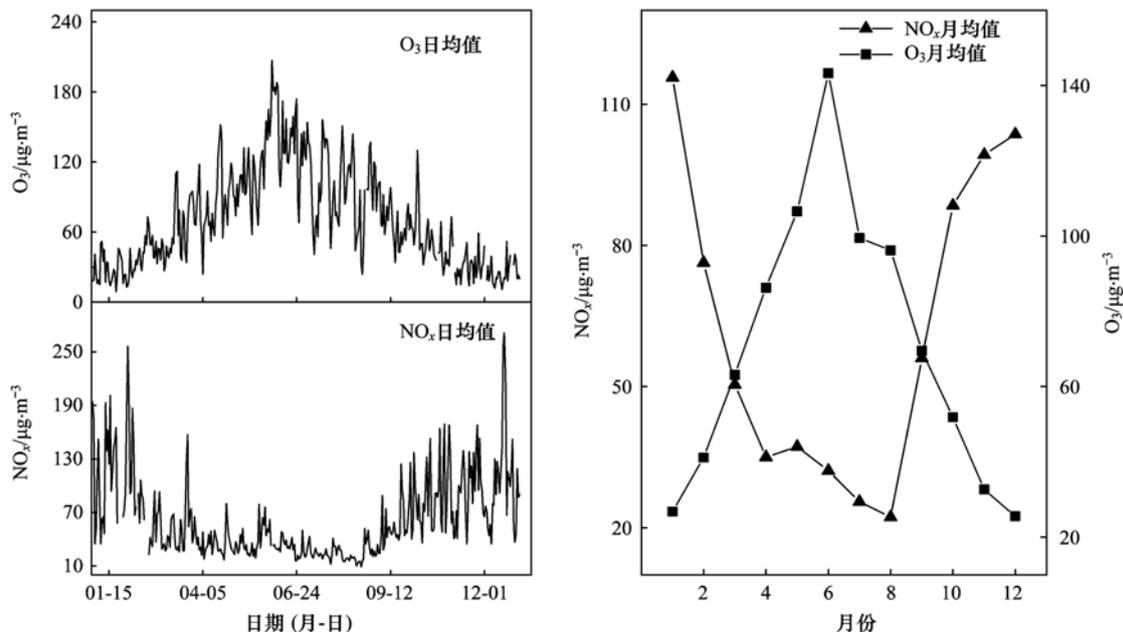


图 2 2018 年观测点  $\text{O}_3$  和  $\text{NO}_x$  时间序列及月均值变化

Fig. 2 Time series and monthly mean changes of  $\text{O}_3$  and  $\text{NO}_x$  concentrations at observation points in 2018

本次观测以 6 月为主,正是该站点  $\text{O}_3$  超标最严重的月份,图 3 给出了观测期间的气象参数和  $\text{O}_3$  的污染现状,从中可知,观测期间风速均值约为  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,大气温度在  $18 \sim 36^\circ\text{C}$  范围内波动,相对湿度在  $10\% \sim 95\%$  之间波动,观测期间  $\text{O}_3$  日最大 8 h 平均值( $\text{O}_3$ -8h)和小时均值( $\text{O}_3$ -1h)超过国家  $\text{O}_3$  日最大 8 h 均值一、二级标准( $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )以及小时均值二级标准( $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )的天数分别占总天数的 93.6%、68.1% 和 79.5%,集中出现在 5 月 29 日~6 月 7 日、6 月 10~23 日和 6 月 26 日~7 月 5 日;其中, $\text{O}_3$ -8h 和  $\text{O}_3$ -1h 最大值分别为  $275.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $298.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 上述结果均表明,泰安市该区域在观测期间正遭受严重的  $\text{O}_3$  污

染,与国控监测数据基本一致.

为判断  $\text{O}_3$  生成敏感性,同步监测了臭氧相关物种的浓度特征,见图 4. 观测点  $\text{O}_x$ 、VOCs、 $\text{NO}_z$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{NO}_2$  和  $\text{NO}$  平均体积分数分别为  $73.99 \times 10^{-9}$ 、 $16.57 \times 10^{-9}$ 、 $4.60 \times 10^{-9}$ 、 $16.19 \times 10^{-9}$ 、 $14.70 \times 10^{-9}$  和  $1.78 \times 10^{-9}$ ,小时最大值分别为  $147.47 \times 10^{-9}$ 、 $60.08 \times 10^{-9}$ 、 $18.70 \times 10^{-9}$ 、 $136.94 \times 10^{-9}$ 、 $68.23 \times 10^{-9}$  和  $82.46 \times 10^{-9}$ . 甲醛( $3.18 \times 10^{-9}$ )、丙酮( $2.02 \times 10^{-9}$ )、丙烷( $1.71 \times 10^{-9}$ )、乙醛( $1.39 \times 10^{-9}$ )和丁烷( $0.92 \times 10^{-9}$ )是平均体积分数最高的前 5 种 VOCs 物种,相应的 PE 值见表 2.

为进一步研究  $\text{O}_3$  与前体物的相关性,绘制了  $\text{O}_3$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$  和 VOCs 日变化曲线,见图 5. 从中可知

