

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第9期

Vol.39 No.9

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角区域非道路移动机械排放清单及预测	黄成, 安静宇, 鲁君 (3965)
基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率	李荔, 张洁, 赵秋月, 李慧鹏, 韩军赞 (3976)
上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析	杨静, 陈龙, 刘敏, 孟祥周, 张希 (3987)
广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单	孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 张永波, 梁小明, 叶代启 (3995)
重庆市北碚城区气溶胶中水溶性无机离子的质量浓度及其粒径分布	李彦沛, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 江长胜 (4002)
济南市夏、冬季 PM _{2.5} 中化学组分的季节变化特征及来源解析	刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 李静, 邢继钊, 魏本杰, 张二勋, 刘加珍, 董杰 (4014)
聊城冬季一重污染过程 PM _{2.5} 污染特征及成因分析	张敬巧, 吴亚君, 张萌, 王涵, 陈振兴, 胡君, 李慧, 范晓龙, 柴发合, 王淑兰 (4026)
夏季青岛大气气溶胶中不同形态磷的浓度、来源及沉降通量	王楠, 马森, 石金辉, 高会旺, 姚小红 (4034)
晋城市冬季环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析	杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 李如梅, 李颖慧, 余化龙, 彭林 (4042)
北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价	熊秋林, 赵文吉, 李大军, 周涛 (4051)
合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析	孟凡昊, 秦敏, 梁帅西, 谢品华, 夏晖晖, 段俊, 方武, 唐科, 李昂, 魏桢, 王凤 (4060)
填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质	李昊, 刘彦君, 陈坦, 闫秋鹤, 代辉祥, 王洪涛, 陆文静 (4070)
北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征	李贝贝, 韩凯丽, 秦建平, 王鑫, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (4078)
基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析	高翔, 左锐, 郭学茹, 孟利, 刘鑫, 王膜, 滕彦国, 王金生 (4086)
透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估	官曼莉, 左俊杰, 任心欣, 赵洪涛, 罗茜, 廖云杰, 李叙勇 (4096)
黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析	赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 谢晓芸 (4105)
黄河干流宁蒙段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性	席玥, 王婷, 倪晋仁, 韩鹏, 仪马兰, 郑彤, 蒋咏, 马若绮, 崔锋 (4114)
伊洛河和浑太河春季水体光学吸收特征的对比	李柳阳, 邵田田, 张鑫, 宋炎炎, 苏东辉, 王涛 (4122)
马莲河流域化学风化的季节变化和影响因素	王雨山, 韩双宝, 邓启军, 祁晓凡 (4132)
柳江盆地浅层地下水硝态氮水特征和成因分析	徐进, 何江涛, 彭毅, 曾颖 (4142)
地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性	张雯, 尹琳, 周念清 (4150)
三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征	张志永, 万成炎, 胡红青, 彭建华, 侯娟, 丁庆秋, 袁玉洁 (4161)
蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算	刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 李欣, 黄佳维, 赵冲, 唐咏春, 平明明 (4169)
锆改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响	何思琪, 张薇, 林建伟, 詹艳慧, 李娟英, 邢云青, 高春梅, 黄宏, 梁舒静 (4179)
洱海流域乡镇尺度上人类活动对净氮输入量的影响	李影, 刘宏斌, 雷秋良, 胡万里, 王洪媛, 翟丽梅, 任天志, 连慧妹 (4189)
我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应	聂家琴, 王东启, 陈杰, 李杨杰, 陈姝, 陈振楼 (4199)
东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响	储瑜, 何肖微, 曾巾, 赵大勇, 孙强, 曹萍, 吴庆龙 (4206)
处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程	汪海波, 马丁, 岳正波, 陶巍, 陈天虎, 王进 (4215)
华东地区某饮用水源地中磺胺类抗性基因的分布特征	胡亚茹, 姜蕾, 张天阳, 雷丹丹, 姜巍巍, 张东, 林匡飞, 崔长征 (4222)
制革废水处理过程中磺胺类抗生素和抗性细菌的分布特征	花莉, 李璐, 杨春燕 (4229)
人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较	赵林丽, 邵学新, 吴明, 姜小三, 陆琳莹 (4236)
城市污水管网中不同生化作用的基质流向	姚翔译, 石烜, 桑浪涛, 金鹏康, 王晓昌 (4242)
微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染影响的减缓特性	王旭东, 石彩霞, 廖正伟, 贺毓淑, 王磊 (4249)
UV 强化草酸络合 Fe ³⁺ 活化过硫酸盐氧化降解苯胺	韩东晖, 李瑛, 李开明, 应光国 (4257)
焦化废水 A/O ² 和 A/O/H/O 处理工艺中多环芳烃的削减行为分析	吴海珍, 孙胜利, 刘国新, 韦景悦, 吴超飞, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (4265)
长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响	俞小军, 李杰, 周猛, 宋璐, 李维维, 王亚娥, 马娟, 吕慧 (4274)
NaCl 盐度对 A ² /O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响	张兰河, 田蕊, 郭静波, 贾艳萍, 张海丰, 李正, 陈子成 (4281)
温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响	陈方敏, 金润, 袁琨, 李祥, 黄勇, 顾澄伟 (4289)
游离氨 (FA) 对氨氧化菌 (AOB) 活性抑制动力学试验	孙洪伟, 于雪, 高宇学, 李维维, 祁国平, 许涓 (4294)
HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响	安芳娇, 赵智超, 黄利, 黄剑明, 邵兆伟, 陈永志 (4302)
长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复	李田, 魏凡凯, 汪裕昌, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (4310)
广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析	宋波, 张云霞, 庞瑞, 杨子杰, 宾娟, 周子阳, 陈同斌 (4317)
紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应	罗梅, 田冬, 高明, 黄容 (4327)
秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响	李娇, 田冬, 黄容, 徐国鑫, 黎嘉成, 高明, 王子芳 (4338)
低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力	谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 黄宇, 黄小辉 (4348)
臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响	周慧敏, 李品, 高峰, 冯兆忠, 张殷波 (4359)
再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响	韩洋, 李平, 齐学斌, 崔丙健, 常迪, 马欢欢 (4366)
黄淮海地区鸡粪有机肥重金属含量特征及环境风险	李发, 徐应明, 王林, 梁学峰, 孙约兵, 纪艺凝, 栾润宇 (4375)
村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析	靳琪, 高红, 岳波, 黄启飞, 王瑜堂, 吴小丹, 於俊颖, 杨惠媛 (4385)
《环境科学》征订启事 (3986)	《环境科学》征订简则 (4050) 信息 (4085, 4104, 4337)

合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析

孟凡昊^{1,2}, 秦敏^{1*}, 梁帅西^{1,2}, 谢品华^{1,2,3}, 夏晖晖¹, 段俊¹, 方武¹, 唐科^{1,2}, 李昂¹, 魏桢⁴, 王凤⁴

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学, 合肥 230026; 3. 中国科学院区域大气环境研究卓越创新中心, 厦门 361021; 4. 安徽省环境监测中心站, 合肥 230071)

摘要: 为研究合肥市交通干道大气苯系物污染状况, 采用自主研发的差分吸收光谱(DOAS)系统, 于2016年3月期间对合肥市交通主干道大气苯系物(苯、甲苯、间二甲苯和邻二甲苯)以及常规污染物NO₂、SO₂等进行了连续观测。观测结果显示, 观测期间苯、甲苯、间二甲苯和邻二甲苯的平均浓度分别为21.7、63.6、33.9和98.7 μg·m⁻³。与国内外其它城市比较显示, 合肥市交通干道大气苯和甲苯的污染处于中等水平, 二甲苯的污染较为严重。结合观测期的间风速风向、T/B特征比值以及CO等污染物的相关性, 对上述苯系物来源进行了分析, 结果显示观测期间T/B值为0.8~4.5, 苯、甲苯与CO的相关性系数R分别为0.55和0.34。表明机动车尾气排放是观测区域苯和甲苯的主要排放源之一, 同时也受到周边工业园区排放的影响, 二甲苯的主要排放源为观测地点北偏东方向的涂料行业工业园区。苯和甲苯的夜间高浓度峰值分析结果表明, 夜间的高浓度苯和甲苯可能主要来源于观测地点周边工业园区的排放。观测区域苯系物的臭氧生成潜势(OFP)表现为邻二甲苯>间二甲苯>甲苯>苯, 其中二甲苯的OFP占总OFP的85%, 表明周边工业园区的排放对该地区臭氧生成的贡献较大。

关键词: 差分吸收光谱; 苯系物(BTX); 交通排放; 工业园区; 臭氧生成潜势

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)09-4060-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201712250

