

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.6
第41卷 第6期

目次

基于SPAMS的天津市夏季环境受体中颗粒物的混合状态及来源..... 林秋菊,徐娇,李梅,王玮,史国良,冯银厂 (2505)

南京北郊降水无机离子和有机酸的化学特征及来源分析..... 杨笑影,曹芳,林煜棋,章炎麟 (2519)

西安市PM_{2.5}中水溶性离子的季节变化特征..... 黄舍舍,王羽琴,李升苹,陈庆彩 (2528)

新疆石化工业区颗粒物含水量和酸度对二次无机组分形成的影响..... 刘会斌,迪丽努尔·塔力甫,王新明,张潇潇,王威,阿布力克木·阿不力孜,买里克扎提·买合木提,刘伟 (2536)

长秋季生物质燃烧对PM_{2.5}中WSOC吸光性的影响..... 孟德友,曹芳,翟晓瑶,张世春,章炎麟 (2547)

2019年5月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源..... 王倩 (2555)

南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析..... 曹梦瑶,林煜棋,章炎麟 (2565)

郑州市春季大气污染过程VOCs特征、臭氧生成潜势及源解析..... 任义君,马双良,王思维,于世杰,李一丹,张瑞芹,尹沙沙 (2577)

上甸子区域背景站VOCs污染特征及其对臭氧生成贡献..... 韩婷婷,李颖若,邱雨露,何迪,王焱,马志强 (2586)

北京市餐饮业大气污染物排放特征..... 孙成一,白画画,陈雪,翟翼飞,高启天,何万清,聂磊,石爱军,李国傲 (2596)

北京市农业机械排放因子与排放清单..... 王凯,樊守彬,亓浩云 (2602)

北京市土壤风蚀扬尘排放因子本地化..... 李贝贝,黄玉虎,毕晓辉,刘李阳,秦建平 (2609)

基于MODIS_C061的长三角地区AOD与Angström指数时空变化分析..... 张颖蕾,崔希民 (2617)

环渤海地区2,4,4'-三氯联苯的多介质归趋模拟..... 张毅,马艳飞,宋帅,吕永龙,张盛,吴强 (2625)

岗南水库沉积物间隙水有色溶解有机物的时空分布特征及差异分析..... 周石磊,孙悦,苑世超,彭瑞哲,刘世崇,岳奇丞,张航,王周强,李再兴,罗晓 (2635)

“河-湖”沉积物重金属环境特征及来源解析..... 李悦昭,陈海洋,孙文超 (2646)

伊通河(城区段)沉积物重金属形态分布特征及风险评价..... 姜时欣,翟付杰,张超,王蒙蒙,单保庆 (2653)

典型岩溶地下河流域水体中硝酸盐源解析..... 赵然,韩志伟,申春华,张水,涂汉,郭永丽 (2664)

沉积物参与下氮磷脉冲式输入对太湖水体营养盐浓度和藻类生长的影响..... 陈洁,许海,詹旭,许笛,朱广伟,朱梦圆,季鹏飞,康丽娟 (2671)

丰水期东洞庭湖超微型浮游藻类时空分布特征及其影响因素..... 李胜男,陈豪宇,彭华,李芸君,朱坚,简燕,纪雄辉 (2679)

胶网藻对水体中恩诺沙星的毒性响应及去除作用..... 王振方,韩子玉,王梦雪,马逸驰,王婷,王丽卿,张玮 (2688)

不同光照和磷水平下两种沉水植物磷富集和钙磷含量的比较..... 桑雨璇,杨珈乐,熊怡,尹文博,汪华,王和云 (2698)

过氧化钙复合片剂对水体修复和底泥磷控制的作用..... 张帅,李大鹏,丁玉琴,徐楚天,许鑫澎,孙培荣,赵哲豪,黄勇 (2706)

基于区域DNDC的稻田轮作氮素空间分异与驱动分析:以晋江流域为例..... 王亚楠,祝伟,祁新华,范水生 (2714)

不同铁锰浓度的低温铁锰氨地下水净化中氨氮去除途径..... 张杰,梅宁,刘孟浩,叶雪松,李冬 (2727)

高晶度Mn-Fe LDH催化剂活化过一硫酸盐降解偶氮染料RBK5..... 李立,吴丽颖,董正玉,王霖,张倩,洪俊明 (2736)

Fe-cyclam/H₂O₂体系催化降解罗丹明B机制..... 余雨清,陈翔宇,蔡权华,黄歆珏,陈曼 (2746)

微生物光电化学池去除硝酸盐氮:以PANl/TiO₂-NTs为光阳极..... 卢忆,周海珊,彭瑞建,叶杰旭,陈建孟,宋爽,张士汉 (2754)

缺氧MBR-MMR处理海水养殖废水性能及膜污染特性..... 陈凡雨,徐仲,尤宏,柳锋,李之鹏,陈其伟,韩红卫 (2762)

HRT对改良式A²/O-BAF反硝化除磷脱氮的影响..... 赵凯亮,刘安迪,南彦斌,梁利民,王云霞,陈永志 (2771)

重金属Ni(II)对厌氧氨氧化脱氮性能的影响及其动力学特征变化..... 孙琪,赵白航,范飒,周邦磊,李玉琪 (2779)

异养硝化-好氧反硝化混合菌对尿素的去及重金属和盐度的影响..... 王萌萌,曹刚,张迪,冯乃亮,潘涌璋 (2787)

火山岩填料曝气生物滤池的SNAD工艺启动特性及功能菌丰度演替..... 薛嘉俊,张绍青,张立秋,李淑更,姚海楠,耿忠轩,李鸿,刘晓玲 (2796)

游离羟胺对两种典型亚硝态氮氧化菌活性的影响..... 沈琛,张树军,彭永臻 (2805)

死菌DNA对厌氧消化污泥中抗生素抗性基因及微生物群落分析的干扰..... 苏宇傲,刘宏波,毛秋燕,张慧旻,张衍,刘和 (2812)

中国农田土壤重金属空间分布特征及污染评价..... 陈文轩,李茜,王珍,孙兆军 (2822)

土壤环境质量预警体系构建与应用..... 李笑诺,丁寿康,陈卫平,王夏晖,吕斯丹,刘睿 (2834)

不同母质发育土壤团聚体分布对外源输入秸秆的响应及其与有机碳矿化的关系..... 毛霞丽,邱志腾,张爽,沈倩,章明奎 (2842)

长期施肥稻田土壤胞外酶活性对底物可利用性的响应特征..... 宁玉菲,魏亮,魏晓梦,祝贞科,袁红朝,葛体达,吴金水 (2852)

生物质炭对磷富集土壤中两种元素生物有效性及作物镉积累的影响..... 黄洋,郭晓,胡学玉 (2861)

基于田块尺度的农田土壤和小麦籽粒镉铅污染特征及健康风险评价..... 肖冰,薛培英,韦亮,刘成程,高培培,樊利敏,杜佳燕,刘文菊 (2869)

重构土壤垂直剖面重金属Cd赋存形态及影响因素..... 胡青青,沈强,陈飞,尹炳,邹宏光,庄红娟,张世文 (2878)

新乡市镉污染土壤细菌群落组成及其对镉固定效果..... 陈兆进,李英军,邵洋,林立安,徐鸽,陈彦,田伟,姚伦广,韩辉 (2889)

三峡消落带适生植物根系活动调控土壤养分与细菌群落多样性特征..... 李丽娟,李昌晓,陈春桦,杨治华,陈雪梅 (2898)

滇池水中细菌和古菌氮代谢功能基因的空间分布..... 张宇,左剑恶,王丝可,Alisa Salimova,李爱军,李玲玲 (2908)

模拟升温对冰川前缘地微生物种群的影响..... 王愉琬,马安周,种国双,谢飞,周汉昌,刘国华,庄国强 (2918)

水肥气耦合对温室番茄土壤N₂O排放及番茄产量的影响..... 商子惠,蔡焕杰,陈慧,孙亚楠,李亮,朱艳,王晓云 (2924)

矸石山及其周边村庄土壤浸出液对大麦的毒性作用..... 尚誉,杨丰隆,宁夏,董轶茹,桑楠 (2936)

海南省昌化江河口海域生物体中多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评价..... 汪慧娟,旷泽行,周贤,覃晓青,黄洪辉 (2942)

春季北京市河流大型底栖动物群落结构特征及影响因素分析..... 贺玉晓,李珂,任玉芬,王思琪,方文颖 (2951)

热解温度和时问对香蒲生物炭性质的影响及生态风险评估..... 蔡朝卉,楚沉静,郑浩,罗先香,李锋民 (2963)

长江经济带交通碳排放测度及其效率格局(1985~2016年)..... 蒋自然,金环环,王成金,叶士琳,黄艳豪 (2972)

《环境科学》征订启事(2595) 《环境科学》征稿简则(2687) 信息(2697,2713,2811)

南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析

曹梦瑶^{1,2}, 林煜棋^{1,2,3*}, 章炎麟^{1,2,3*}

(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 耶鲁大学-南京信息工程大学大气环境中心, 气候与环境变化国际合作联合实验室, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044; 3. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室, 南京 210044)

摘要: 2018年秋季在南京利用大气挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)吸附浓缩在线监测系统(AC-GCMS 1000)对大气VOCs进行连续观测,以了解其化学特征、臭氧生成潜势和污染来源。结果表明,南京秋季大气VOCs体积分数为 $(64.3 \pm 45.6) \times 10^{-9}$,以烷烃(33.1%)、含氧挥发性有机物(OVOCs)(22.3%)及卤代烃(21.8%)为主。VOCs的昼夜变化呈“双峰型”变化特征,高值主要出现在清晨的06:00~07:00及夜间的18:00~20:00,主要受机动车排放及气象要素的共同影响。秋季南京VOCs的臭氧生成潜势(ozone formation potential, OFP)为 $267.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,主要贡献物种是芳香烃类化合物(55.2%)和烯烃类化合物(20.8%)。PMF受体模型源解析确定5个VOCs来源,分别是交通排放(34%)、工业排放(19%)、LPG排放(17%)、涂料及有机溶剂挥发(16%)以及生物质燃烧和燃煤排放(14%),因此控制南京工业区秋季大气污染应主要着力于交通及工业排放的治理。

关键词: 南京; 挥发性有机物(VOCs); 污染特征; 臭氧生成潜势(OFP); 来源解析

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)06-2565-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201910154

Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in the Nanjing Industrial Area in Autumn

CAO Meng-yao^{1,2}, LIN Yu-chi^{1,2,3*}, ZHANG Yan-lin^{1,2,3*}

(1. International Joint Laboratory on Climate and Environment Change (ILCEC), Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environmental Monitoring and Pollution Control, School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Atmospheric volatile organic compounds (VOCs) were continuously monitored via an online GC-FID/MS system in Nanjing during the autumn of 2018 to analyze the chemical characteristics, ozone formation potential (OFP), and potential sources of VOCs in this industrial region. During the sampling period, the average concentration of atmospheric total VOCs (TVOCs) was $(64.3 \pm 45.6) \times 10^{-9}$. Alkanes were the most predominant VOC compound, accounting for 33.1% of the TVOC mass, followed by oxygenated volatile organic compounds (OVOCs, 22.3%) and halogenated hydrocarbons (21.8%). The diurnal cycles of VOCs revealed “bimodal” distributions. The higher concentrations of VOCs observed at 06:00-07:00 and 18:00-20:00 were attributed to the intense traffic emissions and meteorological conditions. Furthermore, maximum incremental reaction (MIR) analysis was used to estimate OFP of VOCs. The results showed that the calculated OFP in Nanjing was $267.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. Aromatic hydrocarbons and alkenes were the dominant contributors to OFPs, which accounted for 55.2% and 20.8% to the total OFPs, respectively. Finally, five potential sources of VOCs were quantified by the positive matrix factorization model, including traffic emissions (34%), industrial emissions (19%), liquefied petroleum gas (LPG) emissions (17%), usage of paints and solvents (16%), coal combustion, and biomass burning (14%). These findings suggested that control of vehicle emissions and industrial sources would be an important way to reduce VOC concentrations and improve air quality in Nanjing.

