

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烯废气的研究 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)

南京北郊大气 VOCs 体积分数变化特征

安俊琳, 朱彬, 李用宇

(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: 利用 2011-03-01 ~ 2012-02-29 南京北郊大气 VOCs 观测资料, 对大气 VOCs 体积分数的时间序列变化特征、光化学活性差异和来源特征进行了研究. 结果表明, VOCs 体积分数平均为 43.52×10^{-9} , 并呈现夏季高, 冬季低, 春季低, 秋季高的季节变化. VOCs 体积分数呈现夜间高, 白天低的日变化特征. VOCs 体积分数夜间呈现夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季, 白天呈现冬季 > 夏季 > 春季 > 秋季. VOCs 日变化幅度秋季最大, 冬季最小. 烷烃和烯烃日变化幅度最大值出现在秋季, 芳香烃和炔烃日变幅最大值出现在春季. 采用丙烯等量体积分数方法表示, VOCs 物种中烯烃含量最高, 芳香烃次之, 烷烃最小. T/B、E/B 和 X/B 比值平均值分别是 1.23、0.95 和 0.81, 反映出影响观测点的气团呈现一定老化程度. 以 3-甲基戊烷作为机动车排放典型示踪物, 估算得到乙烯、甲苯和间, 对-二甲苯分别有 85%、71% 和 82% 来自非机动车源.

关键词: 挥发性有机物; 光化学反应活性; OH 反应活性; 臭氧生成潜势; 来源特征

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)12-4504-09

Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) in Nanjing Northern Suburb, China

AN Jun-lin, ZHU Bin, LI Yong-yu

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

Abstract: Based on the data of volatile organic compounds (VOCs) collected continuously from Mar 1, 2011 to Feb 29, 2012 in the northern suburb of Nanjing, characteristics of their temporal variation, photochemical reactivity of their compositions and source characteristics of VOCs were analyzed. The results showed that the mean value of VOCs mixing ratios was 43.52×10^{-9} (volume fraction). There was an obvious seasonal cycle of VOCs, with the maximum in summer and minimum in winter. Diurnal variation of VOCs mixing ratios showed a very clear cycle, with higher average VOCs mixing ratios at nighttime than at daytime. The seasonal trend of VOCs mixing ratios at night was in the order of summer > autumn > spring > winter, whereas the order during daytime was winter > summer > spring > winter. Mixing ratio of VOCs had greater diurnal amplitude in autumn and lesser in winter. Alkanes and alkenes had greater diurnal amplitude in autumn. Aromatics and alkenes had greater diurnal amplitude in spring. Using the propylene-equal mixing ratios method, alkenes was found to be the largest part of VOCs, followed by aromatics, and alkanes was the least. The ratios of T/B, E/B and X/B were 1.23, 0.95 and 0.81, respectively, possibly due to the aging of the air mass at this site. The robust vehicular indicator, 3-methylpentane, which is an intrinsic component gasoline, was used to estimate the contributions of traffic versus non-traffic sources. The non-traffic source contribution was significant for ethene (85%), toluene (71%) and *m,p*-xylene (82%).

Key words: volatile organic compounds (VOCs); photochemical reactivity; OH reactivity; ozone formation potential (OFP); sources characteristics

随着城市经济发展的工业化进程加快和机动车保有量的激增, 近几年各大城市已进入到城市光化学复合污染时期^[1,2]. 特别是城市规模不断扩大, 城市中各个功能区之间的大气污染物相互作用日益突出, 由此带来的区域光化学污染问题是当前城市发展所面临的重要环境问题之一^[3,4]. 自从洛杉矶烟雾事件以来, 城市光化学问题一直备受人们关注. Haagen-Smit^[5]的一系列早期研究表明, 挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 是以臭氧(O₃)为特征物的城市光化学污染发生的关键控制物质, 对其变化特征研究是制定光化学污染控制策略的重要基础.

VOCs 除了是 O₃ 前体物以外, 同时也会造成二

次气溶胶污染, 对城市 O₃ 和灰霾等复合型大气污染的形成至关重要^[6,7]. 大气 VOCs 物种成千上万种, 各物种化学结构以及参加大气化学反应的能力也不尽相同, 对复合型大气污染的贡献也有很大差异, 研究 VOCs 的体积分数水平, 组成特征和反应活性对揭示复合型大气污染的形成机制有重要意义. 例如, 墨西哥城和圣地亚哥出现的高 O₃ 污染事件就与

收稿日期: 2013-06-13; 修订日期: 2013-07-22

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) (XDB05020206); 国家自然科学基金项目 (41275143); 江苏省高校自然科学研究重大基础研究项目 (12KJA170003)

作者简介: 安俊琳 (1978 ~), 男, 博士, 主要研究方向为大气环境, E-mail: junlinan@nuist.edu.cn

液化石油气的泄漏有着密切联系^[8,9]. 而美国休斯敦出现高 O₃ 浓度的原因主要是附近石油化工企业排放的高活性 VOCs 成分所致^[10].

近年来,已有研究报道了北京^[11,12]、上海^[13]、广州^[14,15]和香港^[16] VOCs 组成特征. Liu 等^[14]对珠三角地区 VOCs 的组成和来源进行了研究,发现 LPG 公交车辆的使用是导致广州市区大气中丙烷体积分数显著高于其他物种的体积分数的主要原因,而芳香烃类物种则是新垦市工业区大气最主要的物种. 王伯光等^[15]在珠三角地区对 VOCs 的时空分布做了系统研究,并用 E/X 指示气团的老化程度,发现广州市 VOCs 污染水平很高且主要来源于交通源,夏、冬季具有明显的空间变化规律. Shao 等^[11]的研究表明,机动车尾气排放和油气挥发的 C₄ 和 C₅ 烯烃类化合物是北京市大气化学活性的主要贡献物种. Wang 等^[12]运用 GC-MS/FID 定量分析了北京市大气中 55 个 NMHCs 物种,发现奥运会和残奥会期间 NMHCs 的浓度水平较 6 月分别降低了 35% 和 25%. Cai 等^[13]的研究认为,上海市中心城区夏季大气 VOCs 的主要来源为机动车尾气排放、燃料使用、溶剂挥发、工业生产和生物质燃烧,而对 OFP 贡献率最大的是溶剂使用,其次是机动车尾气. 最为经济有效的控制 O₃ 的措施不是降低所有 VOCs

的排放,而是针对 O₃ 产生潜力较大的物种,降低它们的排放量.

