

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第12期

Vol.34 No.12

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

序	郝郑平(4503)
南京北郊大气 VOCs 体积分数变化特征	安俊琳,朱彬,李用宇(4504)
天津中心城区环境空气挥发性有机物污染特征分析	翟增秀,邹克华,李伟芳,王亘,翟友存(4513)
南京市北郊夏季挥发性有机物的源解析	杨辉,朱彬,高晋徽,李用宇,夏丽(4519)
上海市春季臭氧和二次有机气溶胶生成潜势的估算	崔虎雄(4529)
四川省典型人为污染源 VOCs 排放清单及其对大气环境的影响	韩丽,王幸锐,何敏,郭卫广(4535)
武汉市秸秆燃烧 VOCs 排放估算及管理对策	黄碧捷(4543)
北京市冬季灰霾期 NMHCs 空间分布特征研究	段菁春,彭艳春,谭吉华,郝吉明,柴发合(4552)
广州市中心城区环境空气中挥发性有机物的污染特征与健康风险评价	李雷,李红,王学中,张新民,温冲(4558)
天津某家具城挥发性有机物健康风险评估	张银,王秀艳,高爽(4565)
废旧有机玻璃再生利用行业挥发性有机物(VOCs)排放特征研究	王浙明,徐志荣,叶红玉,许明珠,王晓星(4571)
农药企业场地空气中挥发性有机物污染特征及健康风险	谭冰,王铁宇,庞博,朱朝云,王道涵,吕永龙(4577)
电子产品加工制造企业挥发性有机物(VOCs)排放特征	崔如,马永亮(4585)
汽车涂料生产环节 VOCs 的排放特征及安全评价	曾培源,李建军,廖东奇,涂翔,许玫英,孙国萍(4592)
载人汽车室内空气 VOCs 污染的指标评价	陈小开,程赫明,罗会龙(4599)
基于 GC-MS 的烹调油烟 VOCs 的组分研究	何万清,聂磊,田刚,李靖,邵霞,王敏燕(4605)
VOCs 污染场地挖掘过程的环境健康风险评价	房增强,甘平,杨乐,戴子瑜,祁世鸿,贾建丽,何绪文(4612)
挥发性有机物污染场地挖掘过程中污染扩散特征	甘平,杨乐巍,房增强,郭淑倩,于妍,贾建丽(4619)
土壤中苯向大气挥发过程的影响因素和通量特征研究	杜平,王世杰,赵欢欢,伍斌,韩春媚,房吉敦,李慧颖,细见正明,李发生(4627)
土壤组分对四氯乙烯吸附解吸行为的影响	胡林,邱兆富,何龙,窦颖,吕树光,隋倩,林匡飞(4635)
自来水常规和深度处理工艺中挥发性有机物的变化规律	陈锡超,罗茜,陈虎,魏孜,王子健,许科文(4642)
杭州市典型企业废水中挥发性有机物排放特征及其评价	陈峰,徐建芬,唐访良,张明,阮东德(4649)
维生素 C 工业废水处理系统 VOCs 污染特性	郭斌,律国黎,任爱玲,杜昭,邢志贤,韩鹏,高博,刘淑娅(4654)
新型生物滴滤填料性能评价	梅瑜,成卓韦,王家德,活泼(4661)
微量臭氧强化生物滴滤降解甲苯性能研究	张超,赵梦升,张丽丽,陈建孟(4669)
BF 和 BTF 工艺去除 DCM 性能比较	潘维龙,於建明,成卓韦,蔡文吉(4675)
改性 13X 沸石蜂窝转轮对甲苯的吸附性能研究	王家德,郑亮巍,朱润晔,俞云锋(4684)
转轮吸附法处理有机废气的研究	朱润晔,郑亮巍,毛玉波,王家德(4689)
活性炭吸附有机蒸气性能的研究	蔡道飞,黄维秋,王丹莉,张琳,杨光(4694)
UV-生物过滤联合降解苯乙炔废气的研究	沙昊雷,杨国靖,夏静芬(4701)
蜂窝状 ZSM-5 型分子筛对丙酮和丁酮吸附性能研究	杜娟,栾志强,解强,叶平伟,李凯,王喜芹(4706)
内浮顶油罐“小呼吸”对环境影响过程的分析	吴宏章,黄维秋,杨光,赵晨露,王英霞,蔡道飞(4712)
基于 Tanks 4.0.9d 模型的石化储罐 VOCs 排放定量方法研究	李靖,王敏燕,张健,何万清,聂磊,邵霞(4718)
铜铈复合氧化物上石化行业典型 VOCs 的氧化行为与动力学	陈长伟,于艳科,陈进生,何焜(4724)
KrBr ⁺ 准分子灯直接光解一甲胺气体	赵洁,刘玉海,韦连梅,叶招莲,张善端(4734)
异味混合物中组分浓度与其强度贡献关系研究	颜鲁春,刘杰民,付慧婷,孙媛,林文辉(4743)
挥发性有机污染物排放控制标准制订中的关键技术问题研究	江梅,张国宁,任春,邹兰,魏玉霞(4747)
挥发性有机污染物排放控制标准体系的建立与完善	江梅,张国宁,邹兰,魏玉霞,张明慧(4751)
我国 VOCs 的排放特征及控制对策研究	王铁宇,李奇锋,吕永龙(4756)
固定源废气 VOCs 排放在线监测技术现状与需求研究	王强,周刚,钟琪,赵金宝,杨凯(4764)
石化行业炼油恶臭污染源治理技术评估	牟桂芹,隋立华,郭亚逢,马传军,杨文玉,高阳(4771)
植物源挥发性有机化合物排放清单的研究进展	谢军飞,李延明(4779)
基于动态 CGE 的挥发性有机污染物 VOCs 排放预测和控制研究	刘昌新,王宇飞,郝郑平,王铮(4787)
《环境科学》第34卷(2013年)总目录	(4792)
《环境科学》征订启事(4717) 《环境科学》征稿简则(4742) 信息(4528, 4626, 4693, 4700)	

南京市北郊夏季挥发性有机物的源解析

杨辉, 朱彬*, 高晋徽, 李用宇, 夏丽

(南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044)

摘要: 2012 年 8 月利用在线气相色谱仪对南京市北郊大气环境中的挥发性有机物(VOCs)进行连续监测, 分析 VOCs 时间变化规律, 并利用 PMF(positive matrix factorization)受体模型和 CPF(conditional probability function)方法对其来源进行解析. 结果表明, 南京市北郊夏季 VOCs 日变化呈双峰分布, 小时平均体积分数为 $(33.84 \pm 27.77) \times 10^{-9}$, 夜间高于日间. 其中含量最高的是烷烃, 其次是烯烃和芳烃, 分别占到总挥发性有机物(TVOCs)的 49.3%、24.4% 和 18.5%, 乙炔占 7.8%. 南京市北郊夏季 VOCs 主要来源有 5 个, 分别是交通尾气、燃料挥发、工业排放、有机溶剂挥发和植物排放源, 各自对 TVOCs 贡献为 33.1%、25.8%、23.2%、8.1% 和 9.7%. 烷烃主要来源于汽车尾气排放、工业排放和燃料挥发, 贡献百分比分别为 23.7%、35.3% 和 31.3%; 烯烃主要来源于燃料挥发、工业排放和汽车尾气排放, 分别占 41.1%、18.4% 和 24.3%; 对芳烃贡献最大的为汽车尾气排放, 占到 49.2%, 其次是有机溶剂挥发排放占 30.8%.