Key words: Nanjing; volatile organic compounds (VOCs); pollution level; ozone formation potential (OFP); source apportionment

由于城市工业化的快速发展及交通网络的大幅扩张,城市地区的空气污染日渐严重,大气中的挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)浓度大幅上升^[1]. VOCs作为大气污染物的重要组成,是大气光化学反应的重要参与者,对于对流层臭氧的形成与人类健康的危害有重要作用^[2,3]. 随着城市的迅速发展,各地的大气氧化性均有不同程度的增强,使得臭氧成为继PM_{2.5}之后的另一区域性重要污染物,而臭氧的形成主要是人类活动排放的NO_x和

VOCs在大气中进行光化学反应生成. 因此分析研究VOCs的浓度、组成特征及其污染来源对于制定高效的大气污染治理策略有重要的指导意义.

收稿日期: 2019-10-22; 修订日期: 2019-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977305); 国家自然科学基金委国际合作与交流项目(41761144056); 江苏省自然科学基金杰出青年基金项目(BK20180040); 江苏省双创团队基金项目

作者简介: 曹梦瑶(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气环境, E-mail: 20181208002@nuist.edu.cn

* 通信作者, E-mail: yclin1226@outlook.com; dryanlinzhang@outlook.com

大气中的 VOCs 来源主要分为人为源和天然源,城市地区的 VOCs 主要是人类活动产生,农村地区主要来自生物排放^[4].从全球尺度看,VOCs 的天然排放量远大于人为排放量,有研究表明,天然源的 VOCs 排放量约占总排放量的 91.9%,人为源仅占 8.1%^[5].但由于城市扩张及经济发展的需要,在人类活动密集的区域,VOCs 的人为排放量远超天然排放量^[6].

目前国内关于 VOCs 污染特征的研究主要集中在东部地区如长江三角洲^[7~9]、珠江三角洲^[10~13]及华北平原^[14~17]等经济发达和人口密集的城市群.南京地处中国东部、长江下游,作为江苏省的省会城市,是长三角辐射带动中西部地区发展的国家重要门户城市,也是长江经济带与东部沿海经济带战略交汇的重要节点.随着人口的增加和经济的飞速发展,南京的空气污染已经成为影响公众环境的主要问题之一.有研究表明工业活动的增强及汽车普及率的提升是南京大气污染严重的主要原因^[18].要想制定有效的 VOCs 控制策略,首先必须确定大气中 VOCs 的含量、组成特征及污染源.本研究对南京秋季大气 VOCs 进行连续在线观测,利用最大增量反应活性因子(MIR)评估臭氧生成潜势,并利用正交矩阵因子受体模型(PMF)进行 VOCs 源解析,以期能为南京秋季大气污染的防治工作提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 采样点及采样时间

本研究采样时间为 2018 年 9 月 16 日至 10 月 7 日,共计 22 d.采样地点位于南京市浦口区南京信息工程大学文德楼顶(32°20'E, 118°72'N,海拔高度:62 m).采样点以北和以东 3~6 km 有石油化工厂、炼钢厂和化工厂等工业区,以东和以西毗邻公路和高速等交通要道,以南有森林覆盖区,西北方有农田,采样点周围分布居民区(图 1).工业排放、交通排放、居民生活排放及生物排放等造成了该区域 VOCs 污染的多样性.

1.2 样品采集和分析方法

本采样点采用大气 VOCs 吸附浓缩在线监测系统(AC-GCMS 1000, 禾信),通过捕集、聚焦、解析和反吹这 4 个过程完成样品的捕集进样.环境空气或标准气体等样品被捕集后自动选取分入两个通道(即 FID 通道和 MS 通道),进入第一级超低温捕集管(-160℃),将 N₂ 和 O₂ 等空气背景组分排出捕集管,实现 VOCs 的第一级捕集和富集.当捕集量达到设定值后,系统自动将 FID 和 MS 通道第一级捕集管快速升温(FID 升温至 -40℃,MS 升温至



A:扬子石化;B:农田;C:南化;D:盘城工业区;E:南钢;
F:森林覆盖区;G:丁解工业园;H:高新开发区;红点:工厂
图 1 采样点地理位置示意

Fig. 1 Geographical location of the sampling site

40℃),使 VOCs 气化进入每个通道的第二级聚焦管,实现 VOCs 二级超低温聚焦(-160℃)和进一步浓缩富集及脱水干燥.二级聚焦过程完成后,两个通道的二级聚焦管与分析系统直接连接,聚焦管快速升温(以 50℃·s⁻¹的速度升温至 170℃)将样品快速加热气化,GC 载气流过聚焦管将样品带入相应的色谱柱(GC-FID 和 GC-MS)完成在线定性与定量分析.解吸进样后,FID 和 MS 通道的第一级捕集管和二级聚焦管重新连通,并加热至 180℃,同时利用氮气对整个捕集气路进行反吹,将残留管路中的水汽和杂质等吹出系统.低碳组分(C₂~C₄)通过 FID 进行定量分析,其余高碳组分的 VOCs,包括碳数较高的烷烃、烯烃、炔烃、卤代烃、芳香烃及含氧挥发性有机物(OVOCs)则通过 MS 进行在线定性与定量分析^[19].

1.3 臭氧生成潜势的计算方法

臭氧生成潜势(ozone formation potential, OFPs)是评价 VOCs 对臭氧生成影响的一个重要参数,本研究采用最大增量反应活性(MIR)因子来估算大气中 VOCs 的 OFP.其计算方法为将 VOCs 的浓度乘以相应的最大增量反应活性因子,计算公式如下:

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

式中,OF_{P_i}为第*i*种 VOCs 的臭氧生成潜势,μg·m⁻³;MIR_{*i*}为第*i*种 VOCs 的最大增量反应活性,以 O₃/VOCs 计,g·g⁻¹,计算时 MIR 采用 Carter^[20]研究中的系数;[VOC]_{*i*}为大气中第*i*种 VOCs 的浓度,μg·m⁻³.

1.4 PMF 受体模型

PMF 受体模型是一种基于对大量观测数据进行分析的多元分析工具,广泛应用于对大气污染物主

要来源的解析^[21]. 本研究使用的是由美国环境保护局开发的 PMF5.0 对秋季 VOCs 进行来源解析. PMF 需要两个输入文件: ①物种浓度矩阵; ②浓度不确定性矩阵. 在污染源解析前, 需将原数据中低于检出限的物质浓度用 1/2 倍检出限替换, 低于检出限浓度的物质不确定度(Unc)用 5/6 倍检出限替换, 若浓度大于检出限, 则不确定度的计算公式如下:

$$\text{Unc} = \sqrt{(c \times \text{Error Fraction})^2 + (0.5 \times \text{MDL}_i)^2} \quad (2)$$

式中, c 为物种浓度; Error Fraction 为推估标准偏差的百分比; MDL_i 为第 i 个组分的方法检出限.

将包含浓度与不确定度数据的文件输入 PMF5.0 模型中, 用信噪比(S/N)判断物种是否适合放入模型分析^[22], 信噪比的定义如下:

$$\frac{S}{N} = \left(\frac{1}{2} \right) \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}{\sum_{i=1}^n s_{ij}^2}} \quad (3)$$

式中, x_{ij} 为第 i 个样品中第 j 个物种的体积分数, 10^{-9} ; s_{ij} 为第 i 个样品中第 j 个物种的标准偏差. 若 S/N 小于 0.5, 代表该物种对解析结果有不良影响, 应剔除; 若 S/N 在 0.5 ~ 1.0 之间, 将该物种设为“weak”, 此时模型预设将该物种的标准偏差(即不确定度)乘以 3 倍; 若 S/N 大于 1.0, 物种设为“strong”, 可直接放入模型进行分析.

此外, 将样品数据分解为因子贡献矩阵和因子源谱矩阵乘积, 依靠目标函数 Q 值来缩小残差和不确定性^[23], 计算公式如下:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\frac{\sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj}}{u_{ij}} \right] \quad (4)$$

式中, g_{ik} 为第 k 个来源对第 i 个样本的贡献, %; f_{kj} 为第 k 个来源中第 j 个组分的占比, %; e_{ij} 表示第 i 个样本中第 j 个组分的残差; n 和 m 分别为样本数量和物种数量; u_{ij} 为第 i 个样本中第 j 个物种的不确定性.

为了充分考虑可能的污染来源, 通过比较模型提供的 Q_{true} 与计算得到的 Q_{expected} 的偏差进行因子数的判定, 选取偏差值最小即最优的结果, Q_{expected} 计算公式如下:

$$Q_{\text{expected}} = (n \times \text{“strong”} m) - [(a \times n) + (a \times m)] \quad (5)$$

式中, n 为样本量; m 为物种数量; “strong” m 为信噪比大于 1.0 的物种数量; a 为因子数.

2 结果与讨论

2.1 VOC 的浓度及组成特征

本研究针对 82 种 VOCs 物质, 包括烷烃 20 种、烯烃 8 种、炔烃 1 种、芳香烃 17 种、卤代烃 22 种、含

氧挥发性有机物(OVOCs) 13 种及含硫化合物 1 种进行体积分数特征的描述. 表 1 列出了观测期间 82 种 VOCs 的体积分数水平, 结果表明, 采样期间南京大气中总 VOCs(TVOCs) 体积分数在 10.9×10^{-9} ~ 300.9×10^{-9} 之间, 平均体积分数为 $(64.3 \pm 45.6) \times 10^{-9}$, 各类 VOCs 体积分数依次为: 烷烃 $(21.3 \pm 23.0) \times 10^{-9}$ 、OVOCs $(14.3 \pm 9.6) \times 10^{-9}$ 、卤代烃 $(14.0 \pm 12.6) \times 10^{-9}$ 、芳香烃 $(8.0 \pm 6.3) \times 10^{-9}$ 、烯烃 $(4.47 \pm 6.0) \times 10^{-9}$ 、炔烃 $(1.45 \pm 1.0) \times 10^{-9}$ 及含硫化合物 $(0.7 \pm 1.0) \times 10^{-9}$.

