

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



2019

Vol.40 No.10

第40卷 第10期

目次

京津冀区域重污染期间 PM _{2.5} 垂直分布及输送·····	肖致美, 徐虹, 李鹏, 唐遵, 陈魁, 杨宁, 郑乃源, 杨文, 邓小文 (4303)
肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析·····	常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 杨柳林, 俞绍才, 陈雪, 郑剑平 (4310)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中水溶性化合物的昼夜变化特征及来源解析·····	衣雅男, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 王心培, 刘晓迪, 伏梦璇, 魏本杰 (4319)
沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 排放因子及碳组分源谱·····	赵雪艳, 王静, 祝胜男, 卞思思, 张宇, 王歆华, 殷宝辉, 杨文, 白志鹏 (4330)
城市生活垃圾露天焚烧排放 PM _{2.5} 中重金属污染特征及其暴露健康风险·····	程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 王艳, 易鹏, 支国瑞, 张佳羽, 张洋, 张诗澜 (4337)
某工业城市大气颗粒物中 PAHs 的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估·····	王娟, 郭观林, 秦宁, 侯荣, 杨敏, 康艺瑾, 段小丽 (4345)
南京城市大气氨-铵的高频演化及其气粒转化机制·····	邵生成, 常运华, 曹芳, 林煜棋, 范美益, 谢锋, 洪一航, 章炎麟 (4355)
广州地区大气棕色碳气溶胶吸收特性·····	李铸杰, 谭浩波, 郑军 (4364)
郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析·····	张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 张瑞芹, 张猛, 于世杰, 李一丹 (4372)
基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数·····	梁小明, 陈来国, 孙西勃, 赵伟, 卢清, 孙家仁, 陈朋龙, 叶代启 (4382)
北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱·····	方莉, 刘明文, 陈丹妮, 李国昊, 王迪, 邵霞, 聂磊 (4395)
民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响·····	卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 韩勇, 陈颖军 (4404)
利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性·····	王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 王红磊, 丁涵, 郑小波 (4412)
镁铝水滑石衍生复合氧化物的 COS 水解性能·····	魏征, 张鑫, 张凤莲, 蒋国霞, 张雨萌, 周化兵, 郝郑平, 解强 (4423)
长江源区大气降水化学特征及离子来源·····	汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 丁永建, 胡召富, 王利辉, 杨贵森 (4431)
连续极端降雨对东江流域水质影响分析·····	车蕊, 林澍, 范中亚, 李文静, 曾凡棠, 毛本健, 石雷, 黄志伟 (4440)
基于湖泊与出入湖水水质关联性研究:以鄱阳湖为例·····	黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 张波涛, 冯明雷, 陈宏文, 李晓秀, 王圣瑞 (4450)
金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征·····	刘明坤, 童俊, 胡波, 朱慧峰, 白晓慧 (4461)
太湖不同介质电导率时空变化特征·····	王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛 (4469)
大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析·····	施媛媛, 李一平, 程月, 程一鑫 (4478)
基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析·····	李娜, 施坤, 张运林, 龚志军, 查勇, 张毅博 (4487)
草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价·····	张杰, 汪院生, 郭西亚, 朱金格, 邓建才 (4497)
太湖草型湖区沉积物中生物易降解物质组成与分布规律·····	祁闯, 方家琪, 张利民, 司泽君, 黄和笑, 王卓森, 李翔, 王磊, 王国祥 (4505)
淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系·····	杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮 (4513)
岩溶区不同土地利用下地下水碳同位素地球化学特征及生态意义·····	任坤, 潘晓东, 曾洁, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏 (4523)
岩溶地下水化学对城镇化进程的时序响应·····	杨应增, 何守阳, 吴攀, 吴起鑫, 韩志伟, 罗维 (4532)
巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析·····	唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇 (4543)
δ-MnO ₂ /沸石纳米复合材料同时去除地下水中的铁锰氨氮·····	马文婕, 陈天虎, 陈冬, 刘海波, 程鹏, 张泽鑫, 陶琼, 张玉珠 (4553)
不同香蒲预处理方式对水平潜流人工湿地脱氮的强化效果·····	熊家晴, 卢学斌, 郑于聪, 王晓昌 (4562)
不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化·····	刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 黄利, 倪蓉, 陈永志 (4569)
启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水·····	吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳 (4578)
聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析·····	孙事昊, 贾沛沛, 陈凯琦, 彭永臻, 张亮 (4585)
典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素·····	冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 邢智, 魏威, 余江 (4594)
5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素·····	何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4604)
Cu ²⁺ 和 Pb ²⁺ 在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用·····	卜帅宾, 孟昭福, Sambath Yek, 张梦飞, 王腾, 任爽, 张凌恺 (4611)
滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价·····	洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞 (4620)
贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价·····	唐启琳, 刘秀明, 刘方, 汪花, 王世杰 (4628)
渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术·····	李娜, 贺红周, 冯爱煊, 李伟, 蒋珍茂, 魏世强 (4637)
不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选·····	陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃 (4647)
小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运·····	王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉 (4654)
微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响·····	廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟 (4661)
药渣生物炭基质联合麦饭石对土壤-黑麦草体系的调控与机制·····	肖亮亮, 丁园 (4668)
磺胺甲噁唑污染土壤中微生物群落结构与抗生素抗性基因的分布特征·····	张海丰, 史明明, 孙艳梅, 程首涛, 高浩泽, 王旭明 (4678)
生活垃圾渗滤液处理过程中抗生素抗性基因的变化特征·····	黄福义, 周曙仡聃, 颜一军, 苏建强, 朱永官, 张炯 (4685)
有机肥施用对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响·····	邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 李熠凡, 鲁璐, 王旭东, 张阿凤, 王彦丽 (4691)
灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响·····	周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明 (4700)
柑橘/大蒜盖套作下土壤 CO ₂ 排放及其效率对秸秆还田量的响应·····	游璟, 倪九派, 黄容, 张洋, 谢德体 (4708)
增温及秸秆施用对豆-麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响·····	张婷婷, 陈书涛, 王君, 王朝辉, 胡正华 (4718)
O ₃ 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟·····	徐静馨, 郑有飞, 王圣, 王立稳, 赵秀勇, 麦博儒 (4725)
2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征·····	潘晓东, 李品, 冯兆忠, 段昌群 (4733)
《环境科学》征订启事 (4394) 《环境科学》征稿简则 (4449) 信息 (4584, 4593, 4653)	

北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱

方莉¹, 刘文文², 陈丹妮², 李国昊³, 王迪⁴, 邵霞³, 聂磊^{3*}

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 北京工业大学环境与能源工程学院, 北京 100124; 3. 北京市环境保护科学研究院, 城市大气挥发性有机物污染防治技术与应用北京市重点实验室, 北京 100037; 4. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 基于北京市挥发性有机物 (VOCs) 排放清单和下一阶段 VOCs 减排的需求, 针对汽车整车制造、木质家具制造和出版物印刷这 3 个主要溶剂使用行业, 分别选取典型企业作为研究对象, 采用负压法对重点排放环节进行采样, 以 GC-MS/FID 系统测定样品中 VOCs 组分构成, 从而获取了北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱。结果表明, 汽车整车制造主要排放环节排放的 VOCs 组分存在明显差异, 色漆涂装工序以含氧 VOCs 和芳香烃为主, 分别占比 71.26% 和 27.14%, 单光工序芳香烃达到 84.10%; 木质家具制造业不同排放环节的 VOCs 组分差异不大, 均以含氧 VOCs 和芳香烃为主, 分别占 55.08% 和 18.98%; 出版物印刷业不同排放环节无法单独监测, 其混合废气 VOCs 组分以烷烃和含氧 VOCs 为主, 分别占比 47.29% 和 44.57%。

关键词: 挥发性有机物 (VOCs); 木质家具制造; 汽车整车制造; 印刷; 源成分谱

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4395-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201901128

Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing

FANG Li¹, LIU Wen-wen², CHEN Dan-ni², LI Guo-hao³, WANG Di⁴, SHAO Xia³, NIE Lei^{3*}