Characteristics of Atmospheric BTX near a Main Road in Hefei City

MENG Fan-hao^{1,2}, QIN Min^{1*}, LIANG Shuai-xi^{1,2}, XIE Pin-hua^{1,2,3}, XIA Hui-hui¹, DUAN Jun¹, FANG Wu¹, TANG Ke^{1,2}, LI Ang¹, WEI Zhen⁴, WANG Feng⁴

(1. Key Laboratory of Environment Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. Center for Excellence in Regional Atmospheric Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China; 4. Anhui Environmental Monitoring Center, Hefei 230071, China)

Abstract: In order to study levels of BTX near a main road in Hefei in March 2016, benzene, toluene, *m*-xylene, and *o*-xylene (BTX) and conventional pollutants (such as NO₂ and SO₂) in the atmosphere were monitored through a home-made differential optical absorption spectroscopy (DOAS) system. Results showed that average concentrations of benzene, toluene, *m*-xylene, and *o*-xylene were 21.7, 63.6, 33.9, and 98.7 μg·m⁻³, respectively. Compared with other cities both in China and elsewhere, benzene and toluene pollution can be considered to be of medium level, while xylene pollution is serious. Wind direction, T/B ratio, and correlation with CO were also analyzed, together with BTX sources. Result showed that the T/B ratio was 0.8-4.5, with correlation coefficients of benzene, toluene, and CO of 0.55 and 0.34, respectively. These values indicate that benzene and toluene are mainly derived from automotive emissions, also affected by surrounding industrial parks. Xylene is mainly derived from a coating industrial park north of the observation site. It was shown that high night-time concentrations of benzene and toluene could be due to industrial emissions from the industrial parks around the observation site. The ozone formation potential is in the order of *o*-xylene > *m*-xylene > toluene > benzene at the observation site. The ozone formation potential of xylene accounted for 85% of total ozone formation potential, indicating that emissions from surrounding industrial parks contribute greatly to ozone formation in the area.

Key words: differential optical absorption spectroscopy; benzene, toluene, *m*-xylene, and *o*-xylene (BTX); traffic emissions; industrial park; ozone formation potential

随着工业化的加速和城市人口的激增, 大量挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)被排放到城市大气环境中。机动车保有量的持续增加, 使机动车尾气排放成为城市大气环境的主要污染源之一。此外各类装修材料的大量使用、洗涤剂 and 工业溶剂等的广泛应用, 导致了城市大气污染状况的日益加剧。

收稿日期: 2017-12-29; 修订日期: 2018-03-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0201000, 2016YFC0208200); 中国科学院对外合作重点项目(GJHZ1511); 安徽省科技重大专项(16030801120, 15cz04126); 国家科技支撑计划项目(2014BAC19B00)

作者简介: 孟凡昊(1993~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气痕量气体的光谱学方法探测, E-mail: fhmeng@aiofm.ac.cn

* 通信作者, E-mail: mqin@aiofm.ac.cn

VOCs 作为重要的大气污染物, 在臭氧(O_3)、光化学烟雾^[1]和二次有机气溶胶的形成过程中扮演着重要角色^[2~6]. 苯系物是苯及其衍生物的总称(BTEX), 是 VOCs 中的重要一类, 包括苯、甲苯、乙苯、二甲苯、硝基苯、苯乙烯等. 作为城市大气中重要的污染物种类之一, BTEX 具有较高的光化学反应活性, 同时也存在一定的毒性. 如苯具有致癌性^[7], 甲苯会对人体神经系统产生强烈的刺激作用, 长期接触会对人体健康造成危害等^[8, 9]. 因此, 苯系物受到了各国研究学者的广泛关注, 并在国内外开展了相关测量分析工作^[10~13].

例如, Khoder 等^[14]采用气相色谱法测量了 2007 年埃及首都开罗地区的 BTEX, 通过计算 BTEX 之间的比值和相关性, 分析了该地区 BTEX 的主要排放源. Pandit 等^[15]同样采用气相色谱法测量了 2011 年印度孟买地区 6 个城市的 BTEX 浓度, 研究了该区域不同排放源对 BTEX 浓度的贡献. Buczynska 等^[16]采用气相色谱和质谱联用的方法, 分析了比利时莫尔特赛尔地区的 BTEX 变化. 分析结果表明, 该地区 BTEX 主要来源于交通排放, 其浓度变化与交通密度相关. 与此同时, 我国研究学者也开展了一系列针对中国城市 BTEX 浓度的研究分析工作. 如叶丛雷等^[17]采用差分吸收光谱法(differential optical absorption spectroscopy, DOAS), 于 2010 年在广州市开展了交通干道大气苯系物(BTX, 苯、甲苯和二甲苯的总称)的测量, 观测期间苯和甲苯的平均浓度分别为 $15.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $61.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 相关性分析结果表明, 机动车尾气排放是苯和甲苯的主要排放源. Hsieh 等^[18]于 2004 年在台湾南部地区开展了隧道观测实验, 测量了 5 个不同隧道内的甲基叔丁基醚(methyl tertiary butyl ether, MTBE)和 BTEX 浓度, 结果显示 5 个测量隧道内 MTBE、甲苯和邻、间二甲苯的浓度最高, 不同隧道内的车流量和车辆类型存在差异, 其 T/B 特征比值也不同. 霍霄玮等^[19]采用气相色谱法, 测量了 2015~2016 年冬、夏两季西安市交通干道大气苯系物的浓度变化, 观测结果显示西安市冬、夏两季 BTEX 的日变化趋势不同, 冬季出现早中晚 3 个高峰, 而夏季仅有早晚两个高峰. 分析结果表明, 该地区的主要污染物为苯和甲苯. 上述开展的城市大气 BTEX 研究工作, 对评估城市 BTEX 污染水平和确定城市 BTEX 排放源具有重要意义.

本文介绍了 2016 年 3 月期间合肥市交通干道交汇口开展的大气 BTX 观测结果, 结合观测期间

的风速风向、T/B 特征比值以及与 CO 等污染物的相关性, 分析了观测区域 BTX 的污染水平和来源分布, 并计算了该地区 BTX 的臭氧生成潜势.

1 材料与方法

本研究的目的是为了评估合肥市典型交通干道大气苯系物的污染水平, 并探究其来源, 为合肥市大气苯系物的污染控制提供数据支持. 实验观测周期为 2016 年 3 月 4~28 日, 观测数据可以作为合肥市春季交通主干道大气苯系物排放状况的参考.

1.1 监测地点

本研究观测地点位于合肥市黄山路与天智路交汇口($31^{\circ}55'N$, $117^{\circ}22'E$), 黄山路是合肥市东西交通干道, 全长 9.08 km, 是合肥市主要交通干道之一, 车流量较大. 观测地点北面为工业园区, 南面为企业办公区, 东面约 300 m 为合肥市西二环路, 如图 1 所示.



图 1 监测地点示意

Fig. 1 Measurement site

1.2 监测仪器

苯系物测量采用自主研发的 DOAS 系统, 系统望远镜安装在某写字楼 3 楼, 距地面约 12 m. 角反射镜安装在望远镜北偏西方向的四层建筑顶楼, 系统总光程为 566 m. 该系统主要由 150 W 的氙灯光源, 发射接收一体的 Cassegrain 式望远镜, 角反射镜阵列, 传输光纤, 紫外波段光谱仪(QE65000 光谱仪)和计算机数据采集系统等组成(图 2), 其详细描述可参考文献[20, 21]. 由于单一光谱仪的光谱测量范围有限, DOAS 系统采用分支光纤连接双光谱仪的方法扩展光谱测量范围, 两台光谱仪的光谱测量范围分别为 200~300 nm 和 300~400 nm, 除对苯(benzene)、甲苯(toluene)、间二

甲苯(*m*-xylene)和邻二甲苯(*o*-xylene)等苯系物进行测量外还可同时获取 NO₂、HCHO 和 SO₂ 等多种污染物的浓度信息. 系统对苯、甲苯、间二甲苯和邻二甲苯的探测灵敏度为 $0.5 \times 10^{-9} \sim 2 \times 10^{-9}$ (566 m), 时间分辨率为 1 ~ 3 min, 反演总误差约为 11.4%.

观测期间 CO 的浓度采用开放式可调谐半导体激光吸收光谱(tunable diode laser absorption

spectroscopy, TDLAS)气体分析仪进行测量, 仪器安装位置与 DOAS 系统基本相同, 系统总光程为 566 m. 仪器检测限为 0.07×10^{-6} , 时间分辨率优于 1 min, 其详细描述可见文献[22, 23]. 观测期间的车流量数据由摄像机记录, 摄像机安装高度大于 7 m, 俯角为 30° ~ 35°, 监测道路长度大于 80 m. 采集图像采用图像处理的方式获取车流量数据, 统计每日车流量变化情况.