表 2 为 VOCs、污染物及气象要素的相关性, 图 2(a) 和 2(b) 为气象参数(温度、相对湿度、风速、风向)、 NO_x 及臭氧的时间序列. 观测期间主导风向为西北风, 温度和相对湿度之间及臭氧和 NO_x 之间存在明显的负相关关系, 臭氧体积分数的高峰时段为相对湿度较低、温度较高、太阳辐射较强的时候, 通常这种气象条件有利于大气光化学反应的发生. 图 2(c) 和图 2(d) 显示了总挥发性有机物(TVOCs, 82 种 VOCs 浓度总和)的时间序列及不同种类 VOCs 的占比情况. 当大气中的 VOCs 与 NO_x 浓度累积到一定水平时, 随着大气光化学反应的进行, 臭氧浓度逐渐增加, VOCs 及 NO_x 的浓度随之逐步降低. TVOCs 浓度变化趋势与风速相反, 表明气象条件, 尤其是风速对于 VOCs 的积累和扩散起着重要的作用.

图 3 为各 VOCs 组分的占比情况, 各物种所占 TVOCs 的百分比依次为烷烃(33%)、OVOCs(22%)、卤代烃(22%)、芳香烃(13%)、烯烃(7%)、炔烃(2%) 和含硫化合物(1%). 图 4 所示, 平均体积分数前 15 的物质依次是: 乙烷 $[(8.8 \pm 15.9) \times 10^{-9}]$ 、乙醇 $[(4.6 \pm 4.9) \times 10^{-9}]$ 、丙烷 $[(4.5 \pm 4.4) \times 10^{-9}]$ 、乙烯 $[(3.3 \pm 4.6) \times 10^{-9}]$ 、氯苯 $[(3.2 \pm 8.3) \times 10^{-9}]$ 、异丙醇 $[(3.0 \pm 2.9) \times 10^{-9}]$ 、1,2-二氯乙烷 $[(2.8 \pm 2.1) \times 10^{-9}]$ 、丙酮 $[(2.6 \pm 1.6) \times 10^{-9}]$ 、二氯甲烷 $[(2.5 \pm 2.5) \times 10^{-9}]$ 、正丁烷 $[(2.3 \pm 1.9) \times 10^{-9}]$ 、1,2-二氯丙烷 $[(1.8 \pm 3.0) \times 10^{-9}]$ 、乙炔 $[(1.5 \pm 1.0) \times 10^{-9}]$ 、甲苯 $[(1.3 \pm 1.4) \times 10^{-9}]$ 、苯 $[(1.3 \pm 1.9) \times 10^{-9}]$ 和异戊烷 $[(1.2 \pm 1.6) \times 10^{-9}]$, 这些物质体积分数累积对 TVOCs 的贡献率超过 70%, 说明南京秋季大气中 VOCs 的优势物种为 C2 ~ C5 烷烯炔、OVOCs 及卤代烃.

本研究以南京秋季臭氧体积分数的中位数为划分标准, 将 VOCs 分为高、低臭氧值污染时期, 分析对比二者 VOCs 的组成特征差异. 图 5 反映了南京秋季高低臭氧污染时期 VOCs 化学组成的变化特征.

表 1 南京秋季大气 VOCs 各物质体积分数及 OFPs 统计结果

Table 1 Statistical concentration of VOCs and OFPs in Nanjing during the sampling period in autumn

| 类别 | 化合物名称 | 平均值 $\times 10^{-9}$ | 标准差 $\times 10^{-9}$ | 最大值 $\times 10^{-9}$ | 最小值 $\times 10^{-9}$ | MIR $/g \cdot g^{-1}$ | OFP $/\mu g \cdot m^{-3}$ | OFP 占比 /% | |
|-----|------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|--------------|-------|
| 烷烃 | 乙烷 | 8.85 | 15.95 | 113.22 | 0.96 | 0.25 | 2.97 | 1.11 | |
| | 丙烷 | 4.53 | 4.45 | 30.43 | 0.40 | 0.48 | 4.28 | 1.60 | |
| | 异丁烷 | 1.06 | 0.71 | 5.49 | 0.19 | 1.21 | 3.32 | 1.24 | |
| | 正丁烷 | 2.28 | 1.90 | 14.02 | 0.27 | 1.02 | 6.03 | 2.26 | |
| | 异戊烷 | 1.24 | 1.57 | 12.66 | 0.12 | 1.38 | 5.51 | 2.06 | |
| | 正戊烷 | 0.83 | 1.00 | 7.29 | 0.08 | 1.04 | 2.79 | 1.04 | |
| | 2,3-二甲基丁烷 | 0.28 | 0.30 | 2.59 | 0.11 | 1.07 | 1.16 | 0.43 | |
| | 2-甲基戊烷 | 0.10 | 0.16 | 1.75 | 0.04 | 1.50 | 0.55 | 0.21 | |
| | 环戊烷 | 0.13 | 0.16 | 1.31 | 0.06 | 2.40 | 1.01 | 0.38 | |
| | 3-甲基戊烷 | 0.29 | 0.29 | 1.81 | 0.04 | 1.50 | 1.70 | 0.64 | |
| | 正己烷 | 0.26 | 0.36 | 2.53 | 0.05 | 0.98 | 0.97 | 0.36 | |
| | 甲基环戊烷 | 0.13 | 0.18 | 2.05 | 0.05 | 2.80 | 1.36 | 0.51 | |
| | 2-甲基己烷 | 0.11 | 0.20 | 1.68 | 0.04 | 1.08 | 0.51 | 0.19 | |
| | 环己烷 | 0.41 | 1.13 | 10.32 | 0.04 | 1.28 | 1.96 | 0.73 | |
| | 3-甲基己烷 | 0.08 | 0.11 | 1.26 | 0.05 | 1.40 | 0.52 | 0.19 | |
| | 甲基环己烷 | 0.11 | 0.09 | 1.14 | 0.09 | 1.80 | 0.87 | 0.33 | |
| | 正辛烷 | 0.08 | 0.09 | 1.16 | 0.06 | 0.60 | 0.24 | 0.09 | |
| | 癸烷 | 0.06 | 0.09 | 1.16 | 0.05 | 0.46 | 0.18 | 0.07 | |
| | 十一烷 | 0.16 | 0.09 | 0.92 | 0.02 | 0.42 | 0.48 | 0.18 | |
| | 十二烷 | 0.30 | 0.14 | 1.73 | 0.07 | 0.38 | 0.88 | 0.33 | |
| 合计 | | 21.29 | 22.95 | 147.53 | 3.52 | — | 37.30 | 13.96 | |
| 烯烃 | 乙烯 | 3.31 | 4.63 | 33.92 | 0.19 | 7.40 | 30.71 | 11.50 | |
| | 丙烯 | 0.45 | 1.23 | 12.72 | 0.03 | 9.40 | 7.88 | 2.95 | |
| | 反-2-丁烯 | 0.07 | 0.10 | 0.97 | 0.04 | 10.00 | 1.79 | 0.67 | |
| | 顺-2-丁烯 | 0.20 | 0.16 | 1.88 | 0.06 | 10.00 | 4.92 | 1.84 | |
| | 1-戊烯 | 0.13 | 0.21 | 1.70 | 0.04 | 6.20 | 2.55 | 0.96 | |
| | 反-2-戊烯 | 0.08 | 0.14 | 1.59 | 0.04 | 8.80 | 2.23 | 0.83 | |
| | 异戊二烯 | 0.16 | 0.18 | 1.41 | 0.07 | 9.10 | 4.38 | 1.64 | |
| | 1-己烯 | 0.07 | 0.11 | 1.27 | 0.05 | 4.40 | 1.15 | 0.43 | |
| | 合计 | | 4.47 | 6.04 | 43.39 | 0.60 | — | 55.60 | 20.81 |
| 炔烃 | 乙炔 | 1.45 | 1.01 | 6.68 | 0.08 | 0.50 | 0.85 | 0.32 | |
| 芳香烃 | 苯 | 1.25 | 1.86 | 16.56 | 0.11 | 0.42 | 1.83 | 0.69 | |
| | 甲苯 | 1.31 | 1.37 | 16.25 | 0.06 | 2.70 | 14.55 | 5.45 | |
| | 乙苯 | 0.70 | 0.76 | 7.51 | 0.04 | 2.70 | 8.90 | 3.33 | |
| | 间/对-二甲苯 | 0.69 | 0.85 | 8.51 | 0.05 | 7.40 | 24.24 | 9.07 | |
| | 邻-二甲苯 | 0.70 | 0.73 | 6.63 | 0.03 | 6.50 | 21.42 | 8.02 | |
| | 苯乙烯 | 0.43 | 0.68 | 5.91 | 0.04 | 2.20 | 4.35 | 1.63 | |
| | 异丙苯 | 0.10 | 0.11 | 1.07 | 0.04 | 2.20 | 1.22 | 0.46 | |
| | 正丙苯 | 0.14 | 0.12 | 1.15 | 0.02 | 2.10 | 1.62 | 0.61 | |
| | 1-乙基-3-甲基苯 | 0.31 | 0.26 | 3.57 | 0.02 | 7.39 | 12.42 | 4.65 | |
| | 对-乙基甲苯 | 0.09 | 0.10 | 0.98 | 0.07 | 4.39 | 2.08 | 0.78 | |
| | 1,3,5-三甲苯 | 0.09 | 0.13 | 1.16 | 0.03 | 10.10 | 4.66 | 1.75 | |
| | 1-乙基-2-甲基苯 | 0.10 | 0.14 | 1.51 | 0.03 | 5.54 | 3.03 | 1.14 | |
| | 1,2,4-三甲苯 | 0.29 | 0.25 | 3.15 | 0.06 | 8.80 | 13.56 | 5.08 | |
| | 1,2,3-三甲苯 | 0.21 | 0.13 | 1.40 | 0.05 | 8.90 | 10.16 | 3.80 | |
| | 1,3-二乙基苯 | 0.24 | 0.11 | 0.82 | 0.08 | 7.08 | 9.98 | 3.74 | |
| | 对-二乙苯 | 0.20 | 0.09 | 0.83 | 0.07 | 4.39 | 5.20 | 1.95 | |
| | 萘 | 1.21 | 1.28 | 10.25 | 0.06 | 1.17 | 8.12 | 3.04 | |
| | 合计 | | 8.05 | 6.28 | 38.19 | 1.08 | — | 147.35 | 55.16 |