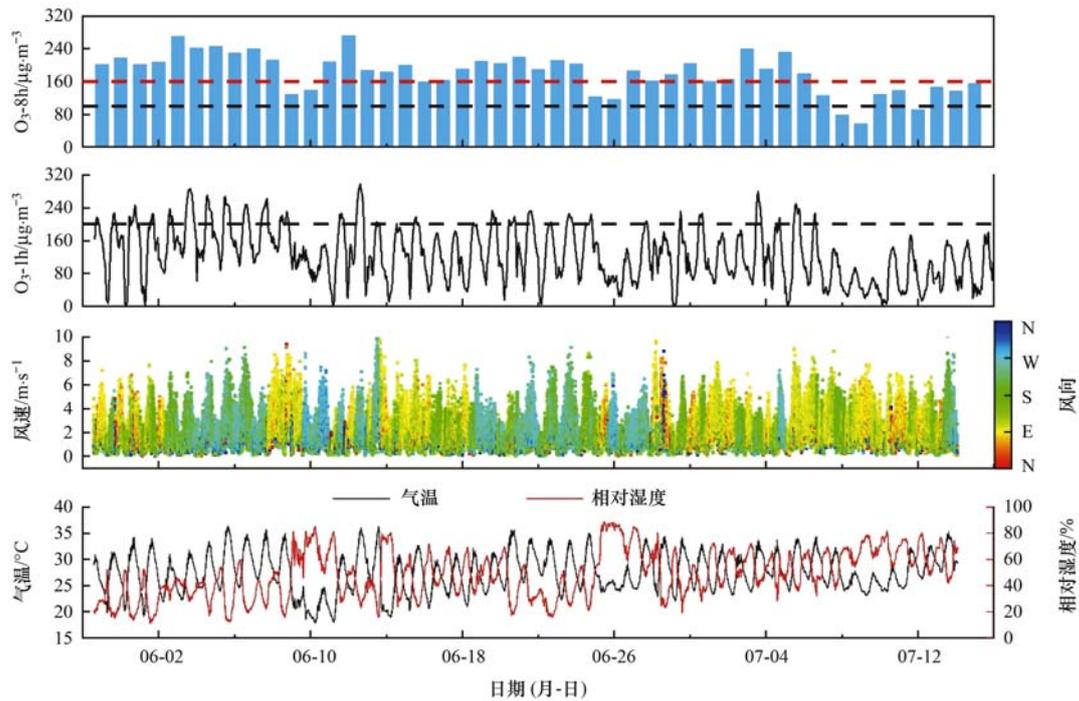
图3 观测期间 O<sub>3</sub> 污染现状Fig. 3 Status of O<sub>3</sub> pollution during the observation period

表2 观测期间 VOCs 主要组分平均体积分数和 PE 值

Table 2 Mean concentrations and PE of main components of VOCs during the observation period

序号	组分	平均体积分数 × 10 <sup>-9</sup>	PE × 10 <sup>-9</sup>
1	甲醛	3.18	1.13
2	丙酮	2.02	0.02
3	丙烷	1.71	0.07
4	乙醛	1.39	0.79
5	丁烷	0.92	0.08
6	甲苯	0.88	0.19
7	异戊烷	0.81	0.11
8	苯乙烯	0.72	1.58
9	戊醛	0.62	0.77
10	苯	0.60	0.03
11	丁醛	0.56	0.57
12	正戊烯	0.53	0.63
13	异丁烷	0.50	0.04
14	异戊二烯	0.48	1.82
15	丁烯醛	0.47	0.57
16	乙苯	0.33	0.09
17	十二烷	0.32	0.16
18	戊烷	0.31	0.04
19	间/对-二甲苯	0.28	0.20
20	丙醛	0.27	0.21

O<sub>3</sub> 浓度(体积分数)的日变化呈典型的单峰型变化, O<sub>3</sub> 在 13:00 ~ 17:00 左右较高, 15:00 左右出现最高值, 与北京<sup>[33]</sup> 和南京<sup>[34]</sup> 地区接近; VOCs 日变化趋势整体呈现夜间高白天低的变化特征, 早晚 VOCs 浓度(体积分数)高表明早晚存在较强的人类活动, 如城市地区机动车尾气排放等, 中午和下午由于气象条件有利于污染物的扩散而且大气光化学反应活

性较强也会消耗一定量的 VOCs, 造成大气中 VOCs 的浓度下降; NO<sub>2</sub> 夜间浓度明显大于白天, 这是由于白天特别是 13:00 ~ 17:00 时段 NO<sub>2</sub> 等在较强的太阳辐射下发生光化学反应生成 O<sub>3</sub>, 导致 O<sub>3</sub> 上升, 而夜间低地层 O<sub>3</sub> 又与 NO 反应转化为 NO<sub>2</sub><sup>[35]</sup>, 同时夜间风速较小, 大气多处于稳定状态, 且泰安属于山地, 易出现逆温, 不利于污染物的扩散, 使得 NO<sub>2</sub> 在近地层积累; NO 峰值出现在 06:00 左右, 主要是由于观测点靠近蔬菜批发市场, 运输车辆工作较早, 随着太阳辐射强度的增强, NO 在氧化剂的参与下发生光化学反应转化为 NO<sub>2</sub>, 浓度逐渐降低<sup>[36]</sup>.

## 2.2 观测期间臭氧生成对前体物的敏感性分析

### 2.2.1 特征比值法

OPE 的定义为每氧化一分子 NO<sub>2</sub> 到 NO<sub>2</sub> 所生成的 O<sub>3</sub> 分子数, 由于在城市地区 NO<sub>x</sub> 较高, NO 对 O<sub>3</sub> 的滴定较为明显, 因此一般选用 O<sub>x</sub> (O<sub>x</sub> = O<sub>3</sub> + NO<sub>2</sub>) 代表 O<sub>3</sub> 生成量<sup>[37]</sup>. 为尽可能真实反映局地光化学生成的效率, 选取了风速低于 3 m·s<sup>-1</sup> 且大气光化学反应活性最强的时段(10:00 ~ 16:00) 上述 3 种污染物小时平均浓度数据, 逐日线性拟合了 O<sub>x</sub> 与 NO<sub>2</sub> 的相关关系, 得出观测期间逐日 OPE [ΔO<sub>x</sub>/Δ(NO<sub>y</sub> - NO<sub>x</sub>)] 值, 见图 6(a). 可以看出, 泰安市 OPE 大部分时间均在 4.0 以上, 在部分 O<sub>3</sub> 污染天甚至在 7.0 以上, 其结果与 Kanaya 等<sup>[38]</sup> 对泰山的研究结论基本一致.