关键词: 挥发性有机物; 变化特征; PMF 受体模型; 条件概率函数; 源解析

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)12-4519-10

Source Apportionment of VOCs in the Northern Suburb of Nanjing in Summer

YANG Hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, LI Yong-yu, XIA Li

(Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Hourly concentrations of ambient volatile organic compounds (VOCs) were sampled in August 2012 in the northern suburb of Nanjing. Emissions of VOCs were analyzed by using PMF (positive matrix factorization) and CPF (conditional probability function). The hourly average mixing ratio of the TVOCs in summer was $(33.84 \pm 27.77) \times 10^{-9}$, with a bimodal diurnal variation trend. 49.3% of the TVOCs were alkanes, 24.4% were alkenes, 18.5% were aromatics and 7.81% were acetylene. Five sources were identified as summer major contributors to ambient VOCs concentrations by PMF. 33.1% of the total VOCs was attributed to vehicle related emissions, 25.8% to fuel evaporation, 23.2% to industrial emissions, 8.1% to solvent evaporation and 9.7% to plant emissions. For alkanes, vehicle emissions, industrial emissions, fuel and solvent evaporation accounted for 23.7%, 35.3%, 31.3% and 2%, respectively. For alkenes, fuel evaporation accounted for 41.1%, industrial emissions for 18.4%, and vehicle emission for 24.3%. Vehicle emission was the major contributor to aromatics, accounting for 49.2%, followed by solvent evaporation, which accounted for 30.8%.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); variety characteristics; positive matrix factorization (PMF); conditional probability function (CPF); source apportionment

挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)是指沸点范围在 50 ~ 260℃ 之间, 室温下饱和蒸气压超过 133.32 Pa, 在常温下以蒸气形式存在于空气中的一类有机物(WHO, 1989). VOCs 种类繁多, 包括各种烷、烯、醛酮、芳烃及其他的衍生物, 而且多为有毒有害物质, 美国 EPA 公布的具有毒性的大气污染物中有超过 50 种属于挥发性有机物. VOCs 是光化学反应的参与者, 是臭氧的重要前体物, 它能通过与大气中氧化性物质产生系列反应, 形成二次污染物粒子^[1,2]; VOCs 能够延长 CH₄ 在空气中的寿命, 增加臭氧背景值, 影响全球碳循环, 另外它还是重要的次级温室气体, 对环境与气候也有影响^[3].

随着经济发展, 城市汽车保有数量迅速增加, 石

油产品的生产使用和机动车尾气排放使城市大气污染逐渐由煤烟型向石油型过渡. 机动车尾气、石化工业排放和化石燃料挥发是城市 VOCs 的主要来源, VOCs 排放不断增加使城市光学污染日趋严重. 国家环境保护“十二五”规划明确指出: “加强挥发性有机污染物和有毒废气控制. 加强石化行业生产、输送和存储过程挥发性有机污染物排放控制.

收稿日期: 2013-07-01; 修订日期: 2013-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41275143); 江苏省高校自然科学基金研究重大基础研究项目(12KJA170003); 江苏省“333”高层次人才培养工程项目; 江苏省“六大人才高峰”计划项目; 江苏省江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX13_493)

作者简介: 杨辉(1986~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气化学与大气环境, E-mail: yh017@126.com

* 通讯联系人, E-mail: binzhu@nuist.edu.cn

鼓励使用水性、低毒或低挥发性的有机溶剂,推进精细化工行业有机废气污染治理,加强有机废气回收利用. 实施加油站、油库和油罐车的油气回收综合治理工程. 开展挥发性有机污染物和有毒废气监测,完善重点行业污染物排放标准.”而江苏省环境监测中心公布的 2012 环境空气状况中指出:按《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)评价,江苏省除一氧化碳(CO)日均浓度达到国家环境空气质量二级标准要求外,二氧化氮(NO_2)、臭氧(O_3)和细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)均存在不同程度超标现象. 作为 O_3 的重要前体物,VOCs 对 O_3 、二次有机气溶胶等污染物的浓度有着直接的作用. 因此,挥发性有机物的监测与控制是当前环境空气污染控制治理的重要任务之一.

要有效地控制城市大气中的挥发性有机物,除了研究其浓度变化,组成特征以及时空分布规律以外,对其来源的研究也非常重要. 研究中常利用 VOCs 的观测数据来推断和分析其来源:一种是定性和半定量方法,另一种是定量方法. 前者使用简单但是存在缺陷,因此常使用定量方法^[4]. 定量的方法常见的有化学质量平衡法(CMB)、正矩阵因子法(PMF)和主成分分析法(PCA)等. PCA 是一种多元统计方法,通过线性变化把给定的一组相关变量通过线性变换转成另一组不相关的变量,多用于大气污染物源解析中. Guo 等^[5]利用 PCA 方法研究了中国东部乡村地区大气环境中 VOCs 的来源,得出该乡村观测点的 VOCs 和 CO 排放源主要由机车尾气、生物质燃烧和工业排放组成;蔡长杰等^[6]应用 PCA 受体模型对上海市大气中 VOCs 来源进行解析,分析了上海市环境 VOCs 的主要来源及特征. CMB 也是常用于大气污染管理的受体模型,基本原理是质量守恒. Srivastava 等^[7,8]利用 CMB 模型对德里、孟买大气环境中 VOCs 进行了源解析,得出两地 VOCs 的主要贡献来源;Lu 等^[9]运用 CMB 受体模型对北京 VOCs 进行了源解析,得到受体点各人为污染源的年平均贡献率和不同物种的贡献源. PMF 受体模型是多元统计源解析方法之一,自 1993 年提出以来,被广泛运用于大气颗粒物源解析中. 2003 年 Buzcu 等^[10]利用 PMF 对休斯顿船道重工业区的 3 个测站环境中 54 种 VOCs 数据进行源解析,确定 3 个测点 VOCs 的源类型. PMF 解析的精炼厂、石油化工、蒸发排放与排放清单基本一致;Brown 等^[11]对洛杉矶的两个监测点的 VOCs 进行了观测,利用 PMF 模型解析其来源,并与 CMB(化学

质量平衡)模型解析结果进行了对比;王倩等^[12]利用 PMF 受体模型对上海市秋季的大气中 VOCs 进行源解析,确定了其主要来源及贡献率;Xie 等^[13]利用 PMF 受体模型对休斯顿 5 个光化学评估监测站(PAMS)的碳氢化合物观测数据进行源分析,总结了 5 个观测点的排放源差异及其贡献. PMF 受体模型已经成功地运用于挥发性有机物的源解析研究中^[10-14].

本研究对 2012 年 8 月南京市北郊环境空气中的 VOCs 进行连续的观测,分析其浓度变化和组成特征,并利用 PMF 受体模型结合 CPF 方法对环境 VOCs 的来源进行解析,以期控制城市 O_3 含量,减少光化学污染事件发生提供一定的科学依据.

1 数据及模型介绍

1.1 仪器介绍及数据采集

GC5000 挥发性有机物在线气相色谱仪是集自动采样、富集和分析功能于一体的挥发性有机物分析系统. 该系统主要包括 GC5000VOC(单级富集)、GC5000BTX(两级富集)两台自动分析色谱仪,可测量 $\text{C}_2 \sim \text{C}_6$ 范围的低沸点物种和 $\text{C}_4 \sim \text{C}_{12}$ 范围的高沸点物种;DIM200 稀释模块,主要用于校准配气;其他辅助气源包括用做零气和载气的高纯氮气,及高纯氢气. 测量原理:环境空气样品通过采样经干燥后直接进入分析系统,有机物在富集管的特殊材料中吸附解析后,进入毛细管柱进行分离,然后由 FID(flame ionization detector,火焰离子化检测仪)检测有机物含量,测定的峰面积与校准的峰面积进行比较得到环境 VOCs 浓度. GC5000 可检测 $\text{C}_2 \sim \text{C}_{12}$ 共 56 种挥发性有机物,包括 29 种烷烃、10 种烯烃、16 种芳香烃和 1 种炔烃(乙炔).