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3. Key Laboratory of Urban Atmospheric Volatile Organic Compounds Pollution Control and Application, Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037, China; 4. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Based on the demand for a volatile organic compounds (VOCs) emissions inventory for Beijing and for the reduction in VOC emissions, the three major solvent-based industries of automobile manufacturing, furniture manufacturing, and publication printing were selected for this study. In each case, emissions link negative pressure sampling was used in combination with laboratory-based GC-MS/FID to obtain the VOC spectra. The results show that there are significant differences in the emission of VOCs from the main stages of automobile manufacturing. Specifically, the paint-coating process was dominated by the emission of oxygenated VOCs and aromatic hydrocarbons, accounting for 71.26% and 27.14% of total VOC emissions, respectively. The proportion of aromatic hydrocarbons emitted during the varnishing process was very large (84.10%), which were mainly composed of the benzene series. The differences in VOC emissions during different stages of the furniture manufacturing process were small, mainly consisting of oxygenated VOCs and aromatic hydrocarbons, which accounted for 55.08% and 18.98% of the total, respectively. Of these, alcohols and esters were the main components. VOCs emitted from different stages of the publication printing process could not be monitored separately. Thus, the VOCs in the mixed exhaust gas from this process were mainly composed of alkanes and oxygenated VOCs, which accounted for 47.29% and 44.57% of the total emissions, respectively.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); wooden furniture manufacturing; automobile manufacturing; printing; source profile

挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 作为大气臭氧和二次有机气溶胶污染的关键前体物^[1~3], 针对其排放来源和环境影响的研究日益受到大气污染防治研究机构和学者的关注^[4,5], 掌握区域 VOCs 主要来源, 推进减排已成为我国各级环境管理部门需要完成的重点工作任务之一。“十二五”期间北京市为贯彻《大气污染防治行动计划》和《北京市 2013-2017 年清洁空气行动计划》, 有针对性地加强了工业源挥发性有机物的减排工作, 采用疏解非首都功能、散乱污企业退出和污染治理措施升级改造相结合的方式推进了挥发性有机

物减排, 工业源排放量及排放构成发生了明显变化, 但溶剂使用工业源仍是北京市主要的工业 VOCs 排放源之一。

文献[6]提出了以重点地区为主要着力点, 以重点行业 and 重点污染物为主要控制对象, 加强活性强的 VOCs 排放控制的减排要求。为落实国家这一基于反应活性的 VOCs 控制要求, 北京市需要掌握

收稿日期: 2019-01-15; 修订日期: 2019-03-29

基金项目: 北京市科技重大专项 (Z171100004417029; D171100001317001)

作者简介: 方莉 (1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气挥发性有机污染物, E-mail: fl284921894@163.com

* 通信作者, E-mail: nielei@cee.cn

区域主要污染源 VOCs 成分谱。虽然国内外学者已针对生物质燃烧、道路汽油车、摩托车、非道路柴油机械、道路柴油车、居民燃煤炉灶等污染源开展 VOCs 源成分谱研究^[7~11], 其中文献[12~17]构建了含物种分配信息的我国人为源 VOCs 排放清单, 国内学者也在部分地区开展了主要溶剂使用污染源 VOCs 物种构成分析^[18~28], 但北京市在“十二五”期间积极推进溶剂使用行业落后工艺淘汰退出, 使得近几年溶剂使用行业生产工艺和含 VOCs 原辅材料使用情况发生了较为明显变化, 现有溶剂使用污染源 VOCs 源成分谱, 难以表征北京市溶剂使用源 VOCs 的排放构成, 无法支撑北京市实施基于反应活性的排放控制。

本研究基于北京市 VOCs 排放清单和下一阶段 VOCs 减排的需求, 针对汽车整车制造、木质家具制造和出版物印刷这 3 个主要溶剂使用行业, 选取代表性企业对重点排放环节排放 VOCs 的浓度水平和组分构成进行研究, 获取了北京市 VOCs 成分谱。本研究结果具有一定代表性, 以期为北京市下一阶段量化重点行业影响, 实施基于反应活性的 VOCs 排放控制提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采集

经前期行业整体情况调研可知, 近年来北京市汽车整车制造行业新建汽车生产线和原有汽车生产线改造绝大多数采用“阴极电泳+水性中涂+水性底色漆+溶剂型罩光漆”的技术路线; 木质家具制造行业采用水性涂装工艺代替了传统溶剂型涂装工艺; 印刷业已完成使用溶剂型油墨包装印刷企业的调整退出, 目前保留的印刷企业主要是出版物印刷企业。本研究选取 6 家典型溶剂使用企业作为行业

代表开展 VOCs 源成分谱研究, 包括 3 家木质家具制造企业、2 家汽车整车制造企业和 1 家出版物印刷企业, 企业类别、采样信息及废气处理设施类型见表 1。选取 1 家印刷企业的原因在于: 2015 年公布的北京市地方标准 DB 11/1201-2015《印刷业挥发性有机物排放标准》中制订了印刷行业的排放控制要求, 明确了工艺措施和管理要求。目前北京市印刷业已完成使用溶剂型油墨包装印刷企业的调整退出, 印刷行业工艺集中度高, 保留的印刷企业主要是出版物印刷企业, 采用的都是主流技术, 印刷工艺主要采用平版胶印, 油墨主要采用植物油基油墨, 所选出版物印刷企业排放现状可以代表北京市出版物印刷行业的排放特征。

国内已有研究成果通常利用处理措施后排气筒监测数据建立源成分谱, 这种方法因为同一行业不同企业采取的废气收集措施和处理技术存在较大差异, 无法准确表征行业原始 VOCs 排放构成, 本研究创新点在于以典型企业主要 VOCs 排放节点为采样对象, 通过监测获取了未经过处理措施的 VOCs 样品, 在此基础上建立的源成分谱, 能够表征行业原始 VOCs 排放构成。本研究以典型企业主要 VOCs 排放节点为采样对象, 采用无组织采样的方式对主要排放节点所产生的 VOCs 进行样品采集。采样方法借鉴美国 EPA Method-18, 使用具有恒定质量流量控制的无油采样泵抽取不锈钢密封桶内空气使桶内产生负压, 从而使废气通过颗粒物过滤器及采样探头匀速进入置于桶内的 Tedlar (10 L) 采样袋内以完成采样。采样点位设置在排放节点周边 1 m 处, 离地高度原则上为 1.5 m; 采样流量为 1 000 mL·min⁻¹, 采样时间为 10 min。此外, 样品采集均在生产线正常运行时段, 同一工艺过程不同点位的样品同时采集。

表 1 采样位置与数量

Table 1 Sampling points and sampling numbers

企业编号	企业类别	采样位置	采样数量	废气处理设施
1	木质家具	喷涂车间涂装工序	6	水帘柜
2	木质家具	喷涂车间涂装工序	8	水帘柜
3	木质家具	喷涂车间涂装工序	8	等离子体
4	汽车整车制造	喷涂车间底色漆工序 喷涂车间罩光工序	8	蓄热式氧化、沸石转轮浓缩等
5	汽车整车制造	喷涂车间底色漆工序 喷涂车间罩光工序	6	蓄热式氧化、沸石转轮浓缩等
6	出版物印刷	印刷车间	3	活性炭吸附

1.2 分析方法

本研究分析的 VOCs 共 106 种, 包括 TO-15 和 PAMS 标气中所有化合物。样品的分析依据美国 EPA (Environmental Protection Agency) 推荐的 TO-15

的方法, 采用三级冷阱预浓缩-二维 GC-MS/FID (Gas Chromatography-Mass Spectrometer/Flame Ionization Detector) 系统进行定性定量分析。首先自动进样系统 (Entech 7032AQ-L) 通过快速连接头抽

