

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第2期

Vol.39 No.2

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

特别策划:挥发性有机污染物(VOCs)排放特征、减排控制、环境政策研究专辑(III)

序 郝郑平(477)

我国机动车排放VOCs及其大气环境影响 陈天增,葛艳丽,刘永春,贺泓(478)

基于PMF量化工业排放对大气挥发性有机物(VOCs)的影响:以南京市江北工业区为例 胡崑,王鸣,郑军,王红丽,卢兴东,景盛翱,陈超(493)

南京工业区挥发性有机物来源解析及其对臭氧贡献评估 张玉欣,安俊琳,王俊秀,师远哲,刘静达,梁静舒(502)

某工业园区VOCs臭氧生成潜势及优控物种 武蕾丹,王秀艳,杨文,郭凤艳,刘锦(511)

某石油化工园区秋季VOCs污染特征及来源解析 胡天鹏,李刚,毛瑶,郑煌,秦世斌,闵洋,张家泉,邢新丽,祁士华(517)

某典型石油化工园区冬季大气中VOCs污染特征 毛瑶,李刚,胡天鹏,郑煌,安艺伟,闵洋,邢新丽,祁士华(525)

杭州市工业源VOCs排放清单及排放特征 卢滨,黄成,卢清,杨强,井宝莉,夏阳,唐伟,顾泽平(533)

秦皇岛市工业行业挥发性有机物排放特征 虎啸宇,刘航,王乃玉,王灿,揣莹(543)

浙江省汽摩配行业挥发性有机物排放特征及排放系数 杨忠平,王浙明,何志桥,徐志荣,滕富华,张华岳(551)

汽车制造企业恶臭来源及影响分析 石田立,张伟霞,陈小方,张嘉妮,梁小明,范丽雅,叶代启(557)

典型酿造业厂界无组织排放VOCs污染特征与风险评价 高占啟,胡冠九,王荃,朱冰清,陈素兰(567)

成都市大气环境VOCs污染特征及其健康风险评价 李友平,唐娅,范忠雨,蒲敏,章金莲,杨铮铮,吴大磊(576)

上海地区住宅儿童卧室室内甲醛和苯系物浓度的现场检测分析 蒋巧云,刘平平,王雪颖,路荣春,刘炜,周华元,龚莹莹,周亚欣,黄晨(585)

江苏省人为源VOCs排放清单及其对臭氧生成贡献 夏思佳,刘倩,赵秋月(592)

江门市人为源挥发性有机物排放清单 陈小方,张伟霞,陈柄旭,张嘉妮,范丽雅,叶代启(600)

长江三角洲2014年天然源BVOCs排放、组成及时空分布 刘岩,李莉,安静宇,张伟,严茹莎,黄凌,黄成,王红丽,王卿,王敏(608)

北京城市副中心(通州区)加油站VOCs排放清单 黄玉虎,胡玮,李贝贝,纪旋,肖宇,任碧琪,秦建平(618)

公交车使用废食用油制生物柴油的污染物排放及VOCs成分谱 胡志远,林骠骑,黄成,王红丽,景盛翱,楼狄明(626)

生物滴滤塔净化甲基叔丁基醚废气的研究 褚其英,姚露露,吕雄标,叶杰旭,叶虹霓,潘梁柱,陈建孟,陈东之(633)

低温等离子体-生物耦合系统对复合CVOCs的降解 郭海倩,缪晶晶,姜理英,张迪(640)

水质异味期间钱塘江杭州段表层水体中挥发性和半挥发性有机物污染特征及健康风险评价 陈峰,唐访良,徐建芬,王奕奕,阮东德,张伟,周姗(648)

城市自来水管网中挥发性有机物的空间分布特征 许美佳,王海亮,李春梅,徐雄,王东红(655)

不同通勤模式暴露于VOCs的健康风险评价 佟瑞鹏,张磊(663)

家具制造过程中VOCs的来源分析及环境健康风险评价 佟瑞鹏,张磊,杨校毅,朱旭波,任传耕(672)

研究报告

北京市PM_{2.5}时空分布特征及其与PM₁₀关系的时空变异特征 杨文涛,姚诗琪,邓敏,王艳军(684)

小型池塘水-气界面CH₄冒泡通量的观测 张秀芳,肖薇,张弥,王伟,赵佳玉,胡勇博,谢成玉,张圳,谢燕红,黄文晶(691)

中国七大流域全氟烷基酸污染水平与饮水暴露风险 王鑫璇,张鸿,王艳萍,罗骥(703)

铁岭市河流氮素时空分布及源解析 杨丽标,雷坤,乔飞,孟伟(711)

基于三维荧光及平行因子分析的川西高原河流水体CDOM特征 刘堰杨,秦纪洪,刘琛,孙辉,唐翔宇,范诗雨(720)

宁波市地表水重金属污染现状和健康风险评价 徐美娟,鲍波,陈春燕,王永川,高夫燕,虞效益(729)

巢湖水体可溶态重金属时空分布及污染评价 吴蕾,刘桂建,周春财,刘荣琼(738)

广西龙江沉积物重金属污染现状及生物有效性 蓝小龙,宁增平,肖青相,黄正玉,刘意章,肖唐付,赵彦龙,吴世良(748)

内电解人工湿地冬季低温尾水强化脱氮机制 郑晓英,朱星,王菊,周翔,徐亚东,韦诚,高雅洁,周徽(758)

河道型水库支流库湾营养盐动态补给过程 徐雅倩,徐飘,杨正健,刘德富,马骏(765)

降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析 刘心愿,宋林旭,纪道斌,刘德富,崔玉洁,黄佳维,赵冲,唐咏春,平明明(774)

城市河流沉水植物与大型底栖动物群落的关系 梁晓东,余杨,张敏,段龙飞,彭文启(783)

三峡库区兰陵溪小流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征 张林,黄志霖,肖文发,曾立雄,宋文梅(792)

基于污染评价的地下水中优控污染物筛选 赵鹏,何江涛,王曼丽,黄德亮,王磊,梁雨(800)

硫和石英砂比对自养填充床反应器去除高浓度高氯酸盐的影响 陶华强,邵冬海,张超,宋圆圆,逯彩彩,郭建博(811)

活性炭/高分子复合水凝胶对水中亚甲基蓝和Cu(II)的去除性能 孔岩,庄媛,石宝友,韩志勇,郝昊天,韩昆,于建伟(819)

三维网状HZO@SGH对水中氟离子的吸附作用和机制 马福臻,周少奇,刘泽璐,支亮亮,周璇(828)

MgO/活性炭催化臭氧氧化降解有机物的作用机制 许珊珊,林存旺,丁亚磊,童少平(838)

污水厂二级出水中难降解有机物的臭氧氧化特性 侯瑞,金鑫,金鹏康,苟邦耀,王晓昌(844)

染料探针技术对二级出水中优势污染物的定量检测 孟晓荣,王隽,王磊,王旭东,乔茹凯,任婷婷,唐卫婷(852)

污水处理厂厌氧氨氧化工艺小试 李冬,赵世勋,王俊安,朱金凤,关宏伟,张杰(859)

间歇曝气模式下曝气量对短程硝化恢复的影响 刘宏,南彦斌,李慧,王翔,彭永臻,陈永志(865)

好氧/除磷颗粒对亚硝化颗粒污泥启动的影响 李冬,郭跃洲,曹美忠,张泽文,李帅,张杰(872)

处理垃圾渗滤液的SBR中微生物种群与污泥比阻 蔡丽云,黄泽彬,须子唯,江志斌,林莉莉,黄宇(880)

基于城镇化进程表层土壤多环芳烃来源解析及风险评价 姚宏,张士超,刘明丽,王静,鲁垠涛,于晓华(889)

西江流域土壤砷含量空间变异与污染评价 刘畅,宋波,张云霞,雷梅,田美玲,余元元,庞瑞(899)

开封城市土壤磷素组成特征及流失风险 白秀玲,马建华,孙艳丽,刘德新(909)

电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价 尹伊梦,赵委托,黄庭,程胜高,赵珍丽,余葱葱(916)

上海市稻米中有机氯农药残留水平及健康风险评价 孟媛,刘翠翠,仇雁翎,周轶慧,朱志良(927)

四环素类抗生素对不同蔬菜生长的影响及其富集转运特征 迟菘琳,王卫中,徐卫红,李桃,李彦华,张春来(935)

硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤As-Cd生物有效性及稻米累积阻控 李园星露,叶长城,刘玉玲,李丹阳,刘寿涛,罗海艳,刘孝利,铁柏清,孙健(944)

电子垃圾拆解工人的肝功能和肾功能健康状况及影响因素分析:以清远市龙塘镇为例 严晓,李淑圆,王美欢,许榕发,郑晶,任明忠(953)

《环境科学》征稿简则(584) 《环境科学》征订启事(683) 信息(799,908,934)

基于 PMF 量化工业排放对大气挥发性有机物 (VOCs) 的影响: 以南京市江北工业区为例

胡崑¹, 王鸣^{1,2*}, 郑军^{1,2}, 王红丽³, 卢兴东^{1,4}, 景盛翱³, 陈超⁵

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 2. 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044; 3. 上海市环境科学研究院, 国家环境保护城市大气复合污染成因与防治重点实验室, 上海 200233; 4. 南京科略环境科技有限责任公司, 南京 211800; 5. 杭州市环境监测中心站, 杭州 310007)

摘要: 挥发性有机物(VOCs)在臭氧(O₃)和二次有机气溶胶(SOA)生成中起着关键作用. 南京市江北地区工业密集, 为评估工业排放对大气 VOCs 的影响, 本研究于 2017 年 3 月在工业区受体点南京信息工程大学(南信大)开展了为期近 1 个月的 VOCs 采样和测量. 监测数据显示南信大站点大气 VOCs 浓度波动大, 范围(体积分数)在 10.3×10^{-9} ~ 200.5×10^{-9} 之间, 烯烃、芳香烃和卤代烃等组分(例如: 乙烯、丙烯、苯、苯乙烯、二氯甲烷等)存在明显的异常高值. 利用正交矩阵因子模型(PMF)对 VOCs 进行来源解析, 结果显示在观测期间与工业排放相关源的平均贡献为 50.0%, 其中石化源、化工源以及涂料和溶剂使用源的贡献分别为 14.9%、19.3% 和 15.8%. 在 VOCs 高污染时段, 与工业排放相关源的占比高达 74.9%. 进一步结合风速和风向数据, 确定了不同类型工业源的主导方位, 追溯排放源的潜在位置.

关键词: 挥发性有机物; 工业排放; 来源解析; 正交矩阵因子分析; 南京

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)02-0493-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201708254

Quantification of the Influence of Industrial Emissions on Volatile Organic Compounds (VOCs) Using PMF Model: A Case Study of Jiangbei Industrial Zone in Nanjing

HU Kun¹, WANG Ming^{1,2*}, ZHENG Jun^{1,2}, WANG Hong-li³, LU Xing-dong^{1,4}, JING Sheng-ao³, CHEN Chao⁵

(1. College of Environment Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology (CICAET), Nanjing 210044, China; 3. State Environmental Protection Key Laboratory of Formation and Prevention of the Urban Air Complex, Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 4. Nanjing Intelligent Environmental Sci-Tech Co., Ltd., Nanjing 211800, China; 5. Hangzhou Environmental Monitoring Station, Hangzhou 310007, China)

Abstract: Volatile organic compounds (VOCs) are important precursors of ozone and secondary organic aerosol. The effect of industrial emissions on ambient VOC concentrations in the Jiangbei Industrial Zone in Nanjing was evaluated using the ambient VOCs measurements taken at Nanjing University of Information Science and Technology (NUIST) during March 2017. The monitoring data showed that the sum of 92 measured VOCs (TVOCs) ranged from 10.3×10^{-9} to 200.5×10^{-9} . Some VOC species, such as ethylene, propene, benzene, styrene, and dichloromethane had abnormally high values. Positive matrix factorization model (PMF) was used to identify the main sources of VOCs. The results showed that industrial emissions on average accounted for 50.0% of TVOCs, while petrochemical industry, chemical industry, and paints & solvents use accounted for 14.9%, 19.3% and 15.8%, respectively. During a VOC pollution episode, the contribution of industrial emissions reached 74.9%. The direction of industrial sources was determined by combining the wind speed and wind direction data.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); industrial emission; source analysis; PMF; Nanjing

我国大气污染逐渐呈现出复合污染特征, 以臭氧(O₃)和细颗粒物为代表的二次污染问题日益凸显^[1]. 挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是参与大气化学反应的重要污染物之一^[2], 是臭氧(O₃)和二次有机气溶胶(secondary organic aerosol, SOA)的关键前体物^[3]. 另外, 部分 VOCs 还会对人体健康产生危害, 如苯、二氯乙烯等被国际癌症研究机构(International Agency for Research

on Cancer, IARC)列为一类致癌物^[4]. 大气中 VOCs 的来源复杂, 不仅来自直接排放(一次源), 还可以

收稿日期: 2017-08-31; 修订日期: 2017-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41505113); 江苏省自然科学基金项目(BK20150896); 上海市科学技术委员会科研计划项目(16DZ1204606); 国家环境保护城市大气复合污染成因与防治重点实验室开放课题项目(CX201510(C))

作者简介: 胡崑(1992~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气 VOCs 污染控制, E-mail: 306938144@qq.com

* 通信作者, E-mail: wangmingmelon@163.com

通过光化学反应生成(二次源),石油、化工、溶剂涂料挥发等工业相关排放是 VOCs 重要的人为源^[2]。

国内外的研究发现不同地区大气 VOCs 的来源具有显著差异。Wang 等^[5]对北京大气 VOCs 来源研究发现,机动车相关排放(44.2%)是其最重要的排放源。而美国休斯顿地区作为美国最大的石化基地之一,其大气 VOCs 主要来自石油炼制和化工等工业源,贡献率高达 49%~85%^[6]。Liu 等^[7]对珠江三角洲新垦地区大气 VOCs 来源研究发现,涂料和溶剂使用(32.9%)是最重要的排放源,其次为汽油车尾气排放(30.6%)。Mo 等^[8]对长三角城市 VOCs 来源研究发现,工业排放(石化、化工和涂料工业)占到 VOCs 排放的 50.0%。在工业密集地区,如何定量分析工业排放对大气 VOCs 的影响,是近年来的研究热点。

由于大气 VOCs 化学组成复杂,不同组分活性差异大,给 VOCs 来源研究带来了很大挑战。排放清单法和受体模型法是目前常用的 VOCs 来源研究方法。排放清单是通过收集排放因子(emission factor, EF)和活动水平(activity)数据计算各环节 VOCs 排放量,而受体模型是独立于排放清单的源解析方法,它根据受体的实测数据来解析 VOCs 的来源。目前常用的受体模型有化学质量平衡法(chemical mass balance, CMB)、主成分分析(principal component analysis, PCA)和正交矩阵因子法(positive matrix factorization, PMF)。基于 CMB 模型进行 VOCs 来源解析需要源成分谱(source profile)^[9],适用于对 VOCs 源谱研究有一定基础的区域。PMF 基于受体点的实测数据来估算污染源的组成和对环境浓度的贡献,尤其适用于 VOCs 来源复杂而且源谱数据库未构建完成的地区。Dumanoglu 等^[10]对土耳其工业区 VOCs 进行 PMF 来源解析,与工业相关 VOCs 排放占到 90%,机动车占到 10%。本研究所关注的江北工业区站点周边 VOCs 来源复杂,而且源谱构建工作较为欠缺,虽然本研究尝试测量了一些 VOCs 源谱,但仍不能覆盖站点周边所有行业,因此选择了 PMF 作为本研究的来源解析模型。

长江三角洲地区是我国的经济中心,也是工业聚集地,清单研究表明工业相关的源占总 VOCs 排放量的 69%~71%^[11,12]。南京市位于长三角的西部,周边集中了较多的石化、化工、钢铁等相关行业^[13]。为了评估南京市江北工业排放对大气 VOCs 的影响,本研究在受工业区影响的南京信息工程大

学站点开展为期近 1 个月的 VOCs 测量,分析了 VOCs 浓度及化学组成,利用 PMF 模型定量解析 VOCs 来源,并结合风向等气象条件进一步识别工业源的主要方位。