采用 VOCs/NO<sub>x</sub> 比值法可粗略判断区域 O<sub>3</sub> 生

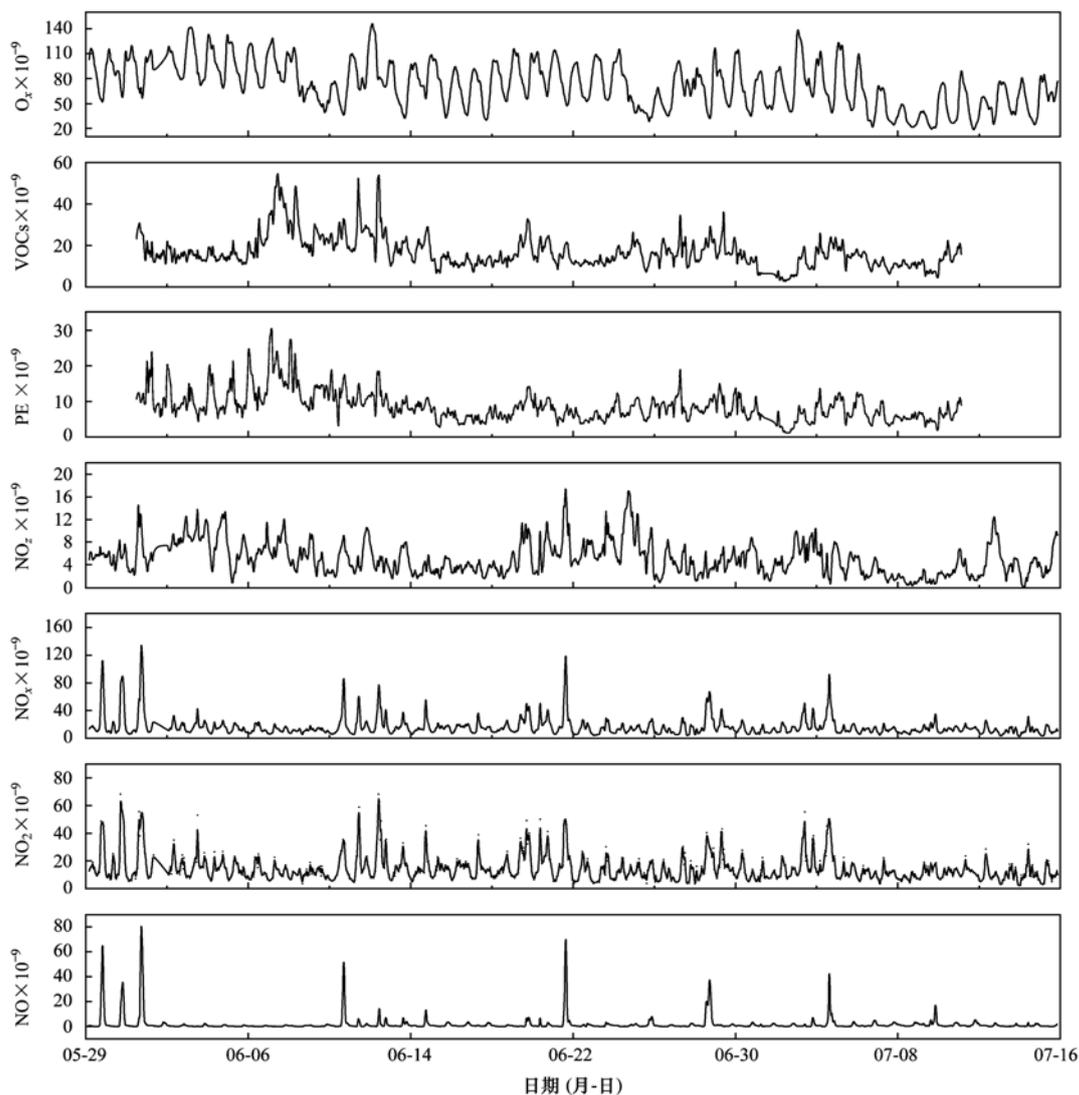


图4 臭氧相关物种浓度时间变化序列

Fig. 4 Time series of ozone-related species concentrations

成的敏感性. 由于 VOCs 监测仪器的时间分辨率是 1 h, 为了尽可能真实反映  $O_3$  光化学生成的敏感性, 选取了  $O_3$  生成的前体物 VOCs 和  $NO_x$  小时平均浓度(08:00 ~ 16:00)的比值数据, 见图 6(b), 可以看出,  $VOCs/NO_x$  的日平均比值在观测时间明显高于 4.0, 且多数高于 8.0, 其结果和舟山市的<sup>[20]</sup> 相反.

$H_2O_2/NO_2$  作为一种光化学指示剂是由 Sillman 等<sup>[28]</sup> 在 1998 年提出, 选取大气光化学反应活性最强的时段(10:00 ~ 16:00)  $H_2O_2$  和  $NO_2$  小时平均浓度数据, 绘出  $H_2O_2/NO_2$  的日均值变化, 见图 6(c), 可以看出,  $H_2O_2/NO_2$  基本均大于 0.15.

结合图 3 可以看出 OPE、 $VOCs/NO_x$  和  $H_2O_2/NO_2$  特征比值法中,  $O_3$  处于 VOCs 敏感的天数所对应的  $O_3$  浓度较低, 不具有代表性. 综上所述, 结合表 1 得出 OPE、 $VOCs/NO_x$  和  $H_2O_2/NO_2$  特征比值法获得的结论一致, 即观测期间泰安市处于  $NO_x$  敏感区及过渡区.