2012 年 8 月在南京市北郊对环境大气 VOCs 进行了逐小时的连续观测,整点采样,除正常维护、校准和停电等其他意外情况外共获得 729 个有效样本. 风速风向数据来自中国气象局综合观测基地(南京)的地面实时观测资料,距离 VOCs 监测点直线距离约 1.1 km. VOCs 观测地点在南京信息工程大学气象楼 12 楼($\text{N}32^\circ12'$, $\text{E}118^\circ42'$),采样管海拔高约为 60 m. 如图 1,测点以东方向 3~6 km 是包括石化工业、钢铁厂、化工厂和热电厂等大型企业的工业园区;东侧和西侧毗邻宁六公路、宁连和宁洛高速等交通要道;其他方向又包括农田、龙王山植被覆盖区和居民居住聚集区. 工业废气、烟尘,汽车尾气排放和居民燃气排放构成了该区域 VOCs

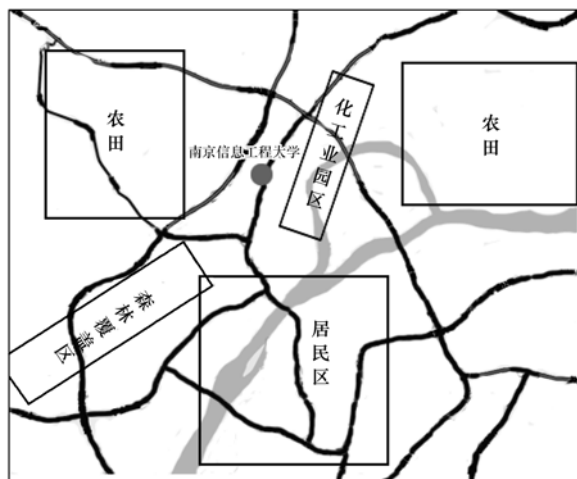


图1 观测点位置及周边排放源分布

Fig. 1 Location of observation point and distribution of emission sources

污染的复杂性.

1.2 PMF 受体模型介绍

正矩阵因子分解法 (positive matrix factorization, PMF) 是由芬兰赫尔辛基大学 Paatero 教授和 Tapper 在 1993 年提出的多元统计分析方法^[10], 在解决大气环境悬浮颗粒物及挥发性有机物的源解析方面有广泛的应用^[2,11~14].

PMF 受体模型的基本原理就是首先利用权重计算出颗粒物中各化学组分的误差, 然后通过最小二乘法来确定出其主要的污染源及其贡献率; 假设 X 为 $n \times m$ 矩阵, n 为样品数, m 为化学成分数目, 将矩阵 X 分解为矩阵 G 和矩阵 F ; 其中 G 为 $n \times p$ 的颗粒物排放源贡献矩阵, F 为 $p \times m$ 的污染源成分谱矩阵, p 为主要污染源的数目.

定义: $X = GF + E$, 其中 E 为残差矩阵, 表示 X 与 GF 之间的差异, Q 表示实际数据与解析结果之间的差值. 为解析出 G 和 F , 正矩阵因子模式解析过程即要求 Q 趋于最小:

$$Q(E) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{e_{ij}}{s_{ij}} \right)^2 \quad (1)$$

$$e_{ij} = x_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} \quad (2)$$

($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, p$) 式中, s_{ij} 为 X 的标准偏差; x_{ij} 、 g_{ik} 、 f_{kj} 、 e_{ij} 分别为 X 、 G 、 F 、 E 矩阵元素, 在 $g_{ik} \geq 0, f_{kj} \geq 0$ 的约束条件下, 通过迭代最小化算法对 Q 求解, 同时确定 G (污染源贡献) 和 F (源成分谱)^[11].

1.3 条件概率函数介绍

条件概率函数 (conditional probability functions,

CPF) 的基本定义为:

$$CPF = m_{\theta} / n_{\theta} \quad (3)$$

式中, m_{θ} 为在风向 θ 的区域中浓度不小于“高值”且对应时次风速大于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的样品个数, n_{θ} 是该区域中对应时次风速大于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的总样品个数. 定义“高值”为不低于观测值百分位数 75% 处的值^[13,14].

CPF 是一个无量纲量, 大小处于 0 ~ 1 之间. 一个区域 CPF 值的大小, 表明了该区域固定时间段内对观测点污染物的贡献大小, 从而可以判定污染物的主要来源. CPF 值大, 则对测站污染物贡献大, 反之则对其贡献小. 根据贡献的大小和空气运输的路径, 就可以判断污染物的主要来源方向, 进而推断排放源的特征. 在 CPF 分析中有一个假设, 就是空气从排放源到受体是的路径为直线. 在多数情况下气团在到达受体前都是一个迂回曲折的路径, 而在排放源和受体距离非常近的情况下可以认为污染物是直线传输的. 城市环境 VOCs 污染多具局地性, 所以用 CPF 值判定排放源大致方位是合理的^[15,16]. 文中 CPF 分析中所使用的污染物浓度是 PMF 受体模型解析结果中排放源贡献浓度^[13].

1.4 质量控制和不确定度

1.4.1 质量控制

在 PMF 受体模型解析前需要对观测数据进行相应的处理, 主要包括观测样本中缺测、信噪比、零值和低值 (非 0 值) 几个方面. 样本中缺测的数据采用了单个物种时间插值方法替换; 样本中物种浓度大于零且小于 MDL (方法检测限) 的低值用方法检测限的一半替换^[17]. 即式 (4):

$$X_{ij} = \text{MDL}_j / 2 \quad (4)$$

对于样本信噪比和零值, 分别根据信噪比大小和零值占总样本的百分比进行了处理, 详细方法见表 1. 信噪比反映了数据质量的好坏, 样本中物种浓度信噪比大于 2 为合格数据直接用于模型, 0.2 ~ 2 物种的通过扩大其不确定度 (UNC) 降低计算权重, 小于 0.2 的不在模型中使用; 样本中单个物种“0”值超过该物种总样本数 80% 的不在模型中使用, 50% ~ 80% 物种 UNC 扩大 3 倍, 小于 50% 的可用于受体模型.

信噪比的计算方法如公式 (5):

$$\left(\frac{S}{N} \right) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - s_{ij})^2}{\sum_{i=1}^n s_{ij}^2}} \quad (5)$$

表 1 PMF 模型中数据中零值和信噪比处理方法

Table 1 Pretreatment method of the sample for zero value and S/N for PMF

信噪比(S/N)	观测数据 0 值	模型中标记	处理方法
<0.2	≥80%	Bad	模型中不使用
0.2~2	50%~80%	Weak	UNC 扩大 3 倍,降低计算权重
>2	<50%	Strong	模型直接使用

式中, X_{ij} 为该物种某一时刻的浓度, s_{ij} 为物种标准方差, n 是样本个数.

1.4.2 不确定度计算

PMF 受体模型运算需要相应的不确定度 (uncertainty, UNC). UNC 的计算方法有很多种,文中使用样品物种浓度的 0.05 倍与方法检测线之和的算法^[18]. 即公式(6)和(7)所示:

$$UNC_{ij} = 0.05 \cdot X_{ij} + MDL_j \quad (6)$$

$$MDL_j = \frac{3 \times N \times c}{H} \quad (7)$$

式中, X_{ij} 为经过质量控制后的各物种浓度, N 为噪声, c 为样本中该物种浓度, H 为色谱图峰高, MDL_j 为各物种方法检测限 (method detection limit), 是指在通过某一分析方法全部测定过程后 (包括样品预处理), 被分析物产生的信号能以 99% 置信度区别于空白样品而被测定出来的最低浓度. 各挥发性有机物物种的 MDL 见表 2.