南京市城北工业区集中了扬子石化、南钢、南京化工园等诸多大型企业,而此类企业的生产、储运过程是大气中 VOCs 的重要来源,这势必会对工业区及周边大气环境产生负面影响,造成区域光化学污染. 但针对国内城市工业区大气质量问题研究不多,对这一类型功能区大气 VOCs 浓度特征缺乏全面的认识. 因此,本研究以南京城北工业区大气 VOCs 体积分数连续观测资料为基础,分析大气中 VOCs 组分特征,化学反应活性及对臭氧生成贡献,并尝试利用特征示踪物分析其污染源特征.

1 材料与方法

1.1 观测站点

观测地点位于南京市浦口区南京信息工程大学气象楼楼顶 (32°12'N, 118°42'E, 海拔高度: 62 m). 该站点东北方向约 5 km 是包括石油化工业,钢铁厂和化工厂等大型企业的南京城北工业区,距观测点东 500 m 处为南北走向的宁六公路 (见图 1). 因此本观测点的资料可以代表典型城市工业区大气污染特点. 观测时间为 2011-03-01 ~ 2012-02-29,期间的 2011 年 6 月由于仪器故障缺测一个月.

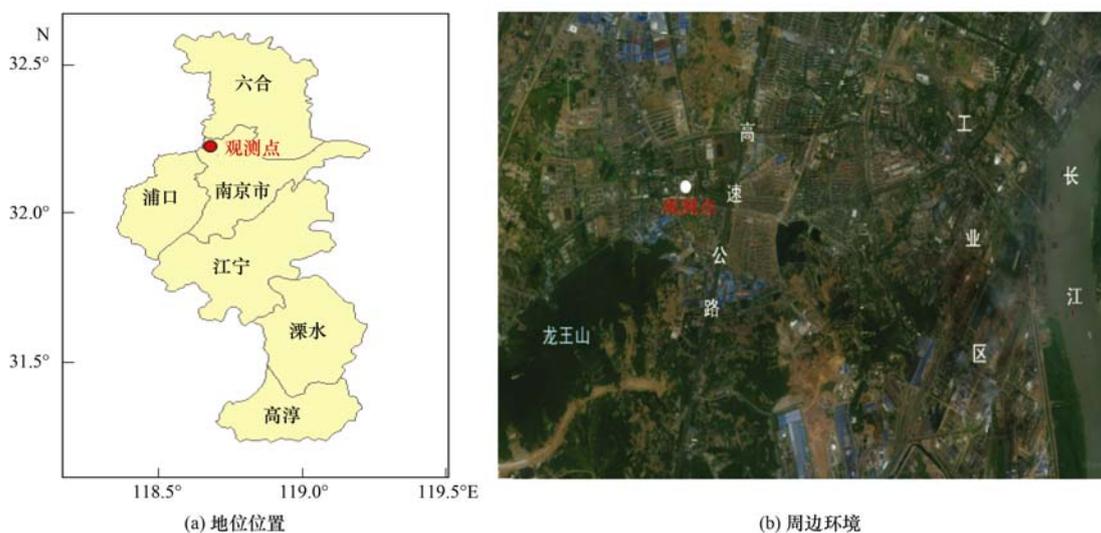


图 1 观测点的地理位置及周边环境

Fig. 1 Location of observation site and the surrounding environment

1.2 仪器与分析方法

VOCs 观测采用由德国 AMA 公司生产的 GC 5000 自动在线气相色谱氢火焰离子 (Gas Chromatography-Flame Ionization Detector, GC-FID) 监测系统进行连续监测,采样频率为 1 h. GC 5000

系列监测系统,具体包括 GC 5000-VOC (单级富集) 和 GC 5000-BTX (两级富集) 两套独立的分析色谱仪,分别测量 C₂ ~ C₆ 的低沸点 VOCs 物种和 C₄ ~ C₁₂ 的高沸点 VOCs 物种,检测器均为氢火焰离子化检测器 (FID). 测量原理: 环境空气样品经过干燥管

后直接进入分析系统,有机物在富集管中吸附解析后,进入毛细管柱分离,然后由 FID 检测有机物含量. 仪器检测 $C_2 \sim C_{12}$ 共计 56 种 VOCs,其中包括 29 种烷烃、10 种烯烃、16 种芳香烃和 1 种炔烃. 为了保证观测数据的有效性和可靠性,观测期间利用 DIM200 校准模块每 3 周进行一次校准. 采用美国环保署认可的 Linde Gas North America LLC 标准气体进行 5 点校准,校准时相关系数均在 0.995 以上.

1.3 VOCs 化学活性比较方法

采用 OH 自由基活性浓度和最大增量活性浓度来比较 VOCs 在大气中的化学活性. 其中,OH 自由基活性浓度采用 Chameides 等^[17]提出的归一化 OH 自由基活性加权浓度即丙烯等效浓度表示. 它的原理是把所有 VOCs 置于一个平等的基点上进行比较,同时考虑物种的浓度和与 OH 自由基的反应常数,对某一种 VOCs 物种,其丙烯等效浓度定义为:

$$\text{VOCs 丙烯等效浓度} = \frac{\text{VOCs 浓度} \times K^{\text{OH}}(\text{VOCs})}{K^{\text{OH}}(\text{丙烯})} \quad (1)$$

式中, $K^{\text{OH}}(\text{VOCs})$ 是某一种 VOCs 物种与 OH 自由基反应的速度常数, $K^{\text{OH}}(\text{丙烯})$ 是丙烯与 OH 自由基的反应速率常数,VOCs 各物种与 OH 自由基的反应速率常数采用 Atkinson 等^[18]的实验结果,数值见表 1.

最大增量活性浓度 (maximum incremental reactivity, MIR) 由 Carter^[19]提出,用来比较单个 VOCs 物种臭氧形成潜势 (ozone formation potentials, OFP),定义公式如下:

$$\text{臭氧生成潜势}(\text{VOCs}) = \text{VOCs 浓度} \times \text{MIR 系数}(\text{VOCs}) \quad (2)$$

式中,MIR 系数(VOCs)是 VOCs 物种最大增量活性系数,该系数采用 Carter^[19]实验结果,数值见表 1.