### 2.2.2 EKMA 曲线法

基于 EKMA 曲线的方法, 假设  $NO_x$  100 种初始浓度情景( $NO_x$  浓度从  $0 \sim 100 \times 10^{-9}$ ) 和换算为丙烯等效浓度(PE)的 VOCs 120 种初始浓度情景(浓度从  $0 \sim 120 \times 10^{-9}$ ), 共 12 000 个情景, 模拟对应情景下的  $O_3$  生成, 研究时段设定为每天 10:00 ~ 16:00. 箱模式中的反应机制采用 MCM 机制, 每种不同情景下的  $NO_x$  浓度为纵坐标, VOCs 浓度为横坐标, 将 10:00 ~ 16:00 模拟生成的最大臭氧浓度使用不同颜色的点标记于相应的坐标中, 用彩色点线性拟合成彩色面, 并连结彩色面上相同颜色的点, 构成  $O_3$  最大生成等值线, 从而绘制出  $O_3$  最大生成等值线, 图 7 展示了观测期间观测点  $O_3$  局地最大产出浓度与前体物浓度的非线性关系. 其中黑色直线表示的是各  $O_3$  局地最大产出浓度转折点的连线, 也称为脊线, 其代表了特征浓度比值参数  $PE/NO_x$ , 位于脊线上方的代表其  $O_3$  生成处于 VOCs 控制区, 位于

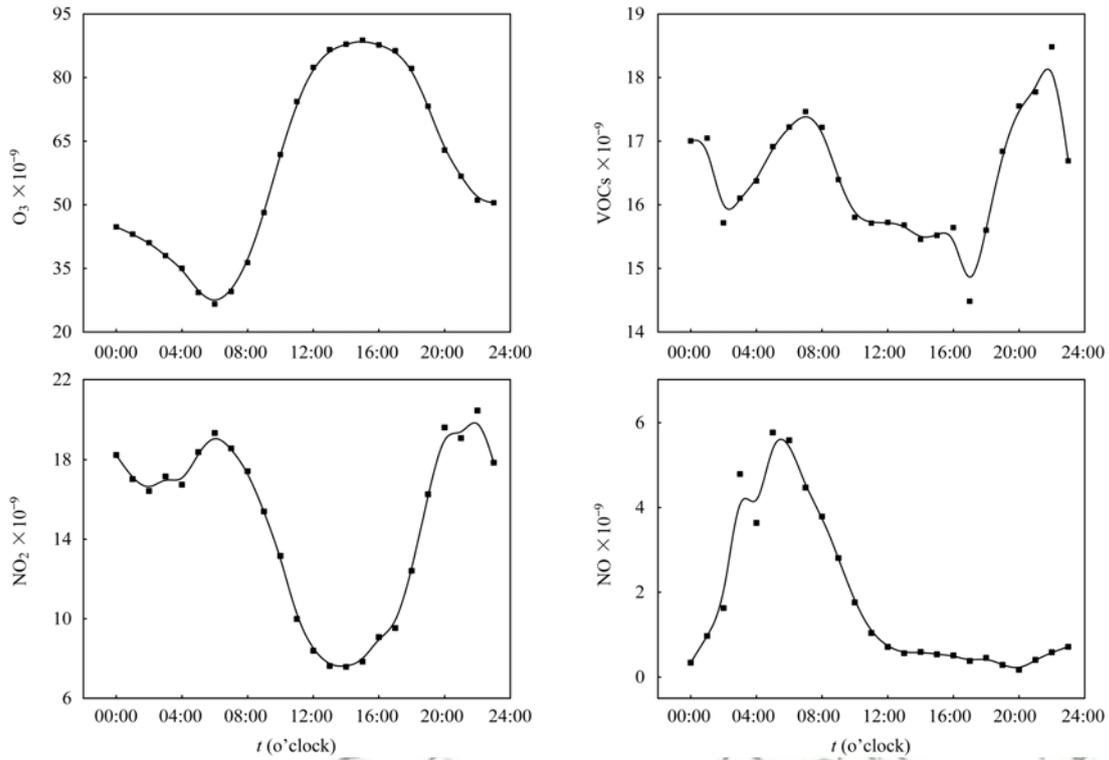
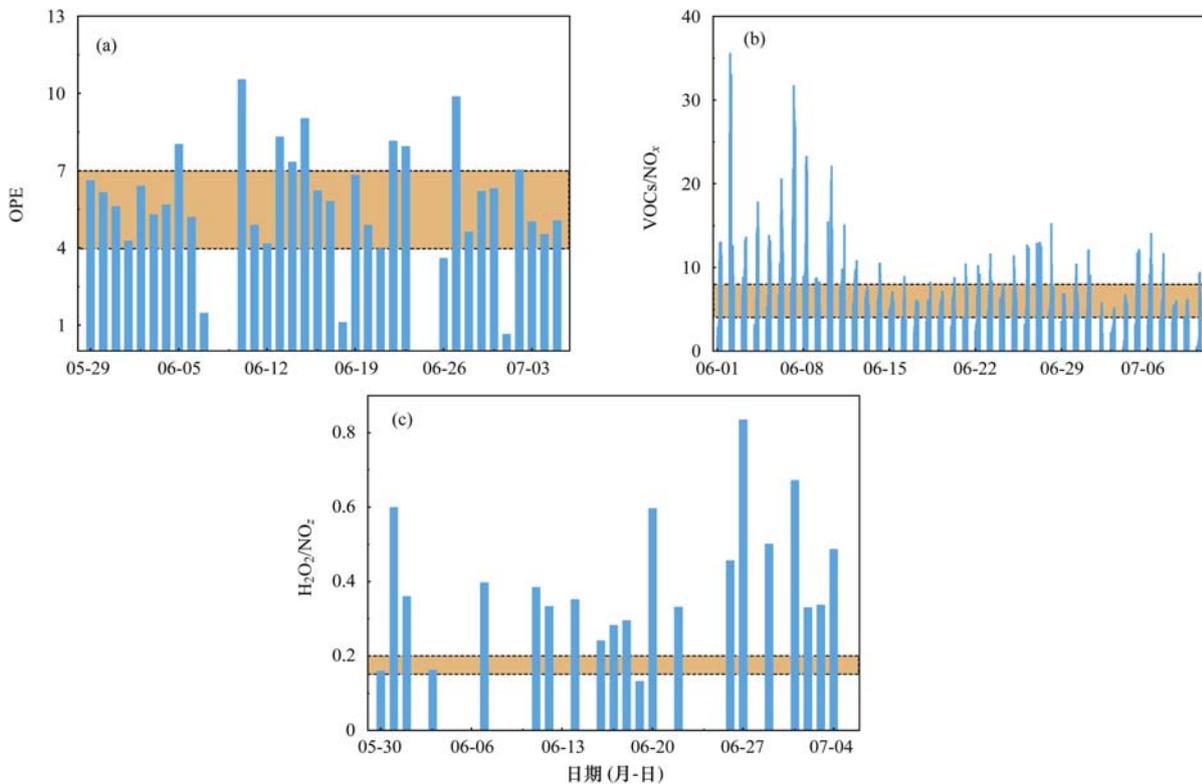