2 结果与分析

2.1 南京市北郊夏季 VOCs 变化特征

在 2012 年 8 月连续观测获得 729 个有效样中, 共检出 56 种挥发性有机物. 表 2 给出了样本各物种的平均体积分数、最大值、最小值和标准偏差以及其方法检测限. 可知, 南京市北郊夏季 TVOCs (总挥发性有机物) 小时平均体积分数约为 $(33.84 \pm 27.77) \times 10^{-9}$, 最大可达 224.48×10^{-9} . 烷烃、烯烃和芳烃的体积分数为 $(16.67 \pm 16.15) \times 10^{-9}$ 、 $(8.26 \pm 8.67) \times 10^{-9}$ 和 $(6.27 \pm 4.85) \times 10^{-9}$, 分别占到 TVOCs 的 49.3%、24.4% 和 18.5%. 乙炔的平均体积分数为 $(2.64 \pm 1.89) \times 10^{-9}$, 占 TVOCs 的 7.8%.

VOCs 是光化学反应的重要参与者. 夏季太阳辐射最强, 光化学反应活跃, 同时高温环境利于 VOCs 在空气中挥发^[4]. 图 2 给出了南京市北郊夏季挥发性有机物小时平均体积分数和太阳辐射、环境温度的日变化. 可以看到夏季南京市北郊的环境中 VOCs 成双峰型分布, 峰值主要出现在上午 10:00~11:00 和夜间 23:00~00:00 两个时间段, 低值则

出现在 05:00 左右和 14:00~16:00 两个时间段. 上午 07:00 之后居民上班高峰, 汽车尾气排放等居民活动使空气中 VOCs 增加, 10:00 左右出现第一个峰值. 之后随着太阳辐射增强, 环境温度增高, 光化学反应消耗作用下 VOCs 浓度下降, 14:00 左右达到最低值. 17:00 以后随着太阳辐射减弱, VOCs 浓度又逐渐回升, 直到夜间 23:00~00:00 达到第二个峰值. 02:00~05:00 则由于排放源排放减少, VOCs 浓度出现下降趋势. VOCs 浓度整体呈现出昼间低于夜间, 这主要是因为昼间混合层高度升高的稀释作用和光化学反应对 VOCs 的消耗共同导致的.

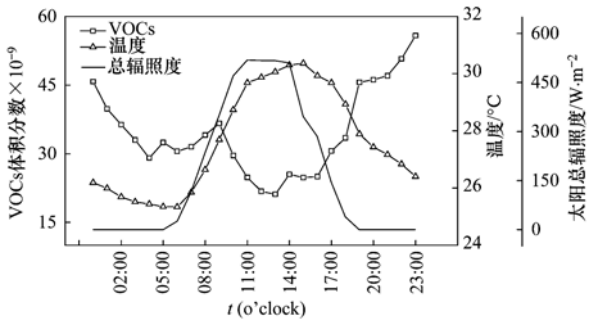


图 2 2012 年夏季 VOCs 体积分数、温度、总辐照度平均日变化
Fig. 2 Diurnal variation of VOCs, temperature and total solar irradiance

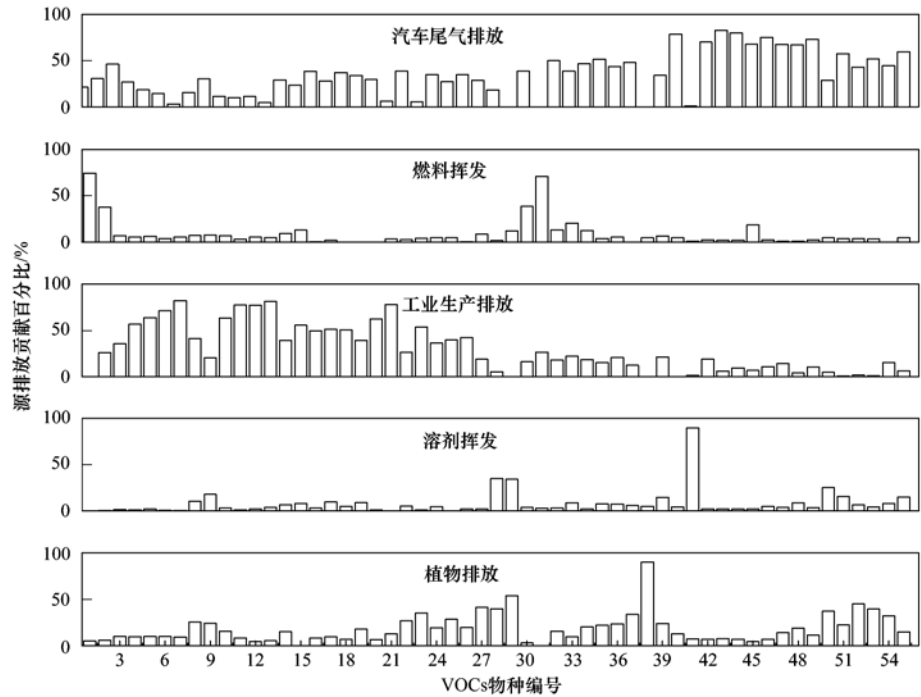
2.2 源解析结果分析

PMF 受体模型多次运行分析后, 确认南京市北郊夏季 VOCs 可能的主要排放源有 5 个: 汽车尾气排放源、工业生产排放源、燃料挥发源、植物排放和有机溶剂挥发源. 图 3 是 PMF 解析的南京市北郊夏季 VOCs 五类排放源的贡献百分比. 第 1 个因子中贡献较大的物种有乙炔、乙烯、2-甲基戊烷、顺-2-丁烯、反-2-丁烯、甲苯、乙苯、二甲苯等芳烃类挥发性有机物. 乙炔是燃烧产生的代表性物种, 而城市空气中的乙炔主要就是来自于机动车尾气的排放^[19]. 乙烯和乙炔来源于燃料的燃烧^[20], 丙烯和苯、甲苯在城市也来自于汽车尾气排放, 2-甲基戊烷常被作为交通工具排放示踪物, 主要是内燃机的不完全燃烧产生的^[21]. 另外顺、反 2-丁烯也常常产生于汽车尾气中^[22]. 因此可以确认因子 1 为汽车尾气排放源. 因子 2 中贡献大的物种主要有: 乙烷、

表 2 2012 年夏季 VOCs 的体积分数和方法检测限 $\times 10^{-9}$
Table 2 Mixing ratio and MDL of VOCs in summer 2012 $\times 10^{-9}$