取气体样品 400 mL, 然后样品进入预浓缩仪 (Entech 7100A) 进行前处理. 冷阱 Module1 为多孔玻璃微珠, 能够去除水、 N_2 和 O_2 , 冷冻温度为 165°C , 解吸温度 10°C ; 冷阱 Module2 装有 Tenax 吸附剂, 由 Module 1 解吸出的气体物质在 -50°C 下富集浓缩于 Tenax 吸附阱中, 以去除 Ar 、 CH_4 、 CO_2 和微量水分, 解吸温度为 180°C ; 冷阱 Module3 (空管) 冷冻聚焦, 冷阱由空毛细管构成, 冷冻温度为 -160°C , 聚焦冷冻完毕后, Module3 快速升温使冷冻在毛细柱头的 VOCs 迅速汽化, 在氮载气的推动下, 解吸进入 GC-MS/FID 系统 (Agilent 7890A/5975C) 进行分离和定量. GC-MS/FID 系统的升温程序如下: GC 柱箱初始温度为 35°C , 保持 5 min; 然后以 $5^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温至 160°C , 保持 2 min; 再以 $20^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升温至 220°C 并保持 5 min, 全程运行 40 min. 载气为高纯氦气 (纯度 $>99.999\%$), 传输线温度为 250°C . 质谱条件: 质谱检测器的离子源类型为电子轰击电离 (EI), 电离能量为 70 eV, 离子源温度 230°C , 全扫描方式, 扫描范围为 $20\sim200\text{ u}$.

定量分析使用的外标气体为 TO-15 和 PAMS 混合标气 (Scott Gases, 美国), 前者包含 63 种化合物, 后者包含 56 种 VOCs. 内标气体含有 4 种化合物, 分别为溴氯甲烷、1,4-二氟苯、D5-氯苯和 1-溴-4-氟苯 (Spectra gases, 美国). GC-MS 分析系统的标准曲线包含 7 个浓度梯度 (1×10^{-9} 、 2.5×10^{-9} 、 5×10^{-9} 、 10×10^{-9} 、 15×10^{-9} 、 20×10^{-9} 和 25×10^{-9}), 各化合物标准曲线的 R^2 值均大于 0.99, 可保证数据的有效性和准确性.

2 结果与讨论

基于实验数据分析行业总体趋势, 在数据分析前采用了 SPSS 聚类分析做预处理, 通过 K-Means 算法对所有数据进行分类, 表明行业间数据相似度高, 行业内数据相似度高. 结果共检出 109 种 VOCs, 包括 29 种烷烃、11 种烯烃、34 种卤代烃、18 种芳香烃、15 种含氧有机物和 3 种其他物质. 基于北京市近几年监管力度的加强, 各行业的工艺集中度较高, 采用的都是主流技术, 企业间差距不大, 所以本文基于实验数据对行业的不同排放环节进行综合分析, 从而分析行业总体趋势, 对生产工艺类似且排放特征大致相同的行业进行统一处理分析, 对排放特征存在较大差异的行业进行了不同环节的处理分析. 木质家具制造业底漆、色漆和面漆涂装工艺及所使用含 VOCs 原辅材料类型相似, 因此, 以该行业不同工序 VOCs 组分构成的平均值作

为木质家具制造行业的源成分谱. 印刷业主要排放环节混合排放, 无法单独监测, 选取出版物印刷企业车间 VOCs 组分构成作为该行业的源成分谱. 汽车整车制造行业的电泳车间完全密闭, 中涂车间需要在恒温、恒湿的超清洁度工艺区内作业, 无法实现采样监测, 本研究只给出了罩光工序和色漆涂装工序的 VOCs 源成分谱. 表 2 列出了各行业的 VOCs 组分构成.

2.1 木质家具制造行业 VOCs 源成分谱

木质家具制造业排放的 VOCs 主要来源于涂装工序所使用的涂料, 稀释剂和固化剂等含 VOCs 原辅材料的挥发, 涂料种类, 稀释剂配比、固化剂使用情况等因素都会影响木质家具制造行业的排放, 此外, 间歇涂装作业的行业特征也会导致不同工况条件下建立的木质家具制造业成分谱存在一定的差异. 本研究基于典型木质家具制造企业实测获取了不同涂装工序排放 VOCs 的组分构成, 见图 1.

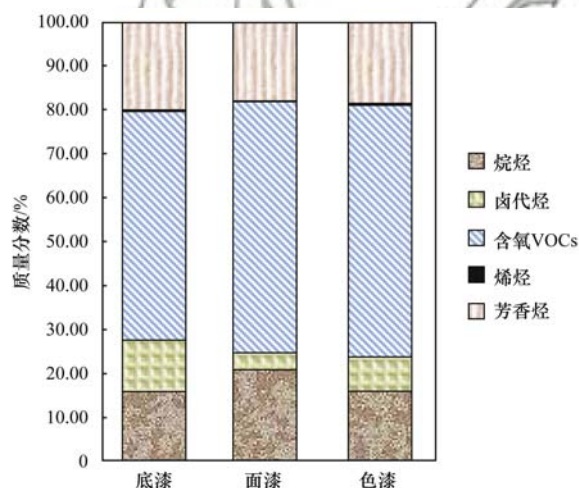


图1 木质家具制造行业不同喷涂工序 VOCs 组分构成

Fig. 1 Composition of VOCs emitted from different spraying processes in the wooden furniture manufacturing industry

底漆、面漆和色漆这 3 个工序排放 VOCs 的组分构成差异不大, 均为含氧 VOCs 占比最大, 超过 50.00%, 其次为芳香烃和烷烃, 卤代烃和烯烃占比相对较低. 对其进行归一化, 获得北京市木质家具制造行业 VOCs 源成分谱组分构成如图 2, 含氧 VOCs 占 55.08%, 芳香烃占 18.98%, 烷烃占比 17.42%, 卤代烃占比 8.18%, 烯烃占比 0.32%.

与国内外源谱相比, 北京市木质家具制造业 VOCs 排放的特点是芳香烃比例大幅下降, 国内木质家具制造业 VOCs 源谱比较见图 3, 芳香烃比例明显低于已有研究成果, 差异的原因一方面是部分研究成果未监测分析酯类等含氧 VOCs, 如文献[20~23], 但与已将含氧 VOCs 比例纳入源成分谱的研究结果相比^[19, 24], 芳香烃的占比还是低很多, 分

表 2 北京市典型溶剂使用行业 VOCs 源成分谱¹⁾/ %
Table 2 Source composition spectrum of VOCs in typical solvent-based industries in Beijing/ %