1 材料与方法

1.1 采样地点和采样时间

为了解南京市工业区 VOCs 污染特征及其来源,本研究在位于南京工业排放密集的江北工业区附近布设了采样点。点位设于南京信息工程大学(118.71°E, 32.21°N),采样高度离地约 3 m。站点东向距离盘城新街约 800 m,距离宁六公路约为 1.5 km。南信大站点北向约 2 km 是盘城工业区,包括橡胶、化工等行业;东北向约 10 km 是扬子石化、扬子巴斯夫等;偏东向约 5 km 是中国石化南京化学工业有限公司(“南化”)、南京钢铁集团有限公司(“南钢”)等,站点东南向约 2 km 是丁解工业园,包括化工、塑料、彩钢、家具等行业;在站点南向约 3 km 是高新开发区,包括是冶金、材料制造等行业(图 1)。另外,为了评估工业排放对 VOCs 的影响,本研究在南京西北方向江浦地区设置了一个对照点(118.61°E, 32.03°N),采样高度离地面约 15 m,周边车流量小,无明显局地源排放。

南信大站点观测时间为 2017 年 3 月 6~30 日,采样开始时间为 07:00,每 2 h 采一个样品,每天共采集 7 个样品,对应的采样时间分别为 07:00~09:00、09:00~11:00、11:00~13:00、13:00~15:00、15:00~17:00、17:00~19:00、19:00~21:00。采样期间,选择了 3 d(2017 年的 3 月 7 日、3 月 15 日、3 月 18 日)在对照点开展了同步的全空气样品采集。采样期间的气象资料显示,采样期间风速为 1~8 m·s⁻¹,平均风速为 2.4 m·s⁻¹,平均温度为 10.3℃。图 1 中给出了采样期间观测站点的风玫瑰图,可以看出采样期间主要以北风和东风为主。

1.2 采样方法

本研究采用内壁抛光并经过硅烷化的不锈钢罐(3.2 L, Entech, USA)采集全空气样品。在采样前用自动清罐仪(Entech 3100, USA)对不锈钢罐进行清洗,并抽真空(内部压力≤6.67 Pa 即 50 mTorr)备用。采样时在不锈钢罐上安装限流阀控制采样流速(CS2100E, Entech, USA)进行累积采样,采样时间为 2 h。

1.3 实验室分析方法

不锈钢罐采样完成后于 24 h 内送至实验室进行分析,本研究采用的分析设备为北京大学和武汉



图 1 采样点位地图及周边工业分布示意

Fig. 1 Map of sampling sites and surrounding industrial parks

天虹环保产业股份有限公司共同研发的大气挥发性有机物快速在线监测系统 TH-300B. 该系统为双气路设计, 环境大气经采样泵通过低温除水阱和低温捕集阱 (-150°C), 使大气中的 VOCs 被捕集并浓缩. 完成采样后, 捕集阱加热至 110°C , 使 VOCs 解析并且由载气带入系统进行分析. 其中一路(气路 I)使用 PLOT 柱 ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{KCl}$, $0.53\text{ mm} \times 15\text{ cm}$) 进行捕集, 利用氢火焰离子检测器 (flame ionization detector, FID) 进行检测 C2 ~ C5 的碳氢化合物, 色谱分离柱为 PLOT 柱 ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{KCl}$, $15\text{ m} \times 0.32\text{ mm}$). 另外一路(气路 II)使用去活石英毛细管空柱 ($0.53\text{ mm} \times 15\text{ cm}$) 捕集, 利用四级杆质谱检测器 (mass spectrometer, MS) 检测 C5 ~ C10 的碳氢化合物、卤代烃, 色谱分离柱为 DB-624 ($30\text{ m} \times 0.25\text{ mm}$) 的柱. 仪器检测限为 $0.001 \times 10^{-9} \sim 0.026 \times 10^{-9}$, 精密性 $0.8\% \sim 6.1\%$, 系统的具体原理、细节设置和质量控制和质量保证 (QA/QC) 详见文献 [14]. 本研究共测量了 92 种 VOCs, 其中包括 28 种烷烃、11 种烯烃、17 种芳香烃、乙炔和 35 种卤代烃.

1.4 PMF 模型

PMF 模型是美国环保署 (US Environmental Protection Agency, EPA) 发布的源解析模型, 将矩阵 x_{ij} 分解为源贡献矩阵 g_{jk} 和污染物源成分谱矩阵 f_{kj} , e_{ij} 为残差矩阵, 计算公式如下:

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij}$$

式中, x_{ij} 表示 i 样品中 j 组分的浓度; g_{jk} 表示第 k 个源对 i 样品的贡献; f_{kj} 表示第 k 个排放源中 j 组分的

含量; p 污染源数目. PMF 模型主要是计算基于不确定度 u_{ij} 目标函数的最小值 Q , m 和 n 分别是样品量和物种量, $g_{jk} \geq 0$, $f_{kj} \geq 0$, $u_{ij} > 0$, 计算公式如下:

$$Q = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left[\frac{x_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj}}{u_{ij}} \right]^2$$

PMF 模型不确定度 u_{ij} 的计算公式:

$$u_{ij} = \sqrt{(\text{EF} \times c)^2 + (0.5 + \text{MDL})^2} \quad (c > \text{MDL})$$

如果浓度小于等于 MDL 时, 公式计算为:

$$u_{ij} = 5/6 \times \text{MDL} \quad (c \leq \text{MDL})$$

式中, c 为浓度数据, EF (error fraction) 代表误差分数, 本研究中 EF 值的确定主要考虑到仪器测量的精密性 ($0.8\% \sim 6.1\%$), 并结合该设备应用于其他地区的一些 PMF 来源解析研究中 EF 参数的设置值^[15,16], 将 EF 设置为 10% . MDL (method detection limit) 为检测限, 通过将接近期望检测限浓度的标准样品, 重复进样 7 次, 计算分析结果的平均标准偏差, 乘以在 99% 置信度区间的统计系数 t 值 (3.14), 详细原理见文献 [14].

2 结果与讨论

2.1 VOCs 浓度水平及化学组成

在整个观测期间, 南信大站点的 92 种 VOCs 组分 (TVOCs) 的浓度范围 (体积分数) 在 $10.3 \times 10^{-9} \sim 200.5 \times 10^{-9}$, 平均值为 $(34.3 \pm 28.8) \times 10^{-9}$, 浓度波动幅度较大. TVOCs 中的烷烃、烯烃、乙炔、芳香烃和卤代烃的平均值分别为 $(14.3 \pm 13.8) \times 10^{-9}$ 、 $(3.6 \pm 4.0) \times 10^{-9}$ 、 $(1.7 \pm 1.1) \times 10^{-9}$ 、 $(4.6 \pm 7.0) \times 10^{-9}$ 和 $(10.1 \pm 9.1) \times 10^{-9}$, 分别占 41.6% 、 10.5% 、 5.1% 、 13.4% 和 29.3% .

在同步观测期间, 江浦对照点的烷烃、烯烃、乙炔、芳香烃和卤代烃的平均值分别为 $(10.2 \pm 3.9) \times 10^{-9}$ 、 $(2.2 \pm 1.3) \times 10^{-9}$ 、 $(1.3 \pm 0.3) \times 10^{-9}$ 、 $(1.4 \pm 1.2) \times 10^{-9}$ 和 $(6.8 \pm 2.4) \times 10^{-9}$, 分别占比 45.8% 、 9.9% 、 5.7% 、 8.2% 和 30.3% . 南信大站点的烷烃、烯烃、乙炔、芳香烃和卤代烃的平均值分别为 $(12.0 \pm 6.4) \times 10^{-9}$ 、 $(3.2 \pm 3.4) \times 10^{-9}$ 、 $(1.1 \pm 0.4) \times 10^{-9}$ 、 $(4.1 \pm 5.3) \times 10^{-9}$ 和 $(8.2 \pm 6.5) \times 10^{-9}$, 分别占比 42.1% 、 11.2% 、 3.9% 、 14.3% 和 28.5% .

本研究的 VOCs 浓度小于在 2011 ~ 2012 年南京北郊 VOCs 的观测浓度^[17]. 不同城市 VOCs 浓度水平具有一定的差异性, 南京江北工业区大气中的

乙炔(1.7×10^{-9})低于上海春节期间(3.5×10^{-9}),乙炔是燃烧源的典型物种,上海机动车尾气排放是重要的污染来源之一^[18].而与厦门春冬季相比,南京江北工业区大气中的苯(2.2×10^{-9})浓度大于厦门(0.5×10^{-9})^[19],苯主要来自工业相关源排放,说明南京江北受工业 VOCs 排放影响较大.