续表 1

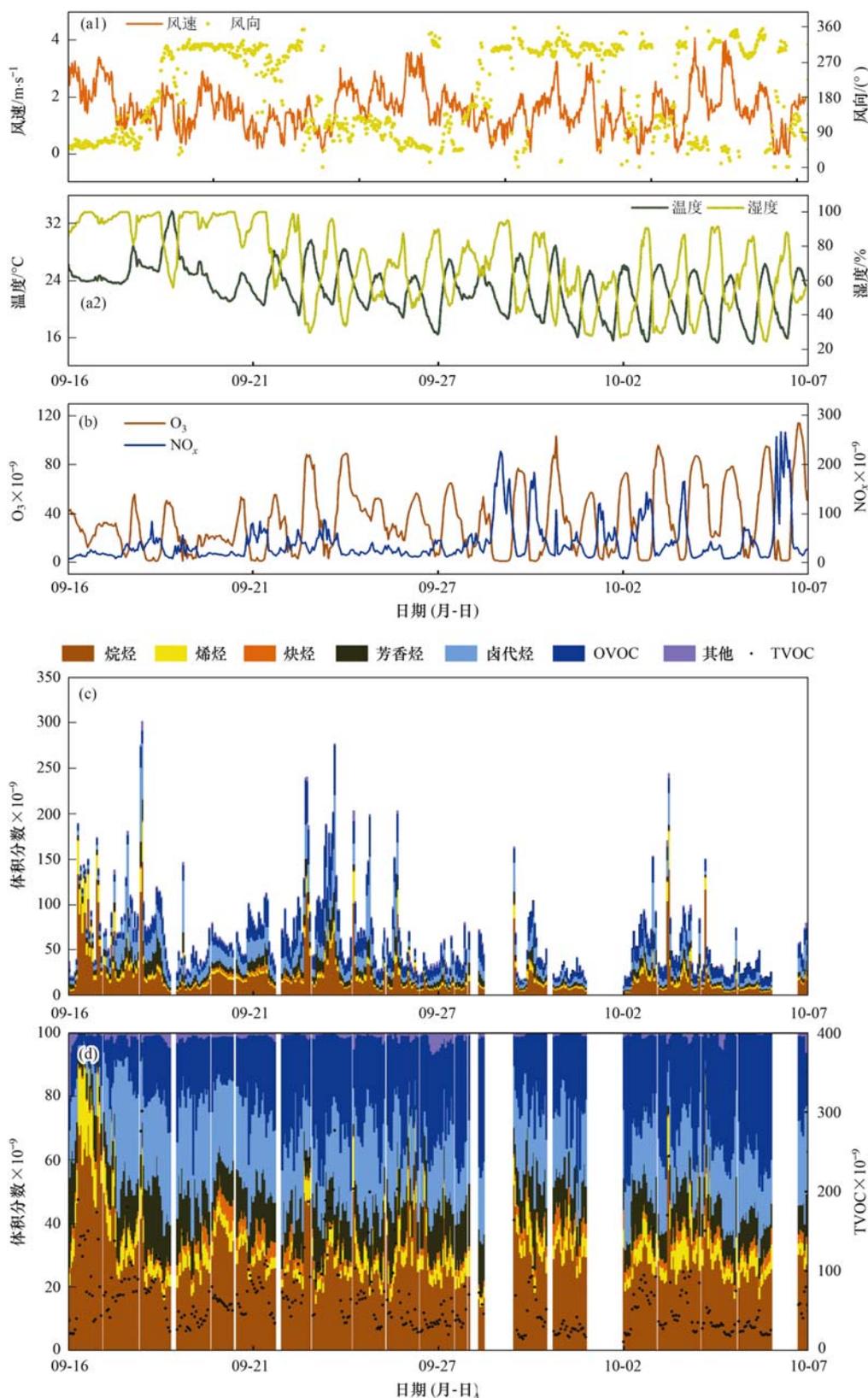
| 类别 | 化合物名称 | 平均值 $\times 10^{-9}$ | 标准差 $\times 10^{-9}$ | 最大值 $\times 10^{-9}$ | 最小值 $\times 10^{-9}$ | MIR $/g \cdot g^{-1}$ | OFP $/\mu g \cdot m^{-3}$ | OFP 占比 /% |
|-------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|--------------|
| | 一氯甲烷 | 0.31 | 0.38 | 2.35 | 0.07 | — | — | — |
| | 一溴甲烷 | 0.07 | 0.15 | 1.68 | 0.03 | — | — | — |
| | 一氟三氯甲烷 | 0.19 | 0.13 | 1.40 | 0.08 | — | — | — |
| | 二氯甲烷 | 2.52 | 2.49 | 19.16 | 0.32 | — | — | — |
| | 顺-1,2-二氯乙烯 | 0.06 | 0.10 | 1.32 | 0.03 | — | — | — |
| | 三氯甲烷 | 0.54 | 0.60 | 7.06 | 0.04 | — | — | — |
| | 四氯化碳 | 0.20 | 0.12 | 1.34 | 0.07 | — | — | — |
| | 1,2-二氯乙烷 | 2.81 | 2.11 | 10.56 | 0.14 | — | — | — |
| | 三氯乙烯 | 0.11 | 0.13 | 1.24 | 0.06 | — | — | — |
| | 1,2-二氯丙烷 | 1.81 | 2.98 | 32.76 | 0.12 | — | — | — |
| 卤代烃 | 反-1,3-二氯-1-丙烯 | 0.09 | 0.10 | 1.30 | 0.07 | — | — | — |
| | 顺-1,3-二氯-1-丙烯 | 0.13 | 0.08 | 1.09 | 0.12 | — | — | — |
| | 1,1,2-三氯乙烷 | 0.17 | 0.39 | 5.59 | 0.03 | — | — | — |
| | 四氯乙烯 | 0.08 | 0.10 | 1.14 | 0.06 | — | — | — |
| | 氯苯 | 3.18 | 8.28 | 71.71 | 0.03 | — | — | — |
| | 对称四氯乙烷 | 0.03 | 0.08 | 0.97 | 0.01 | — | — | — |
| | 1,3-二氯苯 | 0.06 | 0.11 | 0.78 | 0.01 | — | — | — |
| | 对-二氯苯 | 0.93 | 0.95 | 5.92 | 0.06 | — | — | — |
| | 苜基氯 | 0.12 | 0.03 | 0.48 | 0.08 | — | — | — |
| | 邻-二氯苯 | 0.34 | 0.52 | 5.18 | 0.02 | — | — | — |
| | 1,2,4-三氯苯 | 0.06 | 0.08 | 0.58 | 0.01 | — | — | — |
| | 1,1,2,3,4,4-六氯-1,3-丁二烯 | 0.19 | 0.21 | 1.11 | 0.02 | — | — | — |
| | 合计 | 14.02 | 12.58 | 102.53 | 2.35 | — | — | — |
| | 乙醇 | 4.58 | 4.88 | 38.07 | 0.22 | 1.34 | 12.63 | 4.73 |
| | 异丙醇 | 3.04 | 2.89 | 17.40 | 0.09 | 0.54 | 4.41 | 1.65 |
| | 丙烯醛 | 0.10 | 0.15 | 1.53 | 0.05 | — | — | — |
| | 丙酮 | 2.64 | 1.59 | 21.18 | 0.04 | 0.56 | 3.83 | 1.43 |
| | 2-丁酮 | 1.04 | 0.74 | 4.79 | 0.16 | 1.18 | 3.94 | 1.47 |
| | 4-甲基-2-戊酮 | 0.45 | 0.63 | 8.75 | 0.11 | — | — | — |
| | 2-己酮 | 0.24 | 0.07 | 1.06 | 0.14 | — | — | — |
| OVOCs | 甲基叔丁基醚 | 0.50 | 0.71 | 6.70 | 0.05 | 0.62 | 1.22 | 0.46 |
| | 乙酸乙烯酯 | 0.26 | 0.37 | 2.72 | 0.04 | — | — | — |
| | 乙酸乙酯 | 1.06 | 0.95 | 7.48 | 0.25 | — | — | — |
| | 四氢呋喃 | 0.07 | 0.14 | 2.22 | 0.04 | — | — | — |
| | 甲基丙烯酸甲酯 | 0.26 | 0.09 | 1.23 | 0.09 | — | — | — |
| | 1,4-二氧六环 | 0.12 | 0.08 | 1.18 | 0.04 | — | — | — |
| | 合计 | 14.35 | 9.62 | 68.06 | 2.20 | — | 26.03 | 9.75 |
| 含硫化合物 | 二硫化碳 | 0.70 | 1.04 | 10.57 | 0.04 | — | — | — |
| TVOC | | 64.33 | 45.55 | 300.91 | 10.88 | — | 267.12 | 100.00 |

表 2 VOCs、污染物及气象要素的相关性¹⁾

Table 2 Correlations matrix of TVOCs, air pollutants, and meteorological parameters

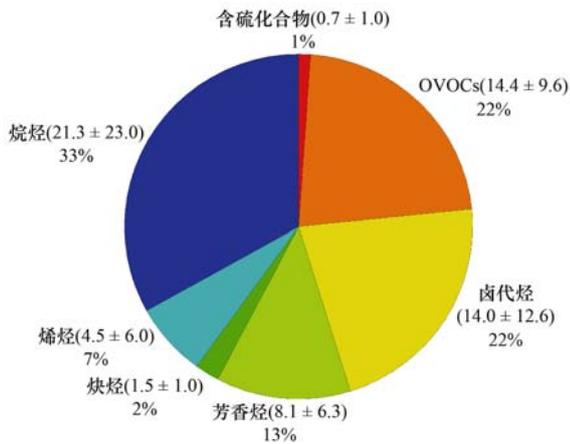
| | TVOC | O ₃ | NO _x | 温度 | 湿度 | 风速 | 风向 |
|-----------------|-----------|----------------|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| TVOC | 1 | -0.213 ** | 0.226 ** | 0.056 | 0.257 ** | -0.252 ** | -0.220 ** |
| O ₃ | -0.213 ** | 1 | -0.503 ** | 0.536 ** | -0.727 ** | 0.523 ** | -0.311 ** |
| NO _x | 0.226 ** | -0.503 ** | 1 | -0.457 ** | 0.176 ** | -0.538 ** | 0.220 ** |
| 温度 | 0.056 | 0.536 ** | -0.457 ** | 1 | -0.243 ** | 0.308 ** | -0.269 ** |
| 湿度 | 0.257 ** | -0.727 ** | 0.176 ** | -0.243 ** | 1 | -0.232 ** | 0.176 ** |
| 风速 | -0.252 ** | 0.523 ** | -0.538 ** | 0.308 ** | -0.232 ** | 1 | -0.265 ** |
| 风向 | -0.220 ** | -0.311 ** | 0.220 ** | -0.269 ** | 0.176 ** | -0.265 ** | 1 |

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

图2 气象参数、NO_x、臭氧及 VOCs 时间序列Fig. 2 Time series of meteorological parameters and concentrations of NO_x, O₃, and VOCs in Nanjing during the sampling period

在高臭氧污染时期,所有 VOCs 中仅卤代烃和 OVOCs 的体积分数和百分比高于低臭氧污染时期,而烷烃、烯烃、炔烃和芳香烃的体积分数和百分比在高臭氧污染时期均略低于低臭氧污染时期,由于大