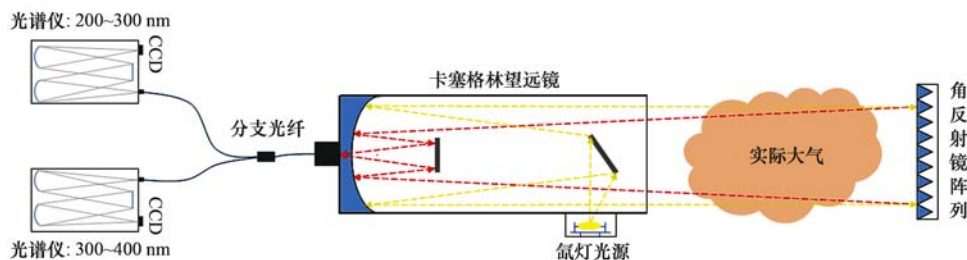


图2 DOAS系统示意

Fig. 2 Scheme of the DOAS system

1.3 质量控制和数据分析

观测期间为保证仪器的正常运行和监测数据的有效性, 对实验期间的监测数据进行质量控制. 每日对 DOAS 和 TDLAS 仪器进行光路校准, 保证测量光谱的信噪比; 定期对 DOAS 仪器进行氙灯谱和汞灯标准光谱的测量, 减少温度、光源光强变化等因素引起的光谱漂移及仪器函数变化对监测数据的影响. 观测期间采用开放式 TDLAS 仪器测量 CO, 部分夜间数据的缺失是由于昼夜温差变化导致仪器光路偏移, 数据信噪比较低所致.

DOAS 系统苯系物测量的时间分辨率为 1 ~ 3 min, 开放式 TDLAS 仪器 CO 测量的时间分辨率优于 1 min. 为便于数据分析讨论, 对苯系物、NO₂ 和 CO 等监测数据进行 5 min 数据平均处理并剔除奇异值, 在此基础上进行小时平均和日平均处理. 同时对气象参数、车流量等辅助数据进行相同处理, 保证数据的一致性.

2 结果与讨论

2.1 风速风向和污染物浓度时间序列

图3为观测期间的风速风向玫瑰图. 玫瑰图显示, 观测期间的主导风向为北风和东北风, 风速以中低风速为主. 图4为观测期间苯、甲苯、间二甲苯、邻二甲苯以及 NO₂、HCHO 和 SO₂ 的浓度时间序列, 观测期间苯、甲苯、间二甲苯和邻二甲苯的平均浓度(时均值平均)分别为: 21.7、63.6、33.9 和 98.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 由图4可知, 间二甲苯和邻二甲

苯存在较明显的日变化, 表现出日间高浓度, 夜间低浓度的变化趋势. 观测期间, 苯和甲苯出现了明显的高浓度峰值, 特别是3月的16日、18日和19日夜, 二者同时出现了高浓度峰值, 该期间苯和甲苯的浓度峰值分别达到 102.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 244.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 远高于观测期间苯和甲苯的平均浓度, 表明该区域可能存在较强的夜间污染物排放源.

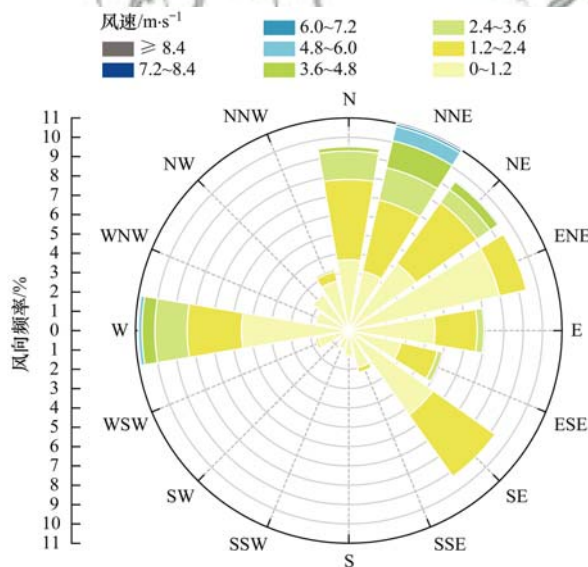


图3 风速风向玫瑰图

Fig. 3 Rose plots of wind speed and wind direction

为评估合肥市交通干道大气苯系物污染水平, 对国内外相关测量结果进行了比较. 表1中列举了国内外城市交通干道大气苯系物的浓度, 为与国内外其它城市比较, 采用二甲苯浓度表示间二甲苯和

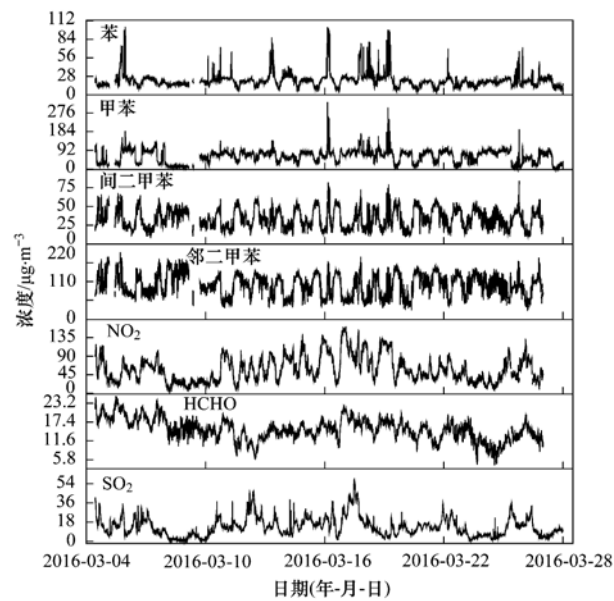


图 4 污染物浓度时间序列

Fig. 4 Time series of pollutant concentrations

邻二甲苯的总浓度。相比于国内外其它城市，合肥市交通干道大气苯和甲苯的污染处于中等水平。二甲苯浓度除那不勒斯市外，合肥市交通干道大气二甲苯浓度显著高于国内外其它城市。总体而言，合肥市交通干道大气苯系物的污染水平较为严重，因而制定相应的苯系物排放限制措施显得尤为重要。

2.2 苯系物日变化趋势

图 5 为观测期间的污染物日变化趋势，阴影部分显示，CO 浓度的日变化趋势与车流量日变化趋势一致，在交通早高峰和晚高峰期间达到浓度峰值。苯和甲苯的日变化趋势与车流量日变化趋势存在一定相似性，表明机动车尾气排放对观测区域苯和甲苯浓度有影响。观察苯和甲苯的日变化趋势图发现，观测期间苯和甲苯的夜间浓度值较高，而夜间车流量明显减少，表明夜间高浓度苯和甲苯主要来源于非交通排放源，可能是观测地点周边污染源

表 1 国内外城市交通干道大气苯系物污染水平比较

Table 1 Comparison of atmospheric BTX in urban traffic artery in China and elsewhere

测量日期(年-月)	城市	苯/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	甲苯/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	二甲苯/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	文献
2016-03	合肥	21.7	63.6	132.6	本研究
2010-11	广州	15.9	61.3	23.4	[17]
2011	北京	50.2	79.8	77.4	[24]
2004-12	上海	14.4	55.6	24.4	[25]
2006-04~2007-01	南京	9.5	29.4	4.8	[26]
1999-09	香港	4.85	28.81	6.83	[27]
2008-04	巴里	1.4	2.5	3.8	[28]
2009-10~2009-12	胡志明市	56.0	121.0	87.0	[29]
2005-05~2005-10	那不勒斯	14.2	180.6	208.9	[30]
2013~2014	德里	26.2 ± 11.9	92.7 ± 43.7	37.4 ± 23.5	[31]

的排放所致。同时考虑到夜间边界层稳定且高度较低，易造成污染物浓度的累积，从而导致观测区域夜间高浓度苯和甲苯值的出现。

图 5 中间二甲苯和邻二甲苯的日变化趋势显示，二者的日变化趋势相同，都表现出日间高浓度，夜间低浓度的变化特征。且其日变化趋势与交通排放日变化趋势存在显著差异，表明机动车尾气排放不是观测区域二甲苯的主要排放源，其可能主要来源于观测地点周边污染源的排放。