2 结果与讨论

2.1 VOCs 体积分数时间序列特征

表 1 给出了观测期间 56 种 VOCs 物种体积分数统计结果. 从中可以看出,烷烃 29 种组分中,乙烷体积分数最高,为 6.97×10^{-9} ,其次为丙烷(3.29×10^{-9})和正丁烷(1.69×10^{-9}),这 3 种烷烃占总烷烃的 60.8%. 烯烃各组分中,含量最高的 3 种烯烃占到总烯烃的 88.3%,它们分别是乙烯(5.68×10^{-9})、丙烯(2.45×10^{-9})和 1-丁烯(1.61×10^{-9}). 芳香烃类物种中,苯的体积分数最高 ($3.14 \times$

10^{-9}),甲苯次之(2.10×10^{-9}),乙苯第三(1.19×10^{-9}). 这 3 种组分占总芳香烃类 66.1%. 观测期间南京大气总 VOCs 体积分数为 43.52×10^{-9} ,其中烷烃为 19.64×10^{-9} ,烯烃为 11.03×10^{-9} ,炔烃为 3.21×10^{-9} ,芳香烃为 9.73×10^{-9} . 它们分别占总 VOCs 的 45.1%、25.3%、7.3% 和 22.3%.

为了比较 VOCs 体积分数季节变化特征,图 2 给出了 VOCs 中四大类烃类的季节变化直方图. 从中可以发现,4 种烃类存在明显季节变化,烷烃体积分数在冬季最高,春季最低,冬季比春季高 17.1%. 烯烃体积分数在夏季最高,春季最低,夏季比春季高 34.4%. 芳香烃体积分数在春季最高,冬季最低,春季比冬季高 63.9%. 炔烃体积分数在春季最高,夏季最低,春季比夏季高 48.3%. 总 VOCs 体积混合比呈现季节变化,夏季最高,冬季最低,夏季比冬季高 5.6%.

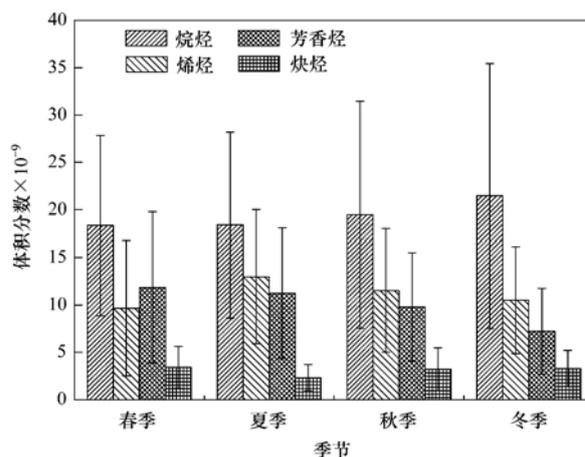


图 2 VOCs 各组分季节变化

Fig. 2 Seasonal variations of VOCs mixing ratios

图 3 给出了 VOCs 体积分数日变化曲线. 可以看出,VOCs 体积分数呈现明显日变化,夜间体积分数较高,白天体积分数较低. VOCs 日变化曲线存在季节差异,在春季,夜间 (20:00 ~ 06:00) 平均为 48.19×10^{-9} ,白天 (07:00 ~ 19:00) 平均为 37.97×10^{-9} . 夏季夜间平均为 50.02×10^{-9} ,白天平均为 40.60×10^{-9} . 秋季夜间平均为 48.74×10^{-9} ,白天平均为 36.67×10^{-9} . 冬季夜间平均为 43.92×10^{-9} ,白天平均为 41.16×10^{-9} . VOCs 体积分数夜间呈现夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季,白天呈现冬季 > 夏季 > 春季 > 秋季. VOCs 体积分数日变化幅度分别为: 21.85×10^{-9} (春季)、 20.18×10^{-9} (夏季)、 24.19×10^{-9} (秋季) 和 13.07×10^{-9} (冬季),冬季变幅最小,而秋季变幅最大.

表 1 观测期间 VOCs 组分平均体积分数¹⁾ $\times 10^{-9}$
Table 1 Average mixing ratios of VOCs in Nanjing $\times 10^{-9}$