部分烯烃和炔烃的化学活性较其他 VOCs 物种更为活泼^[24],推测在高臭氧污染时期,大气氧化能力较强,因此烯烃和炔烃可能与较多的 OH 自由基发生光化学氧化而损耗。



括号中表示各 VOCs 组分的体积分数,单位: $\times 10^{-9}$

图3 南京秋季各 VOCs 组分占比

Fig. 3 Relative abundances of different categorized VOCs to the TVOCs in Nanjing during the autumn sampling period

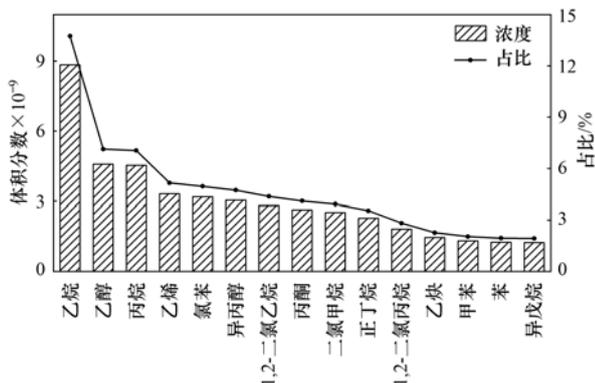


图4 南京秋季大气中的主要 VOCs 物种

Fig. 4 Concentrations of the dominant VOCs species in Nanjing during the autumn sampling period

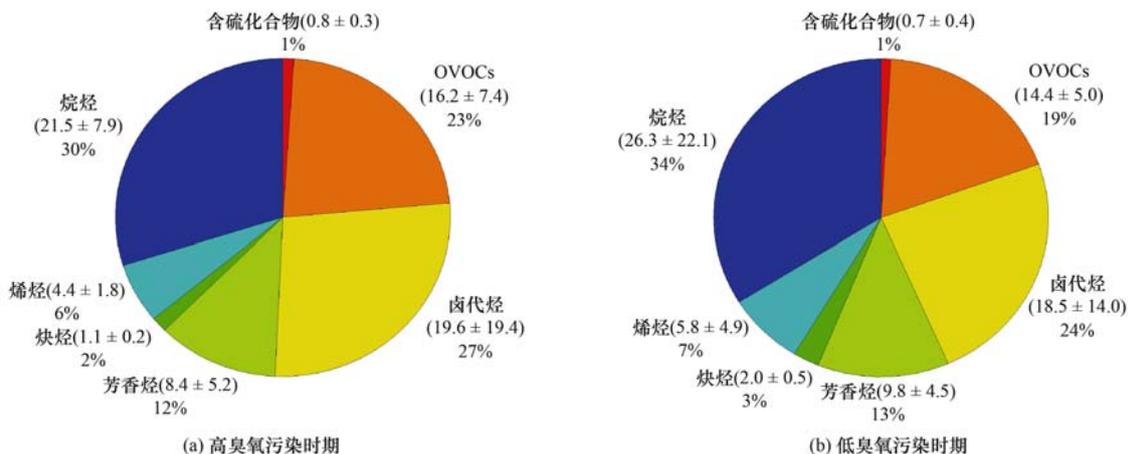
2.2 VOCs 的日变化规律

监测期间各类 VOCs、臭氧、NO_x 及气象要素等的昼夜变化如图 6 所示。TVOCs 体积分数的昼夜变化基本呈“双峰型”变化。日间 VOCs 峰值的出现时间为 06:00 ~ 07:00, 同时间 NO 及 NO_x 的峰值出

现,说明白天 VOCs 的峰值可能主要来源于交通污染源的贡献。此后,随着温度的升高和太阳辐射的增强,大气光化学反应随之增强,VOCs 逐渐转化生成臭氧,并且随着风速的增大,边界层高度的升高,污染物扩散速度加快,TVOCs 体积分数逐渐下降,至 15:00 前后达到最低值。然而,在 18:00 ~ 20:00 期间 TVOCs 再次出现峰值,此时 NO 及 NO_x 的体积分数逐渐上升,且温度和风速逐渐下降,光化学反应减弱,边界层高度降低,这样的气象要素更有利于大气污染物的累积,因此在交通污染源和气象要素的共同作用下,TVOCs 的体积分数在 20:00 前后达到第二个峰值。交通晚高峰后,各类 VOCs 体积分数均有所下降,NO₂ 的光解反应也随着辐射的降低逐渐减弱,大气光化学反应对 VOCs 的消耗作用逐渐减小,因此至午夜左右(23:00 ~ 24:00),TVOCs 的体积分数有所回升。整体而言,夜间的 TVOCs 平均体积分数明显高于白天,说明光化学反应过程和气象条件的影响对 VOCs 的消耗有十分重要的作用。

2.3 VOCs 的臭氧生成潜势

南京秋季大气各 VOCs 的 OFP 及其占比情况如表 1 所示,TVOCs 的 OFPs 为 267.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,其中芳香烃对于 OFP 的贡献最大,约占 55.2%,其次依序是烯炔(20.8%)、烷烃(14.0%)、OVOCs(9.7%)和炔炔(0.3%)。从表中不难发现,尽管烷烃的体积分数在所有 VOCs 物种中占比最高,但由于其光化学反应活性较低,与 OH 自由基间的反应较为缓慢,生成臭氧的能力也相对较弱,所以烷烃对 OFPs 的贡献相对较小,因此控制烷烃的排放对于缓解南京秋季臭氧污染的态势并无显著效果。相较之下,芳香烃和烯炔的体积分数远低于烷烃,烯炔体积分数仅占 TVOCs 的 7.0%,芳香烃仅占 12.5%,但与其他 VOCs 相比,芳香烃和烯炔与 OH 反应化学活性较高,因此



括号中表示各 VOCs 组分的体积分数,单位: 10^{-9}

图5 高臭氧污染时期和低臭氧污染时期所测得的 VOCs 化学组成特征

Fig. 5 Chemical compositions of VOCs monitored during the high ozone and low ozone periods

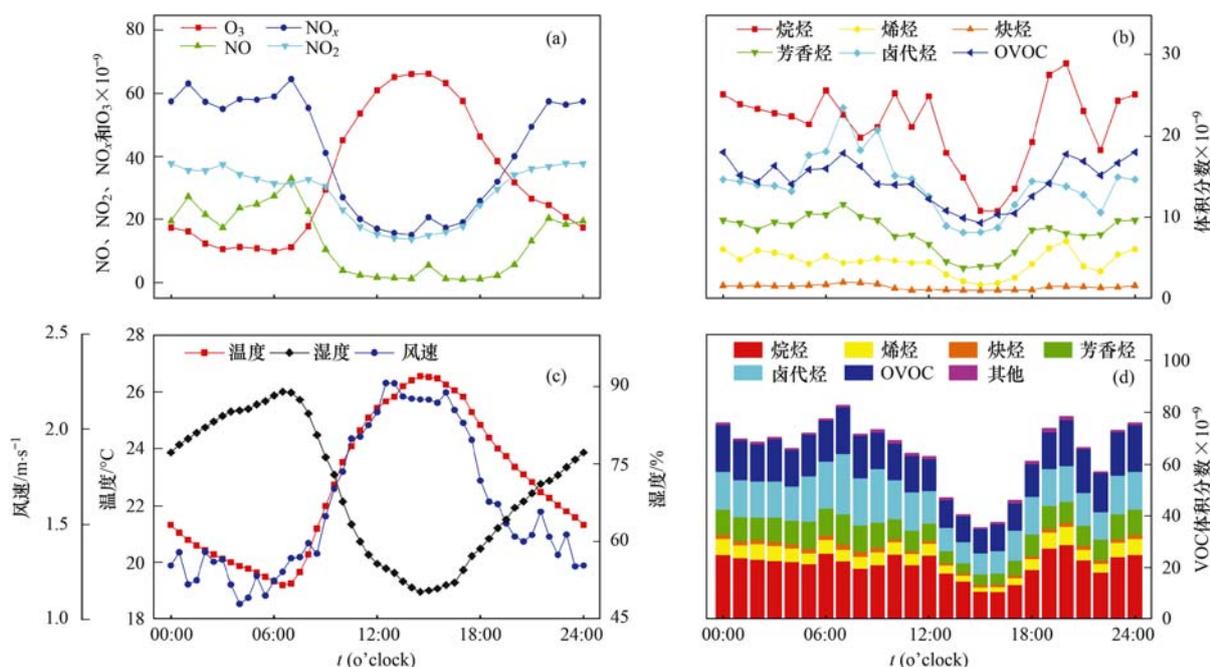


图6 南京秋季主要污染物、VOCs及气象要素日变化

Fig. 6 Diurnal variations of major air pollutants, VOCs, and meteorological parameters measured in Nanjing during the autumn sampling period

较为活泼的烯烃和芳香烃更易参与光化学反应的过程,发生光化学氧化,生成更多的臭氧,因此它们对OFPs的贡献度较其他VOCs物种更高.芳香烃对于OFPs的相对贡献率高达55.2%,而烯烃对OFPs的贡献率仅次于芳香烃,达到20.8%.芳香烃和烯烃在南京秋季臭氧形成中具有极大的潜力,因此控制一次排放的芳香烃和烯烃更有利于控制南京秋季大气臭氧的生成.

国内各典型城市及季节VOCs的OFP如表3所示,从季节对比来看,秋季略小于夏季,从时间跨度来看,南京VOCs的OFP呈逐年递减趋势,说明南京近年来的VOCs防治工作卓有成效.同国内其他典型城市相比,广州、朔州及天津等华南及华北工业城市VOCs的OFPs远大于南京,说明工业排放的VOCs对OFP的影响巨大,上海和厦门等华东地区城市VOCs的OFPs与南京相近,太原、武汉、郑州及昆明等华北、华中和西南地区省会城市VOCs的OFP则低于南京,说明南京秋季VOCs的OFP远低于重工业城市,但较其他省会城市而言,其臭氧生成水平仍旧偏高,因此南京对于VOCs的防治仍不能松懈.

2018年秋季观测期间OFPs前10位VOCs物种详见图7.对OFPs贡献前10种组分别为:乙烯(11.5%)、间/对-二甲苯(9.1%)、邻-二甲苯(8.0%)、甲苯(5.4%)、1,2,4-三甲苯(5.1%)、乙醇(4.7%)、间-乙基甲苯(4.7%)、1,2,3-三甲苯(3.8%)、1,3-二乙基苯(3.7%)和乙苯(3.3%),其中芳香烃贡献率占43.1%,烯烃占11.5%,可见芳

香烃和烯烃对南京秋季环境空气中臭氧的影响较大.其中乙烯通常主要来源于机动车尾气排放及石油化工排放^[4,36],间/对-二甲苯、邻-二甲苯和甲苯等苯系物通常来源于机动车尾气排放和溶剂的使用^[37],因此控制南京地区的交通和石油化工排放,有利于减少本地区的臭氧污染.