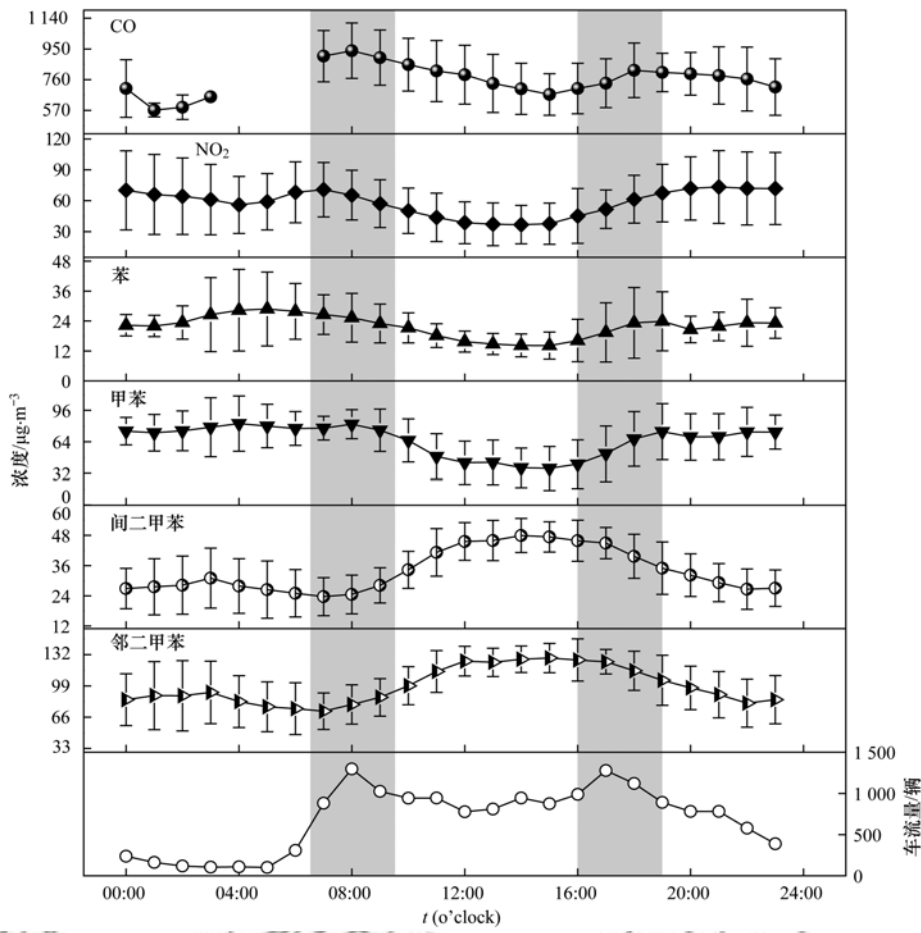
2.3 苯系物来源分析

2.3.1 二甲苯排放源分析

苯系物日变化趋势分析结果表明，观测地点周边可能存在其它污染源。因此对观测地点周边污染源进行了调查：①北偏东方向 300 m；塑料行业工业园区；②北偏东方向 250 m；涂料行业工业园区；③西北方向 40 m；烟草行业工业园区；④东方向

300 m；西二环路。上述企业生产加工过程中会使用苯系物溶剂或产生苯系物废气，可能会影响观测区域苯系物的浓度。

图 5 中间二甲苯和邻二甲苯的日变化趋势表明，二者为同源污染物，且机动车尾气排放对其贡献可能并不占主导，其可能主要来源于观测地点周边污染源的排放。根据污染源调查结果显示，观测地点北偏东方向 250 m 为涂料行业工业园区，其生产过程会产生二甲苯污染^[32]。为探究观测区域二甲苯的主要排放源，以间二甲苯为例，绘制了观测期间间二甲苯浓度分布，如图 6 所示。浓度分布显示，观测期间高浓度的间二甲苯主要集中在观测地点北偏东方向。且在较高风速($7.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)情况下，北偏东方向仍存在高浓度的间二甲苯，表明该方向存在二甲苯的排放源。该结果与污染源调查结果一致，表明观测区域二甲苯的主要排放源为观测地点



阴影部分表示交通早高峰(07:00 ~ 09:30)和晚高峰(16:00 ~ 19:00)

图 5 污染物日变化趋势

Fig. 5 Diurnal variations in pollutants

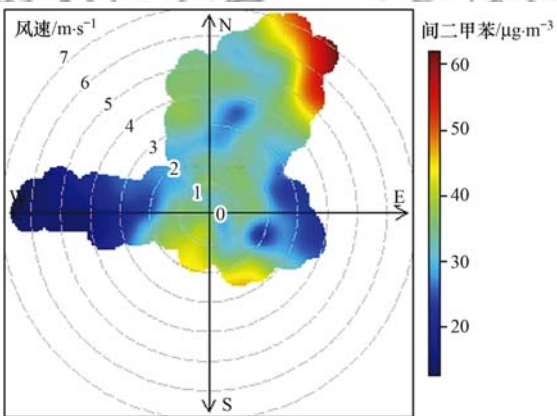


图 6 间二甲苯的浓度分布

Fig. 6 Concentration distribution of *m*-xylene

北偏东方向的涂料行业工业园区.

2.3.2 苯系物和交通排放的关系

大气 CO 浓度可以作为机动车尾气排放的示踪物,分析苯、甲苯与 CO 的相关性,分析其与交通排放的关系.图 7 为观测期间苯和甲苯的相关性,二者的相关性系数 R 为 0.64.图 8 分别为苯、甲苯

与 CO 的相关性,其中苯与 CO 的相关性系数 R 为 0.55,甲苯与 CO 的相关性系数 R 为 0.34,表明观测区域苯、甲苯与交通排放源的相关性较弱,可能是受观测地点周边污染源苯系物排放的影响.

甲苯/苯(T/B)的浓度比值可以作为鉴别交通

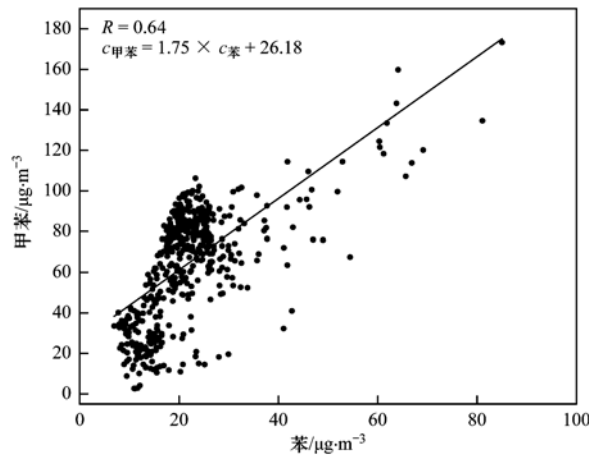


图 7 苯和甲苯的相关性

Fig. 7 Correlation of benzene and toluene

排放源的标识^[33~35]。有研究表明,当 T/B 的比值为 1.5~3.0 时城市机动车尾气排放是苯和甲苯的主要排放源。Barletta 等^[36]在中国东莞地区的观测结果表明,T/B 值大于 5 时,观测区域苯系物浓度受到工业排放的较大影响。Hsieh 等^[37]在台湾南部工业园区附近和 Lee 等^[38]在香港地区的研究结果表明,T/B 值与交通流量的增加、工业排放和其它城市污染源相关。本次观测的 T/B 值为 0.8~4.5,表明观测区域的苯和甲苯主要来源于机动车尾气排放,同时也受到周边工业园区排放的影响。根据污染源调查结果显示,观测地点周边存在涂料、塑料行业工业园区^[32,39],其会产生苯系物废气和溶剂挥发,影响观测区域苯和甲苯的浓度。

图 4 污染物浓度时间序列显示,观测期间 3 月 7~10 日甲苯出现连续浓度低值,而其它苯系物浓度无明显变化。为探究该期间苯和甲苯的浓度变化,绘制了该期间苯、甲苯和 CO 的浓度时间序列(时均值平均),如图 9 所示。图 10 为该期间苯和甲苯的相关性,二者的相关性系数 R 为 0.84,表明该期间的苯和甲苯可能来自于同一排放源。计算该