组分	质量分数 ± 标准差			
	木质家具	印刷(出版物)	汽车色漆涂装工序	汽车罩光工序
丙烷	0.02 ± 0.07	0.12 ± 0.07	ND	0.24 ± 0.06
异丁烷	0.94 ± 0.38	0.09 ± 0.07	0.02 ± 0.03	0.08 ± 0.01
1-丁烯	0.00 ± 0.01	0.02 ± 0.01	ND	ND
正丁烷	1.02 ± 0.37	0.18 ± 0.13	0.03 ± 0.05	0.10 ± 0.02
顺-2-丁烯	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.00	ND	ND
反-2-丁烯	ND	0.01 ± 0.01	ND	ND
异戊烷	0.59 ± 0.27	0.02 ± 0.00	0.01 ± 0.02	0.11 ± 0.04
正戊烯	0.02 ± 0.05	ND	ND	ND
正戊烷	0.24 ± 0.11	0.01 ± 0.01	0.03 ± 0.02	2.35 ± 1.16
反-2-戊烯	0.03 ± 0.02	0.01 ± 0.00	ND	ND
异戊二烯	0.17 ± 0.13	0.01 ± 0.00	ND	ND
顺-2-戊烯	0.01 ± 0.01	ND	ND	ND
2,2-二甲基丁烷	ND	0.03 ± 0.00	ND	ND
2,3-二甲基丁烷	0.48 ± 0.22	0.04 ± 0.04	ND	ND
2-甲基戊烷	3.12 ± 1.41	0.44 ± 0.01	ND	ND
环戊烷	0.10 ± 0.06	0.08 ± 0.01	ND	ND
3-甲基戊烷	1.91 ± 0.86	0.64 ± 0.02	ND	ND
正己烯	ND	0.02 ± 0.02	ND	ND
2,4-二甲基戊烷	0.14 ± 0.10	0.87 ± 0.31	ND	ND
甲基环戊烷	0.35 ± 0.14	2.51 ± 0.50	ND	ND
2-甲基己烷	0.27 ± 0.13	7.18 ± 2.92	0.01 ± 0.01	ND
环己烷	3.7 ± 1.76	1.56 ± 0.45	0.03 ± 0.03	ND
2,3-二甲基戊烷	ND	2.39 ± 0.83	ND	ND
3-甲基己烷	0.29 ± 0.15	6.35 ± 2.39	ND	ND
苯	0.28 ± 0.19	0.06 ± 0.02	0.03 ± 0.02	0.03 ± 0.03
2,2,4-三甲基戊烷	ND	ND	ND	ND
甲基环己烷	ND	4.00 ± 1.23	ND	ND
2,3,4-三甲基戊烷	ND	0.04 ± 0.02	ND	ND
2-甲基庚烷	ND	0.94 ± 0.26	ND	ND
3-甲基庚烷	0.02 ± 0.02	1.63 ± 0.39	ND	0.08 ± 0.08
辛烷	0.07 ± 0.05	1.23 ± 0.36	0.12 ± 0.08	ND
乙苯	2.89 ± 0.72	0.14 ± 0.06	3.99 ± 0.41	1.32 ± 0.09
间,对-二甲苯	5.51 ± 1.33	0.18 ± 0.08	6.68 ± 0.85	4.85 ± 0.30
壬烷	ND	0.65 ± 0.38	ND	ND
邻-二甲苯	3.16 ± 0.72	0.16 ± 0.07	5.36 ± 0.83	2.06 ± 0.15
苯乙烯	2.11 ± 1.01	0.16 ± 0.03	ND	ND
异丙苯	0.03 ± 0.01	0.14 ± 0.06	0.15 ± 0.03	0.64 ± 0.07
正丙苯	0.05 ± 0.04	0.14 ± 0.06	0.44 ± 0.09	3.4 ± 0.37
1-乙基-2-甲基苯	0.16 ± 0.13	0.15 ± 0.06	1.47 ± 0.29	6.25 ± 0.77
1-乙基-3-甲基苯	0.05 ± 0.06	0.18 ± 0.08	0.63 ± 0.13	16.29 ± 0.31
1,2,3-三甲基苯	0.05 ± 0.06	0.17 ± 0.05	0.89 ± 0.16	11.75 ± 1.05
癸烷	ND	1.22 ± 0.68	ND	ND
对-乙基甲苯	0.03 ± 0.04	0.16 ± 0.06	0.55 ± 0.11	6.23 ± 0.7
1,3,5-三甲基苯	0.49 ± 0.35	0.14 ± 0.06	4.85 ± 0.95	6.28 ± 0.43
间-二乙苯	ND	0.19 ± 0.07	0.13 ± 0.04	0.60 ± 0.02
对-二乙苯	0.03 ± 0.04	0.02 ± 0.01	0.53 ± 0.09	0.87 ± 0.33
正十一烷	0.06 ± 0.07	4.11 ± 3.32	0.32 ± 0.33	0.04 ± 0.04
正十二烷	1.81 ± 1.00	2.7 ± 2.06	ND	0.04 ± 0.04
丙烯	0.08 ± 0.03	0.03 ± 0.02	ND	ND
二氯二氟甲烷	0.02 ± 0.01	0.05 ± 0.02	ND	ND
二氯四氟乙烷	ND	ND	ND	ND
氯甲烷	0.09 ± 0.06	0.01 ± 0.00	ND	ND
氯乙烯	ND	0.00 ± 0.00	ND	ND
1,3-丁二烯	ND	0.00 ± 0.00	ND	ND
溴甲烷	ND	0.00 ± 0.00	ND	ND
氯乙烷	ND	0.00 ± 0.00	ND	ND

续表 2

组分	质量分数 ± 标准差			
	木质家具	印刷(出版物)	汽车色漆涂装工序	汽车罩光工序
三氯一氟甲烷	ND	0.02 ± 0.01	ND	ND
乙醇	36.71 ± 6.94	1.32 ± 0.51	10.01 ± 3.34	2.09 ± 0.05
丙烯醛	0.08 ± 0.07	ND	ND	0.03 ± 0.03
1,1-二氯乙烯	ND	0.00 ± 0.00	ND	ND
三氯三氟乙烷	ND	0.00 ± 0.00	ND	ND
丙酮	7.77 ± 2.89	0.27 ± 0.15	0.86 ± 0.27	1.32 ± 1.24
异丙醇	0.86 ± 0.65	42.85 ± 12.52	6.20 ± 1.94	4.35 ± 0.84
二硫化碳	0.02 ± 0.02	0.00 ± 0.00	ND	ND
二氯甲烷	7.35 ± 7.16	2.92 ± 2.61	0.76 ± 0.22	1.52 ± 0.63
反-1,2-二氯乙烯	ND	0.00 ± 0.00	ND	ND
甲基叔丁基醚	0.13 ± 0.20	0.06 ± 0.01	ND	ND
正己烷	2.27 ± 0.90	1.91 ± 0.16	0.03 ± 0.02	0.04 ± 0.04
1,1-二氯乙烷	ND	ND	0.12 ± 0.08	ND
乙酸乙烯酯	0.18 ± 0.41	ND	ND	ND
顺-1,2-二氯乙烯	ND	0.00 ± 0.00	ND	ND
2-丁酮	1.12 ± 0.42	ND	0.41 ± 0.17	0.08 ± 0.08
乙酸乙酯	8.22 ± 4.60	0.06 ± 0.04	0.27 ± 0.14	ND
氯仿	0.09 ± 0.12	0.19 ± 0.11	0.12 ± 0.05	ND
四氢呋喃	ND	ND	ND	ND
1,1,1-三氯乙烷	ND	ND	ND	ND
四氯化碳	ND	0.01 ± 0.01	ND	2.82 ± 1.52
1,2-二氯乙烷	0.03 ± 0.04	0.02 ± 0.00	0.01 ± 0.02	ND
庚烷	0.02 ± 0.02	6.34 ± 2.53	ND	ND
三氯乙烯	ND	0.64 ± 0.64	ND	ND
1,2-二氯丙烷	0.16 ± 0.09	0.06 ± 0.01	ND	ND
甲基丙烯酸甲酯	0.01 ± 0.01	ND	ND	ND
1,4-二氧己烷	ND	0.00 ± 0.00	ND	ND
一溴二氯甲烷	ND	ND	ND	ND
顺-1,3-二氯丙烯	0 ± 0	0.00 ± 0.00	ND	ND
4-甲基-2-戊酮	ND	ND	ND	ND
甲苯	3.66 ± 1.58	0.39 ± 0.09	0.41 ± 0.07	0.08 ± 0.00
反-1,3-二氯丙烯	0.07 ± 0.09	0.00 ± 0.00	ND	ND
1,1,2-三氯乙烷	ND	0.38 ± 0.38	ND	ND
四氯乙烯	0.27 ± 0.19	0.00 ± 0.00	ND	ND
2-己酮	ND	0.00 ± 0.00	ND	ND
二溴一氯甲烷	ND	0.00 ± 0.00	ND	ND
1,2-二溴乙烷	ND	0.00 ± 0.00	ND	ND
氯苯	ND	0.00 ± 0.00	ND	ND
溴仿	ND	0.00 ± 0.00	ND	ND
1,1,2,2-四氯乙烷	ND	0.00 ± 0.00	ND	ND
1,2,4-三甲苯	0.41 ± 0.36	0.24 ± 0.06	1.06 ± 0.31	23.45 ± 3.36
1,3-二氯苯	0.01 ± 0.01	0.00 ± 0.00	ND	ND
1,4-二氯苯	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01	ND	ND
苯基氯	0.08 ± 0.05	0.15 ± 0.05	ND	0.13 ± 0.13
1,2-二氯苯	ND	0.12 ± 0.04	ND	ND
1,2,4-三氯苯	ND	0.26 ± 0.09	ND	ND
六氯-1,3-丁二烯	ND	0.34 ± 0.12	ND	ND
萘	0.00 ± 0.00	0.20 ± 0.07	ND	ND
丁醇	ND	ND	35.77 ± 9.00	ND
乙酸丁酯	ND	ND	17.73 ± 2.65	ND
乙烯	ND	ND	ND	0.18 ± 0.01
乙炔	ND	ND	ND	0.12 ± 0.02
乙烷	ND	ND	ND	0.18 ± 0.08

1) 表中的数值是基于 109 种 VOCs 组分归一化计算所得, ND 表示低于检测限, 丁醇和乙酸丁酯的排放浓度均以甲苯计

析其原因主要在于采用溶剂型涂装工艺的木质家具企业已被淘汰或搬迁离开北京市, 剩余的企业已全部实现水性涂装工艺替代溶剂型涂装工艺, 从而使得北京市家具制造行业所产生的 VOCs 中, 芳香烃大幅下降.