类别	组分	平均值	标准误差	变化范围	最低检测限	$K^{OH} \times 10^{12}$	MIR
烷烃	乙烷	6.97	6.88	0.04 ~ 72.44	0.08	0.25	0.25
	丙烷	3.29	1.98	0.15 ~ 18.39	0.04	1.09	0.48
	正丁烷	1.69	1.20	0.02 ~ 18.61	0.03	2.36	1.02
	异丁烷	1.51	0.96	0.02 ~ 12.60	0.03	2.12	1.21
	正戊烷	0.81	0.69	0.01 ~ 11.48	0.02	3.94	1.04
	异戊烷	1.12	0.89	0.01 ~ 11.16	0.02	3.60	1.38
	环戊烷	0.11	0.13	0.01 ~ 2.13	0.02	4.97	2.40
	正己烷	0.67	0.63	0.02 ~ 6.17	0.04	5.20	0.98
	环己烷	0.40	1.07	0.02 ~ 20.61	0.04	6.97	1.28
	甲基环戊烷	0.10	0.19	0.02 ~ 2.90	0.04	—	2.80
	2,2-二甲基丁烷	0.50	0.31	0.02 ~ 4.70	0.04	2.23	0.82
	2,3-二甲基丁烷	0.07	0.11	0.02 ~ 2.54	0.03	5.78	1.07
	2-甲基戊烷	0.34	0.37	0.02 ~ 5.17	0.03	5.20	1.50
	3-甲基戊烷	0.25	0.28	0.02 ~ 5.51	0.04	5.20	1.50
	正庚烷	0.14	0.14	0.02 ~ 2.90	0.03	6.76	0.81
	甲基环己烷	0.12	0.18	0.02 ~ 6.80	0.03	9.64	1.80
	2-甲基己烷	0.36	1.06	0.02 ~ 15.20	0.03	—	1.08
	3-甲基己烷	0.20	0.20	0.02 ~ 1.73	0.03	—	1.40
	2,3-二甲基戊烷	0.13	0.42	0.02 ~ 9.08	0.03	—	1.31
	2,4-二甲基戊烷	0.10	0.28	0.02 ~ 10.00	0.03	4.77	1.50
正辛烷	0.10	0.41	0.01 ~ 12.68	0.02	8.11	0.60	
2,2,4-三甲基戊烷	0.09	0.22	0.02 ~ 10.35	0.03	3.34	0.93	
2,3,4-三甲基戊烷	0.06	0.10	0.01 ~ 1.64	0.02	6.60	1.60	
2-甲基庚烷	0.04	0.15	0.01 ~ 7.24	0.02	—	0.96	
3-甲基庚烷	0.05	0.04	0.01 ~ 0.79	0.02	—	0.99	
正壬烷	0.10	0.19	0.01 ~ 4.27	0.02	9.70	0.54	
正癸烷	0.10	0.19	0.06 ~ 8.72	0.12	11.0	0.46	
十一烷	0.13	0.27	0.01 ~ 4.46	0.02	12.3	0.42	
十二烷	0.06	0.15	0.02 ~ 7.21	0.03	13.2	0.38	
烯烃	乙烯	5.68	4.23	0.32 ~ 81.04	0.07	8.52	7.40
	丙烯	2.45	2.10	0.02 ~ 26.45	0.03	26.3	9.40
	1-丁烯	1.61	1.35	0.01 ~ 11.47	0.02	31.4	8.90
	反-2-丁烯	0.16	0.16	0.01 ~ 2.25	0.02	64.0	10.0
	顺-2-丁烯	0.17	0.22	0.02 ~ 11.25	0.03	56.4	10.0
	1-戊烯	0.15	0.25	0.02 ~ 4.89	0.03	31.4	6.20
	反-2-戊烯	0.05	0.09	0.02 ~ 2.11	0.03	67.0	8.80
	顺-2-戊烯	0.05	0.13	0.02 ~ 2.34	0.03	65.0	8.80
	异戊二烯	0.54	0.82	0.01 ~ 21.60	0.02	101.0	9.10
己烯	0.17	0.32	0.02 ~ 3.96	0.04	37.0	4.40	
炔烃	乙炔	3.12	2.04	0.02 ~ 19.94	0.04	—	0.50
芳香烃	苯	3.14	3.32	0.02 ~ 32.58	0.03	1.22	0.42
	甲苯	2.10	1.68	0.02 ~ 12.88	0.03	5.63	2.70
	乙苯	1.19	1.18	0.01 ~ 13.93	0.02	7.0	2.70
	间,对-二甲苯	0.94	0.77	0.01 ~ 9.92	0.02	18.7	7.40
	邻-二甲苯	0.43	0.68	0.01 ~ 21.04	0.02	13.6	6.5
	苯乙烯	0.31	0.27	0.01 ~ 3.58	0.02	58.0	2.20
	正丙苯	0.13	0.21	0.01 ~ 2.40	0.02	5.80	2.10
	异丙苯	0.14	0.19	0.01 ~ 1.06	0.02	6.30	2.20
	间乙基甲苯	0.20	0.22	0.02 ~ 3.84	0.04	18.6	—
	对乙基甲苯	0.13	0.23	0.02 ~ 2.56	0.04	11.8	—
	邻乙基甲苯	0.14	0.52	0.01 ~ 25.10	0.02	11.9	—
	1,2,3-三甲苯	0.09	0.19	0.01 ~ 3.65	0.02	32.7	8.9
	1,2,4-三甲苯	0.07	0.12	0.03 ~ 3.36	0.06	32.5	8.8
	1,3,5-三甲苯	0.43	0.49	0.02 ~ 7.41	0.03	56.7	10.1
间二乙基苯	0.19	0.52	0.01 ~ 8.59	0.02	—	—	
对二乙基苯	0.11	0.20	0.01 ~ 2.21	0.02	—	—	
烷烃		19.64					
烯烃		11.03					
炔烃		3.21					
芳香烃		9.73					
总 VOCs		43.52					

1) K_{OH} : VOCs 与 OH 反应常数 [$\text{cm}^3 (\text{molecule} \cdot \text{s})^{-1}$]^[18]; MIR: 最大增量反应活性 (O_3/VOCs)^[19]