图2比较了观测期间各 VOCs 组分浓度水平的平均值与中位数,从中可以看出大部分 VOCs 组分浓度的平均值高于中位数,有22种组分平均值与中位数的比值大于2,主要是一些卤代烃、芳香烃、烯烃和 C6 以上的烷烃,其中氯苯和环己烷浓度平均值与中位数的比值高达23和9,说明这些 VOCs 组分浓度存在异常高值.结合对站点周边调研的情况,南化的工业产品和原料就有氯苯和环己烷.因此,初步判断这些组分可能受到了周边工业排放的影响.

为了进一步评估工业排放对南信大站点 VOCs 浓度的影响,选取了4种典型 VOCs 组分,包括苯、间/对-二甲苯、乙烯和丙烯,统计分析其浓度频率分布特征,并与对照点的测量结果进行比较(图

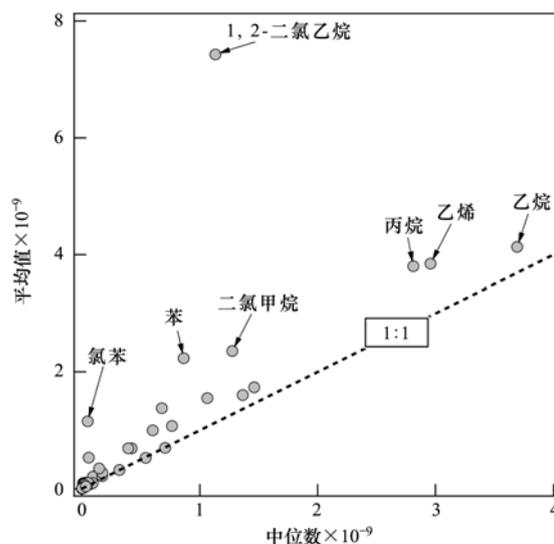


图2 VOCs 组分浓度(体积分数)平均值与中位数散点图

Fig. 2 Scatter plots of average and median values of mixing ratios of VOCs

3).从图3中可以看出,这4种组分浓度的频率分布均有明显的右拖尾现象,高于对照点浓度中位数的数据分别约占总样本量的90%、70%、83%和85%.对两个站点4种VOCs组分浓度进行大小比

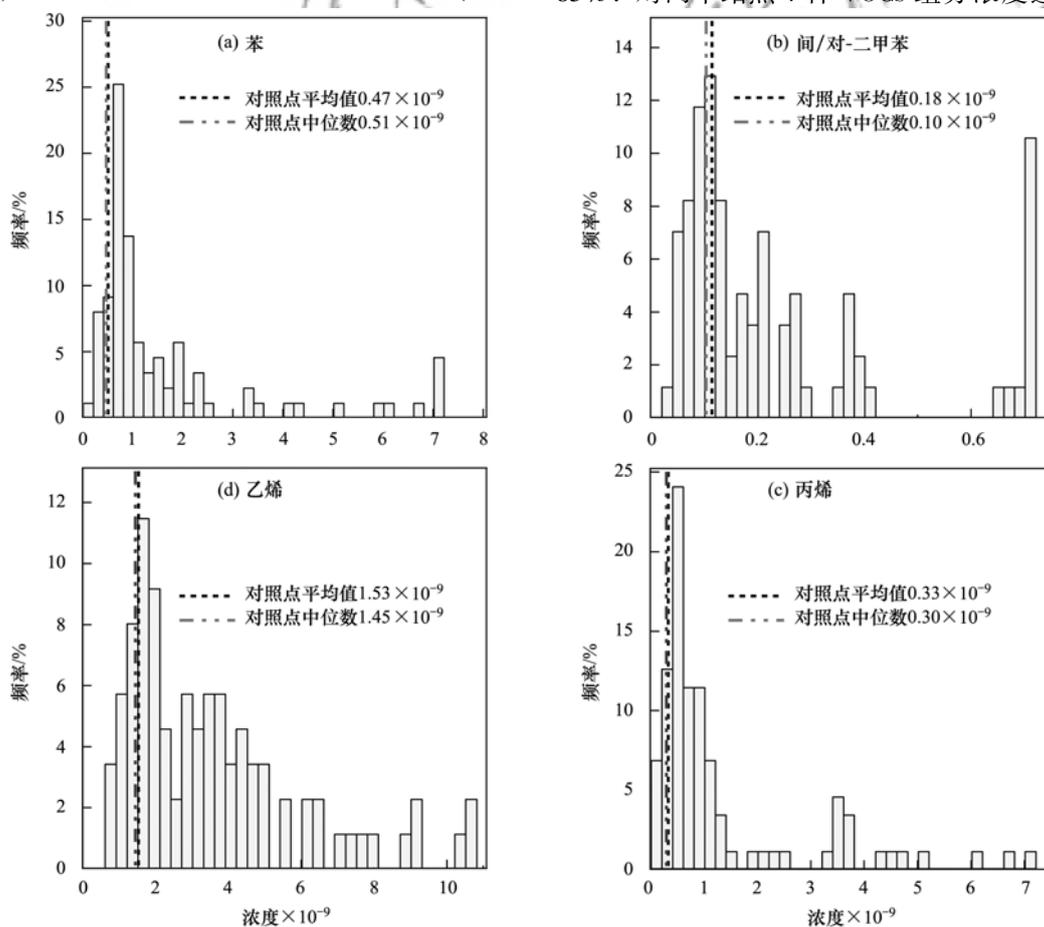


图3 4种典型VOCs组分的浓度(体积分数)频率分布直方图

Fig. 3 Frequency distribution of four VOCs species mixing ratios

较, 统计检验结果表明在南信大站点浓度显著高于对照点($P < 0.05$), 再次说明这些组分可能受到周边工业排放的影响。

2.2 典型 VOCs 组分的日变化特征

大气中 VOCs 浓度的时间变化特征受气象条件(边界层高度等)、光化学反应和源排放强度等因素的影响^[2]. 南信大站点不同 VOCs 组分的日变化特征存在较为明显的差异. 图 4 展示南信大站点观测到的 6 种典型 VOCs 组分(乙炔、乙烯、丙烷、氯苯、苯和正己烷)的日变化特征. 对站点周边的企业调研可知, 乙烯、丙烷、氯苯、苯和正己烷是扬子石化和南化的生产原料和工业产品. 从图中可以看出, 乙炔浓度日变化特征呈“U”型, 最高浓度出现在 07:00~09:00 和 19:00~21:00, 而在 13:00~15:00 和 15:00~17:00 浓度最低. 在 3 月, 此时光化学反应较弱, 且乙炔的反应活性较低 [$k_{OH} = 10^{-12} \text{ cm}^3 \cdot (\text{molecule} \cdot \text{s})^{-1}$], 光化学过程的影响较小. 气象因素对乙炔浓度日变化的影响主要体现在风速风向和边界层高度的影响. 观测研究站点近地面的风速风向并没有呈现出显著的日变化特征, 因此乙炔浓度的日变化主要受到边界层高度和排放强度的影响. 边界层高度的变化会对 VOCs 的浓度产生影响, 当大气边界层高度降低时, 污染加重; 大气边

界层高度升高时, 污染减轻^[20]. 乙炔主要来自机动车尾气等燃烧排放^[7], 当在 07:00~09:00 和 19:00~21:00, 处在上下班的高峰期, 此时车流量较大, 大气边界层高度较低, 不利于乙炔的扩散, 因此乙炔浓度较高. 当在 13:00~15:00 和 15:00~17:00, 此时车流量减少, 太阳辐射增强, 大气边界层高度升高, 有利于乙炔的扩散, 因此乙炔在下午时段浓度较低. 丙烷浓度的日变化规律与乙炔相似, 但其在 07:00~09:00 的浓度高于 19:00~21:00 的测量结果. 而丙烷/乙炔在 07:00~09:00 的均值为 2.5, 高于在 19:00~21:00 的 1.6, 早晚的比值差异较大. 在隧道机动车排放研究中发现, 丙烷/乙炔的均值在 1.6^[21], 说明丙烷的来源与乙炔并不完全一致, 除了受到机动车尾气的影响, 还受到 LPG 使用等其他源的影响. 乙烯浓度的最高值出现在 09:00~11:00, 中午的浓度与傍晚(17:00~21:00)的结果差异并不显著; 氯苯 ($0.01 \times 10^{-9} \sim 10.1 \times 10^{-9}$)、苯 ($0.2 \times 10^{-9} \sim 32.8 \times 10^{-9}$) 和正己烷 ($0.02 \times 10^{-9} \sim 2.7 \times 10^{-9}$) 的浓度范围波动较大, 浓度最高值分别出现在 09:00~11:00、17:00~19:00 和 09:00~11:00. 南信大站点东北方向约 10 km 是扬子石化、扬子巴斯夫等企业, 偏东向约 5 km 是南化等企业. 乙烯、氯苯、苯和正己烷是石