从主要 VOCs 组分来看, 比例最高的是乙醇, 占 36.71%, 其次是乙酸乙酯和丙酮, 分别占 8.22% 和 7.77%, 然后是二氯甲烷、间、对-二甲

苯、环己烷、甲苯、邻-二甲苯、2-甲基戊烷和乙苯, 如图 4 所示, 上述 10 种主要 VOCs 组分占总排放的 82.09%.

2.2 汽车整车制造行业 VOCs 源成分谱

汽车整车制造行业排放的 VOCs 与木质家具制造行业类似, 主要来源于涂装工序所使用的涂料, 稀释剂和固化剂等含 VOCs 原辅材料的挥发, 除涂料种类, 稀释剂配比、固化剂使用情况等因素影响

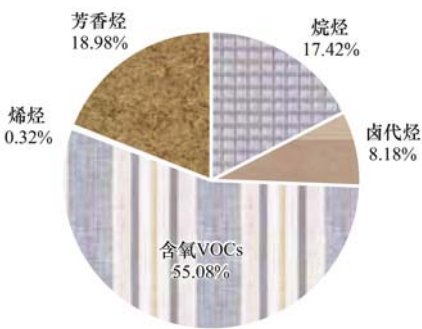


图2 木质家具制造行业 VOCs 源成分谱组分构成

Fig. 2 Composition of VOCs source component spectrum components in the wooden furniture manufacturing industry

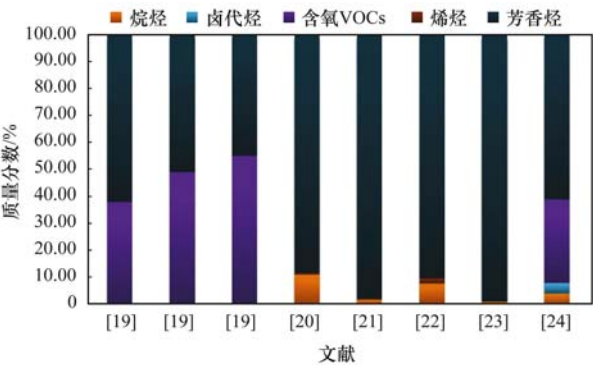


图3 国内外木质家具制造业 VOCs 源谱组分构成

Fig. 3 Source components of VOCs for domestic and foreign wooden furniture manufacturing

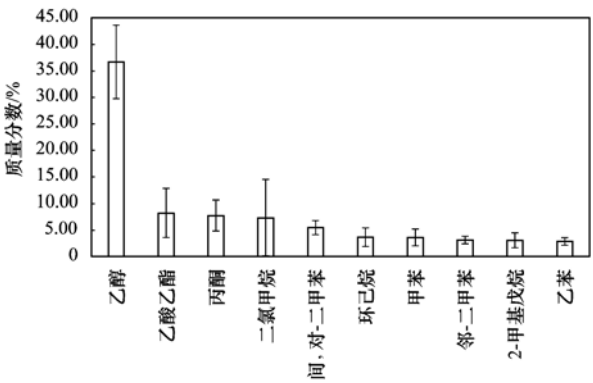


图4 北京市典型木质家具制造企业主要 VOCs 组分

Fig. 4 Main VOCs in typical wooden furniture manufacturing enterprises in Beijing

VOCs 排放,涂装设备换色过程中大量清洗溶剂使用也会影响 VOCs 排放。

北京市汽车整车制造行业底色漆工序和罩光工序分别采用水性涂装工艺和溶剂型涂装工艺,VOCs 排放浓度和组分构成均存在明显差异,底色漆工序的 TVOCs 为 $11.20 \sim 26.81 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,罩光工序为 $216.02 \sim 249.01 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。底色漆工序产生的 VOCs 中,含氧 VOCs 占比最高,达到 71.26%,芳香烃、卤代烃和烷烃所占比例分别为占比 27.14%、1.01% 和 0.58%,如图 5 所示。罩光工序所产生的

VOCs 中,芳香烃所占比例最高,达到 84.10%,其次为含氧 VOCs,占比 7.86%,其余 3 类物质所占比例较低,如图 6 所示。罩光工序的芳香烃占比约为含氧 VOCs 的 10.70 倍,而色漆工序的含氧 VOCs 比例为芳香烃的 2.63 倍。

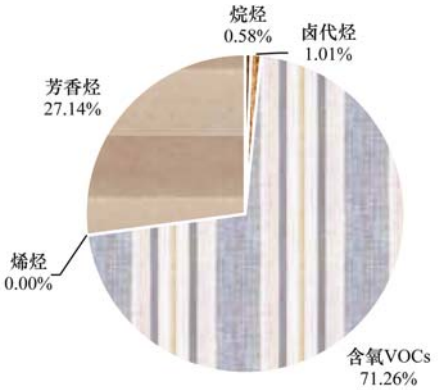


图5 汽车整车制造行业色漆工序 VOCs 组分构成

Fig. 5 Composition of VOCs from the painting process of the automobile manufacturing industry

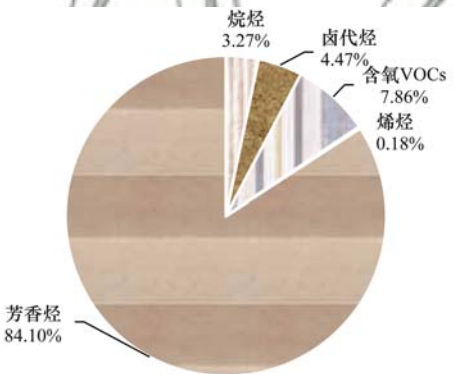


图6 汽车整车制造行业罩光工序 VOCs 组分构成

Fig. 6 Composition of VOCs from the varnishing process of the automobile manufacturing industry

对国内汽车整车制造行业 VOCs 源成分谱结果进行比较可以看出(图 7),已有研究结果因为涂装工序分类和细化程度不同以及纳入监测分析的 VOCs 物种不同存在明显差异,本研究结果底色漆工序源成分谱与成都市汽车制造企业源成分谱^[19]的研究结果类似,贡献最高的 VOCs 组分为含氧 VOCs,芳香烃占比明显下降,但北京市 VOCs 所占比例更高。分析差异原因主要在于北京市汽车整车制造企业面漆底色漆涂装工序已实现溶剂型涂装工艺的水性化替代,从而导致所排放的 VOCs 中芳香烃含量的下降。本研究结果罩光工序芳香烃占比最高,与文献^[27]中已将含氧 VOCs 比例纳入源成分谱的研究结果类似,这与北京市汽车整车制造工序仍采用溶剂型涂装工艺的现状是相符的。