物种名称	最小值	最大值	平均值	标准偏差	方法检测限	编号 ¹⁾
乙烷	0.44	85.83	4.93	4.06	0.08	1
丙烷	0.25	26.57	2.79	2.34	0.04	2
异丁烷	0.21	8.08	1.47	1.06	0.03	3
正丁烷	0.18	13.36	1.51	1.33	0.03	4
环戊烷	0.00	1.27	0.13	0.16	0.02	5
异戊烷	0.05	11.21	1.29	1.24	0.02	6
正戊烷	0.05	12.27	0.88	1.01	0.02	7
甲基环戊烷	0.00	41.94	0.13	1.64	0.04	8
2,2-二甲基丁烷	0.01	12.53	0.52	0.89	0.04	9
2-甲基戊烷	0.00	0.71	0.08	0.09	0.03	10
2,3-二甲基丁烷	0.00	4.19	0.40	0.52	0.03	11
3-甲基戊烷	0.00	3.62	0.35	0.49	0.04	12
正己烷	0.00	5.33	0.52	0.66	0.04	13
2,4-二甲基戊烷	0.00	0.45	0.05	0.06	0.03	14
环己烷	0.00	32.23	0.73	2.34	0.04	15
2-甲基己烷	0.00	1.09	0.11	0.13	0.03	16
3-甲基己烷	0.00	0.38	0.04	0.05	0.03	17
2,3-二甲基戊烷	0.00	1.39	0.15	0.16	0.03	18
2,2,4-三甲基戊烷	0.00	0.66	0.03	0.03	0.03	19
正庚烷	0.00	1.79	0.14	0.16	0.03	20
甲基环己烷	0.00	1.00	0.08	0.09	0.03	21
2,3,4-三甲基戊烷	0.00	0.25	0.02	0.02	0.02	22
2-甲基庚烷	0.00	4.51	0.05	0.29	0.02	23
3-甲基庚烷	0.00	0.25	0.03	0.03	0.02	24
正辛烷	0.00	0.52	0.06	0.05	0.02	25
正壬烷	0.00	0.47	0.05	0.05	0.02	26
正癸烷	0.00	0.40	0.02	0.03	0.06	27
十一烷	0.00	2.52	0.10	0.25	0.02	28
十二烷	0.00	0.82	0.01	0.05	0.03	29
乙烯	0.25	45.08	3.77	4.54	0.07	30
丙烯	0.00	29.12	2.40	3.90	0.03	31
反-2-丁烯	0.00	0.93	0.10	0.10	0.02	32
1-丁烯	0.00	7.23	1.07	1.18	0.02	33
顺-2-丁烯	0.00	0.92	0.11	0.11	0.03	34
反-2-戊烯	0.00	0.46	0.04	0.07	0.03	35
1-戊烯	0.00	0.56	0.09	0.11	0.03	36
顺-2-戊烯	0.00	1.12	0.02	0.06	0.03	37
异戊二烯	0.00	2.61	0.61	0.53	0.02	38
1-己烯	0.00	0.31	0.03	0.04	0.04	39
乙炔	0.48	15.68	2.64	1.89	0.04	40
苯	0.01	30.02	1.89	3.09	0.03	41
甲苯	0.00	12.67	1.45	1.14	0.03	42
乙基苯	0.06	16.69	1.17	1.07	0.02	43
间,对-二乙苯	0.01	4.12	0.44	0.37	0.02	44
苯乙烯	0.00	2.22	0.22	0.22	0.02	45
邻-二乙苯	0.02	3.14	0.33	0.30	0.02	46
异丙苯	0.00	1.35	0.04	0.06	0.02	47
正丙苯	0.00	2.56	0.07	0.13	0.02	48
对-乙基甲苯	0.00	1.12	0.17	0.14	0.04	49
间-乙基甲苯	0.00	0.48	0.03	0.07	0.04	50
1,3,5-三甲基苯	0.00	0.60	0.09	0.07	0.03	51
邻-乙基甲苯	0.01	0.70	0.25	0.08	0.02	52
1,2,4-三甲基苯	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	—
1,2,3-三甲基苯	0.00	0.54	0.05	0.04	0.02	53
间-二乙基苯	0.00	0.53	0.03	0.04	0.02	54
对-二乙基苯	0.00	0.65	0.04	0.06	0.02	55

1) 表中编号为物种在 PMF 受体模型解析结果代号,“—”表示未在受体模型中使用



横坐标为 VOCs 物种编号, 详见表 2

图 3 各排放源对 VOCs 物种的贡献

Fig. 3 Factor profile resolved from summery samples using PMF

丙烷、丁烷、部分乙烯和丙烯. 乙烷、丙烷 源于天然气^[20,23]. 液化石油气主要的成分包括丙烷、乙烷、丁烷、乙烯和丙烯. 城市地区居民用的化石燃料泄漏挥发和一些以液化石油气为燃料的机动车泄漏挥发是其主要的来源. 尤其在夏季气温高、太阳辐射强的环境下,更利于其挥发. 因此认为因子 2 为燃料(液化石油气和天然气)泄漏挥发源. 因子 3 中贡献大的物种包括了大部分高碳的烷烃、乙烯、丙烯、1-丁烯, 顺、反 2-丁烯, 顺、反 2-戊烯等部分芳烃. 高挥发性的烷烃主要来源于工业生产过程^[7],除了交通工具排放和有机溶剂挥发外,工业生产是芳烃类的挥发性有机物的主要来源^[6,24~26]. 因此认为因子 3 是工业生产排放源. 因子 4 的主要物种为异戊二烯,还有一部分高碳的烷烃和长链的芳烃. 异戊二烯是植物排放的最主要的挥发性有机物^[27]. 此外植物排放的还有其它如环己烷、2-甲基戊烷、3-甲基己烷,庚烷、二甲苯、乙基苯等其他芳烃^[28]. 因此认为因子 4 是植物排放源. 因子 5 贡献大的物种包括苯,乙苯等其他大部分的芳烃化合物和正辛烷、正壬烷、十一烷、十二烷、正癸烷、2,2-二甲基丁烷等烷烃. 正壬烷作为印油的主要成分之一,在印刷和影印工业使用非常广泛. 正辛烷,正癸烷,2-甲基庚烷/甲基庚烷,正己烷,二甲苯,甲苯,及其他芳烃常被用作涂料和其他工业中^[7,29,30]. 甲苯

也常用于稀释印刷油墨. 可以判定因子 5 为有机溶剂使用挥发源.

对流层内挥发性有机物的寿命变化从数月到数小时不等,短的在几公里距离内就可以达到最大氧化程度. 城市地区 VOCs 浓度受人为影响显著,具有局地污染的特征^[2]. 图 4 是 2012 年夏季 5 个主要排放源的 CPF 值分布. 以测站为中心按风向每 10 度一个区共 36 个,即排放源的 36 个贡献区. 在测站以东是包括石化工业、钢铁厂、化工厂和热电厂等大型企业的化工业园区;东侧和西侧毗邻交通要道;其他方向又包括农田,龙王山植被覆盖区和城市居民聚集区. 图 4 分别是汽车尾气排放源、工业排放源、燃料泄漏挥发源、植物源以及溶剂挥发源的 CPF 分布. 可知,汽车尾气排放源对观测点贡献较大的区域主要是测站以南和偏东地区. 测站南方是南京市城区的居民聚集地,市,交通繁忙,汽车尾气排放量大;工业排放贡献较大的区域则在测站东北方向的大厂工业园区和偏南方向江宁工业园区;燃料挥发源贡献高值主要在测站以东和东南方向两个区域,包括了大厂和城区两个居民聚居区和工业园区,居民区是燃料集中使用区,另外工业园区的工业生产、热电厂也是燃料使用大户;植物源贡献主要集中在测站西北和西南地区,测站西北方向被大片农田包围,西南方是包括龙王山和珍珠泉景区的