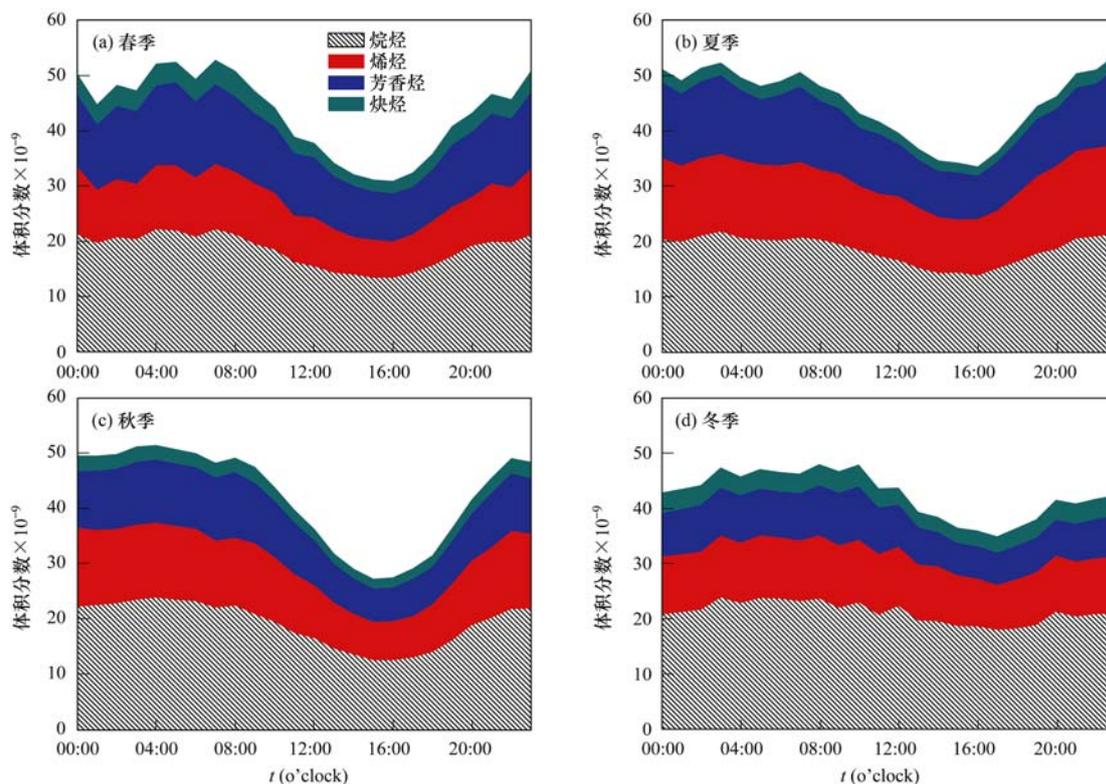


图3 VOCs 体积分数日变化

Fig. 3 Diurnal variations of VOCs mixing ratios

VOCs 各组分比例在不同季节存在显著日变化波动,烷烃在总 VOCs 的含量分别是 42.51% (春季),41.01% (夏季),45.19% (秋季)和 49.80% (冬季). 烯烃在总 VOCs 的含量分别是 22.23% (春季),28.92% (夏季),26.78% (秋季)和 24.33% (冬季). 芳香烃在总 VOCs 的含量分别是 27.45% (春季),24.91% (夏季),22.16% (秋季)和 17.76% (冬季). 炔烃在总 VOCs 的含量分别是 7.81% (春季),5.16% (夏季),5.88% (秋季)和 8.11% (冬季). 比较 VOCs 各组分的日变化幅度,发现烷烃在各季节的日变化幅度最大发生在秋季,变化幅度达到 11.33×10^{-9} ,最小出现在冬季,变幅为 5.87×10^{-9} . 烯烃日变幅最大发生在秋季,变幅达到 7.31×10^{-9} ,最小出现在冬季,变幅为 3.26×10^{-9} . 芳香烃日变幅最大发生在春季,变幅达到 6.46×10^{-9} ,最小出现在冬季,变幅为 3.88×10^{-9} . 炔烃日变幅最大发生在春季,变幅达到 2.50×10^{-9} ,最小出现在夏季,变幅为 1.0×10^{-9} .

2.2 VOCs 体积分数光化学活性特征

VOCs 作为重要的大气光化学活性物质,除了关心其本身的体积分数以外,VOCs 的大气光化学活性特征也是其变化特征重要的一个方面. 表 2 给

出了 VOCs 物种分别按照体积分数,丙烯等量体积分数和最大臭氧产生潜势体积分数 3 种计算方法排序的前 20 种物种. 可以发现,用 3 种方法表示的前 20 种物种分别占总 VOCs 的 88.69%、89.61% 和 93.08%. 采用体积分数方法,排名前 5 位物种分别是乙烷、乙烯、丙烷、苯和乙炔. 采用丙烯等量体积分数方法,前 5 位物种是丙烯,异戊二烯、1-丁烯、乙烯和 1,3,5-三甲苯. 采用最大臭氧产生潜势体积分数方法,前 5 种物种是乙烯、丙烯、1-丁烯、间,对-二甲苯和甲苯. 这种排序差异主要由不同 VOCs 物种光化学活性差异造成的.

为了比较两种方法与体积分数的差异,图 4 给出了采用丙烯等量体积分数和 OFP 体积分数表示的 VOCs 各物种的季节变化. 比较图 2 的体积分数结果,可以发现,采用丙烯等量体积分数方法[见图 4(a)]后,烯烃含量最高,芳香烃次之,烷烃最小. 而且存在季节差异,烯烃夏季最高(12.25×10^{-9}),冬季最低(8.32×10^{-9}). 芳香烃春季最高(6.09×10^{-9}),冬季最低(2.45×10^{-9}). 烷烃春季最高(1.78×10^{-9}),秋季最低(1.41×10^{-9}). 采用 OFP 体积分数[见图 4(b)]后,几类 VOCs 物种大小顺序和丙烯等量体积分数一致. 各 VOCs 物种的季节变

表 2 3 种不同方法表示的 VOCs 体积分数前 20 位比较

Table 2 Average mixing ratios of the 20 most abundant VOCs species as determined by three different methods in Nanjing

排序	体积分数		丙烯等量体积分数			最大臭氧产生潜势体积分数			
	组分	数值 $\times 10^{-9}$	百分比/%	组分	数值 $\times 10^{-9}$	百分比/%	组分	数值 $\times 10^{-9}$	百分比/%
1	乙烷	6.97	16.02	丙烯	2.45	16.16	乙烯	42.05	31.66
2	乙烯	5.68	13.06	异戊二烯	2.07	13.67	丙烯	23.02	17.33
3	丙烷	3.29	7.57	1-丁烯	1.93	12.72	1-丁烯	14.36	10.82
4	苯	3.14	7.21	乙炔	1.84	12.15	间,对-二甲苯	6.94	5.23
5	乙炔	3.12	7.17	1,3,5-三甲苯	0.92	6.10	甲苯	5.68	4.28
6	丙烯	2.45	5.63	苯乙烯	0.68	4.51	异戊二烯	4.91	3.70
7	甲苯	2.10	4.84	间,对-二甲苯	0.67	4.40	1,3,5-三甲苯	4.33	3.26
8	正丁烷	1.69	3.88	甲苯	0.45	2.97	乙苯	3.20	2.41
9	1-丁烯	1.61	3.71	反-2-丁烯	0.40	2.62	邻-二甲苯	2.76	2.08
10	异丁烷	1.51	3.48	顺-2-丁烯	0.36	2.35	异丁烷	1.83	1.38
11	乙苯	1.19	2.73	乙苯	0.32	2.08	乙烷	1.74	1.31
12	异戊烷	1.12	2.57	己烯	0.24	1.58	正丁烷	1.72	1.30
13	间,对-二甲苯	0.94	2.16	邻-二甲苯	0.22	1.45	顺-2-丁烯	1.66	1.25
14	正戊烷	0.81	1.87	1-戊烯	0.18	1.17	反-2-丁烯	1.63	1.23
15	正己烷	0.67	1.55	异戊烷	0.15	1.01	丙烷	1.58	1.19
16	异戊二烯	0.54	1.24	正丁烷	0.15	1.00	乙炔	1.56	1.17
17	2,2-二甲基丁烷	0.50	1.15	苯	0.15	0.96	异戊烷	1.54	1.16
18	1,3,5-三甲苯	0.43	0.99	间-甲基甲苯	0.14	0.91	苯	1.32	0.99
19	邻-二甲苯	0.43	0.98	丙烷	0.14	0.90	1-戊烯	0.92	0.70
20	环己烷	0.40	0.92	正己烷	0.13	0.88	正戊烷	0.85	0.64
前 20 种总体积分数		38.60	88.69	13.58		89.61	123.62		93.08
总 VOCs 体积分数		43.52		15.15			132.82		