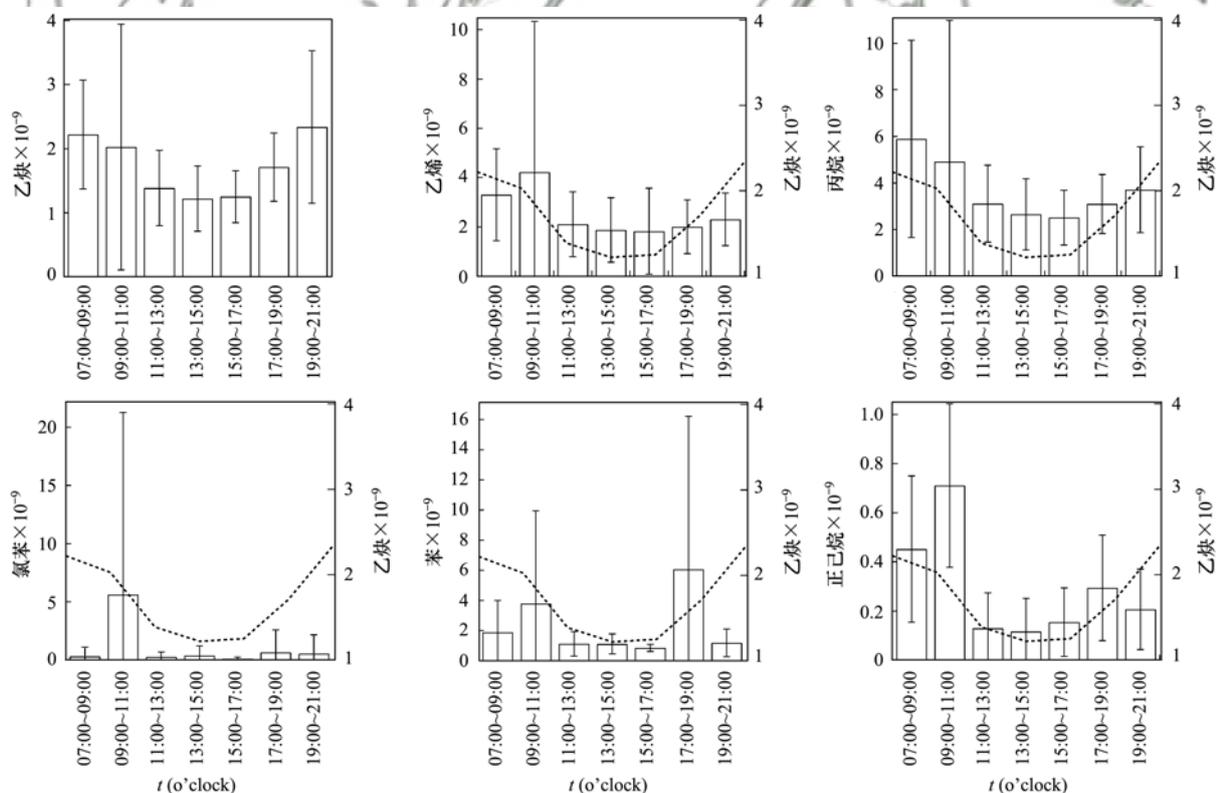


图 4 采样期间乙炔、乙烯、丙烷、氯苯、苯和正己烷浓度的平均日变化特征

Fig. 4 Diurnal variations of acetylene, ethylene, propane, benzene, chlorobenzene, and *n*-hexane

化、化工行业的重要原料和产品,可能受到这些工业源的影响,这些 VOCs 组分与乙炔的日变化存在明显差异.

2.3 PMF 模型解析

本研究综合考虑了所测量 VOCs 组分的浓度水平、源示踪作用以及周边工业的源谱调查情况. 所选 VOCs 组分信噪比(S/N)皆大于 3.5, 结合对扬子石化和南化的源谱调查,低碳烯烃和苯分别是其重要的工业产品和原料. 共筛选出了 26 种典型 VOCs 组分,包括 12 种烷烃、6 种烯烃、乙炔、6 种芳香烃以及 1 种卤代烃. 输入 PMF 模型进行 VOCs 来源解析.

因子数通过 $Q(\text{true})$ 和 $Q(\text{theoretical})$ 的比值来判断^[16], PMF 解析到的 $Q(\text{true})/Q(\text{theoretical})$ 随因子数的关系如图 5 所示, $Q(\text{true})/Q(\text{theoretical})$ 并没有随因子数的增长而出现突变的情况. 因此本研究中主要基于 PMF 解析得到的因子意义的可解释度来确定 PMF 的因子数. 最终选择 5 个来源因子, 当选择更多的因子个数时, 会出现因子被拆分成两个没有实际物理意义的因子. 经过检验, PMF 解析的结果能够稳定重现.

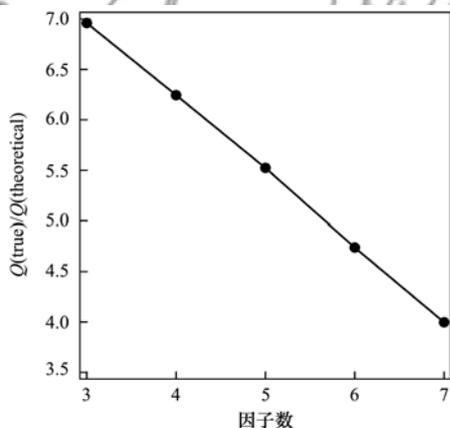


图 5 $Q(\text{true})/Q(\text{theoretical})$ 随因子数的变化关系

Fig. 5 The $Q(\text{true})/Q(\text{theoretical})$ values as a function of factor number in PMF

PMF 解析出 5 个因子的化学组成特征如图 6 所示. 其中, 质量分数表示各 VOCs 组分在同一个因子中的质量浓度占比, 贡献率表示各因子对同一种 VOCs 组分质量浓度的相对贡献.

因子 a 中苯和二氯甲烷是主要成分, 结合对扬子石化、南化的生产工艺以及产品的源谱测量和现场调研, 发现苯是南化重要的产品及原料, 这两种组分又是化工行业 VOCs 的重要示踪物^[22,23], 将该因子识别为“化工源”. 因子 b 对乙烯和丙烯浓度的贡献最高, 分别为 37.9% 和 71.6%, 烯烃是石化行

业的重要产品^[24,25], 将该因子识别为“石化源”. 因子 c 的化学组成比因子 a 和因子 b 复杂, C3 ~ C5 烷烃和烯烃的贡献明显高于其他因子, 这些组分与机动车尾气和汽油挥发等交通排放源有关^[26], 因此将因子 c 命名为“交通排放源”. 因子 d 中 C7 ~ C8 芳香烃是主要成分, 芳香烃是涂料和溶剂挥发的重要成分^[27], 将此因子识别为“涂料和溶剂使用源”. 因子 e 中的乙烷、丙烷和乙炔的含量最高, 乙烷和丙烷分别是天然气(NG)和液化石油气(LPG)的重要组分^[28], 乙炔受不完全燃烧过程的影响^[7], 另外这几种组分的大气寿命较长, 还会受到背景和传输的影响^[29], 因此将因子 e 识别为“NG 和 LPG 使用 + 燃烧 + 背景传输源”.