图 5  $O_3$ 、VOCs、 $NO_2$  和 NO 日变化特征

Fig. 5 Diurnal characteristics of  $O_3$ , VOCs,  $NO_2$ , and NO concentrations



图中橘色部分为过渡区,橘色上部为  $NO_x$  敏感,下部为 VOCs 敏感

图 6 观测期间特征比值

Fig. 6 Feature ratios during the observation period

脊线下方的则代表处于  $NO_x$  控制区. 其中黑框代表采样期间 PE 和  $NO_x$  平均体积分数所在位置,从中可见,观测点观测期间大多处于脊线附近及脊线下

方,即  $O_3$  生成位于  $NO_x$  控制区和过渡区,削减  $NO_x$  和 VOCs 均对  $O_3$  生成具有控制作用. 脊线对应的丙烯等效浓度与  $NO_x$  浓度比值为 8:3 (约 2.67),暗示

了该站点在  $O_3$  前体物浓度减排时按照这个比值进行 VOCs(PE) 和  $NO_x$  削减可以达到  $O_3$  浓度控制的最佳效果。

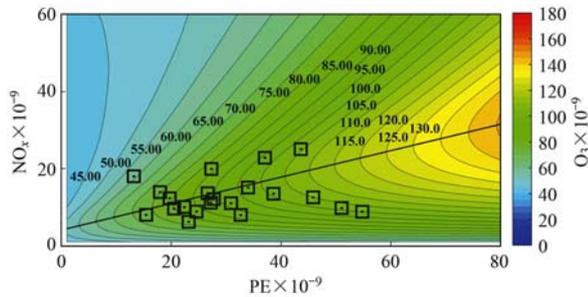


图7 观测点局地  $O_3$  最大浓度与丙烯等效浓度 (PE) 和  $NO_x$  浓度的非线性关系

Fig. 7 Nonlinear relationship of the maximum  $O_3$  concentration and the propylene equivalent concentration (PE) and  $NO_x$  concentration at the observation point

### 3 结论

(1) 泰安市  $O_3$  浓度有明显的季节变化, 夏季高, 冬季低, 超标多发生在夏季,  $O_3$  浓度日均及月均最大值均发生在 6 月; 观测期间  $O_3$  日最大 8 h 平均值 ( $O_3$ -8h) 和小时均值 ( $O_3$ -1h) 超过国家  $O_3$  日最大 8 h 均值一、二级标准 ( $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 以及小时均值二级标准 ( $200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 的天数分别占总天数的 93.6%、68.1% 和 79.5%。

(2)  $O_3$  浓度的日变化呈单峰型变化,  $O_3$  在 13:00~17:00 左右浓度较高, 15:00 左右出现最高值, VOCs、 $NO_2$  日变化趋势整体呈现夜间高白天低的变化特征,  $NO$  峰值出现在 06:00 左右。

(3) 由特征比值法 OPE、VOCs/ $NO_x$ 、 $H_2O_2$ / $NO_2$  以及 EKMA 曲线的方法, 均可得出观测期间泰安市大气  $O_3$  光化学生成偏向于  $NO_x$  敏感区及过渡区。因此, 削减  $NO_x$  和 VOCs 均对  $O_3$  生成具有控制作用, 同时在  $O_3$  前体物浓度减排时按照丙烯等效浓度与  $NO_x$  浓度比值为 8:3 进行 VOCs(PE) 和  $NO_x$  削减可以达到  $O_3$  浓度控制的最佳效果。

#### 参考文献:

[1] Sun L, Xue L K, Wang T, *et al.* Significant increase of summertime ozone at Mount Tai in Central Eastern China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(16): 10637-10650.

[2] Ma Z Q, Xu J, Quan W J, *et al.* Significant increase of surface ozone at a rural site, north of eastern China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(6): 3969-3977.

[3] Zhang Q, Yuan B, Shao M, *et al.* Variations of ground-level  $O_3$  and its precursors in Beijing in summertime between 2005 and 2011[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(12): 6089-6101.

[4] Wang Z B, Li J X, Liang L W. Spatio-temporal evolution of ozone pollution and its influencing factors in the Beijing-Tianjin-

Hebei Urban Agglomeration[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **256**: 113419.

[5] 余益军, 孟晓艳, 王振, 等. 京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 106-114.

Yu Y J, Meng X Y, Wang Z, *et al.* Driving factors of the significant increase in surface ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China, during 2013-2018[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 106-114.

[6] Wei W, Lv Z F, Cheng S Y, *et al.* Characterizing ozone pollution in a petrochemical industrial area in Beijing, China: a case study using a chemical reaction model[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**(6): 377.

[7] Yu Y J, Wang Z, He T, *et al.* Driving factors of the significant increase in surface ozone in the Yangtze River Delta, China, during 2013-2017[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, **10**(4): 1357-1364.