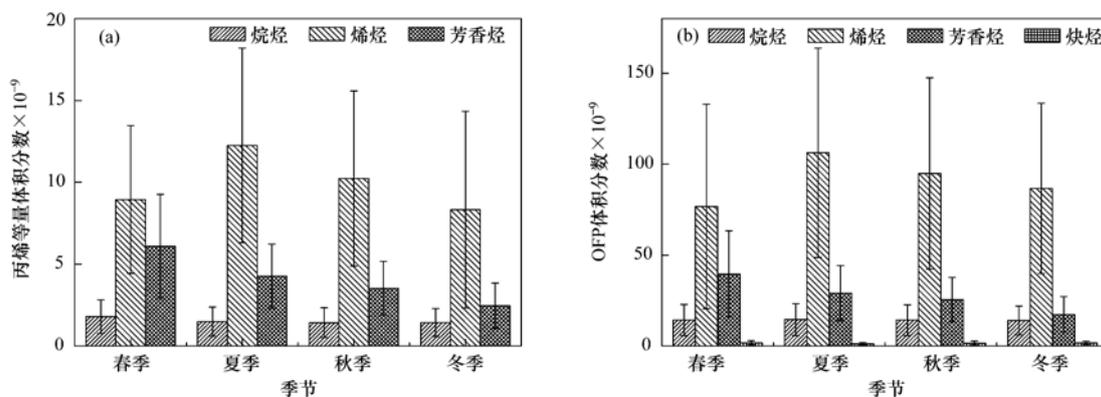


图 4 VOCs 丙烯等量体积分数和 MIR 体积分数季节变化

Fig. 4 Seasonal variations of VOCs mixing ratios in propylene-equivalent and MIR methods

化特点, 烯烃和芳香烃同丙烯等量体积分数方法一致, 而烷烃表现出夏季最高, 冬季最低。

为了比较空气团老化程度及影响观测点的 VOCs 污染源输送距离, 一些典型 VOCs 物种的活性差异常常被用于评估空气团老化程度^[20]。这些 VOCs 物种一般具有相似的污染来源, 但大气化学活性差别较大, 由于输送过程中光化学反应强度强弱不同, 导致物种体积分数差异, 因此这类 VOCs 物种的比值高低是判别气团老化程度重要参数。苯、甲苯、乙苯、间, 对-二甲苯这 4 种苯系物具有相似来源, 在大气中的光化学活性差别明显 (见表 1)。

例如, 在 OH 自由基 12 h 平均体积分数为 0.06×10^{-12} 的大气环境中, 它们在大气中的存在周期分别是 12.5 d (苯)、2 d (甲苯)、23 h (乙苯) 和 7.8 h (间, 对-二甲苯)。因此, 这 4 类 VOCs 物种比值常被用于判断气团老化程度。图 5 给出了这几种物种比值的日变化曲线, 其中甲苯/苯表示为 T/B, 乙苯/苯表示为 E/B, 间, 对-二甲苯/苯表示为 X/B。可以发现 T/B、E/B 和 X/B 比值在 0.46 ~ 1.68 之间变化, 这 3 个比值的平均值分别是 1.23、0.95 和 0.81。比较一些隧道、道路研究结果^[20], 反映出影响观测点的气团呈现一定老化程度。此外, 3 个比值的日

变化曲线并不存在与交通早晚高峰相关的日变化规律,反映出了除了机动车污染源以外,还存在其他污染源.

图 6 给出了本次观测的结果和其它城市地区和交通隧道的结果比较. 同样选取上述 T/B、E/B 和 X/B 这 3 个比值作为指示物,可以看出,南京与北京、亚特兰大和卡拉奇变化情况较一致,同时都低于城市隧道中实验的结果. 说明南京大气中苯系物的来源除了机动车排放外,还存在其他污染源. 这与图 5 反映出的结果一致.

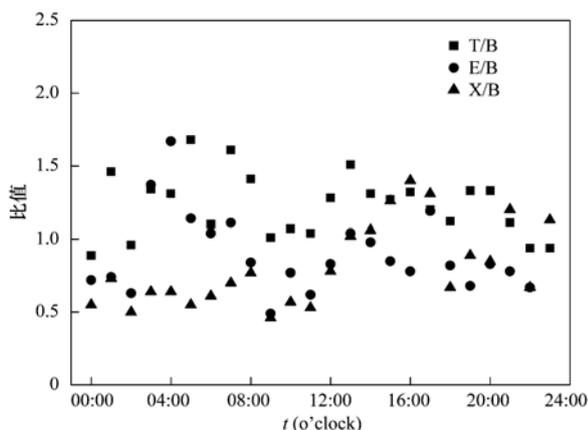
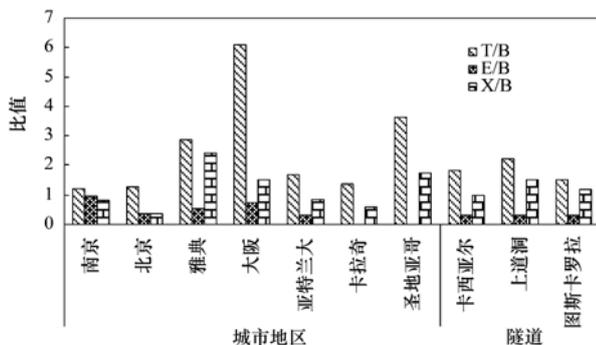


图 5 T/B、E/B、X/B 比值日变化

Fig. 5 Diurnal variations of ratios of T/B, E/B, X/B



雅典: 文献[21]; 大阪: 文献[22]; 亚特兰大: 文献[23];