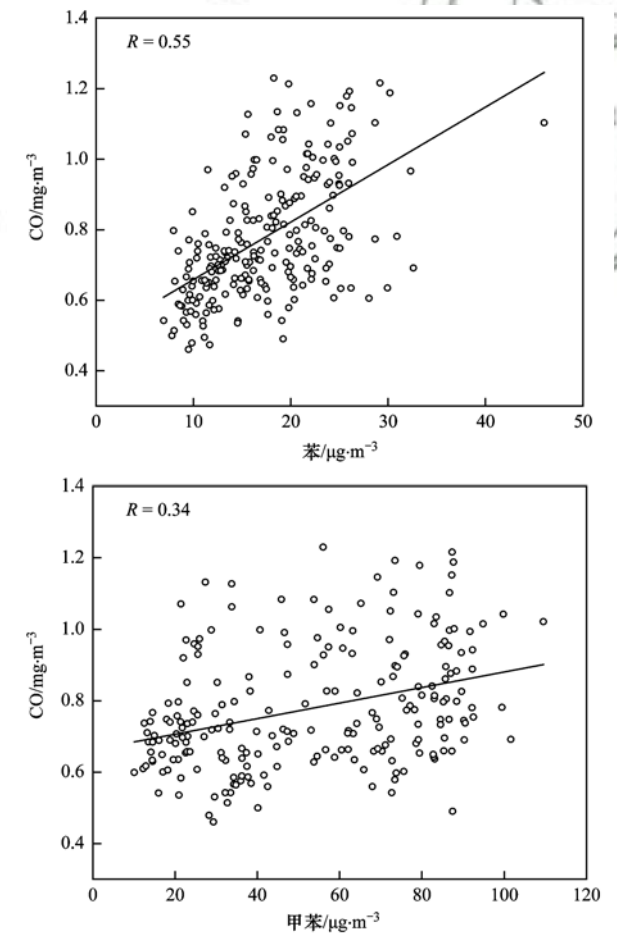
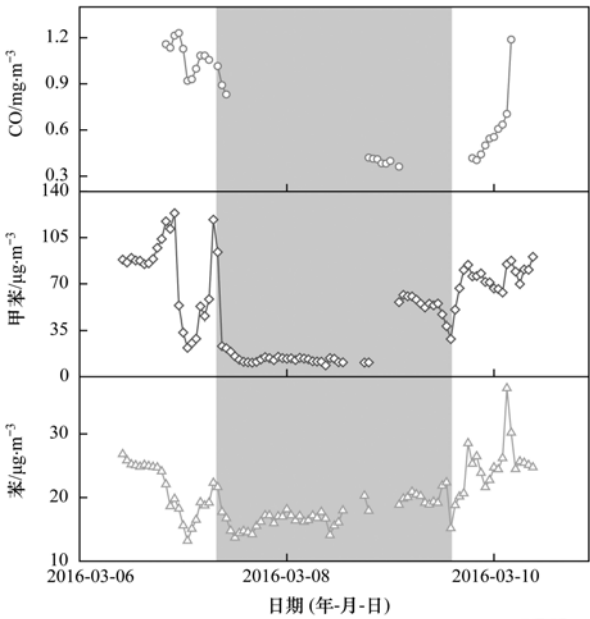


图 8 苯、甲苯与 CO 的相关性
Fig. 8 Correlation of benzene, toluene, and CO



阴影部分为甲苯连续浓度低值变化区间
图 9 3 月 7~10 日苯、甲苯、CO 的变化趋势
Fig. 9 Variations in benzene, toluene, and CO from March 7 to March 10

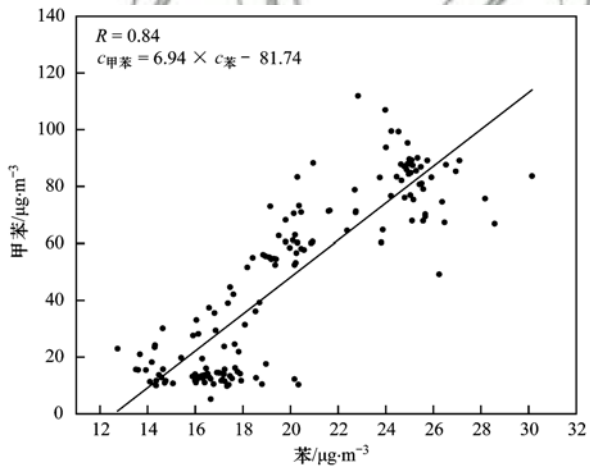


图 10 3 月 7~10 日苯和甲苯的相关性
Fig. 10 Correlation of benzene and toluene from March 7 to March 10

期间苯、甲苯的 T/B 值为 6.9,表明观测地点周边工业园区的排放对该区域苯和甲苯的浓度有较大影响。为探究该期间苯和甲苯的排放源分布,绘制了苯和甲苯的浓度分布,如图 11 所示。苯的浓度分布显示,3 月 7~10 日期间观测区域中心、北偏西方向和北偏东方向,苯浓度值较高。该方向分别为黄山路和天智路交汇口、涂料、塑料行业工业园区和烟草行业工业园区,其均会产生苯的排放。该期间苯的排放源分布较广,其来源较为复杂。

甲苯的浓度分布显示,3 月 7~10 日期间观测地点北方向存在高浓度甲苯,其浓度值达到 120.0

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，表明该区域可能存在甲苯的排放源. 根据周边污染源的调查结果显示，观测地点北偏东方向为涂料、塑料行业工业园区，且该期间的主导风向为东南风，观测地点北方向的高浓度甲苯可能主要来源于北偏东方向的涂料、塑料行业工业园区的排放扩散. 同时甲苯的浓度分布显示，低风速(小于 $1.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)情况下，观测区域中心的甲苯浓度值较低，表明该期间机动车尾气排放对该区域甲苯的浓度贡献较小，可能是导致 3 月 7~10 日期间甲苯出现连续浓度低值的原因.

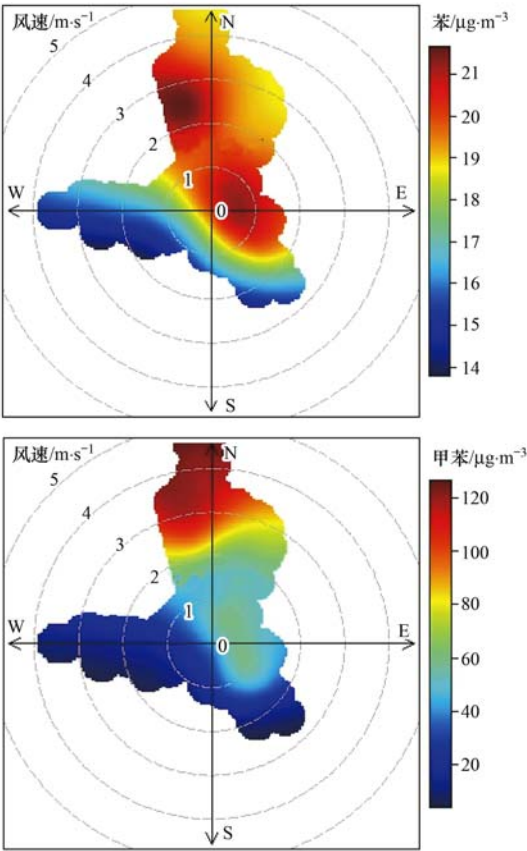


图 11 3 月 7~10 日苯、甲苯的浓度分布
Fig. 11 Concentration distribution of benzene and toluene from March 7 to March 10

2.3.3 苯、甲苯的夜间高浓度峰值

图 4 污染物浓度时间序列图显示，观测期间的苯和甲苯出现了夜间高浓度峰值. 特别是在 3 月的 16 日、18 日和 19 日夜間，苯和甲苯同时出现了高浓度峰值，且二者的变化趋势一致，如图 12 所示. 该期间苯和甲苯的相关性系数 R 为 0.93，如图 13 所示，表明该期间的苯和甲苯可能来自于同一排放源. 图 12 苯和甲苯的浓度时间序列显示，3 月的 16 日、18 日和 19 日夜間的苯和甲苯浓度峰值分别达到 $102.5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $244.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，显著高于观测

期间的平均浓度. 而根据车流量日变化趋势显示，夜间机动车数量显著降低，表明夜间的高浓度苯和甲苯主要来源于非交通排放源，其可能主要来源于观测地点周边污染源的排放. 为探究该期间苯和甲苯的主要排放源，以苯为例，绘制了苯的浓度分布，如图 14 所示. 浓度分布显示，观测地点北偏东方向的苯浓度值较高，该方向为涂料、塑料行业工业园区，夜间的高浓度苯和甲苯可能主要来源于上述工业园区的排放，表明观测地点周边涂料、塑料行业工业园区可能存在夜间排放行为，导致观测区域苯和甲苯夜间高浓度峰值的出现. 该期间的 T/B 值为 1.4，反映了观测地点周边污染源的排放状况，表明周边污染源排放的甲苯浓度较高，苯浓度较低.