[8] Shu L, Wang T J, Han H, *et al.* Summertime ozone pollution in the Yangtze River Delta of eastern China during 2013-2017: synoptic impacts and source apportionment[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **257**: 113631.

[9] Xu Z N, Huang X, Nie W, *et al.* Influence of synoptic condition and holiday effects on VOCs and ozone production in the Yangtze River Delta region, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **168**: 112-124.

[10] 沈劲, 何灵, 程鹏, 等. 珠三角北部背景站臭氧浓度变化特征[J]. *生态环境学报*, 2019, **28**(10): 2006-2011.

Shen J, He L, Cheng P, *et al.* Characteristics of ozone concentration variation in the northern background site of the Pearl River Delta[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(10): 2006-2011.

[11] 汪宇, 彭钰雯, 陈多宏, 等. 珠三角城市近地面臭氧污染分布特征及变化趋势[J]. *环境污染与防治*, 2019, **41**(9): 1103-1107.

Wang Y, Peng Y W, Chen D H, *et al.* Distribution and trends of ground level  $O_3$  pollution in the Pearl River Delta cities[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2019, **41**(9): 1103-1107.

[12] Li J F, Lu K D, Lv W, *et al.* Fast increasing of surface ozone concentrations in Pearl River Delta characterized by a regional air quality monitoring network during 2006-2011[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(1): 23-26.

[13] 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.

[14] Sillman S. The relation between ozone,  $NO_x$  and hydrocarbons in urban and polluted rural environments[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(12): 1821-1845.

[15] Wang T, Xue L K, Brimblecombe P, *et al.* Ozone pollution in China: a review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **575**: 1582-1596.

[16] Shao M, Zhang Y H, Zeng L M, *et al.* Ground-level ozone in the Pearl River Delta and the roles of VOC and  $NO_x$  in its production[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(1): 512-518.

[17] Xue L K, Wang T, Louie P K K, *et al.* Increasing external effects negate local efforts to control ozone air pollution: a case study of Hong Kong and implications for other Chinese cities[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(18): 10769-10775.

[18] Liu Z, Wang Y, Gu D, *et al.* Summertime photochemistry

- during CAREBeijing-2007:  $\text{RO}_x$  budgets and  $\text{O}_3$  formation [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12** (16): 7737-7752.
- [19] 伏志强, 郭佳, 王章玮, 等. 贵阳市大气臭氧生成过程与敏感性初步分析[J]. *环境化学*, 2019, **38**(1): 161-168.  
Fu Z Q, Guo J, Wang Z W, *et al.* Analysis of atmospheric ozone formation process and the sensitivity to precursors in Guiyang [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, **38**(1): 161-168.
- [20] 王俏丽, 董敏丽, 李素静, 等. 舟山市臭氧污染分布特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1143-1151.  
Wang Q L, Dong M L, Li S J, *et al.* Characteristics of ozone pollution distribution and source apportionment in Zhoushan [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1143-1151.
- [21] Kanaya Y, Pochanart P, Liu Y, *et al.* Rates and regimes of photochemical ozone production over Central East China in June 2006: a box model analysis using comprehensive measurements of ozone precursors [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(20): 7711-7723.
- [22] 马伟, 王章玮, 郭佳, 等. 一个沿海城市大气臭氧的本地生成过程及其对前体物的敏感性[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(11): 3593-3599.  
Ma W, Wang Z W, Guo J, *et al.* Sensitivity of ambient atmospheric ozone to precursor species and local formation process in a coastal city [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39** (11): 3593-3599.
- [23] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [24] Sillman S. The use of  $\text{NO}_y$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ , and  $\text{HNO}_3$  as indicators for ozone- $\text{NO}_x$ -hydrocarbon sensitivity in urban locations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, **100** (D7): 14175-14188.
- [25] Sillman S, He D Y. Some theoretical results concerning  $\text{O}_3$ - $\text{NO}_x$ -VOC chemistry and  $\text{NO}_x$ -VOC indicators [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, **107** (D22): ACH 26-1-ACH 26-15.
- [26] Zhang Y, Wen X Y, Wang K, *et al.* Probing into regional  $\text{O}_3$  and particulate matter pollution in the United States; 2. An examination of formation mechanisms through a process analysis technique and sensitivity study [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, **114** (D22): D22305, doi: 10.1029/2009JD011900.
- [27] Liu X H, Zhang Y, Cheng S H, *et al.* Understanding of regional air pollution over China using CMAQ, part I performance evaluation and seasonal variation [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(30): 3719-3727.
- [28] Sillman S, He D Y, Pippin M R, *et al.* Model correlations for ozone, reactive nitrogen, and peroxides for Nashville in comparison with measurements: implications for  $\text{O}_3$ - $\text{NO}_x$ -hydrocarbon chemistry [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, **103** (D17): 22629-22644.
- [29] Na K, Kim Y P, Moon K C. Diurnal characteristics of volatile organic compounds in the seoul atmosphere [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(6): 733-742.
- [30] Atkinson R, Arey J. Atmospheric degradation of volatile organic compounds [J]. *Chemical Reviews*, 2003, **103** (12): 4605-4638.
- [31] Jeffries H E, Tonnesen S. A comparison of two photochemical reaction mechanisms using mass balance and process analysis [J]. *Atmospheric Environment*, 1994, **28**(18): 2991-3003.
- [32] Jimenez P, Baldasano J M, Dabdub D. Comparison of photochemical mechanisms for air quality modeling [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(30): 4179-4194.
- [33] Wang Z S, Li Y T, Chen T, *et al.* Ground-level ozone in urban Beijing over a 1-year period: temporal variations and relationship to atmospheric oxidation [J]. *Atmospheric Research*, 2015, **164-165**: 110-117.
- [34] 王磊, 刘端阳, 韩桂荣, 等. 南京地区近地面臭氧浓度与气象条件关系研究 [J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(4): 1285-1296.  
Wang L, Liu D Y, Han G R, *et al.* Study on the relationship between surface ozone concentrations and meteorological conditions in Nanjing, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(4): 1285-1296.
- [35] 安俊琳, 王跃思, 李昕, 等. 北京大气中  $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$  和  $\text{O}_3$  浓度变化的相关性分析 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(4): 706-711.  
An J L, Wang Y S, Li X, *et al.* Analysis of the relationship between  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  and  $\text{O}_3$  concentrations in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(4): 706-711.
- [36] 宋从波, 李瑞芃, 何建军, 等. 河北廊坊市区大气中  $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$  和  $\text{O}_3$  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  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  and  $\text{O}_3$  at urban area of Langfang, Hebei [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36** (10): 2903-2912.
- [37] Nunnermacker L J, Imre D, Daum P H, *et al.* Characterization of the Nashville urban plume on July 3 and July 18, 1995 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1998, **103** (D21): 28129-28148.
- [38] Kanaya Y, Akimoto H, Wang Z F, *et al.* Overview of the Mount Tai Experiment (MTX2006) in central east China in June 2006: studies of significant regional air pollution [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(16): 8265-8283.