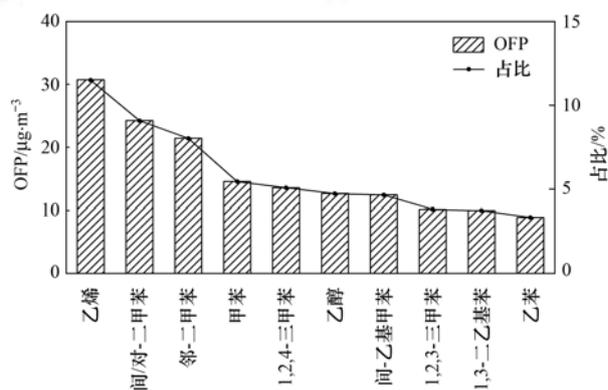


图7 南京秋季OFPs前10位VOCs物种及其占比

Fig. 7 Relative contributions of the top 10 VOC species inducing OFPs in Nanjing during the autumn sampling period

2.4 PMF来源解析

本研究利用PMF受体模型对南京工业区秋季大气VOCs组分进行来源解析,图8为PMF模型的源贡献图,共确定了7种可能的排放源,即石油化工排放源、LPG(液化石油气)排放源、涂料及有机溶剂排放源、汽油车排放源、工业炼焦排放源、生物质燃烧与燃煤排放源、柴油车排放源.

因子1中丙烯、乙烷、乙烯及正己烷的贡献率较高,丙烯、乙烷及乙烯可以通过汽车尾气排放^[14,38],

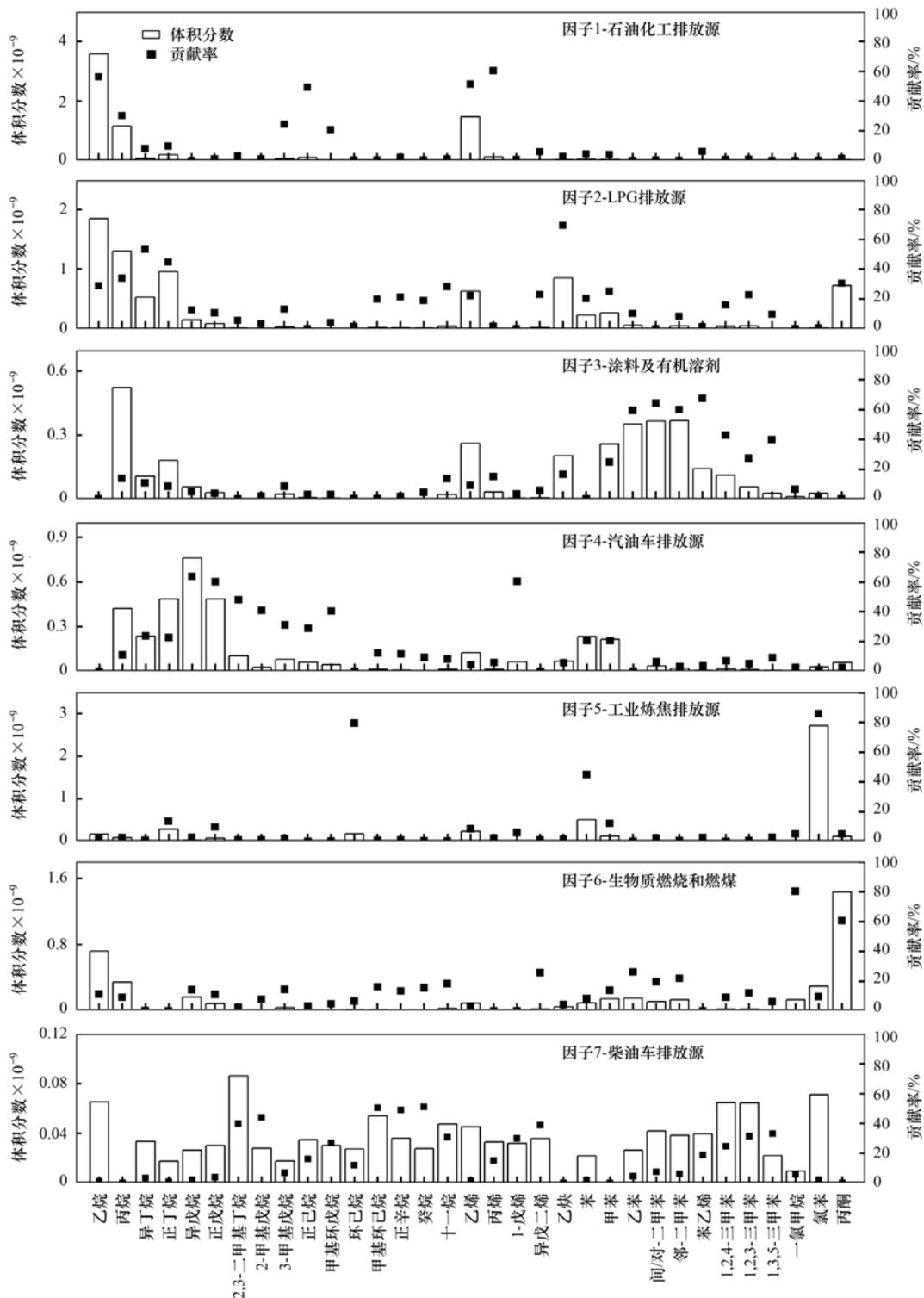


图 8 南京秋季 VOCs 来源解析

Fig. 8 Source profiles of VOCs in autumn in Nanjing

也可以在工业炼焦过程中排放^[4,7], 由于采样点附近有一规模较大的石油化工厂, 各种炼油过程中相关 VOCs 的泄漏是不可避免的, 且与燃烧源有关的乙炔和苯的占比极小, 因此确认因子 1 为石油化工业排放. 因子 2 中 C2 ~ C4 烃类占比较高, 其中丙烷、异丁烷和正丁烷是 LPG 排放的重要指标^[26], 乙炔主要与不完全燃烧有关^[39,40], 因此判断因子 2 为

LPG 排放源. 因子 3 中芳香烃贡献率较高, 其中苯乙烯、间/对-二甲苯、邻-二甲苯及乙苯主要与涂料及有机溶剂使用有关^[37,41], 因此因子 3 定性为涂料及有机溶剂排放源. 因子 4 的特征是 C4 ~ C5 烷烯烃含量较高, 尤其是异戊烷、1-戊烯、正戊烷和 2,3-二甲基丁烷, 其中正戊烷和异戊烷是汽油车排放的典型示踪剂^[39], 因此判断因子 4 为汽油车排放源. 因

表 3 国内典型城市大气 OFP 组成情况

Table 3 Composition of OFP in typical cities in China

| 城市 | 采样日期 (年-月-日) | 烷烃 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 烯烃 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 芳香烃 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 炔烃 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 卤代烃 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | OVOC / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | OFP / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | 文献 |
|----|-----------------------------------|---|---|--|---|--|---|--|------|
| 南京 | 2018-09-16 ~ 2018-10-07 | 37.3 | 55.6 | 147.3 | 0.8 | — | 26.0 | 267.0 | 本研究 |
| 南京 | 2014-05-01 ~ 2014-07-31 | 40.2 | 78.4 | 150.3 | 2.6 | — | — | 271.5 | [25] |
| 南京 | 2015-06-01 ~ 2015-07-16 | 42.3 | 92.9 | 135.3 | 15.0 | — | — | 271.8 | [25] |
| 南京 | 2011-03 ~ 2012-02 | 42.7 | 163.5 | 156.5 | 1.8 | — | — | 364.5 | [26] |
| 上海 | 2013-03-01 ~ 2013-03-31 | 38.4 | 86.7 | 120.1 | 2.4 | — | — | 247.6 | [27] |
| 广州 | 2011-06 ~ 2012-05 | 81.3 | 112.7 | 207.9 | — | — | — | 401.9 | [28] |
| 厦门 | 2014-01 | 24.5 | 27.1 | 94.0 | — | — | — | 145.7 | [29] |
| 厦门 | 2014-03 | 52.9 | 65.5 | 169.9 | — | — | — | 288.2 | [29] |
| 天津 | 2014-05-01 ~ 2014-09-05 | 123.9 | 282.1 | 197.8 | — | — | — | 603.8 | [30] |
| 武汉 | 2014-01-01 ~ 2014-12-31 | 30.3 | 75.719 | 51.9 | — | — | — | 157.9 | [31] |
| 郑州 | 2018-04-14 ~ 2018-04-22 | 50.0 | 34.9 | 76.1 | — | 11.3 | 23.4 | 195.6 | [32] |
| 太原 | 2018-08-01 ~ 2018-08-07 | 23.4 | 58.3 | 38.8 | 1.7 | — | — | 122.2 | [33] |
| 朔州 | 2015-07-22 ~ 24 和 2015-08-18 ~ 19 | 35.9 | 63.7 | 334.2 | 1.1 | — | — | 434.9 | [34] |
| 昆明 | 2014-07 | 12.5 | 10.5 | 7.7 | — | — | — | 30.7 | [35] |
| 昆明 | 2014-01 | 15.8 | 76.1 | 115.7 | — | — | — | 207.5 | [35] |

子 5 中的氯苯、环己烷及苯均为工业排放的典型排放物,其中环己烷和苯均与工业炼焦排放有关^[39],因此确定因子 5 为工业炼焦排放. 因子 6 中一氯甲烷的贡献率最高,为生物质燃烧的典型示踪剂^[4,7],贡献度次高的丙酮可能与燃煤排放有关,因此认为因子 6 是生物质燃烧及燃煤排放. 因子 7 中贡献度较高的物质为 C5 ~ C10 烷烃,如正癸烷、甲基环己烷、正辛烷、2-甲基戊烷及 2,3-二甲基丁烷,其中正癸烷为柴油车排放示踪剂^[14],甲基环己烷为柴油车挥发示踪剂^[7],2-甲基戊烷为交通排放的标志物^[42],因此判断因子 7 为柴油车排放源.

图 9 为 PMF 各因子的贡献占比情况,由于因子 1 和因子 5 分别为石油化工及工业炼焦排放产生,因此合并为工业排放源,而因子 4 为汽油车排放源,因子 7 为柴油车排放源,因此合并为交通排放源,最终通过 PMF 确定了 5 个 VOCs 来源. 从中可以看出

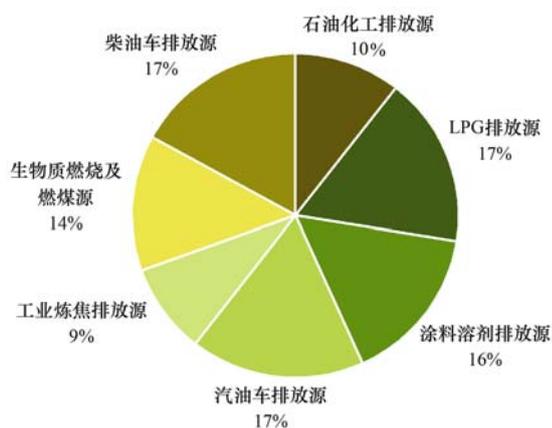


图 9 南京秋季大气 VOCs 各来源贡献率

Fig. 9 Source contributions of atmospheric VOCs in Nanjing during the autumn sampling period

南京秋季 VOCs 污染的主要来源为交通排放(34%)和工业排放(19%),其次是 LPG(液化石油气)(17%)和涂料溶剂排放(16%),因此控制南京秋季大气 VOCs 污染应着重于控制交通及工业排放. 此外,虽然生物质燃烧和燃煤排放贡献率略低于其他各因子,但其贡献率仍有 14% 之多,说明南京秋季燃烧源排放对大气 VOCs 仍有重要影响,而秋季生物质燃烧主要来源于农田秸秆燃烧,因此对于南京秋季秸秆燃烧现象仍需严格治理.