卡拉奇: 文献[24]; 圣地亚哥: 文献[9]; 伦敦: 文献[25]

图 6 不同城市 3 种体积分数比值比较

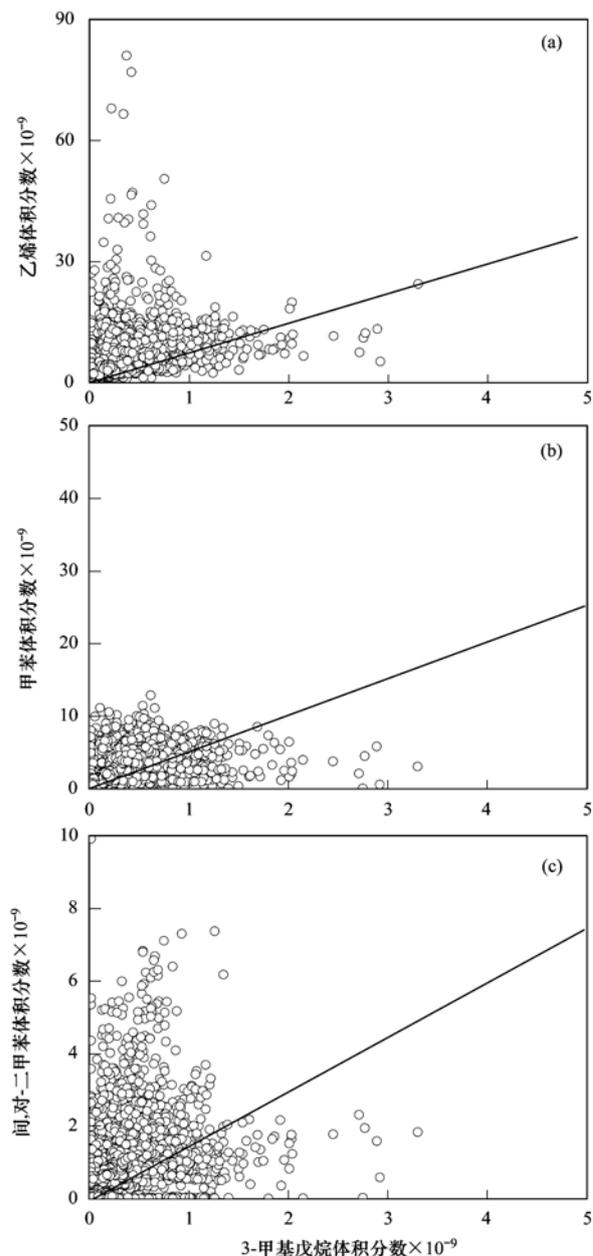
Fig. 6 Ratios of three species determined in this study and other studies

2.3 VOCs 体积分数来源特征

大气中 VOCs 来源主要有机动车排放,溶剂使用挥发,工业生产过程排放和自然源排放等等. 机动车排放和非机动车排放的 VOCs 物种具有交叉部分,这增加了 VOCs 来源解析的难度. 苯和甲苯的比值(B/T)常常被用来确定 VOCs 的主要来源. B/T 比值接近于 0.5 反映出机动车排放是 VOCs 的主

要污染源^[2,14],而当 B/T 比值远大于 0.5 时,大气中 VOCs 主要来自石油化工和涂料使用^[15]. 在本次观测中,B/T 比值为 0.81,这与其他一些学者在国内部分城市的观测结果一致^[2,14],这说明除机动车排放是南京大气中 VOCs 的主要来源以外,还存在其他非机动车污染源.

如图 7 所示,为了区分大气 VOCs 来源中机动车和非机动车贡献比例,采用 Chang 等^[26]提出的特



(a) 中直线斜率是 7.5; (b) 中直线斜率是 5.4;

(c) 中直线斜率是 1.5

图 7 乙烯、甲苯和间,对-二甲苯与 3-甲基戊烷散点图

Fig. 7 Mixing ratios of ethene, toluene and *m,p*-xylene versus 3-methyl-pentane in Nanjing

征物示踪法,选取 3-甲基戊烷作为机动车排放典型示踪物,比较乙烯,甲苯和间,对-二甲苯与 3-甲基戊烷比值关系. 图 7 给出了乙烯/3-甲基戊烷,甲苯/3-甲基戊烷,间,对-二甲苯/3-甲基戊烷的散点图. 其中直线是参考相关文献关于机动车排放源中两种物种的比值^[27]. 乙烯主要由工业生产活动排放,此外,机动车燃料不完全燃烧也排放一定量的乙烯. 图 7(a)中乙烯/3-甲基戊烷平均比值是 53.3,是机动车排放中两者比值的 7.1 倍,反映出 85% 的乙烯来自非机动车源. 甲苯来源除了机动车排放以外,溶剂使用和化学合成等过程中也有排放. 从图 7(b)的散点图中计算甲苯/3-甲基戊烷的比值是 18.8,是机动车排放中两者比值的 3.5 倍,反映出 71% 的甲苯来自非机动车源. 间,对-二甲苯除了机动车排放以外,石油化工等企业也有大量排放. 从图 7(c)的散点图中计算间,对-二甲苯/3-甲基戊烷的比值是 8.6,是机动车排放中两者比值的 5.7 倍,反映出 82% 的间,对-二甲苯来自非机动车源. 比较其他研究结果,本次观测结果中这 3 种物种的非机动车来源要高于北京^[28,29]、广州^[30]、上海^[31]等地的研究结果,究其原因,可能由于南京观测点处于南京北部工业密集区,非机动车排放源贡献高于机动车来源.

3 结论

(1) 南京大气总 VOCs 体积分数为 43.52×10^{-9} ,其中烷烃占 45.1%、烯烃占 25.3%、炔烃占 7.3% 和芳香烃占 22.3%. 总 VOCs 体积分数呈现夏季高,冬季低,的季节变化. 各组分中烷烃在冬季最高,烯烃在夏季最高,芳香烃在春季最高,炔烃在春季最高.

(2) VOCs 体积分数呈现明显日变化,夜间较高,白天较低. VOCs 体积分数夜间呈现夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季,白天呈现冬季 > 夏季 > 春季 > 秋季. VOCs 体积分数日变化幅度秋季最大,冬季最小.