从主要 VOCs 组分来看,底色漆工序主要 VOCs 组分见图 8,丁醇、乙酸丁酯、乙醇、间、对-

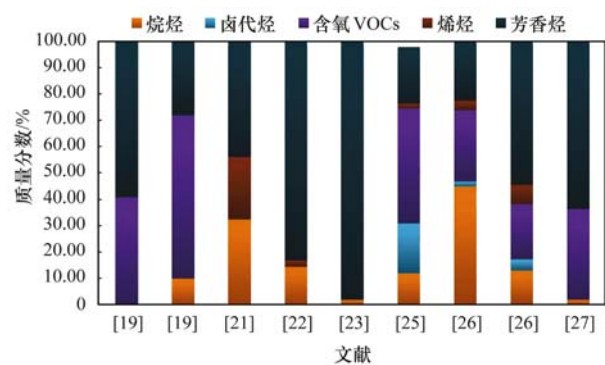


图7 国内外汽车整车制造业 VOCs 源谱组分构成
Fig. 7 Source components of VOCs for domestic and foreign automobile manufacturing

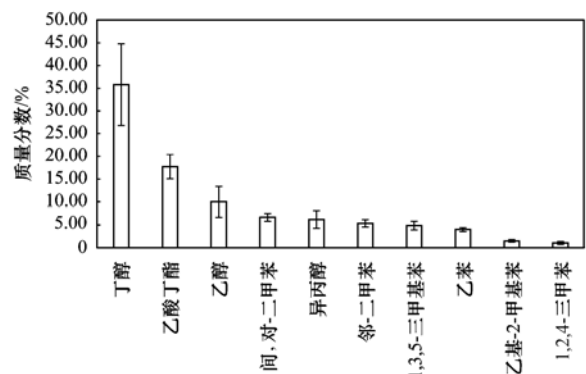


图8 汽车整车制造行业色漆工序主要 VOCs 组分
Fig. 8 Main VOCs in the painting process of the automobile manufacturing industry

二甲苯、异丙醇、邻-二甲苯、1,3,5-三甲基苯、乙苯、1-乙基-2-甲基苯和1,2,4-三甲基苯是底色漆工序排放的主要 VOCs 组分, 占总排放的 93.12%; 丁醇为底色漆涂装工序的首要污染物, 占总 VOCs 比例达到 35.77%, 其次为乙酸丁酯和乙醇, 占比分别为 17.73%, 10.01%; 罩光工序的主要 VOCs 组分见图 9, 1,2,4-三甲基苯、1-乙基-3-甲基苯、1,2,3-三甲基苯、1,3,5-三甲基苯、1-乙基-2-甲基苯、对-

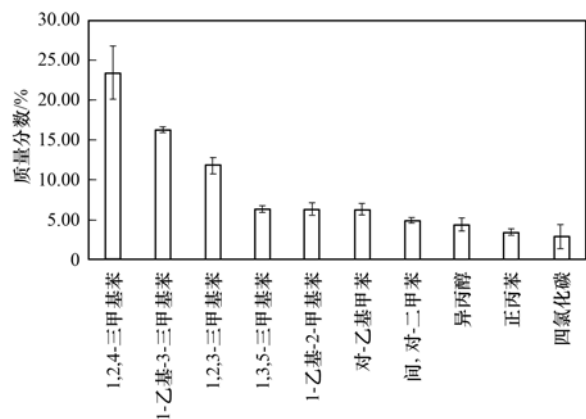


图9 汽车整车制造行业罩光工序主要 VOCs 组分
Fig. 9 Main VOCs in the varnishing process of the automobile manufacturing industry

乙基甲苯、间,对-二甲苯、异丙醇、正丙苯和四氯化碳是罩光工序排放的主要 VOCs 组分, 占总排放的 85.66%; 1,2,4-三甲基苯、1-乙基-3-甲基苯和1,2,3-三甲基苯为主的 6 种 C9 芳香烃, 所占比例很高, 占排放 VOCs 的 70.26%, 显示为了降低涂料毒性, 应对环境管理部门对甲苯和二甲苯的管控, 采用三甲基苯等 C9 芳香烃替代甲苯和二甲苯已成为行业发展趋势。

2.3 印刷行业 VOCs 源成分谱

印刷行业排放的 VOCs 主要来源于印刷生产过程中所使用的油墨, 稀释剂、润版液、清洗剂、光油和胶粘剂等含 VOCs 原辅材料的挥发, 印刷工艺中含 VOCs 原辅材料使用量和 VOCs 含量水平是影响印刷行业 VOCs 排放强度和组分构成的主要因素。对于出版物印刷企业来说, 油墨, 润版液、清洗剂是印刷过程中使用量最多的含 VOCs 原辅材料。

本研究基于典型出版物印刷企业现场监测结果表明, 出版物印刷 VOCs 源成分谱组分构成如图 10, 烷烃占比最大, 为 47.29%, 其次为含氧 VOCs, 占比 44.57%, 卤代烃、芳香烃、烯烃占比很少, 分别为 5.20%、2.83% 和 0.11%。

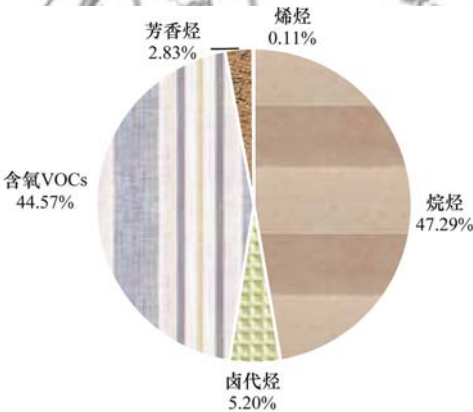


图10 印刷行业 VOCs 组分构成

Fig. 10 Composition of VOCs in the printing industry

对国内印刷行业 VOCs 源成分谱结果进行比较可以看出, 已有研究结果因为印刷工艺分类不同以及纳入监测分析的 VOCs 物种不同存在明显差异, 见图 11, 多数研究成果关注的是采用凹版印刷工艺的包装印刷子行业, 与本研究没有明显的可比性。本研究结果获得的出版物印刷行业源成分谱与文献 [26] 中关于北京市印刷行业 VOCs 排放成分特征的研究结果类似, 均为含氧 VOCs 和烷烃类为主要物种, 但烷烃类和芳香烃所占比例明显下降, 含氧 VOCs 所占比例增加, 分析差异原因可能是北京市近几年鼓励推广使用低 VOCs 原辅材料, 植物油基大豆油墨的使用降低了烷烃和芳香烃的排放占比,

相应就提高了含氧 VOCs 的占比。

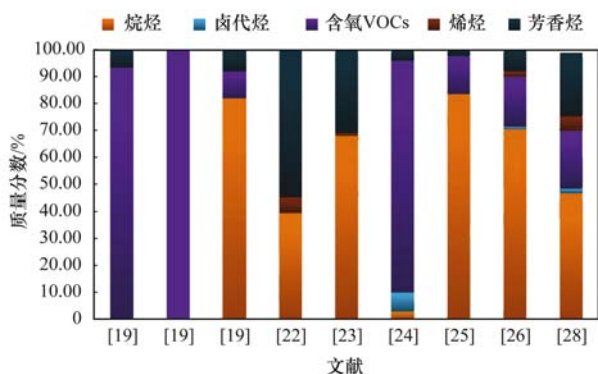


图 11 国内外印刷行业 VOCs 源谱组分构成

Fig. 11 Source components of VOCs for the domestic and foreign printing industry

从主要 VOCs 组分来看,出版物印刷排放的主要 VOCs 组分见图 12, 异丙醇、2-甲基己烷、3-甲基己烷、庚烷、正十一烷、甲基环己烷、二氯甲烷、正十二烷、甲基环戊烷和 2,3-二甲基戊烷是印刷行业排放的主要 VOCs 组分, 占总排放的 81.36%; 异丙醇为出版物印刷排放的首要污染物, 占总 VOCs 比例达到 42.85%, 其它 9 种污染物占比差别不大, 均低于 7.20%。