3 结论

(1) 观测期间,南京秋季 VOCs 体积分数在 $10.9 \times 10^{-9} \sim 300.9 \times 10^{-9}$ 之间,小时平均体积分数为 $(64.3 \pm 45.6) \times 10^{-9}$,其中烷烃和 OVOCs 体积分数占比最高,优势物种为 C2 ~ C4 烷烃、OVOCs 及卤代烃. 高臭氧污染时期卤代烃和 OVOCs 的体积分数和占比较低,而烷烃、烯烃和炔烃的体积分数和百分比比较低,说明在高臭氧污染时期,烷烃和炔烃更易发生光化学氧化损耗.

(2) 南京秋季 VOCs 体积分数的日变化基本呈“双峰型”变化规律,VOCs 峰值出现的时间与交通早晚高峰时间基本一致,其体积分数峰值的出现是交通污染源与气象要素共同作用的结果,且由于夜间光化学反应的减弱及有利污染物堆积的气象条件,晚上 TVOCs 的峰值水平较早晨更高.

(3) 南京秋季大气 VOCs 的臭氧生成潜势为 $267.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,芳香烃和烯烃类化合物是 OFP 最高的 VOCs 物种,占总 OFP 的 76%. 因此,通过控制南京秋季交通排放、石油化工及溶剂挥发排放将有利于削减该地区对臭氧生成潜势贡献最大的物质,从

而达到控制大气臭氧污染及改善南京秋季空气质量的目的。

(4) 将 PMF 解析 VOCs 的污染源根据其相似性归纳为 5 个污染来源, 分别是交通排放源 (34%)、工业排放源 (19%)、LPG 排放源 (17%)、涂料及有机溶剂排放源 (16%) 及生物质燃烧和燃煤源 (14%)。南京秋季大气污染应着重管控交通及工业排放, 且对于秸秆燃烧等生物质燃烧源的治理仍不能放松。

参考文献:

- [1] Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(12-14): 2063-2101.
- [2] 唐孝炎, 张远航, 邵敏, 等. 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, *et al.* *Atmospheric environmental chemistry*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [3] Liu C M, Xu Z L, Du Y G, *et al.* Analyses of volatile organic compounds concentrations and variation trends in the air of Changchun, the Northeast of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(26): 4459-4466.
- [4] 莫梓伟, 邵敏, 陆思华. 中国挥发性有机物(VOCs)排放源成分谱研究进展[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(9): 2179-2189.
Mo Z W, Shao M, Lu S H. Review on volatile organic compounds (VOCs) source profiles measured in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(9): 2179-2189.
- [5] An J L, Wang Y S, Wu F K, *et al.* Characterizations of volatile organic compounds during high ozone episodes in Beijing, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, **184**(4): 1879-1889.
- [6] 魏巍, 王书肖, 郝吉明. 中国人源 VOC 排放清单不确定性研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 305-312.
Wei W, Wang S X, Hao J M. Uncertainty analysis of emission inventory for volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(2): 305-312.
- [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] 王红丽. 上海市光化学污染期间挥发性有机物的组成特征及其对臭氧生成的影响研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(6): 1603-1611.
Wang H L. Characterization of volatile organic compounds (VOCs) and the impact on ozone formation during the photochemical smog episode in Shanghai, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(6): 1603-1611.
- [9] 张爱东, 王晓燕, 修光利. 上海市交通干道空气中挥发性有机物冬季污染特征研究[J]. *环境科学与管理*, 2006, **31**(1): 54-56.
Zhang A D, Wang X Y, Xiu G L. Characterization of atmospheric TVOCs near traffic road in winter in Shanghai [J]. *Environmental Science and Management*, 2006, **31**(1): 54-56.
- [10] Zhang Y L, Wang X M, Zhang Z, *et al.* Sources of C₂-C₄ alkenes, the most important ozone nonmethane hydrocarbon precursors in the Pearl River Delta region [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **502**: 236-245.
- [11] 邹宇, 邓雪娇, 王伯光, 等. 广州番禺大气成分站挥发性有机物的污染特征[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(5): 808-813.
Zou Y, Deng X J, Wang B G, *et al.* Pollution characteristics of volatile organic compounds in Panyu Composition Station [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(5): 808-813.
- [12] 马永亮, 谭吉华, 贺克斌, 等. 佛山灰霾期挥发性有机物的污染特征[J]. *环境科学*, 2011, **32**(12): 3549-3554.
Ma Y L, Tan J H, He K B, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds during haze episode in Foshan city [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(12): 3549-3554.
- [13] 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**(S1): 7-15.
Wang B G, Zhang Y H, Shao M. Special and temporal distribution character of VOCs in the ambient air of Peal River Delta Region [J]. *Environmental Science*, 2004, **25**(S1): 7-15.
- [14] Song M D, Tan Q W, Feng M, *et al.* Source apportionment and secondary transformation of atmospheric nonmethane hydrocarbons in Chengdu, Southwest China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, **123**(17): 9741-9763.
- [15] 范莉茹, 王淑娟, 高博, 等. 石家庄市采暖期间环境空气中挥发性有机物污染特征分析[J]. *绿色环保建材*, 2018, (1): 14-15.
- [16] 刘奇琛, 黄婧, 郭新彪. 北京市大气挥发性有机物(VOCs)的污染特征及来源[J]. *生态毒理学报*, 2017, **12**(3): 49-61.
Liu Q C, Huang J, Guo X B. Pollution characteristics and sources of ambient volatile organic compounds (VOCs) in Beijing [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2017, **12**(3): 49-61.
- [17] 翟增秀, 邹克华, 李伟芳, 等. 天津中心城区环境空气挥发性有机物污染特征分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(12): 4513-4518.
Zhai Z X, Zou K H, Li W F, *et al.* Pollution characterization of volatile organic compounds in ambient air of Tianjin downtown [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4513-4518.
- [18] Wang P, Zhao W. Assessment of ambient volatile organic compounds (VOCs) near major roads in urban Nanjing, China [J]. *Atmospheric Research*, 2008, **89**(3): 289-297.
- [19] 王甫华, 吴曼曼, 乔佳, 等. 新型挥发性有机物吸附浓缩在线监测系统的研制[J]. *质谱学报*, 2019, **40**(2): 177-188.
Wang F H, Wu M M, Qiao J, *et al.* Development of new online monitoring system of adsorption and concentration for atmospheric volatile organic compounds [J]. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 2019, **40**(2): 177-188.
- [20] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds [J]. *Air & Waste*, 1994, **44**(7): 881-899.
- [21] Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values [J]. *Environmetrics*, 1994, **5**(2): 111-126.
- [22] Paatero P, Hopke P K. Discarding or downweighting high-noise variables in factor analytic models [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2003, **490**(1-2): 277-289.
- [23] Brown S G, Frankel A, Hafner H R. Source apportionment of VOCs in the Los Angeles area using positive matrix factorization [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **41**(2): 227-237.
- [24] 解鑫, 邵敏, 刘莹, 等. 大气挥发性有机物的日变化特征及在臭氧生成中的作用——以广州夏季为例[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(1): 54-62.
Xie X, Shao M, Liu Y, *et al.* The diurnal variation of ambient VOCs and their role in ozone formation: case study in summer in Guangzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(1): 54-62.

- [25] 张玉欣, 安俊琳, 王俊秀, 等. 南京工业区挥发性有机物来源解析及其对臭氧贡献评估[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 502-510.
Zhang Y X, An J L, Wang J X, *et al.* Source analysis of volatile organic compounds in the Nanjing industrial area and evaluation of their contribution to ozone[J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 502-510.
- [26] 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.
- [27] 崔虎雄. 上海市春季臭氧和二次有机气溶胶生成潜势的估算[J]. 环境科学, 2013, **34**(12): 4529-4534.
Cui H X. Estimation of the formation potential of ozone and secondary organic aerosol in Shanghai in spring [J]. Environmental Science, 2013, **34**(12): 4529-4534.
- [28] Zou Y, Deng X J, Zhu D, *et al.* Characteristics of 1 year of observational data of VOCs, NO_x and O₃ at a suburban site in Guangzhou, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(12): 6625-6636.
- [29] 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.
- [30] 韩昉, 吴宇峰, 董海燕, 等. 天津滨海新区大气 VOCs 组成及光化学活性分析[J]. 环境科学与技术, 2017, **40**(7): 28-32.
Han Y, Wu Y F, Dong H Y, *et al.* Composition and chemical reactivity of ambient volatile organic compounds in Binhai New Area, Tianjin[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **40**(7): 28-32.
- [31] 曾沛, 郭海, 梁胜文, 等. 武汉市大气 VOCs 污染特征及其对臭氧生成的影响[J]. 环境科学与技术, 2018, **41**(7): 117-124.
Zeng P, Guo H, Liang S W, *et al.* Ambient volatile organic compounds and their contributions to ozone formation in Wuhan [J]. Environmental Science & Technology, 2018, **41**(7): 117-124.
- [32] 张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 等. 郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4372-4381.
Zhang Y X, Yin S S, Yuan M H, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient VOCs in spring in Zhengzhou [J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4372-4381.
- [33] 司雷霆, 王浩, 李洋, 等. 太原市夏季大气 VOCs 污染特征及臭氧生成潜势[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(9): 3655-3662.
Si L T, Wang H, Li Y, *et al.* Pollution characteristics and ozone formation potential of ambient VOCs in summer in Taiyuan[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(9): 3655-3662.
- [34] 李如梅, 武媛媛, 彭林, 等. 朔州市夏季环境空气中 VOCs 的污染特征及来源解析[J]. 环境化学, 2017, **36**(5): 984-993.
Li R M, Wu Y Y, Peng L, *et al.* Characteristics and sources apportionment of ambient volatile organic compounds (VOCs) in summer in Shuozhou [J]. Environmental Chemistry, 2017, **36**(5): 984-993.
- [35] 刘寅, 向峰, 韩新宇, 等. 昆明中心城区夏秋季大气 VOCs 的污染特征及来源解析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2018, **40**(1): 104-112.
Liu Y, Xiang F, Han X Y, *et al.* On pollution characteristics and sources apportionment of ambient VOCs in summer and autumn in Kunming[J]. Journal of Yunnan University, 2018, **40**(1): 104-112.
- [36] 陆思华, 白郁华, 张广山, 等. 大气中挥发性有机化合物(VOCs)的人为来源研究[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(5): 757-763.
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.
- [37] Li G H, Wei W, Shao X, *et al.* A comprehensive classification method for VOC emission sources to tackle air pollution based on VOC species reactivity and emission amounts [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, **67**: 78-88.
- [38] 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.
- [39] Hui L R, Liu X G, Tan Q W, *et al.* VOC characteristics, sources and contributions to SOA formation during haze events in Wuhan, Central China[J]. Science of the Total Environment, 2019, **650**: 2624-2639.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] Chan L Y, Chu K W, Zou S C, *et al.* Characteristics of nonmethane hydrocarbons (NMHCs) in industrial, industrial-urban, and industrial-suburban atmospheres of the Pearl River Delta (PRD) region of South China[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006, **111**(D11): D11304.