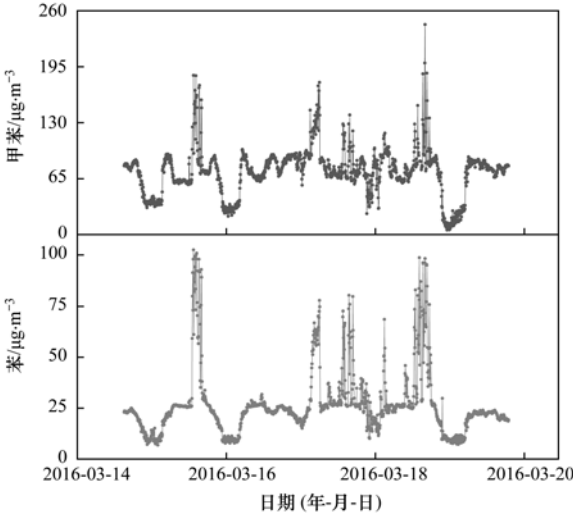


图 12 3 月的 16 日、18 日和 19 日夜間苯和甲苯浓度时间序列
Fig. 12 Time series of night-time benzene and toluene on March 16, 18, and 19

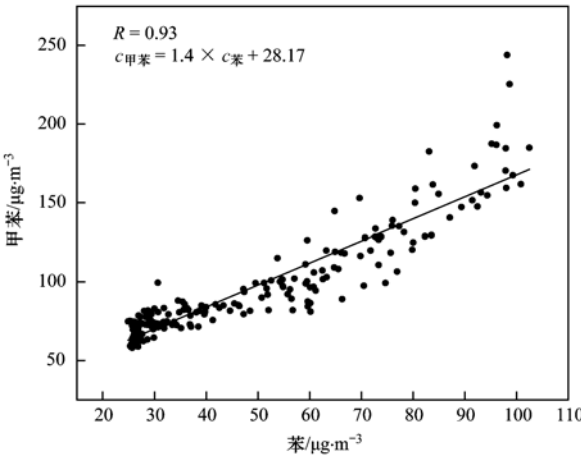


图 13 3 月的 16 日、18 日和 19 日夜間苯和甲苯的相关性
Fig. 13 Correlation of night-time benzene and toluene on March 16, 18, and 19

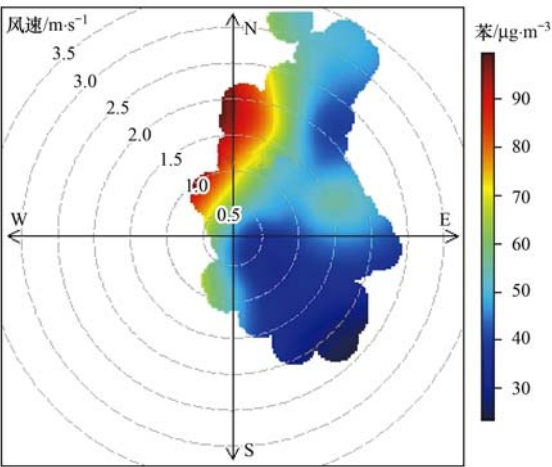


图 14 3 月的 16 日、18 日和 19 日夜间苯的浓度分布
Fig. 14 Concentration distribution of night-time benzene on March 16, 18, and 19

2.4 苯系物臭氧生成潜势

作为光化学反应的重要产物，臭氧在大气污染物的转化过程中扮演着重要角色。VOCs 作为前体物与氮氧化物(NO_x)反应生成臭氧，是城市臭氧污染的重要来源之一。过高浓度的臭氧还会对人体健康和植物生长造成危害^[40]，因此针对苯系物臭氧生成潜势的研究具有重要意义。

苯系物臭氧生成潜势(ozone formation potential, OFP)的研究，通常采用卡特的最大增量反应活性(MIR)法^[41, 42]评估其臭氧生成潜势，计算公式为：

$$\text{OFP}_i = \text{MIR}_i \times [\text{VOC}_i] \quad (1)$$

式中， OFP_i 为臭氧生成潜势($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)； $[\text{VOC}_i]$ 为某 VOCs 的实际大气浓度($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)； MIR_i 为最大增量反应活性系数。表 2 列举了观测期间各苯系物的臭氧生成潜势。

表 2 苯系物臭氧生成潜势			
Table 2 Ozone formation potential of BTX			
化合物	浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	MIR	OFP/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$
苯	21.7	0.42	9.1
甲苯	63.6	2.70	171.7
邻二甲苯	98.7	8.20	809.3
间二甲苯	33.9	6.50	220.4

由表 2 可知,观测区域邻二甲苯的臭氧生成潜势最大,其次为间二甲苯和甲苯,苯的臭氧生成潜势很小.计算结果表明,观测区域二甲苯的 OFP 占总 OFP 的 85%，对臭氧生成的贡献较大,表明观测地点周边工业园区的排放对该地区臭氧生成的影响较大。

3 结论

(1) 观测期间测量地点的大气苯、甲苯、间二

甲苯和邻二甲苯的平均浓度分别为:21.7、63.6、33.9 和 98.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。污染物日变化趋势和周边污染源调查结果显示,观测地点周边存在其它污染源。

(2) 观测区域的间二甲苯和邻二甲苯为同源污染物,且机动车尾气排放对其贡献可能并不占主导,其主要排放源为观测地点北偏东方向的涂料行业工业园区。

(3) 分析观测期间苯、甲苯与 CO 的相关性,计算 T/B 值为 0.8 ~ 4.5,表明观测区域的苯和甲苯主要来源于机动车尾气排放,同时也受到周边工业园区排放的影响。观测区域的苯主要受到周边涂料、塑料行业工业园区和烟草行业工业园区排放的影响。甲苯主要受到周边涂料、塑料行业工业园区排放的影响。

(4) 夜间的高浓度苯和甲苯主要来源于观测地点周边涂料、塑料行业工业园区的排放,表明观测地点周边涂料、塑料行业工业园区可能存在夜间排放行为。

(5) 观测区域苯系物的臭氧生成潜势表现为邻二甲苯 > 间二甲苯 > 甲苯 > 苯,其中二甲苯的 OFP 占总 OFP 的 85%，表明观测地点周边工业园区的排放对该地区臭氧生成的贡献较大,潜在影响该地区的光化学反应活性。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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. 215-259.

[3] Seinfeld J H, Pandis S N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change (2nd ed.) [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2006.

[4] Barletta B, Meinardi S, Rowland F S, *et al.* Volatile organic compounds in 43 Chinese cities [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(32): 5979-5990.

[5] 陈天增, 葛艳丽, 刘永春, 等. 我国机动车排放 VOCs 及其大气环境影响 [J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 478-492.

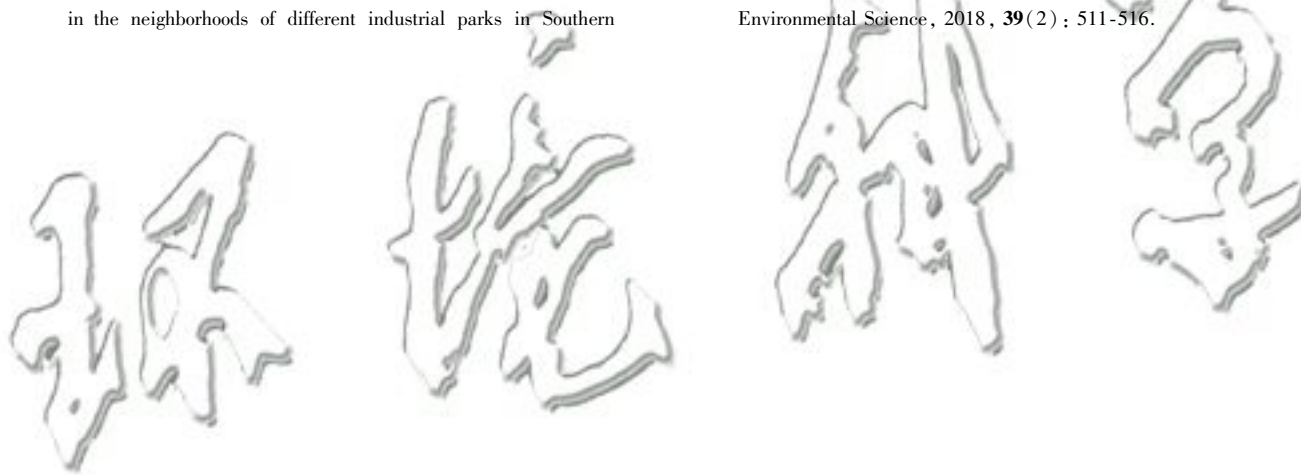
Chen T Z, Ge Y L, Liu Y C, *et al.* VOCs emission from motor vehicles in China and its impact on the atmospheric environment [J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 478-492.

[6] Barletta B, Meinardi S, Simpson I J, *et al.* Characterization of volatile organic compounds (VOCs) in Asian and north American pollution plumes during INTEx-B: identification of specific Chinese air mass tracers [J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2009, **9**(2): 7747-7779.