(3) VOCs 各组分比例在不同季节存在显著差异,烷烃含量冬季最高(49.80%),烯烃含量夏季最高(28.92%),芳香烃含量春季最高(27.45%),炔烃含量冬季最高(8.11%). VOCs 各组分的日变化幅度存在差异,烷烃和烯烃日变化幅度最大值出现在秋季,芳香烃和炔烃日变幅最大值出现在春季.

(4) 采用丙烯等量体积分数方法表示,VOCs 物种中烯烃含量最高,芳香烃次之,烷烃最小,并且存在季节差异. T/B、E/B 和 X/B 比值平均值分别是

1.23、0.95 和 0.81,反映出影响观测点的气团呈现一定老化程度.

(5) 以 3-甲基戊烷作为机动车排放典型示踪物,比较乙烯、甲苯和间,对-二甲苯与 3-甲基戊烷比值关系. 发现乙烯,甲苯和间,对-二甲苯分别有 85%、71% 和 82% 来自非机动车源,这可能由于南京观测点处于南京北部工业密集区,非机动车排放源有较高贡献.

致谢:感谢南京信息工程大学大气物理实验室全体老师同学为观测实验正常运行所做的辛勤工作.

参考文献:

- [1] Sillman S. The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(12): 1821-1845.
- [2] Duan J C, Tan J H, Yang L, *et al.* Concentration, sources and ozone formation potential of volatile organic compounds (VOCs) during ozone episode in Beijing [J]. *Atmospheric Research*, 2008, **88**(1): 25-35.
- [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] 安俊琳,王跃思,李昕,等. 北京大气中 NO , NO_2 和 O_3 浓度变化的相关性分析[J]. *环境科学*, 2007, **28**(4): 706-711.
- [5] Haagen-Smit A J. Chemistry and physiology of Los Angeles smog [J]. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1952, **44**(6): 1342-1346.
- [6] Xie X, Shao M, Liu Y, *et al.* Estimate of initial isoprene contribution to ozone formation potential in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(24): 6000-6010.
- [7] 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*, 2004, **109**(D24): 24305-24326.
- [8] Blake D R, Rowland F S. Urban leakage of liquefied petroleum gas and its impact on Mexico city air quality [J]. *Science*, 1995, **269**(5226): 953-956.
- [9] Chen T Y, Simpson I J, Blake D R, *et al.* Impact of the leakage of liquefied petroleum gas (LPG) on Santiago air quality [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, **28**(11): 2193-2196.
- [10] Ryerson T B, Trainer M, Angevine W M, *et al.* Effect of petrochemical industrial emissions of reactive alkenes and NO_x on tropospheric ozone formation in Houston, Texas [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(D8): 4249-4272.
- [11] 邵敏,赵美萍,白郁华,等. 北京地区大气中非甲烷碳氢化合物(NMHC)的人为源排放特征研究[J]. *中国环境科学*, 1994, **14**(1): 6-12.
- [12] Wang Y S, Ren X Y, Ji D S, *et al.* Characterization of volatile organic compounds in the urban area of Beijing from 2000 to 2007 [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(1): 95-

- 101.
- [13] 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.
- [14] Liu Y, Shao M, Lu S H, *et al.* Volatile organic Compound (VOC) measurements in the Pearl River Delta (PRD) region, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(6): 1531-1545.
- [15] 王伯光, 张远航, 邵敏. 珠江三角洲大气环境 VOCs 的时空分布特征[J]. *环境科学*, 2004, **25**(增刊): 7-15.
- [16] Guo H, So K L, Simpson I L, *et al.* C₁-C₈ volatile organic compounds in the atmosphere of Hong Kong: Overview of atmospheric processing and source apportionment [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(7): 1456-1472.
- [17] Chameides W L, Fehsenfeld F, Rodgers M O, *et al.* Ozone precursor relationships in the ambient atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**(D5): 6037-6055.
- [18] Atkinson R, Arey J. Atmospheric degradation of volatile organic compounds[J]. *Chemical Reviews*, 2003, **103**(12): 4605-4638.
- [19] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds [J]. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 1994, **44**(7): 881-899.
- [20] Barletta B, Meinardi S, Rowland F S, *et al.* Volatile organic compounds in 43 Chinese cities[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(32): 5979-5990.
- [21] Moschonas N, Glavas S. C₃-C₁₀ hydrocarbons in the atmosphere of Athens, Greece [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(15): 2769-2772.
- [22] Tsujino Y, Kuwata K. Sensitive flame ionization detector for the determination of traces of atmospheric hydrocarbons by capillary column gas chromatography [J]. *Journal of Chromatography*, 1993, **642**(1-2): 383-388.
- [23] National Research Council (NRC). Committee on tropospheric ozone formation and measurement. Rethinking the ozone problem in urban and regional air pollution [M]. Washington, DC: National Academy Press, 1991. 88-92.
- [24] Barletta B, Meinardi S, Simpson I J, *et al.* Mixing ratios of volatile organic compounds (VOCs) in the atmosphere of Karachi, Pakistan [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(21): 3429-3443.
- [25] Derwent R G, Davies T J, Delaney M, *et al.* Analysis and interpretation of the continuous hourly monitoring data for C₂-C₈ hydrocarbons at 12 United Kingdom sites during 1996 [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(2): 297-312.
- [26] Chang C C, Wang J L, Lung S C C, *et al.* Source characterization of ozone precursors by complementary approaches of vehicular indicator and principal component analysis [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(10): 1771-1778.
- [27] Chang C C, Wang J L, Liu S C, *et al.* Assessment of vehicular and non-vehicular contributions to hydrocarbons using exclusive vehicular indicator [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(33): 6349-6361.
- [28] Wang B G, Shao M, Lu S H, *et al.* Variation of ambient non-methane hydrocarbons in Beijing city in summer 2008 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(13): 5911-5923.
- [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**(增刊 I): 123-130.
- [30] Shao M, Zhang Y H, Zeng L M, *et al.* Ground-level ozone in the Pearl River Delta and the roles of VOC and NO_x in its production [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(1): 512-518.
- [31] Geng F H, Zhang Q, Tie X X, *et al.* Aircraft measurements of O₃, NO_x, CO, VOCs, and SO₂ in the Yangtze River Delta region [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(3): 584-593.

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