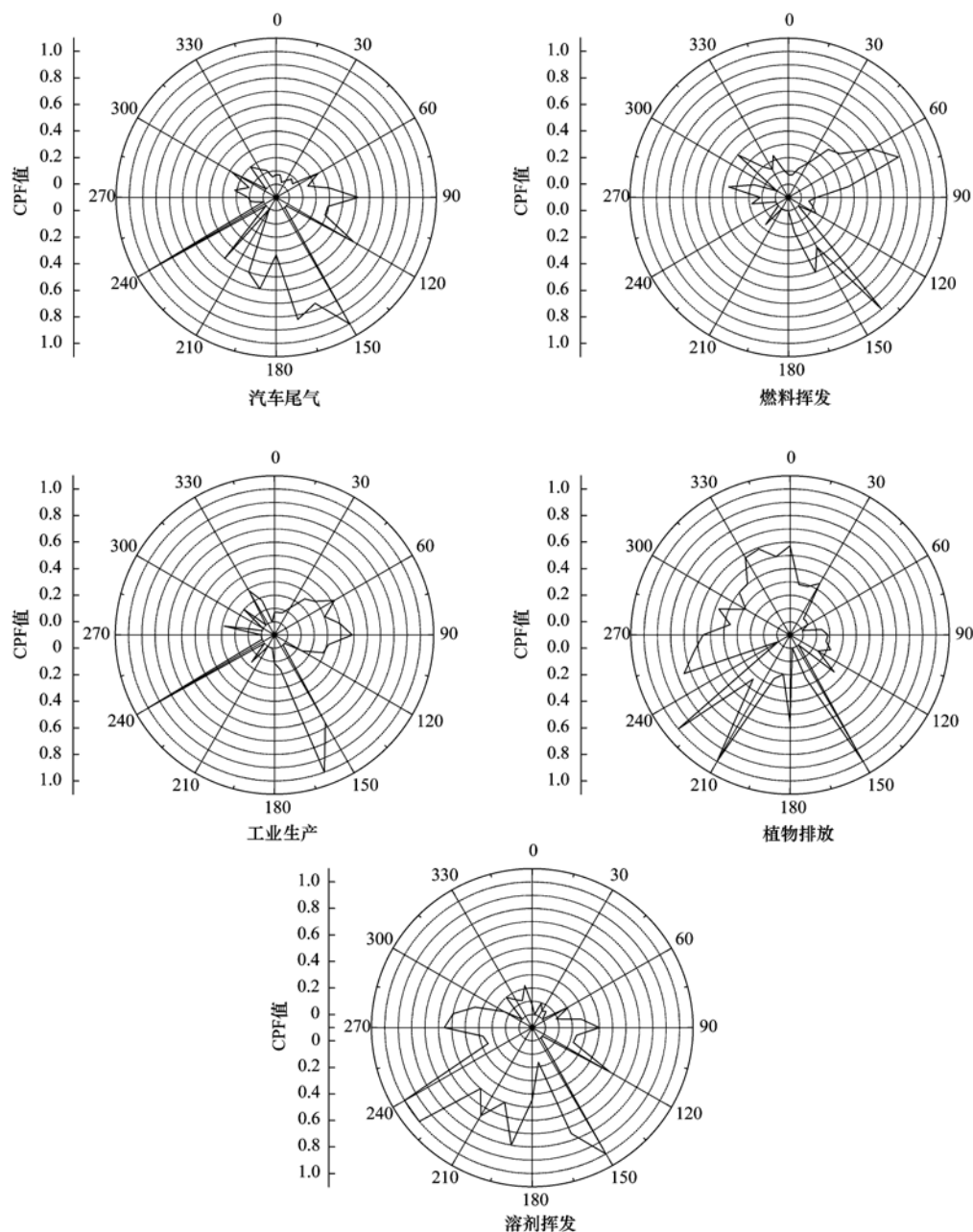


图4 各类排放源的 CPF 值分布

Fig. 4 CPF distribution of each emission source

森林覆盖区;溶剂挥发源则主要是偏南方向的居民聚集区和一些化学工业制造区.居民集中区域,建筑更新较为频繁,有机溶剂使用多.工业生产过程中溶剂的使用也是一个重要来源.综上结合各个排放源的 CPF 值分布可以看出,PMF 解析出的排放源特征与地面实际排放源分布对应较好.

排放源对环境 VOCs 贡献变化与排放源排放物种活性和自身排放变化相关.根据 PMF 受体模型解析结果,图 5 给出了南京市北郊夏季挥发性有机物各类排放源对其贡献的平均日变化图.从中可知,植物排放贡献在昼间大,夜间很少.植物源排放

受太阳辐射影响大,辐射越强,植物排放 VOCs 越多,夜间几乎不排放^[8,13,31].05:00 开始随着太阳辐射增强,植物排放逐渐增加,贡献在 11:00 左右达到最大.异戊二烯是植物排放的主要物种,活性强寿命短,光化学消耗和排放几乎同步,因此在 12:00 ~ 16:00 之间存在一个降低趋势.17:00 之后太阳辐射减弱,植物对 VOCs 贡献逐渐减低,到午夜达到最小.其他的几个排放源在午夜贡献较大,这主要是夜间混合层高度下降和夜间 VOCs 的光化学消耗较少的共同作用.汽车尾气排放贡献和人为活动密切相关,02:00 ~ 05:00 基本保持不变,05:00 ~ 09:00

逐渐增加, 11:00 开始减低到 14:00 达到最低, 17:00 之后又逐渐升高直到 22:00 左右达到峰值, 之后开始降低。14:00 左右低值阶段主要是光化学作用对 VOCs 的消耗造成的。06:00 ~ 07:00 和 17:00 之后是居民上下班交通高峰, 形成 09:00 和 22:00 左右的两个峰值。17:00 之后太阳辐射减弱, 因此第二个峰值高于第一个。行驶车辆减少形成 22:00 之后的降低趋势, 夜间混合层高度降低且 VOCs 消耗少使得午夜后的 02:00 ~ 05:00 汽车排放源的贡献降低并不明显, 保持在一定的水平; 工业生产排放贡献夜间略高于昼间。由于光化学作用, 工业生产对环境 VOCs 贡献夜间整体高于昼间, 存在 02:00 ~ 05:00 和 14:00 ~ 17:00 两个贡献低值阶段, 分别是夜间排放少和太阳辐射消耗造成的; 燃料泄漏挥发和溶剂使用挥发这两个排放源都属于挥发性源, 与环境温度密切相关, 它们对 VOCs 的贡献日变化趋势基本一致。上午 07:00 ~ 10:00 随着温度升高、辐射增强, 泄漏燃料和有机溶剂更易挥发, 对环境 VOCs 贡献增加, 在 11:00 之后由于光化学反应消耗作用而降低。不同的是溶剂挥发源排在 14:00 开始增加, 燃料挥发源则在 17:00 之后开始增长, 这反映了排放源自身排放特征。工作过程中有机溶剂使用主要在 14:00 开始, 而燃料使用则主要集中在下午 17:00 左右, 因此两个挥发源的贡献存在时间上的差异。

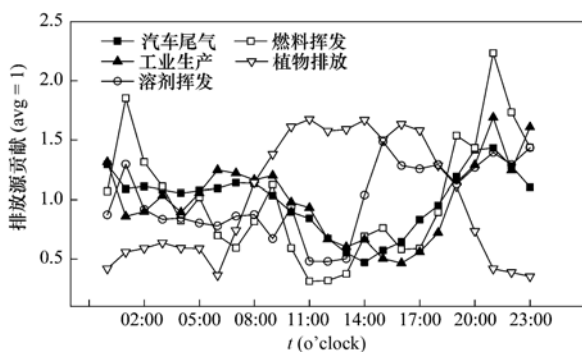


图5 南京市北郊夏季 VOCs 各排放源贡献日变化

Fig. 5 Diurnal variation of contribution for each emission source

根据 PMF 解析结果, 对南京市北郊夏季 TVOCs 来源进行分配。图 6(a) 给出了南京市北郊夏季各排放源对 TVOCs 贡献的百分比。可知汽车尾气排放对 VOCs 贡献最大, 占到 33.1%。其后依次是燃料(液化石油气、天然气)泄漏挥发, 工业生产排放, 植物源和溶剂挥发源, 分别占 25.8%、23.2%、9.7% 和 8.1%。图 6(b) 为各烃类中排放源的贡献大小。烷烃由汽车尾气排放、工业排放、燃料挥发、

溶剂挥发和植物排放贡献分别为 23.7%、35.3%、31.3%、1.6% 和 8.1%; 烯烃主要来源于燃料挥发、工业排放和汽车尾气排放, 分别为 41.1%、18.4% 和 24.3%; 芳烃 49.2% 来自于汽车尾气排放, 其次是有机溶剂挥发排放占到 30.8%。