[7] Cotti G, Conti B, Maltoni C. Benzene: a multipotential carcinogen. results of the long-term bioassays performed at the

- Bologna Institute of Oncology[J]. American Journal of Industrial Medicine, 1983, **4**(5): 589-630.
- [8] 张文斌, 谭丽, 王赞春, 等. 重庆市沙坪坝区大气 VOCs 与健康影响评估[J]. 中国测试, 2017, **43**(3): 43-48.
- Zhang W B, Tan L, Wang Z C, *et al.* Assessment on VOCs in atmospheric air and their influence to health at Shapingba district of Chongqing city[J]. China Measurement & Test, 2017, **43**(3): 43-48.
- [9] 李凤苏. 苯及苯系物对作业人员健康状况的影响[J]. 职业与健康, 2008, **24**(17): 1760-1762.
- Li F S. Influence on health status of workers exposed to benzene[J]. Occupation and Health, 2008, **24**(17): 1760-1762.
- [10] Avens H J, Unice K M, Sahmel J, *et al.* Analysis and modeling of airborne BTEX concentrations from the Deepwater Horizon oil spill[J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45**(17): 7372-7379.
- [11] Berlendis S, Lascourreges J F, Schraauwers B, *et al.* Anaerobic biodegradation of BTEX by original bacterial communities from an underground gas storage aquifer[J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(9): 3621-3628.
- [12] Sarkar C, Chatterjee A, Majumdar D, *et al.* Volatile organic compounds over Eastern Himalaya, India; temporal variation and source characterization using Positive Matrix Factorization[J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2014, **14**(23): 32133-32175.
- [13] Wang M, Zhu T, Zheng J, *et al.* Use of a mobile laboratory to evaluate changes in on-road air pollutants during the Beijing 2008 Summer Olympics[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, **9**(21): 8247-8263.
- [14] Khoder M I. Ambient levels of volatile organic compounds in the atmosphere of Greater Cairo[J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(3): 554-566.
- [15] Pandit G G, Sahu S K, Puranik V D. Distribution and source apportionment of atmospheric non-methane hydrocarbons in Mumbai, India[J]. Atmospheric Pollution Research, 2011, **2**(2): 231-236.
- [16] Buczyńska A J, Krata A, Stranger M, *et al.* Atmospheric BTEX-concentrations in an area with intensive street traffic[J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(2): 311-318.
- [17] 叶丛雷, 谢品华, 秦敏, 等. 广州市交通主干道空气中苯系物的测量[J]. 环境科学, 2012, **33**(11): 3718-3724.
- Ye C L, Xie P H, Qin M, *et al.* BTEX monitoring nearby main road traffic in Guangzhou[J]. Environmental Science, 2012, **33**(11): 3718-3724.
- [18] Hsieh L T, Wang Y F, Yang H H, *et al.* Measurements and correlations of MTBE and BTEX in traffic tunnels[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2011, **11**(6): 763-775.
- [19] 霍霄玮, 薛科社, 许博健, 等. 西安市冬夏季交通主干道环境空气中苯系物的污染特征[J]. 环境污染与防治, 2017, **39**(4): 423-425.
- Huo X W, Xue K S, Xu B J, *et al.* Pollution characteristics of benzenes in ambient air around traffic arteries during winter and summer in Xi'an[J]. Environmental Pollution & Control, 2017, **39**(4): 423-425.
- [20] Qin M, Xie P H, Liu W Q, *et al.* Observation of atmospheric nitrous acid with DOAS in Beijing, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, **18**(1): 69-75.
- [21] 谢品华, 付强, 刘建国, 等. 差分吸收光谱方法反演大气环境单环芳香烃有机物[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, **26**(9): 1584-1588.
- Xie P H, Fu Q, Liu J G, *et al.* Retrieval of monocyclic aromatic hydrocarbons with differential optical absorption spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006, **26**(9): 1584-1588.
- [22] 姚路, 刘文清, 刘建国, 等. 基于 TDLAS 的长光程环境大气痕量 CO 监测方法研究[J]. 中国激光, 2015, **42**(2): 305-312.
- Yao L, Liu W Q, Liu J G, *et al.* Research on open-path detection for atmospheric trace gas CO based on TDLAS[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, **42**(2): 305-312.
- [23] 李明星, 刘建国, 阚瑞峰, 等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱的 CO 和 CH₄ 实时检测系统设计[J]. 光学学报, 2015, **35**(4): 389-395.
- Li M X, Liu J G, Kan R F, *et al.* Design of real-time measurement of atmospheric CO and CH₄ based on tunable diode laser spectroscopy system[J]. Acta Optica Sinica, 2015, **35**(4): 389-395.
- [24] 陆思华, 白郁华, 陈运宽, 等. 北京市机动车排放挥发性有机化合物的特征[J]. 中国环境科学, 2003, **23**(2): 127-130.
- Lu S H, Bai Y H, Chen Y K, *et al.* The characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emitted from motor vehicle in Beijing[J]. China Environmental Science, 2003, **23**(2): 127-130.
- [25] 张爱东, 郭明明, 修光利. 上海市交通干道空气中苯系物冬季污染特征初探[J]. 中国环境监测, 2006, **22**(2): 52-55.
- Zhang A D, Guo M M, Xiu G L. A preliminary study on BTEX pollution characteristics in ambient air at traffic road of Shanghai in winter[J]. Environmental Monitoring in China, 2006, **22**(2): 52-55.
- [26] 苗欣, 孙成, 王禹, 等. 南京市交通干道大气环境中挥发性有机物的研究[J]. 环境保护科学, 2003, **29**(5): 6-9.
- Miao X, Sun C, Wang Y, *et al.* Study on the volatile organic compounds in atmospheric environment by truck road in Nanjing[J]. Environmental Protection Science, 2003, **29**(5): 6-9.
- [27] Ho K F, Lee S C, Chiu G M Y, *et al.* Characterization of selected volatile organic compounds, polycyclic aromatic hydrocarbons and carbonyl compounds at a roadside monitoring station[J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(1): 57-65.
- [28] Caselli M, De Gennaro G, Marzocca A, *et al.* Assessment of the impact of the vehicular traffic on BTEX concentration in ring roads in urban areas of Bari (Italy)[J]. Chemosphere, 2010, **81**(3): 306-311.
- [29] Lan T T N, Minh P A. BTEX pollution caused by motorcycles in the megacity of HoChiMinh[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, **25**(2): 348-356.
- [30] Murena F. Air quality nearby road traffic tunnel portals: BTEX monitoring[J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, **19**(5): 578-583.
- [31] Singh D, Kumar A, Singh B P, *et al.* Spatial and temporal variability of VOCs and its source estimation during rush/non-rush hours in ambient air of Delhi, India[J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2016, **9**(5): 483-493.
- [32] 周雯慧. 涂料生产应用过程中废气排放调查与评价研究

- [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2013. 10-32.
- Zhou W H. Investigation and evaluation of the emissions in the process of coating production and applications [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2013. 10-20.
- [33] Liu J F, Mu Y J, Zhang Y J, *et al.* Atmospheric levels of BTEX compounds during the 2008 Olympic Games in the urban area of Beijing[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **408**(1): 109-116.
- [34] Song Y, Shao M, Liu Y, *et al.* Source apportionment of ambient volatile organic compounds in Beijing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(12): 4348-4353.
- [35] Huang X Y, Zhang Y L, Yang W Q, *et al.* Effect of traffic restriction on reducing ambient volatile organic compounds (VOCs): Observation-based evaluation during a traffic restriction drill in Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **161**: 61-70.
- [36] Barletta B, Meinardi S, Simpson I J, *et al.* Ambient mixing ratios of nonmethane hydrocarbons (NMHCs) in two major urban centers of the Pearl River Delta (PRD) region: Guangzhou and Dongguan [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(18): 4393-4408.
- [37] Hsieh L T, Yang H H, Chen H W. Ambient BTEX and MTBE in the neighborhoods of different industrial parks in Southern Taiwan[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, **128**(2-3): 106-115.
- [38] Lee S C, Chiu M Y, Ho K F, *et al.* Volatile organic compounds (Vocs) in urban atmosphere of Hong Kong[J]. *Chemosphere*, 2002, **48**(3): 375-382.
- [39] 杨永泰, 钟敏华, 廖丽华. 塑料制革工艺废气的有机污染及其对环境的影响[J]. *云南环境科学*, 2001, **20**(Z1): 74-77.
- Yang Y T, Zhong M H, Liao L H. Organic pollution's features and impact on environment of the waste gas in industry of plastic tan[J]. *Yunnan Environmental Science*, 2001, **20**(Z1): 74-77.
- [40] Brauer M, Brook J R. Ozone personal exposures and health effects for selected groups residing in the Fraser Valley [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(14): 2113-2121.
- [41] Cai C J, Geng F H, Tie X X, *et al.* Characteristics of ambient volatile organic compounds (VOCs) measured in Shanghai, China[J]. *Sensors*, 2010, **10**(8): 7843-7862.
- [42] 武蕾丹, 王秀艳, 杨文, 等. 某工业园区 VOCs 臭氧生成潜势及优控物种[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 511-516.
- Wu L D, Wang X Y, Yang W, *et al.* Ozone formation potential and priority species of VOCs in an industrial park [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 511-516.