## CONTENTS

Comparison Analysis of the Effect of Emission Reduction Measures for Major Events and Heavy Air Pollution in the Capital .....	ZHONG Yi-sheng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i>	(3449)
Evaluation of Different ISORROPIA-II Modes and the Influencing Factors of Aerosol pH Based on Tianjin Online Data .....	GAO Jie, SHI Xu-rong, WEI Yu-ting, <i>et al.</i>	(3458)
Emission Characteristics of Particulate Organic Matter from Cooking .....	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i>	(3467)
Characteristics and Sources of 12 Trace Amount Elements in PM <sub>2.5</sub> During a Period of Heavy Pollution in Huanggang, Central China .....	CHEN Zhan-le, TIAN Qian, MAO Yao, <i>et al.</i>	(3475)
Aerosol Optical Properties over the Ebinur Region .....	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie	(3484)
Characteristics of Secondary Organic Particles and the Potential Formation of SOA from VOCs During Wintertime Heavy Pollution Episodes in Tianjin .....	XU Hong, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i>	(3492)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs at Different Pollution Levels During the Winter in an Urban Area in Zhengzhou .....	LI Yi-dan, YIN Sha-sha, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i>	(3500)
Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds (IVOCs) from Biomass Burning in the Yangtze River Delta During 2010-2018 .....	ZHU Yong-hui, WANG Qian, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(3511)
Emission Characteristics of Biogenic Volatile Compounds (BVOCs) from Common Greening Tree Species in Northern China and Their Correlations with Photosynthetic Parameters .....	XU Yan, LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, <i>et al.</i>	(3518)
Characteristics of Surface Ozone and Impact Factors at Different Station Types During the Autumn in Guangzhou .....	GAO Ping, ZHUANG Li-yue, WANG Long, <i>et al.</i>	(3527)
Pollution Characteristics and Sensitivity Analysis of Atmospheric Ozone in Taian City .....	LI Kai, LIU Min, MEI Ru-bo	(3539)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Road Dust from Non-ferrous Smelting Parks .....	FENG Yu-yao, SHI Jian-wu, ZHONG Yao-qian, <i>et al.</i>	(3547)
Pollution and Source Analysis of Heavy Metal in Surface Dust from Xi'an University Campuses .....	FAN Xin-yao, LU Xin-wei, LIU Hui-min, <i>et al.</i>	(3556)
Monitoring Method of Total Particulate Matter in Ultra-low-emission and High-humidity Exhaust Gas from Stationary Sources and an Actual Test in a Gas Power Plant .....	HU Yue-qi, YAN Xu, KONG Chuan, <i>et al.</i>	(3563)
Vessels' Air Pollutant Emissions Inventory and Emission Characteristics in the Xiamen Emission Control Area .....	WANG Jian, HUANG Zhi, LIU Yan-ying, <i>et al.</i>	(3572)
Method for High-resolution Emission Inventory for Road Vehicles in Chengdu Based on Traffic Flow Monitoring Data .....	PAN Yu-jin, LI Yuan, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i>	(3581)
Inversion of Water Quality Parameters Based on UAV Multispectral Images and the OPT-MPP Algorithm .....	HUANG Xin-xi, YING Han-ting, XIA Kai, <i>et al.</i>	(3591)
Effects of Different Water Stratification on the Vertical Distribution of Nitrogen in Sediment Interstitial Waters: A Case Study of the Three Gorges Reservoir and Xiaowan Reservoir .....	LIU Jing-si, ZHU Xiao-sheng, HU Zi-long, <i>et al.</i>	(3601)
Pollution Status and Pollution Behavior of Microplastic in Surface Water and Sediment of Urban Rivers .....	ZHAO Xin, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i>	(3612)
Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Community Structure and Its Influencing Factors in Shanghai River Channels .....	XU Zhi, CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, <i>et al.</i>	(3621)
Restoration of River Sediment by Calcium Peroxide (CaO <sub>2</sub> ) Combined with Biochar .....	LI Yu-ping, JIANG Ying-ying, LIU Bao-ming, <i>et al.</i>	(3629)
Quantification of Nitrate Sources to Groundwater in Karst Trough-valley Areas Based on Dual Stable Isotopes of $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ and the IsoSource Model .....	XU Lu, JIANG Yong-jun, DUAN Shi-hui, <i>et al.</i>	(3637)
Dynamic Process of Nitrogen and Phosphorus Export and Loss Load in an Intensive Orchard with Ridge and Furrow Plantation in the Three Gorges Reservoir Area .....	YAN Kun, WANG Yu-kuan, LIU Qin, <i>et al.</i>	(3646)
Analysis of Rainfall Runoff Pollution and Pollution Load Estimation for Urban Communities in a Highly Urbanized Region .....	GAO Bin, XU You-peng, LU Miao, <i>et al.</i>	(3657)