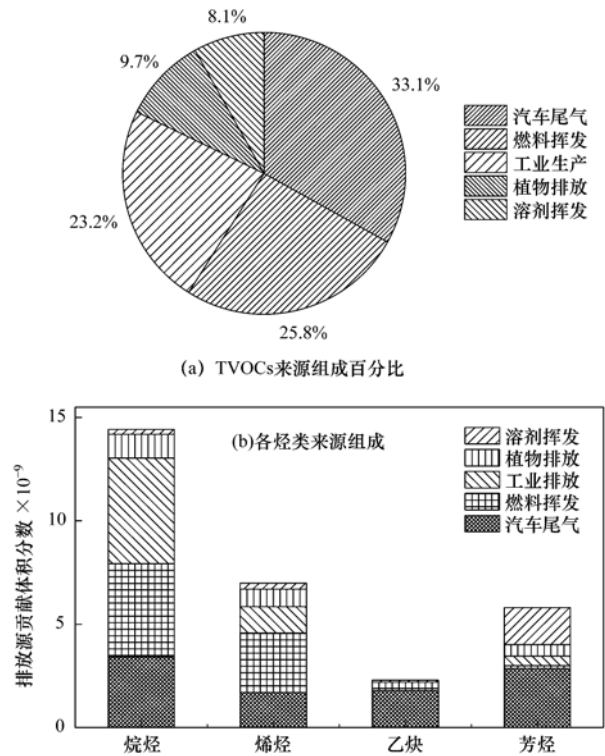


图6 PMF 解析的南京市北郊夏季 VOCs 排放来源贡献

Fig. 6 Contribution of various emission sources to VOCs by PMF

结果表明, 南京市北郊夏季 VOCs 的主要来源是汽车尾气排放, 其次是燃料挥发、工业排放、植物排放和溶剂使用挥发。据江苏省统计年鉴统计, 截止 2012 上半年南京市机动车拥有量已达 148.73 万辆。测站周边绕城高速、国道密集, 车流量大, 机动车尾气对北郊 VOCs 贡献比较大。测站周边工业区聚集, 是大气环境中 VOCs 主要贡献者之一。植物排放贡献具有显著的季节性, 因此要控制南京市北郊大气环境中 VOCs 的含量, 首要是对汽车尾气排放的控制, 降低汽车排量和提高燃料质量, 宣扬绿色出行; 其次就是工业生产中精细化工行业废气处理, 鼓励使用低挥发性的有机溶剂。化石燃料在生产、输送和存储过程中要严格管理, 避免直接向大气中泄漏挥发的情况。

3 结论

(1) 南京市北郊夏季 VOCs 日变化呈双峰分布, 小时平均体积分数为 $(33.84 + 27.77) \times 10^{-9}$, 夜间

高于昼间。各烃类含量最高的是烷烃、其次是烯烃和芳烃分别占到 TVOCs 的 49.3%、24.4% 和 18.5%,乙炔占到了 7.8%。

(2)根据 PMF 受体模型解析和 CPF 分析,夏季南京市北郊挥发性有机物来源主要来源为 5 个,分别是交通尾气、燃料挥发、工业排放、有机溶剂使用和植物源。

(3)南京市北郊夏季,汽车尾气排放对 TVOCs 贡献最大,占到的 33.1%;燃料挥发源占 25.8%;工业生产排放为占 23.2%;有机溶剂挥发和植物源排放分别为 8.1% 和 9.7%。

(4)南京市北郊夏季大气 VOCs 中,烷烃由交通尾气排放、工业生产排放、燃料挥发、溶剂挥发和植物排放贡献分别为 23.7%、35.3%、31.3%、1.6% 和 8.1%;烯烃主要来源于燃料挥发、工业生产排放和交通尾气排放,分别占 41.1%、24.3% 和 18.4%;芳烃的 49.2% 来自于汽车尾气排放,其次是有机溶剂挥发,占到了 30.8%。

参考文献:

- [1] Gee I L, Sollars C J. Ambient air levels of volatile organic compounds in Latin American and Asian cities [J]. *Chemosphere*, 1998, **36**(11): 2497-2506.
- [2] 黄美元,徐华英,王庚辰. 大气环境学[M]. 北京:高等教育出版社,2005. 214-263.
- [3] 王跃思,孙扬,徐新,等. 大气中痕量挥发性有机物分析方法研究[J]. *环境科学*, 2005, **26**(4): 18-23.
- [4] 姜洁. 北京大气中痕量挥发性有机污染物的浓度变化研究[D]. 北京:中国科学院大气物理研究所,2006. 8-14.
- [5] Guo H, Wang T, Simpson I J, *et al.* Source contributions to ambient VOCs and CO at a rural site in eastern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(27): 4551-4560.
- [6] 蔡长杰,耿福海,俞琼,等. 上海中心城区夏季挥发性有机物(VOCs)的源解析[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(5): 926-934.
- [7] Srivastava A, Sengupta B, Dutta S A. Source apportionment of ambient VOCs in Delhi City [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **343**(1-3): 207-220.
- [8] Srivastava A. Source apportionment of ambient VOCs in Mumbai city [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(39): 6829-6843.
- [9] Lu S H, Bai Y H, Zhang G S, *et al.* Source apportionment of anthropogenic emissions of volatile organic compounds [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(5): 757-763.
- [10] Buzcu B, Fraser M P. Source identification and apportionment of volatile organic compounds in Houston, TX [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(13): 2385-2400.
- [11] Brown S G, Frankel A, Hafner H R. Source apportionment of VOCs in the Los Angeles area using positive matrix factorization [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(2): 227-237.
- [12] 王倩,陈长虹,王红丽,等. 上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 424-433.
- [13] Xie Y L, Berkowitz C M. The use of positive matrix factorization with conditional probability functions in air quality studies: An application to hydrocarbon emissions in Houston, Texas [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(17): 3070-3091.
- [14] Liu C H, Tian F L, Chen J W, *et al.* A comparative study on source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments of the Daliao River, China: Positive matrix factorization and factor analysis with non-negative constraints [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(10): 915-920.
- [15] Ashbaugh L L, Malm W C, Sadeh W Z. A residence time probability analysis of sulfur concentrations at Grand Canyon National Park [J]. *Atmospheric Environment*, 1985, **19**(8): 1263-1270.
- [16] Zhou L M, Kim E, Hopke P K, *et al.* Advanced factor analysis on Pittsburgh particle size-distribution data special issue of aerosol science and technology on findings from the Fine Particulate Matter Supersites Program [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2004, **38**(S1): 118-132.
- [17] Ramadan Z, Song X H, Hopke P K. Identification of sources of Phoenix aerosol by positive matrix factorization [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2000, **50**(8): 1308-1320.
- [18] Reff A, Eberly S I, Bhawe P V. Receptor modeling of ambient particulate matter data using positive matrix factorization: review of existing methods [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2007, **57**(2): 146-154.
- [19] Guo H, Lee S C, Louie P K K, *et al.* Characterization of hydrocarbons, halocarbons and carbonyls in the atmosphere of Hong Kong [J]. *Chemosphere*, 2004, **57**(10): 1363-1372.
- [20] Kim E, Hopke P K, Edgerton E S. Source identification of Atlanta aerosol by positive matrix factorization [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2003, **53**(6): 731-739.
- [21] 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.
- [22] Jorquera H, Rappenglück B. Receptor modeling of ambient VOC at Santiago, Chile [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(25): 4243-4263.
- [23] Choi Y J, Ehrman S H. Investigation of sources of volatile organic carbon in the Baltimore area using highly time-resolved measurements [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(5): 775-791.
- [24] Borbon A, Coddeville P, Locoge N, *et al.* Characterising sources and sinks of rural VOC in eastern France [J]. *Chemosphere*, 2004, **57**(8): 931-942.
- [25] 席劲瑛,武俊良,胡洪营,等. 工业 VOCs 排放源废气排放特征调查与分析 [J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(11): 1558-1562.
- [26] Isebrands J G, Guenther A B, Harley P, *et al.* Volatile organic