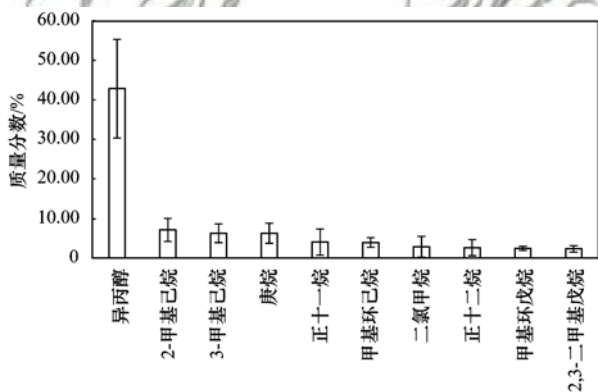


图 12 印刷行业主要 VOCs 组分

Fig. 12 Main VOCs in the printing industry

3 结论

(1) 与其他 VOCs 源成分谱研究成果比较发现, 由于生产工艺和含 VOCs 原辅材料使用情况的差异, 北京市木质家具制造、汽车整车制造和出版物印刷行业源成分谱均体现出明显的区域特征。

(2) 北京市木质家具制造行业因为实现水性化改造, 源成分谱与国内传统木质家具制造行业源成分谱存在明显差异, 不同工序排放的 VOCs 组分均以含氧 VOCs 为主, 其次是芳香烃和烷烃, 卤代烃和烯烃占比较小, 主要组分为乙醇, 乙酸乙酯和丙酮。

(3) 北京市汽车整车制造行业的底色漆涂装工序因为完成水性化改造, 源成分谱与国内传统溶剂

型企业源成分谱存在差异, 排放的 VOCs 中, 含氧 VOCs 占比最高, 芳香烃大幅降低。罩光工序源成分谱与国内传统溶剂型企业源成分谱类似, 以芳香烃为主, 所占比例达 84.1%, 但主要组分与其他研究成果存在差异, 1,2,4-三甲苯、1-乙基-3-甲基苯和 1,2,3-三甲基苯为主的 C9 芳香烃所占比例很高。

(4) 北京市已淘汰使用溶剂型油墨的包装印刷企业, 剩余企业以出版物印刷为主, 排放的 VOCs 中, 以含氧 VOCs 和烷烃为主, 主要组分为异丙醇。

(5) 从加强活性强的 VOCs 排放控制的减排要求出发, 三个溶剂使用行业中, 北京市应重点管控行业的是芳香烃排放占比高的汽车整车制造行业, 重点管控的排放环节是排放 C9 芳香烃的罩光工序。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Yuan B, Hu W W, Shao M, *et al.* VOC emissions, evolutions and contributions to SOA formation at a receptor site in eastern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13** (17): 8815-8832.
- [3] Zhang Y H, Su H, Zhong L J, *et al.* Regional ozone pollution and observation-based approach for analyzing ozone-precursor relationship during the PRIDE-PRD2004 campaign [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42** (25): 6203-6218.
- [4] Andersson K, Bakke J V, Bjørseth O, *et al.* TVOC and health in non-industrial indoor environments [J]. *Indoor Air*, 1997, **7** (2): 78-91.
- [5] Kumar A, Singh D, Kumar K, *et al.* Distribution of VOCs in urban and rural atmospheres of subtropical India: Temporal variation, source attribution, ratios, OFP and risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **613-614**: 492-501.
- [6] 宗述. 六部委印发“十三五”挥发性有机物污染防治工作方案 [J]. *中国环境监察*, 2017, (9): 13-14.
- [7] 高爽, 金亮茂, 史建武, 等. 轻型汽油车 VOCs 排放特征和排放因子台架测试研究 [J]. *中国环境科学*, 2012, **32** (3): 397-405.
- [8] Gao S, Jin L M, Shi J W, *et al.* VOCs emission characteristics and emission factors of light-duty gasoline vehicles with bench test [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32** (3): 397-405.
- [8] 陈天增, 葛艳丽, 刘永春, 等. 我国机动车排放 VOCs 及其大气环境影响 [J]. *环境科学*, 2018, **39** (2): 478-492.
- [9] Chen T Z, Ge Y L, Liu Y C, *et al.* VOCs Emission from motor vehicles in China and its impact on the atmospheric environment [J]. *Environmental Science*, 2018, **39** (2): 478-492.
- [9] Wang J, Jin L M, Gao J H, *et al.* Investigation of speciated VOC in gasoline vehicular exhaust under ECE and EUDC test cycles [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **445-446**: 110-116.
- [10] Yao Y C, Tsai J H. Effects of gasoline aromatic content on emissions of volatile organic compounds and aldehydes from a four-stroke motorcycle [J]. *Environmental Technology*, 2013, **34**

- (17): 2531-2539.
- [11] 区家敏, 冯小琼, 刘郁葱, 等. 珠江三角洲机动车挥发性有机物排放化学成分谱研究[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(4): 826-834.
- Ou J M, Feng X Q, Liu Y C, *et al.* Source characteristics of VOCs emissions from vehicular exhaust in the Pearl River Delta region[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(4): 826-834.
- [12] Wei W, Wang S X, Hao J M, *et al.* Trends of chemical speciation profiles of anthropogenic volatile organic compounds emissions in China, 2005-2020[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2014, **8**(1): 27-41.
- [13] 周子航, 邓也, 谭钦文, 等. 四川省人为源大气污染物排放清单及特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(12): 5344-5358.
- Zhou Z H, Deng Y, Tan Q W, *et al.* Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in the Sichuan Province[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5344-5358.
- [14] 夏思佳, 刘倩, 赵秋月. 江苏省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 592-599.
- Xia S J, Liu Q, Zhao Q Y. Emission inventory of anthropogenically sourced VOCs and its contribution to ozone formation in Jiangsu Province [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 592-599.
- [15] 孙辰, 詹领茜, 尹珩, 等. 武汉市人为源挥发性有机物排放清单的建立[J]. 环境科学与技术, 2018, **41**(4): 166-171.
- Sun C, Zhan L X, Yin H, *et al.* Establishment of anthropogenic volatile organic compounds emission inventory in Wuhan [J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, **41**(4): 166-171.
- [16] 袁梦晨, 祖彪, 张青新, 等. 辽宁省人为源大气污染物排放清单及特征研究[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(4): 1345-1357.
- Yuan M C, Zu B, Zhang Q X, *et al.* Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in Liaoning Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(4): 1345-1357.
- [17] 陈小方, 张伟霞, 陈柄旭, 等. 江门市人为源挥发性有机物排放清单[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 600-607.
- Chen X F, Zhang W X, Chen B X, *et al.* Emission inventory of anthropogenic VOCs in Jiangmen City [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 600-607.
- [18] 佟瑞鹏, 张磊, 杨校毅, 等. 家具制造过程中 VOCs 的来源分析及环境健康风险评估[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 672-683.
- Tong R P, Zhang L, Yang X Y, *et al.* Source analysis and environmental health risk assessment of VOCs in furniture manufacturing[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 672-683.
- [19] 赵锐, 黄络萍, 张建强, 等. 成都市典型溶剂源使用行业 VOCs 排放成分特征[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(3): 1147-1154.
- Zhao R, Huang L P, Zhang J Q, *et al.* Emissions characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from typical industries of solvent use in Chengdu City[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(3): 1147-1154.
- [20] 洪沁, 常宏宏. 家具涂装行业 VOCs 污染特征分析[J]. 环境工程, 2017, **35**(5): 82-86.
- Hong Q, Chang H H. Pollution characteristics analysis of VOCs emitted from furniture painting industry [J]. *Environmental Engineering*, 2017, **35**(5): 82-86.
- [21] 莫梓伟, 牛贺, 陆思华, 等. 长江三角洲地区基于喷涂工艺的溶剂源 VOCs 排放特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 1944-1951.
- Mo Z W, Niu H, Lu S H, *et al.* Process-based emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from paint industry in the Yangtze River Delta, China[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(6): 1944-1951.
- [22] 田亮, 魏巍, 程水源, 等. 典型有机溶剂使用行业 VOCs 成分谱及臭氧生成潜势[J]. 安全与环境学报, 2017, **17**(1): 314-320.
- Tian L, Wei W, Cheng S Y, *et al.* Source profiles and ozone formation potential of volatile organic compounds from the use of solvents in typical industry [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, **17**(1): 314-320.
- [23] Yuan B, Shao M, Lu S H, *et al.* Source profiles of volatile organic compounds associated with solvent use in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(15): 1919-1926.
- [24] Zheng J Y, Yu Y F, Mo Z W, *et al.* Industrial sector-based volatile organic compound (VOC) source profiles measured in manufacturing facilities in the Pearl River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **456-457**: 127-136.
- [25] 翟增秀, 孟洁, 王巨, 等. 有机溶剂使用企业挥发性恶臭有机物排放特征及特征物质识别[J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3557-3562.
- Zhai Z X, Meng J, Wang G, *et al.* Emission characteristics and characteristic substance identification of volatile odorous organic compounds in industries using organic solvents [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(8): 3557-3562.
- [26] 莫梓伟, 陆思华, 李悦, 等. 北京市典型溶剂使用企业 VOCs 排放成分特征[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(2): 374-380.
- Mo Z W, Lu S H, Li Y, *et al.* Emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from typical solvent use factories in Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(2): 374-380.
- [27] 刘郁葱, 夏泽群, 高宗江, 等. 轻型汽车和汽车塑料配件涂装工艺过程的 VOCs 组分特征[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(11): 3944-3951.
- Liu Y C, Xia Z Q, Gao Z J, *et al.* Process-based emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from light vehicle and auto plastic parts manufacturing industry [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(11): 3944-3951.
- [28] 杨杨, 杨静, 尹沙沙, 等. 珠江三角洲印刷行业 VOCs 组分排放清单及关键活性组分[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(3): 326-333.
- Yang Y, Yang J, Yin S S, *et al.* Speciated VOCs emission inventory and key species from printing industry in the Pearl River Delta region [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(3): 326-333.