CONTENTS

Emission Inventory and Prediction of Non-road Machineries in the Yangtze River Delta Region, China	HUANG Cheng, AN Jing-yu, LU Jun (3965)
Vehicle Exhaust Emission Characteristics and Their Contributions in Jiangsu Province	LI Li, ZHANG Jie, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (3976)
Historical Trends of Atmospheric Pb and Hg Emissions from Fossil Fuel Combustion in Shanghai	YANG Jing, CHEN Long, LIU Min, <i>et al.</i> (3987)
Emission Inventory of Atmospheric Pollutants and VOC Species from Crop Residue Burning in Guangdong Province	SUN Xi-bo, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (3995)
Mass Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	LI Yan-pei, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (4002)
Analysis of Seasonal Variations in Chemical Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Summer and Winter in Ji'nan City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4014)
PM _{2.5} Pollution Characterization and Cause Analysis of a Winter Heavy Pollution Event, Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, WU Ya-jun, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (4026)
Concentrations, Sources, and Dry Deposition Fluxes of Different Forms of Phosphorus in Qingdao Aerosols in Summer	WANG Nan, MA Miao, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (4034)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Winter in Jincheng	YANG Fan, YAN Yu-long, GE Yun-fei, <i>et al.</i> (4042)
Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, LI Da-jun, <i>et al.</i> (4051)
Characteristics of Atmospheric BTX near a Main Road in Hefei City	MENG Fan-hao, QIN Min, LIANG Shuai-xi, <i>et al.</i> (4060)
Ozone Generation Potential and Highly Contributing Substances of NMOCs from Landfill Working Face	LI Hao, LIU Yan-jun, CHEN Tan, <i>et al.</i> (4070)
Emission Characteristics of Wind-Eroded Dust from Concrete Batching Plants in Beijing	LI Bei-bei, HAN Kai-li, QIN Jian-ping, <i>et al.</i> (4078)
Seasonal Variation Characteristics of Pollution Risk in a Riverside Source Area Based on Source Apportionment	GAO Xiang, ZUO Rui, GUO Xue-ru, <i>et al.</i> (4086)
Evaluation of Effect of Urban Non-point Source Pollution Control on Porous Asphalt-Bio-retention Combined Roads	GONG Man-li, ZUO Jun-jie, REN Xin-xin, <i>et al.</i> (4096)
Composition, Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Lanzhou Reach of the Yellow River	 ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, <i>et al.</i> (4105)
Characterization of Dissolved Organic Matter Fractions in the Ning-Meng Section of the Yellow River and Relationship with Metal Ions	XI Yue, WANG Ting, NI Jin-ren, <i>et al.</i> (4114)
Comparative Characteristics of Optical Absorption in Waters from Yiluo River and Huntai River in Spring	LI Liu-yang, SHAO Tian-tian, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4122)
Seasonal Variations in River Water Chemical Weathering and Its Influence Factors in the Malian River Basin	WANG Yu-shan, HAN Shuang-bao, DENG Qi-jun, <i>et al.</i> (4132)
Characteristics and Genesis of NO ₃ Type Water in Shallow Groundwater in Lujiang Basin	XU Jin, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (4142)
Development and Evaluation of a Sustainable Long-release Carbon Material Applied for In-Situ Remediation of Groundwater Nitrogen Pollution	 ZHANG Wen, YIN Lin, ZHOU Nian-qing (4150)
Phosphorus Forms and Distribution Characteristics in the Sediment and Soil of the Water-Level-fluctuating Zone in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir	 ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, <i>et al.</i> (4161)
Distribution Characteristics and Release Fluxes of Phosphorus Forms in Xiangxi Bay Sediments in the Three Gorges Reservoir Before and After Impoundment	 LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Zirconium-modified Zeolite Addition on Phosphorus Release and Immobilization in Heavily Polluted River Sediment	HE Si-qi, ZHANG Wei, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (4179)
Impact of Human Activities on Net Anthropogenic Nitrogen Inputs (NANI) at Township Scale in Erhai Lake Basin	LI Ying, LIU Hong-bin, LEI Qiu-liang, <i>et al.</i> (4189)
Simulation of Inorganic Nitrogen Fluxes at the Sediment-water Interface in a Typical Intertidal Zone, Eastern China	NIE Jia-qin, WANG Dong-qi, CHEN Jie, <i>et al.</i> (4199)
Effects of Aquaculture on Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Sediments of Eastern Lake Taihu	CHU Yu, HE Xiao-wei, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4206)
Transformation of Ammonia in Wetland Sediments for Treatment of Mining Wastewater	WANG Hai-bo, MA Ding, YUE Zheng-bo, <i>et al.</i> (4215)
Distribution Characteristics of Sulfonamide Antibiotic Resistance Genes in a Drinking Water Source in East China	HU Ya-ru, JIANG Lei, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (4222)
Distribution Characteristics of Sulfonamides and Sulfamethoxazole-Resistant Bacteria in Tannery Wastewater Treatment Processes	HUA Li, LI Lu, YANG Chun-yan (4229)
Effects of Different Substrates and Particle Sizes on Wastewater Purification	ZHAO Lin-li, SHAO Xue-xin, WU Ming, <i>et al.</i> (4236)
Substrate Flow by Different Biochemical Activities in the Urban Sewage Network	YAO Xiang-yi, SHI Xuan, SANG Lang-tao, <i>et al.</i> (4242)
Reducing Membrane Fouling from Micro-Flocculation in a Humic Acid Ultrafiltration Process	WANG Xu-dong, SHI Cai-xia, LIAO Zheng-wei, <i>et al.</i> (4249)
Enhanced Degradation of Aniline by PS Oxidation in the Presence of UV and Ferric Oxalate	HAN Dong-hui, LI Ying, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (4257)
Behavior and Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coking Wastewater of A/O ² and A/O/H/O Processes	WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, LIU Guo-xin, <i>et al.</i> (4265)
Effects of Long-term Side Stream Extract on Phosphorus Removal and Recovery Performance of EBPR System	YU Xiao-jun, LI Jie, ZHOU Meng, <i>et al.</i> (4274)
Effect of NaCl Salinity on Extracellular Polymeric Substances and Bioflocculation of Anoxic Sludge in A ² /O Process	ZHANG Lan-he, TIAN Rui, GUO Jing-bo, <i>et al.</i> (4281)
Effect of Temperature and pH on Nitrogen Conversion in Feammox Process	CHEN Fang-min, JIN Run, YUAN Yan, <i>et al.</i> (4289)
Inhibitory Kinetics of Free Ammonia (FA) on Ammonia-oxidizing Bacteria (AOB)	SUN Hong-wei, YU Xue, GAO Yu-xue, <i>et al.</i> (4294)
Effect of HRT on Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Heterotrophic Denitrification	AN Fang-jiao, ZHAO Zhi-chao, HUANG Li, <i>et al.</i> (4302)
Reactivation Performance of Nitrosation Flocculent Sludge After Long-term Storage	LI Tian, WEI Fan-kai, WANG Yu-chang, <i>et al.</i> (4310)
Analysis of Characteristics and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils in the Xijiang River Draining of Guangxi	SONG Bo, ZHANG Yun-xia, PANG Rui, <i>et al.</i> (4317)
Soil Organic Carbon of Purple Soil as Affected by Different Application of Biochar	LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming, <i>et al.</i> (4327)
Effects of Straw and Biochar Addition on Soil Carbon Balance and Ecological Benefits in a Rape-maize Rotation Planting System	LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4338)
Potential to Ensure Safe Production from Rice Fields Polluted with Heavy Cadmium by Combining a Rice Variety with Low Cadmium Accumulation, Humic Acid, and Sepiolite	 XIE Xiao-mei, FANG Zhi-ping, LIAO Min, <i>et al.</i> (4348)
Interactive Effects of Ozone and Drought on Antioxidant Enzyme Activities of Poplar Leaves	ZHOU Hui-min, LI Pin, GAO Feng, <i>et al.</i> (4359)
Effects of Different Levels of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Enzyme Activity and Distribution of Thermotolerant Coliforms	HAN Yang, LI Ping, QI Xue-bin, <i>et al.</i> (4366)
Characteristics of Heavy Metals in Chicken Manure Organic Fertilizers in the Huang-Huai-Hai Region and related Environmental Risk Assessment	 LI Fa, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (4375)
Heavy Metal Content of Rural Living Solid Waste and Related Source and Distribution Analysis	JIN Qi, GAO Hong, YUE Bo, <i>et al.</i> (4385)