CONTENTS

| | |
|---|---|
| Mixed State and Sources of Fine Particulate Matter in the Summer in Tianjin City Based on Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS) | LIN Qiu-ju, XU Jiao, LI Mei, <i>et al.</i> (2505) |
| Characteristics and Sources of Inorganic Ions and Organic Acids in Precipitation in the Northern Suburb of Nanjing, China | YANG Xiao-ying, CAO Fang, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (2519) |
| Seasonal Variation of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xi'an | HUANG Han-han, WANG Yu-qin, LI Sheng-ping, <i>et al.</i> (2528) |
| Effect of Liquid Water Content of Particles and Acidity of Particulate Matter on the Formation of Secondary Inorganic Components in Xinjiang Petrochemical Industrial Area | LIU Hui-bin, Dilinuer-Talifu, WANG Xin-ming, <i>et al.</i> (2536) |
| Effect of Biomass Burning on the Light Absorption Properties of Water Soluble Organic Carbon in Atmospheric Particulate Matter in Changchun | MENG De-you, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (2547) |
| Chemical Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Shanghai During an Ozone and Particulate Pollution Episode in May 2019 | WANG Qian (2555) |
| Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in the Nanjing Industrial Area in Autumn | CAO Meng-yao, LIN Yu-chi, ZHANG Yan-lin (2565) |
| Ambient VOCs Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of Air Pollution in Spring in Zhengzhou | REN Yi-jun, MA Shuang-liang, WANG Si-wei, <i>et al.</i> (2577) |
| Characteristics of VOCs and Their Roles in Ozone Formation at a Regional Background Site in Beijing, China | HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, QIU Yu-lu, <i>et al.</i> (2586) |
| Emission Characteristics of the Catering Industry in Beijing | SUN Cheng-yi, BAI Hua-hua, CHEN Xue, <i>et al.</i> (2596) |
| Emission Factors and Emission Inventory of Agricultural Machinery in Beijing Under Real-world Operation | WANG Kai, FAN Shou-bin, QI Hao-yun (2602) |
| Localization of Soil Wind Erosion Dust Emission Factor in Beijing | LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (2609) |
| Spatial and Temporal Characteristics of AOD and Angström Exponent in the Yangtze River Delta Based on MODIS_C061 | ZHANG Ying-lei, CUI Xi-min (2617) |
| Fate Simulation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl in the Bohai Rim Using the Multimedia Model | ZHANG Yi, MA Yan-fei, SONG Shuai, <i>et al.</i> (2625) |
| Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Sediment Interstitial Water from Gangnan Reservoir | ZHOU Shi-lei, SUN Yue, YUAN Shi-chao, <i>et al.</i> (2635) |
| Environmental Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in the Sediments of a River-Lake System | LI Yue-zhao, CHEN Hai-yang, SUN Wen-chao (2646) |
| Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments from the Yitong River City Area | JIANG Shi-xin, ZHAI Fu-jie, ZHANG Han, <i>et al.</i> (2653) |
| Identifying Nitrate Sources in a Typical Karst Underground River Basin | ZHAO Ran, HAN Zhi-wei, SHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2664) |
| Influence of Nutrient Pulse Input on Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Algal Growth in the Sediment-Water System of Lake Taihu | CHEN Jie, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2671) |
| Temporal and Spatial Variation Patterns of Picophytoplankton and Their Correlations with Environmental Factors During the Wet Season in East Lake Dongting | LI Sheng-nan, CHEN Hao-yu, PENG Hua, <i>et al.</i> (2679) |
| Toxicological Effects of Enrofloxacin and Its Removal by Freshwater Micro-Green Algae <i>Dictyosphaerium</i> sp. | WANG Zhen-fang, HAN Zi-yu, WANG Meng-xue, <i>et al.</i> (2688) |
| Comparative Phosphorus Accumulation and Ca-P Content of Two Submerged Plants in Response to Light Intensity and Phosphorus Levels | SANG Yu-xuan, YANG Jia-le, XIONG Yi, <i>et al.</i> (2698) |
| Effect of Calcium Peroxide Composite Tablets on Water Remediation and Phosphorus Control in Sediment | ZHANG Shuai, LI Da-peng, DING Yu-qin, <i>et al.</i> (2706) |
| Spatial Differentiation and Driving Analysis of Nitrogen in Rice Rotation Based on Regional DNDC: Case Study of Jinjiang River Watershed | WANG Ya-nan, SHUI Wei, QI Xin-hua, <i>et al.</i> (2714) |
| Low Temperature Ammonia Nitrogen Removal from an Iron, Manganese, and Ammonia Groundwater Purification Process with Different Concentrations of Iron and Manganese | ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i> (2727) |
| Degradation of RBKS by High Crystallinity Mn-Fe LDH Catalyst Activating Peroxymonosulfate | LI Li, WU Li-ying, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (2736) |
| Mechanisms of Fe-cyclam/H ₂ O ₂ System Catalyzing the Degradation of Rhodamine B | YU Yu-qing, CHEN Xiang-yu, CAI Quan-hua, <i>et al.</i> (2746) |
| Removal of Nitrate Nitrogen by Microbial Photoelectrochemical Cell; PANI/TiO ₂ -NTs as a Photoanode | LU Yi, ZHOU Hai-shan, PENG Rui-jian, <i>et al.</i> (2754) |
| Performance and Membrane Fouling Characteristics of Mariculture Wastewater Treated by Anoxic MBR-MMR | CHEN Fan-yu, XU Zhong, YOU Hong, <i>et al.</i> (2762) |
| Effect of HRT on Denitrifying Phosphorus and Nitrogen Removal in Modified A ² /O-BAF | ZHAO Kai-liang, LIU An-di, NAN Yan-bin, <i>et al.</i> (2771) |
| Effect of Ni(II) on Anaerobic Ammonium Oxidation and Changes in Kinetics | SUN Qi, ZHAO Bai-hang, FAN Sa, <i>et al.</i> (2779) |
| Removal of Urea by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Mixed Strains and Effects of Heavy Metals and Salinity | WANG Meng-qing, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (2787) |
| Start-up Characteristics of SNAD Process and Functional Abundance Succession of Volcanic Rock Biological Aerated Filter | XUE Jia-jun, ZHANG Shao-qing, ZHANG Li-qiu, <i>et al.</i> (2796) |
| Effect of Free Hydroxylamine on the Activity of Two Typical Nitrite-oxidizing Bacteria | SHEN Chen, ZHANG Shu-jun, PENG Yong-zhen (2805) |
| Interference of Dead Cell DNA on the Analysis of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Community in Anaerobic Digestion Sludge | SU Yu-ao, LIU Hong-bo, MAO Qiu-yan, <i>et al.</i> (2812) |
| Spatial Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Arable Land Soil of China | CHEN Wen-xuan, LI Qian, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2822) |
| Construction and Application of Early Warning System for Soil Environmental Quality | LI Xiao-nuo, DING Shou-kang, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2834) |
| Response of Aggregate Distribution to Input Straw and Their Linkages to Organic Carbon Mineralization in Soils Developed from Five Different Parent Materials | MAO Xia-li, QIU Zhi-teng, ZHANG Shuang, <i>et al.</i> (2842) |
| Response of Extracellular Enzyme Activities to Substrate Availability in Paddy Soil with Long-term Fertilizer Management | NING Yu-fei, WEI Liang, WEI Xiao-meng, <i>et al.</i> (2852) |
| Effects of Biochar on Bioavailability of Two Elements in Phosphorus and Cadmium-Enriched Soil and Accumulation of Cadmium in Crops | HUANG Yang, GUO Xiao, HU Xue-yu (2861) |
| Characteristics of Cd, As, and Pb in Soil and Wheat Grains and Health Risk Assessment of Grain-Cd/As/Pb on the Field Scale | XIAO Bing, XUE Pei-ying, WEI Liang, <i>et al.</i> (2869) |
| Reconstructed Soil Vertical Profile Heavy Metal Cd Occurrence and Its Influencing Factors | HU Qing-qing, SHEN Qiang, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2878) |
| Bacterial Community Composition in Cadmium-Contaminated Soils in Xixiang City and Its Ability to Reduce Cadmium Bioaccumulation in Pak Choi (<i>Brassica chinensis</i> L.) | CHEN Zhao-jin, LI Ying-jun, SHAO Yang, <i>et al.</i> (2889) |
| Root Activities of Re-Vegetated Plant Species Regulate Soil Nutrients and Bacterial Diversity in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir | LI Li-juan, LI Chang-xiao, CHEN Chun-hua, <i>et al.</i> (2898) |
| Spatial Distribution of Nitrogen Metabolism Functional Genes of Eubacteria and Archaeobacteria in Dianchi Lake | ZHANG Yu, ZUO Jian-e, WANG Si-ke, <i>et al.</i> (2908) |
| Effect of Simulated Warming on Microbial Community in Glacier Forefield | WANG Yu-wan, MA An-zhou, CHONG Guo-shuang, <i>et al.</i> (2918) |
| Effect of Water-Fertilizer-Gas Coupling on Soil N ₂ O Emission and Yield in Greenhouse Tomato | SHANG Zi-hui, CAI Huan-jie, CHEN Hui, <i>et al.</i> (2924) |
| Toxicity of Soil Leachate from Coal Gangue and Its Surrounding Village of Barley (<i>Hordeum vulgare</i>) | SHANG Yu, YANG Feng-long, NING Xia, <i>et al.</i> (2936) |
| Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Pollution in Marine Organisms from Estuaries of Changhua River in Hainan Province | WANG Hui-juan, KUANG Ze-xing, ZHOU Xian, <i>et al.</i> (2942) |
| Characteristics of Macrobenthos Community Structure and Their Relationships with Environmental Factors in Rivers of Beijing in Spring | HE Yu-xiao, LI Ke, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2951) |
| Effect of Pyrolytic Temperature and Time on Characteristics of <i>Typha angustifolia</i> Derived Biochar and Preliminary Assessment of the Ecological Risk | CAI Zhao-hui, CHU Chen-jing, ZHENG Hao, <i>et al.</i> (2963) |
| Measurement of Traffic Carbon Emissions and Pattern of Efficiency in the Yangtze River Economic Belt (1985-2016) | JIANG Zi-ran, JIN Huan-huan, WANG Cheng-jin, <i>et al.</i> (2972) |