CONTENTS

Vertical Distribution and Transport of PM _{2.5} During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Peng, <i>et al.</i> (4303)
Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing	CHANG Shu-cheng, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (4310)
Diurnal Variations and Source Analysis of Water-soluble Compounds in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (4319)
Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China III to China IV Diesel Vehicles in Shenyang ...	ZHAO Xue-yan, WANG Jing, ZHU Sheng-nan, <i>et al.</i> (4330)
Characteristics of Heavy Metal Pollutants of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks	CHENG Ke, JI Wan-wan, HAO Wei-wei, <i>et al.</i> (4337)
Size Distribution Characteristics and Inhalation Exposure of Particle-Bound PAHs in an Industrial City	WANG Juan, GUO Guan-lin, QIN Ning, <i>et al.</i> (4345)
High-frequency Evolution of Urban Atmospheric Ammonia and Ammonium and Its Gas-to-Particle Conversion Mechanism in Nanjing City	SHAO Sheng-cheng, CHANG Yun-hua, CAO Fang, <i>et al.</i> (4355)
Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou	LI Zhu-jie, TAN Hao-bo, ZHENG Jun (4364)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Zhengzhou	ZHANG Yi-xiang, YIN Sha-sha, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (4372)
Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SUN Xi-bo, <i>et al.</i> (4382)
Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing	FANG Li, LIU Wen-wen, CHEN Dan-ni, <i>et al.</i> (4395)
Emission Characteristics of IVOCs from the Combustion of Residential Solid Fuels and the Impact of Burning Temperature	LU Ya-jing, FENG Yan-li, QIAN Zhe, <i>et al.</i> (4404)
Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations	WANG Run-fang, MA Xiao-dan, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (4412)
Hydrolysis of COS over MgAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	WEI Zheng, ZHANG Xin, ZHANG Feng-lian, <i>et al.</i> (4423)
Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, WU Jing-kui, <i>et al.</i> (4431)
Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin	CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhong-ya, <i>et al.</i> (4440)
Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake	HUANG Dong-ling, NI Zhao-kui, ZHAO Shuang, <i>et al.</i> (4450)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Water Quality in the Jinze Reservoir and Its Inflow	LIU Ming-kun, TONG Jun, HU Bo, <i>et al.</i> (4461)
Temporal and Spatial Variations in the Conductivity in Different Media in Taihu Lake, China	WANG Rui, DAI Dan, ZHANG Chi, <i>et al.</i> (4469)
Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes	SHI Yuan-yuan, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (4478)
Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images	LI Na, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4487)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu	ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, <i>et al.</i> (4497)
Composition and Distribution of Biodegradable Compounds in the Macrophyte Dominated Zone of Lake Taihu	QI Chuang, FANG Jia-qi, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (4505)
Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai ...	DU Cai-li, YANG Li, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (4513)
Geochemical Characteristics and Ecological Significance of Carbon Isotopes in Groundwater Under the Influence of Different Land Use Types in Karst Areas	REN Kun, PAN Xiao-dong, ZENG Jie, <i>et al.</i> (4523)
Temporal Response of Subterranean Karst Stream Hydrochemistry to Urbanization	YANG Ying-zeng, HE Shou-yang, WU Pan, <i>et al.</i> (4532)
Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (4543)
Removal of Fe(II), Mn(II), and NH ₄ ⁺ -N by Using δ-MnO ₂ Coated Zeolite	MA Wen-jie, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, <i>et al.</i> (4553)
Strengthening Effect of Different Cattail Pretreatment Methods on the Denitrification of Horizontal Subsurface Flow in a Constructed Wetland	XIONG Jia-qing, LU Xue-bin, ZHENG Yu-cong, <i>et al.</i> (4562)
Short-cut Nitrification Start-up and Optimization of Operating Conditions Under Different Control Strategies	LIU An-di, ZHAO Kai-liang, LIU Hong, <i>et al.</i> (4569)
Start-up of a Three-stage PN/A Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia	JI Xiao-qing, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4578)
Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis	SUN Shi-hao, JIA Ti-pei, CHEN Kai-qi, <i>et al.</i> (4585)
Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Typical Industrial Areas of Chengdu	RAN Zong-xin, CHEN Jin-yu, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (4594)
Absorption Characterization and the Identification of Factors Influencing Five Organophosphate Esters in Water-Soil System	HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, WEI Shi-qiang (4604)
Adsorption and Interaction of Cu ²⁺ and Pb ²⁺ on BS-12 Amphoteric Modified Bentonites	BU Shuai-bin, MENG Zhao-fu, Sambath Yek, <i>et al.</i> (4611)
Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province	HONG Tao, KONG Xiang-sheng, YUE Xiang-fei (4620)
Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou	TANG Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (4628)
Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing	LI Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, <i>et al.</i> (4637)
Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars	CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, <i>et al.</i> (4647)
Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice	WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, <i>et al.</i> (4654)
Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	LIAO Yuan-chen, Nazgul-Jahitbek, LI Mei, <i>et al.</i> (4661)
Regulation and Mechanism of a Dregs Biochar Matrix Combined with Maifanite on a Soil-Ryegrass System	XIAO Liang-liang, DING Yuan (4668)
Microbial Community Structure and the Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Soil Contaminated by Sulfamethoxazole	ZHANG Hai-feng, SHI Ming-ming, SUN Yan-mei, <i>et al.</i> (4678)
Dynamics of Antibiotic Resistance Genes During the Municipal Solid Waste Leachate Treatment	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, YAN Yi-jun, <i>et al.</i> (4685)
Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability	SHAO Hui-yun, LI Zi-yue, LIU Dan, <i>et al.</i> (4691)
Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil	ZHOU Peng, QI Le, NIU Hai-dong, <i>et al.</i> (4700)
Response of Soil CO ₂ Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems	YOU Jing, NI Jiu-pai, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4708)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Bacterial Community Structure	ZHANG Ting-ting, CHEN Shu-tao, WANG Jun, <i>et al.</i> (4718)
Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, WANG Sheng, <i>et al.</i> (4725)
Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015	PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, <i>et al.</i> (4733)