Adsorption of As(III) in Water by Iron-loaded Graphene Oxide-Chitosan .....	ZHAO Chao-ran, SHAN Hui-mei, ZENG Chun-ya, <i>et al.</i>	(3665)
Sorption Behaviors of Copper Ions and Tetracycline on Microplastics in Aqueous Solution .....	XUE Xiang-dong, WANG Xing-yuan, MEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(3675)
Effect of Porous Fillers Properties on Biofilm Growth .....	JIANG Yu-qin, LI Jiong-hui, FANG Zhi-guo	(3684)
Adaptability of Nitrifying Biofilm Systems to Low Temperature: MBBR and IFAS .....	LI Ren, YU Li-fang, ZHANG Xing-xiu, <i>et al.</i>	(3691)
Improved on Nitrogen Removal of Anaerobic Ammonia Oxidation by Coupling Element Sulfur-based Autotrophic Short-cut Denitrification .....	FANG Wen-ye, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(3699)
Nitrogen and Phosphorus Removal from Domestic Sewage Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration .....	ZHANG Yu-jun, LI Dong, LI Shuai, <i>et al.</i>	(3707)
Rapid Start-up and Stability of Partial Denitrification Based on Different Waste Sludge Sources .....	ZHANG Xing-xing, WANG Chao-chao, WANG Yao, <i>et al.</i>	(3715)
Decision-making Analysis of Excess Sludge Pretreatment for Struvite Recovery Based on AHP-PROMETHEE II Method .....	LIU Xiao-lei, LI An-jie	(3725)
Effect on Ammonia Inhibition Mitigation in the Anaerobic Digestion Process with Zero-Valent Iron .....	LIU Ji-bao, NIU Yu-tong, YU Da-wei, <i>et al.</i>	(3731)
Performance of Anaerobic Membrane Bioreactors for the Co-digestion of Sewage Sludge and Food Waste .....	DAI Jin-jin, NIU Cheng-xin, PAN Yang, <i>et al.</i>	(3740)
Antibiotics Induce Horizontal Gene Transfer of Resistance at Sublethal Concentrations .....	YUAN Qi-yi, CHEN Hong-jie, Laurence Haller, <i>et al.</i>	(3748)
Impact of Tetracycline Antibiotic on the Transcriptional Expression of Tetracycline Resistance Genes in <i>Shigella flexneri</i> .....	GAO Pin, RUAN Xiao-hui, QIU Wen-jie, <i>et al.</i>	(3758)
Competitive Selection of Hydroxylamine on Ammonia Oxidizing Bacteria and Nitrite Oxidizing Bacteria .....	QIAO Xin, WANG Bo, GUO Yuan-yuan, <i>et al.</i>	(3765)
Analysis of the Effect of Temperature on the Microbial Flora Structure During the Nitrite Oxidation Process Using 16S rRNA High-throughput Sequencing .....	HOU Xiao-wei, NIU Yong-jian, LI Wei-wei, <i>et al.</i>	(3773)
Universality and Potential Application of Mn(II) Oxidation Triggered by Microbial Interspecies Interactions .....	NING Xue, LIANG Jin-song, BAI Yao-hui, <i>et al.</i>	(3781)
Distribution and Potential Nitrification Rates of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Surface Sediments of Mangrove in Sanya River .....	LUO Qing, ZHEN Yu, PENG Zong-bo, <i>et al.</i>	(3787)
Effects of Ozone Pollution on Growth, Yields, and Mineral Metallic Element Contents of Paddy Rice .....	FANG Xiao-kun, LUO Xiao-san, ZHANG Dan, <i>et al.</i>	(3797)
Short Term Effects of a Changing Carbon Input on the Soil Respiration of <i>Picea schrenkiana</i> Forests in the Tianshan Mountains, Xinjiang .....	SHAO Kang, GONG Lu, HE Xue-min, <i>et al.</i>	(3804)
Effects of the Combined Application of Organic and Inorganic fertilizers on N <sub>2</sub> O Emissions from Saline Soil .....	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, GUO Jia-wei, <i>et al.</i>	(3811)
Mechanism and Influencing Factors of Increasing Soil Temperature by <i>in-situ</i> Electrical Resistance Heating .....	GE Song, MENG Xian-rong, XU Wei, <i>et al.</i>	(3822)
Acid Mine Wasteland Reclamation by <i>Juncus ochraceus</i> Buchen as a Potential Pioneer Plant .....	HUANG Jian-hong, FU Jiang-li, YAN Xin-rui, <i>et al.</i>	(3829)
Effects of Drip Irrigation Patterns and Biochar Addition on Soil Mineral Nitrogen and Microbial Regulation of Greenhouse .....	CAI Jiu-mao, LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, <i>et al.</i>	(3836)
Effects of Cotton Stalk Biochar on the Structure and Function of Fungi Community in Alkaline Rhizosphere Soil of Rice Under Cadmium Pollution .....	LIU Shi-dou, HAN Yao-guang, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i>	(3846)
Effects of Different Treatments with Water Management Combined with Leaf Spraying Silicon Fertilizer on Cd Accumulation in Rice .....	WEI Bin-yun, ZHOU Hang, LIU Jia-wei, <i>et al.</i>	(3855)
Effects of Chelate GLDA on the Remediation of Cadmium Contaminated Farmland by <i>Pennisetum purpureum</i> Schum .....	QIN Jian-jun, TANG Sheng-shuang, JIANG Kai, <i>et al.</i>	(3862)
Situation Analysis and Trend Prediction of the Prevention and Control Technologies for Planting Non-Point Source Pollution .....	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, LI Hong-na, <i>et al.</i>	(3870)