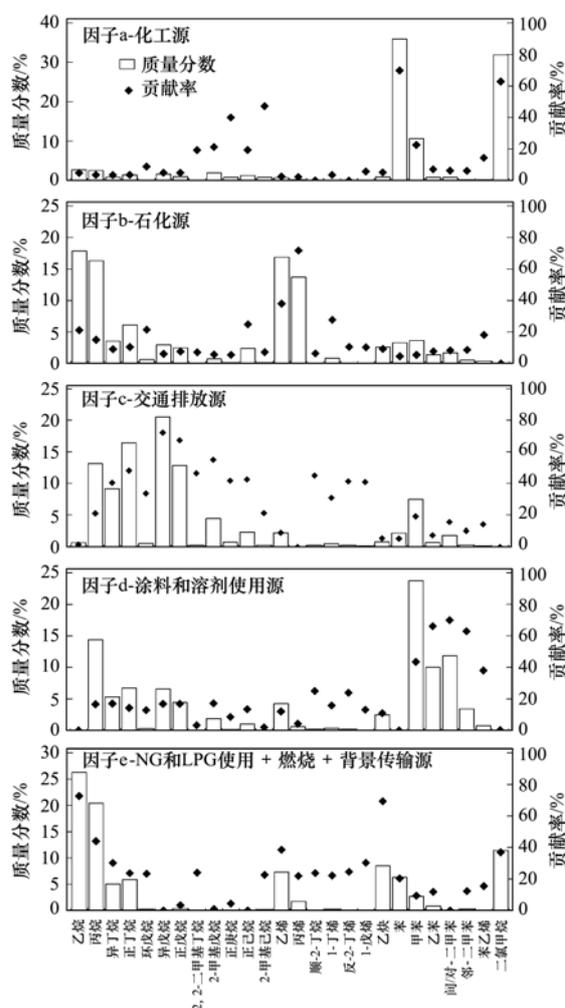


图 6 PMF 因子的 VOCs 化学组成特征

Fig. 6 Profiles of five factors resolved by the PMF model and the distributions of species among these factors

整个观测期间, 南信大站点与工业排放相关的污染源对 VOCs 浓度的相对贡献为 50.0%, 其中石化源、化工源以及涂料和溶剂使用源的贡献分别为 14.9%、19.3% 和 15.8%. 交通排放源的贡献占

21.2%, NG 和 LPG 使用 + 燃烧 + 背景传输源的贡献占 28.7%。本研究与安俊琳等^[17]在 2011 ~ 2012 年对南京市北郊春季 VOCs 与工业相关来源的研究结果(59%)较为接近。

进一步比较了南信大站点和对照点 VOCs 来源的差异。在 3 月 18 日, 风向以东风和东北风为主, 南信大站点处在工业区的下风向, 南信大站点与工业相关源排放对 VOCs 浓度的贡献高达 74.9%, 其中涂料和溶剂使用源是主要排放源(41.6%), 石化源和化工源贡献了 33.3%。而对照点工业排放相关源的影响仅为 40% 左右, NG 和 LPG 使用 + 燃烧 + 背景传输源这一因子的贡献高达 34.3%。这是因为乙烷、丙烷、乙炔等 VOCs 组分活性较低, 在大气中寿命较长, 因此该因子在对照点占比较高。而在另外两天(3 月 7 日、3 月 15 日), 风向以东南风为主, 南信大站点与工业相关源分别为 54.3% 和 39.7%, 对照点与工业相关分别为 36.1% 和 17.3%。

2.4 风速风向对 VOCs 来源的影响

为了进一步探讨工业相关的排放源和交通排放

源对南信大站点 VOCs 的影响, 本研究结合风速风向分析各类排放源对 VOCs 浓度的相对贡献在不同方位上的差异。图 7 展示了化工源、石化源、交通排放源以及涂料和溶剂使用源对 VOCs 浓度的相对贡献(%)在不同风速和风向上的差异。

从图 7 中可以看出, 不同风向上 VOCs 排放源贡献率存在差异。结合风玫瑰图(图 1)可知, 采样期间的主导风向为北风和东风, 南信大站点处在工业区下风向, 大气环境受工业排放影响。在图 7(a)中, 化工源的贡献率高值出现在偏北方向和偏东方向, 南信大站点的北向 2 km 为盘城工业区, 包括化工、橡胶等行业。在偏东约 5 km 为南化等企业, 而苯是南化工业过程中重要的生产原料。在图 7(b)中, 石化源的贡献率高值则出现在站点的东北方向, 东北向约 10 km 有扬子石化、扬子巴斯夫等石化企业。结合对企业的调查可知, 乙烯、丙烯等低碳烯烃是扬子石化的重要产品。在图 7(c)中, 交通排放源的贡献率高值则出现在站点的东向, 站点东向约 800 m 是盘城新街、约 1.5 km 是宁六公路, 车

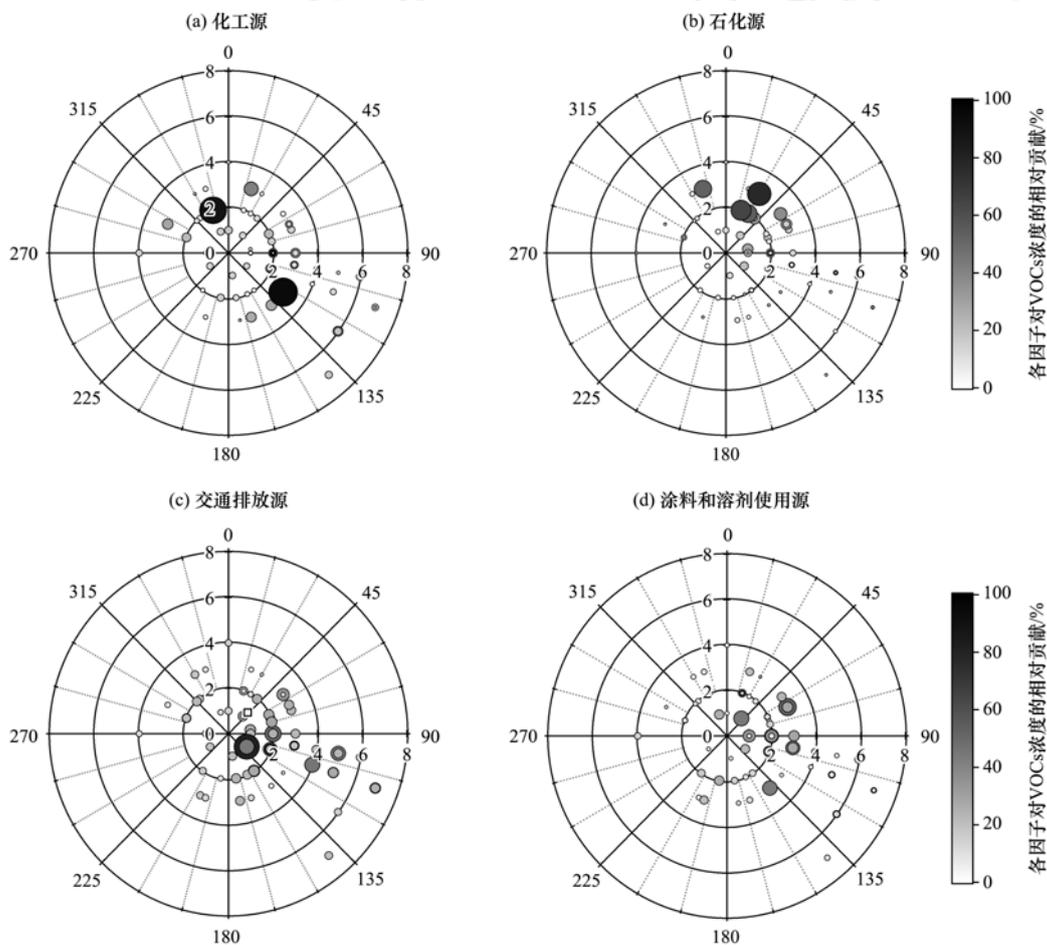


图 7 VOCs 来源风玫瑰图

Fig. 7 Rose plots of VOCs sources

流量较大. 在图 7(d)中, 涂料和溶剂使用源的贡献率高值主要出现在东向, 站点东南向约 2 km 是丁解工业园, 包括橡胶、塑料、彩钢、家具、喷涂等行业, 会在工业过程中排放出苯、甲苯、二甲苯等 VOCs 组分^[30,31].

3 结论

(1) 2017 年 3 月在南京市江北工业区受体点采集环境 VOCs 样品进行分析. 本研究共检测 92 种 VOCs, 28 种烷烃、11 种烯烃、17 种芳香烃、乙炔和 35 种卤代烃. 大气 TVOCs 浓度范围(体积分数)在 $10.3 \times 10^{-9} \sim 200.5 \times 10^{-9}$ 之间, 平均值为 $(34.3 \pm 28.8) \times 10^{-9}$.

(2) 通过统计分析, 发现烯烃、芳香烃和卤代烃等组分(例如: 乙烯、丙烯、苯、苯乙烯、二氯甲烷等)存在明显的异常高值, 受到站点周边工业排放的影响.

(3) 利用 PMF 源解析模型进一步量化工业排放的贡献, 解析出 5 个因子, 其中石化源(14.9%)、化工源(19.3%)、涂料和溶剂使用源(15.8%)、机动车排放源(21.2%)以及 NG 和 LPG 使用 + 燃烧 + 背景传输源(28.7%), 与工业排放相关源占 50.0%. 在高污染时段, 与工业排放相关源的占高达 74.9%.