- compound emission rates from mixed deciduous and coniferous forests in Northern Wisconsin, USA [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(16): 2527-2536.
- [27] 闫雁, 王志辉, 白郁华, 等. 中国植被 VOC 排放清单的建立[J]. 中国环境科学, 2005, **25**(1): 110-114.
- [28] 高伟, 谭国斌, 洪义, 等. 在线质谱仪检测植物排放的挥发性有机物[J]. 分析化学, 2013, **41**(2): 258-262.
- [29] 邵敏, 付琳琳, 刘莹, 等. 北京市大气挥发性有机物的关键活性组分及其来源[J]. 中国科学(D 辑), 2005, **35**(Z1): 123-130.
- [30] 吴方堃, 王跃思, 安俊琳, 等. 北京奥运时段 VOCs 浓度变化、臭氧产生潜势及来源分析研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(1): 10-16.
- [31] 罗玮, 王伯光, 刘舒乐, 等. 广州大气挥发性有机物的臭氧生成潜势及来源研究[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(5): 80-86.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部

CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping (4503)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) in Nanjing Northern Suburb, China	AN Jun-lin, ZHU Bin, LI Yong-yu (4504)
Pollution Characterization of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Tianjin Downtown	ZHAI Zeng-xiu, ZOU Ke-hua, LI Wei-fang, <i>et al.</i> (4513)
Source Apportionment of VOCs in the Northern Suburb of Nanjing in Summer	YANG Hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (4519)
Estimation of the Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol in Shanghai in Spring	CUI Hu-xiong (4529)
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from the Typical Anthropogenic Sources in Sichuan Province	HAN Li, WANG Xing-rui, HE Min, <i>et al.</i> (4535)
Study on Volatile Organic Compounds Emission of Straw Combustion and Management Countermeasure in Wuhan City	HUANG Bi-jie (4543)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs During Winter Haze in Beijing	DUAN Jing-chun, PENG Yan-chun, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (4552)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in the Downtown Area of Guangzhou, China	LI Lei, LI Hong, WANG Xue-zhong, <i>et al.</i> (4558)
Health Risk Assessment of VOCs from a Furniture Mall in Tianjin	ZHANG Yin, WANG Xiu-yan, GAO Shuang (4565)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission from Recycled Waste Polymethyl Methacrylate (PMMA) Industry	WANG Zhe-ming, XU Zhi-rong, YE Hong-yu, <i>et al.</i> (4571)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric Volatile Organic Compounds (VOCs) in Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, PANG Bo, <i>et al.</i> (4577)
Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission from Electronic Products Processing and Manufacturing Factory	CUI Ru, MA Yong-liang (4585)
Emission Characteristics and Safety Evaluation of Volatile Organic Compounds in Manufacturing Processes of Automotive Coatings	ZENG Pei-yuan, LI Jian-jun, LIAO Dong-qi, <i>et al.</i> (4592)
Index Assessment of Airborne VOCs Pollution in Automobile for Transporting Passengers	CHEN Xiao-kai, CHENG He-ming, LUO Hui-long (4599)
Study on the Chemical Compositions of VOCs Emitted by Cooking Oils Based on GC-MS	HE Wan-qing, NIE Lei, TIAN Gang, <i>et al.</i> (4605)
Health-based Risk Assessment in the Excavating Process of VOCs Contaminated Site	FANG Zeng-qiang, GAN Ping, YANG Le, <i>et al.</i> (4612)
Characteristics of Gaseous Pollutants Distribution During Remedial Excavation at a Volatile Organic Compound Contaminated Site	GAN Ping, YANG Yue-wei, FANG Zheng-qiang, <i>et al.</i> (4619)
Factors Affecting Benzene Diffusion from Contaminated Soils to the Atmosphere and Flux Characteristics	DU Ping, WANG Shi-jie, ZHAO Huan-huan, <i>et al.</i> (4627)
Effects of Soil Compositions on Sorption and Desorption Behavior of Tetrachloroethylene in Soil	HU Lin, QIU Zhao-fu, HE Long, <i>et al.</i> (4635)
Occurrence and Distribution of Volatile Organic Compounds in Conventional and Advanced Drinking Water Treatment Processes	CHEN Xi-chao, LUO Qian, CHEN Hu, <i>et al.</i> (4642)
Characteristics and Evaluation of Volatile Organic Compounds Discharge in Typical Enterprise Wastewater in Hangzhou City	CHEN Feng, XU Jian-fen, TANG Fang-liang, <i>et al.</i> (4649)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds from Wastewater Treatment System of Vitamin C Production	GUO Bin, LÜ Guo-li, REN Ai-ling, <i>et al.</i> (4654)
Performance Evaluation of Three Novel Biotrickling Packings	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4661)
Performance of Trace Ozone-augmented Biological Trickling Filter in Toluene Degradation	ZHANG Chao, ZHAO Meng-sheng, ZHANG Li-li, <i>et al.</i> (4669)
Removal Characteristics of DCM by Biotrickling Filter and Biofilter	PAN Wei-long, YU Jian-ming, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> (4675)
Removal of Toluene from Waste Gas by Honeycomb Adsorption Rotor with Modified 13X Molecular Sieves	WANG Jia-de, ZHENG Liang-wei, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (4684)
Treatment of Organic Waste Gas by Adsorption Rotor	ZHU Run-ye, ZHENG Liang-wei, MAO Yu-bo, <i>et al.</i> (4689)
Study on Adsorption Properties of Organic Vapor on Activated Carbons	CAI Dao-fei, HUANG Wei-qiu, WANG Dan-li, <i>et al.</i> (4694)
Degradation of Styrene by Coupling Ultraviolet and Biofiltration	SHA Hao-lei, YANG Guo-jing, XIA Jing-fen (4701)
Adsorption Characteristics of Acetone and Butanone onto Honeycomb ZSM-5 Molecular Sieve	DU Juan, LUAN Zhi-qiang, XIE Qiang, <i>et al.</i> (4706)
Analysis of the Distribution of VOCs Concentration Field with Oil Static Breathing Loss in Internal Floating Roof Tank	WU Hong-zhang, HUANG Wei-qiu, YANG Guang, <i>et al.</i> (4712)
Study on the Quantitative Estimation Method for VOCs Emission from Petrochemical Storage Tanks Based on Tanks 4.0.9d Model	LI Jing, WANG Min-yan, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (4718)
Oxidation Behavior and Kinetics of Representative VOCs Emitted from Petrochemical Industry over CuCeO _x Composite Oxides	CHEN Chang-wei, YU Yan-ke, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (4724)
Direct Photolysis of Methylamine Gas by KrBr [*] Excilamp	ZHAO Jie, LIU Yu-hai, WEI Lian-mei, <i>et al.</i> (4734)
Study on the Relationship Between Odor Intensity and Components Concentrations of Odor Mixture	YAN Lu-chun, LIU Jie-min, FU Hui-ting, <i>et al.</i> (4743)
Study on Key Technical Problems in the Development of Volatile Organic Pollutants Emission Standards	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, REN Chun, <i>et al.</i> (4747)
Establishment and Improvement of Emission Control Standard System of Volatile Organic Compounds in Industry	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZOU Lan, <i>et al.</i> (4751)
Characteristics and Countermeasures of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China	WANG Tie-yu, LI Qi-feng, LÜ Yong-long (4756)
Status and Needs Research for On-Line Monitoring of VOCs Emissions from Stationary Sources	WANG Qiang, ZHOU Gang, ZHONG Qi, <i>et al.</i> (4764)
Evaluation of Treatment Technology of Odor Pollution Source in Petrochemical Industry	MU Gui-qin, SUI Li-hua, GUO Ya-feng, <i>et al.</i> (4771)
Research Advances on Volatile Organic Compounds Emission Inventory of Plants	XIE Jun-fei, LI Yan-ming (4779)
Study of VOCs Emission Prediction and Control Based on Dynamic CGE	LIU Chang-xin, WANG Yu-fei, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (4787)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年12月15日 34卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 12 Dec. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行