(4) 化工源的贡献率高值出现在偏北方向和偏东方向, 受盘城工业区、南化、丁解工业园等化工企业排放的 VOCs 影响; 石化源的贡献率高值则出现在站点的东北方向, 受扬子石化、扬子巴斯夫等石化行业影响; 交通排放源的贡献率高值则出现在站点的东向; 受机动车排放影响; 涂料和溶剂使用源的贡献率高值主要出现在东向, 受橡胶、塑料、彩钢、家具、喷涂等行业影响.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 2015 年中国环境状况公报 [EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201606/t20160602_353138.htm, 2015-06-02.
- [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.
Tang X Y, Zhang Y H, Shao M. Atmospheric environmental chemistry (2nd ed.) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [3] Seinfeld J H, Pandis S N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change (2nd ed.) [M]. Hoboken: Wiley-Interscience, 2006.
- [4] Guo H, Lee S C, Chan L Y, *et al.* Risk assessment of exposure to volatile organic compounds in different indoor environments [J]. Environmental Research, 2004, **94**(1): 57-66.
- [5] Wang G, Cheng S Y, Wei W, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs in the suburban area of Beijing, China [J]. Atmospheric Pollution Research, 2016, **7**(4): 711-724.
- [6] Buzzcu-Guven B, Fraser M P. Comparison of VOC emissions inventory data with source apportionment results for Houston, TX [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(20): 5032-5043.
- [7] Liu Y, Shao M, Fu L L, *et al.* Source profiles of volatile organic compounds (VOCs) measured in China: Part I [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(25): 6247-6260.
- [8] Mo Z W, Shao M, Lu S H, *et al.* Characterization of non-methane hydrocarbons and their sources in an industrialized coastal city, Yangtze River Delta, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, **593-594**: 641-653.
- [9] EPA-CMB8.2. Users manual [EB/OL]. <https://www.epa.gov/scram/chemical-mass-balance-cmb-model>, 2016-11-18.
- [10] Dumanoglu Y, Kara M, Altioik H, *et al.* Spatial and seasonal variation and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in a heavily industrialized region [J]. Atmospheric Environment, 2014, **98**: 168-178.
- [11] Huang C, Chen C H, Li L, *et al.* Emission inventory of anthropogenic air pollutants and VOC species in the Yangtze River Delta region, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(9): 4105-4120.
- [12] Fu X, Wang S X, Zhao B, *et al.* Emission inventory of primary pollutants and chemical speciation in 2010 for the Yangtze River Delta region, China [J]. Atmospheric Environment, 2013, **70**: 39-50.
- [13] An J L, Zhu B, Wang H L, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs measured in an industrial area of Nanjing, Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Environment, 2014, **97**: 206-214.
- [14] Wang M, Zeng L M, Lu S H, *et al.* Development and validation of a cryogen-free automatic gas chromatograph system (GC-MS/FID) for online measurements of volatile organic compounds [J]. Analytical Methods, 2014, **6**(23): 9424-9434.
- [15] Yuan B, Shao M, de Gouw J, *et al.* Volatile organic compounds (VOCs) in urban air; how chemistry affects the interpretation of positive matrix factorization (PMF) analysis [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, **117** (D24): D24302.
- [16] Chen W T, Shao M, Lu S H, *et al.* Understanding primary and secondary sources of ambient carbonyl compounds in Beijing using the PMF model [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, **14**(6): 3047-3062.
- [17] 安俊琳, 朱彬, 王红磊, 等. 南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析 [J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4454-4464.
An J L, Zhu B, Wang H L, *et al.* Characteristics and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in the northern suburb of Nanjing [J]. Environmental Science, 2014, **35**(12): 4454-4464.
- [18] 王红丽, 陈长虹, 黄成, 等. 上海市城区春节和“五一”节期间大气挥发性有机物的组成特征 [J]. 环境科学学报, 2010, **30**(9): 1749-1757.
Wang H L, Chen C H, Huang C, *et al.* Characterization of volatile organic compounds (VOCs) around the Chinese Spring Festival and International Labour Day in the urban area of Shanghai, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, **30**

- (9): 1749-1757.
- [19] 徐慧, 张晗, 邢振雨, 等. 厦门冬春季大气 VOCs 的污染特征及臭氧生成潜势[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 11-17.
Xu H, Zhang H, Xing Z Y, *et al.* Pollution characteristics and ozone formation potential of ambient VOCs in winter and spring in Xiamen[J]. Environmental Science, 2015, **36**(1): 11-17.
- [20] 王耀庭, 李威, 张小玲, 等. 北京城区夏季静稳天气下大气边界层与大气污染的关系[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(10): 1092-1098.
Wang Y T, Li W, Zhang X L, *et al.* Relationship between atmospheric boundary layer and air pollution in summer stable weather in the Beijing urban area[J]. Research of Environmental Sciences, 2012, **25**(10): 1092-1098.
- [21] 张启钧, 吴琳, 刘明月, 等. 南京市机动车排放 VOCs 的污染特征与健康风险评价[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(10): 3118-3125.
Zhang Q J, Wu L, Liu M Y, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of VOCs from vehicle exhaust in Nanjing, China[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(10): 3118-3125.
- [22] Aucott M L, McCulloch A, Graedel T E, *et al.* Anthropogenic emissions of trichloromethane (chloroform, CHCl_3) and chlorodifluoromethane (HCFC-22): reactive chlorine emissions inventory[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1999, **104**(D7): 8405-8415.
- [23] Cai C J, Geng F H, Tie X X, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs measured in Shanghai, China [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(38): 5005-5014.
- [24] Jobson B T, Berkowitz C M, Kuster W C, *et al.* Hydrocarbon source signatures in Houston, Texas: influence of the petrochemical industry [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, **109**(D24): D24305.
- [25] Wei W, Cheng S Y, Li G H, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emitted from a petroleum refinery in Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2014, **89**: 358-366.
- [26] Zhang Y L, Wang X M, Zhang Z, *et al.* Species profiles and normalized reactivity of volatile organic compounds from gasoline evaporation in China[J]. Atmospheric Environment, 2013, **79**: 110-118.
- [27] Yuan B, Shao M, Lu S H, *et al.* Source profiles of volatile organic compounds associated with solvent use in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(15): 1919-1926.
- [28] 吴方堃, 孙杰, 余晔, 等. 长白山背景站大气 VOCs 浓度变化特征及来源分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(9): 3308-3314.
Wu F K, Sun J, Yu Y, *et al.* Variation characteristics and sources analysis of atmospheric volatile organic compounds in Changbai mountain station [J]. Environmental Science, 2016, **37**(9): 3308-3314.
- [29] Atkinson R, Baulch D L, Cox R A, *et al.* Evaluated kinetic and photochemical data for atmospheric chemistry: volume II-gas phase reactions of organic species [J], Atmospheric Chemistry and Physics, 2006, **6**(11): 3625-4055.
- [30] 洪沁, 常宏宏. 家具涂装行业 VOCs 污染特征分析[J]. 环境工程, 2017, **35**(5): 82-86.
Hong Q, Chang H H. Pollution characteristics analysis of VOCs emitted from furniture painting industry [J]. Environmental Engineering, 2017, **35**(5): 82-86.
- [31] 莫梓伟, 牛贺, 陆思华, 等. 长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 1944-1951.
Mo Z W, Niu H, Lu S H, *et al.* Process-based emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from paint industry in the Yangtze River Delta, China [J]. Environmental Science, 2015, **36**(6): 1944-1951.

CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping (477)
VOCs Emission from Motor Vehicles in China and Its Impact on the Atmospheric Environment	CHEN Tian-zeng, GE Yan-li, LIU Yong-chun, <i>et al.</i> (478)
Quantification of the Influence of Industrial Emissions on Volatile Organic Compounds (VOCs) Using PMF Model; A Case Study of Jiangbei Industrial Zone in Nanjing .....	..... HU Kun, WANG Ming, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (493)
Source Analysis of Volatile Organic Compounds in the Nanjing Industrial Area and Evaluation of Their Contribution to Ozone	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jun-xiu, <i>et al.</i> (502)
Ozone Formation Potential and Priority Species of VOCs in an Industrial Park	WU Lei-dan, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (511)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of a Petrochemical Industrial Park During Autumn in China	HU Tian-peng, LI Gang, MAO Yao, <i>et al.</i> (517)
Characteristics of VOCs Pollution in the Winter Atmosphere of a Typical Petrochemical Industry Park	MAO Yao, LI Gang, HU Tian-peng, <i>et al.</i> (525)
Emission Inventory and Pollution Characteristics of Industrial VOCs in Hangzhou, China	LU Bin, HUANG Cheng, LU Qing, <i>et al.</i> (533)
Industrial VOCs Emission in Qinhuangdao	HU Xiao-yu, LIU Hang, WANG Nai-yu, <i>et al.</i> (543)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Auto/motorcycle Parts & Accessories Manufacturing in Zhejiang Province .....	..... YANG Zhong-ping, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (551)
Stench Sources and Impact Analysis in Automobile Making	SHI Tian-li, ZHANG Wei-xia, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (557)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs Fugitively Emitted from Typical Brewers	GAO Zhan-qi, HU Guan-ju, WANG Hui, <i>et al.</i> (567)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in Chengdu	LI You-ping, TANG Ya, FAN Zhong-yu, <i>et al.</i> (576)
Indoor Formaldehyde and Benzene Series in Shanghai Residences and Their Associations with Building Characteristics and Lifestyle Behaviors .....	..... JIANG Qiao-yun, LIU Ping-ping, WANG Xue-ying, <i>et al.</i> (585)
Emission Inventory of Anthropogenically Sourced VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Jiangsu Province	XIA Si-jia, LIU Qian, ZHAO Qiu-yue (592)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs in Jiangmen City	CHEN Xiao-fang, ZHANG Wei-xia, CHEN Bing-xu, <i>et al.</i> (600)
Emissions, Chemical Composition, and Spatial and Temporal Allocation of the BVOCs in the Yangtze River Delta Region in 2014	LIU Yan, LI Li, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (608)
VOCs Emission Inventory of Service Stations in a Subcenter (Tongzhou District) of the City of Beijing	HUANG Yu-hu, HU Wei, LI Bei-bei, <i>et al.</i> (618)
Pollutant Emissions from Diesel Buses Fueled with Waste Cooking Oil Based Biodiesel	HU Zhi-yuan, LIN Biao-qi, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (626)
Treatment of the Waste Gas Containing Methyl <i>tert</i> -Butyl Ether via a Biotrickling Filter	CHU Qi-ying, YAO Lu-lu, LÜ Xiong-biao, <i>et al.</i> (633)
Composite CVOCs Removal in a Combined System of Nonthermal Plasma and a Biotrickling Filter	GUO Hai-qian, MIAO Jing-jing, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (640)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds (VOCs) and Semi-volatile Organic Compounds (SVOCs) in Qiantang River's Hangzhou Section During a Water Odor Pollution Event	CHEN Feng, TANG Fang-liang, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (648)
Occurrence and Spatial Distribution of Volatile Organic Compounds in Urban Drinking Water Distribution Systems	XU Mei-jia, WANG Hai-liang, LI Chun-mei, <i>et al.</i> (655)
Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds for Different Commuting Modes .....	..... TONG Rui-peng, ZHANG Lei (663)
Source Analysis and Environmental Health Risk Assessment of VOCs in Furniture Manufacturing	TONG Rui-peng, ZHANG Lei, YANG Xiao-yi, <i>et al.</i> (672)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of PM _{2.5} and Spatio-temporal Variation Characteristics of the Relationship Between PM _{2.5} and PM ₁₀ in Beijing .....	..... YANG Wen-tao, YAO Shi-qi, DENG Min, <i>et al.</i> (684)
Quantification of Methane Ebullition Flux from Small Ponds Using the Inverted-Funnel Method	ZHANG Xiu-fang, XIAO Wei, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (691)
Contamination Levels and Exposure Risk via Drinking Water from Perfluoroalkyl Acids in Seven Major Drainage Basins of China .....	..... WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, WANG Yan-ping, <i>et al.</i> (703)
Spatio-temporal Distribution and Source Apportionment of Nitrogen in Rivers of Tieling	YANG Li-biao, LEI Kun, QIAO Fei, <i>et al.</i> (711)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Rivers of Western Sichuan Plateau Based on EEM-PARAFAC Analysis .....	..... LIU Yan-yang, QIN Ji-hong, LIU Chen, <i>et al.</i> (720)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Human Health Risk of Surface Waters in the City of Ningbo, China	XU Mei-juan, BAO Bo, CHEN Chun-yan, <i>et al.</i> (729)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaoju Lake	WU Lei, LIU Gui-jian, ZHOU Chun-cai, <i>et al.</i> (738)
Spatial Distribution, Sources and Bioavailability of Heavy Metals in the Surface Sediments of Longjiang River, Southern China .....	..... LAN Xiao-long, NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, <i>et al.</i> (748)
Mechanism on Enhanced Nitrogen Removal in Municipal Secondary Effluent via Internal-Electrolysis Constructed Wetlands at Low Temperature in Winter .....	..... ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, WANG Ju, <i>et al.</i> (758)
Dynamic Replenishment Process of Nutrients in Tributary of Channel Reservoir	XU Ya-qian, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (765)
Effect of the Rainfall on Extinction of Cyanobacteria Bloom and Its Mechanism Analysis	LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (774)
Relationship Between Macrophyte Communities and Macroinvertebrate Communities in an Urban Stream	QU Xiao-dong, YU Yang, ZHANG Min, <i>et al.</i> (783)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output in Runoff and Rainfall Runoff in Lanlingxi Watershed, Three Gorges Reservoir Area .....	..... ZHANG Lin, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (792)
Screening Method of Priority Control Pollutants in Groundwater Based on Contamination Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (800)
Effect of Sulfur to Quartz Sand Ratios on the Removal of High-Concentration Perchlorate in Packed-Bed Reactors	TAO Hua-qiang, SHAO Dong-hai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (811)
Adsorption of Methylene Blue and Cu(II) by Activated Carbon/Macromolecule Composite Hydrogel	KONG Yan, ZHUANG Yuan, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (819)
Adsorption Performance and Mechanism of HZO@SGH for the Removal of Fluoride from Aqueous Solution	MA Fu-zhen, ZHOU Shao-qi, LIU Ze-jun, <i>et al.</i> (828)
Mechanism of MgO/GAC Catalyzed Ozonation of Organic Compounds	XU Shan-shan, LIN Cun-wang, DING Ya-lei, <i>et al.</i> (838)
Ozonation Characteristics of Low Coagulability Organic Matter from the Secondary Effluent of WWTPs	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (844)
Quantitative Analysis of Dominant Pollutants in Secondary Effluent via Dye Probe Technology	MENG Xiao-rong, WANG Cong-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (852)
Lab-scale ANAMMOX Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (859)
Effect of Aeration Rate on Shortcut Nitrification Recovery in Intermittent Aeration Mode	LIU Hong, NAN Yan-bin, LI Hui, <i>et al.</i> (865)
Effect of Aerobic/Phosphorus Granules on Start-up of Partial Nitrification Granular Sludge	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (872)
Microbial Communities and Sludge Specific Resistance in Two SBRs Treating Leachate	CAI Li-yun, HUANG Ze-bin, XU Zi-wei, <i>et al.</i> (880)
Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from the Urbanization Process of Topsoil	YAO Hong, ZHANG Shi-chao, LIU Ming-li, <i>et al.</i> (889)
Spatial Variability and Contamination of Arsenic in Soils of Xijiang River Basin	LIU Chang, SONG Bo, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (899)
Characterization of Phosphorus in Urban Surface Soils in Kaifeng City and Its Risk of Loss	BAI Xiu-ling, MA Jian-hua, SUN Yan-Li, <i>et al.</i> (909)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Rice System in an E-waste Dismantling Area	YIN Yi-meng, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i> (916)
Residue Levels and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Rice from Shanghai	MENG Yuan, LIU Cui-cui, QIU Yan-ling, <i>et al.</i> (927)
Effects of Tetracycline Antibiotics on Growth and Characteristics of Enrichment and Transformation in Two Vegetables	CHI Sun-lin, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (935)
Bioavailability of Silicon Fertilizer Coupled Water Management on Soil Bioavailability and Cumulative Control of Rice in Compound Contaminated Paddy Soils .....	..... LI Yuan-xing-lu, YE Chang-cheng, LIU Yu-ling, <i>et al.</i> (944)
Liver and Kidney Function of E-waste Dismantling Workers and Potential Influencing Factors	YAN Xiao, LI Shu-yuan, WANG Mei-huan, <i>et al.</i> (953)