

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第6期

Vol.38 No.6

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

PM _{2.5} 浓度空间分异模拟模型对比:以京津冀地区为例	吴健生,王茜,李嘉诚,涂媛杰(2191)
北京地区近35年大气污染扩散条件变化	郭淳薇,孙兆彬,李梓铭,张小玲,杨慧玲(2202)
北京市典型区域夏季降水及其对大气污染物的影响	韩力慧,张海亮,向欣,张鹏,程水源,魏巍(2211)
北京山谷风环流特征分析及其对PM _{2.5} 浓度的影响	董群,赵普生,王迎春,苗世光,高健(2218)
北京市建筑施工扬尘排放特征	薛亦峰,周震,黄玉虎,王堃,聂滕,聂磊,秦建平(2231)
生物质成型燃料锅炉挥发性有机物排放特征	吴昌达,张春林,白莉,沈丽冉,王伯光,刘军,杨立辉(2238)
广州番禺大气成分站复合污染过程VOCs对O ₃ 与SOA的生成潜势	邹宇,邓雪娇,李菲,殷长泰(2246)
南京北郊大气臭氧周末效应特征分析	王俊秀,安俊琳,邵平,邹嘉南,林旭,张玉欣(2256)
亚热带稻区大气氨/铵态氮污染特征及干湿沉降	王杰飞,朱潇,沈健林,曾冠军,王娟,吴金水,李勇(2264)
宣威肺癌高发区燃煤排放颗粒物中铁的价态及其氧化性	王强翔,谭正莹,赵慧,李继华,田林玮,王青曜,米持真一,吕森林(2273)
垃圾焚烧厂区二噁英污染及厂区工人呼吸暴露评估	杜国勇,汪倩,张姝琳,张素坤,邓春萍,张洪铭,朱盟翔,蒋昕,朱成旺,任燕玲(2280)
重庆市新型干法水泥厂汞排放特征	张成,张雅惠,王永敏,王定勇,罗程钟,徐凤,何秀清(2287)
轻型汽油车简易瞬态工况法与定容全流稀释采样法(CVS)的排放相关性	王鸿宇,黄成,胡馨遥,李莉,陈勇航,徐健(2294)
不同排放标准公交车燃用生物柴油颗粒物排放特性	楼狄明,赵成志,徐宁,谭丕强,胡志远(2301)
西江水氢氧同位素组成的空间变化及环境意义	许琦,李建鸿,孙平安,何师意,于爽(2308)
基于SWAT与DNDC模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程	韩宁,陈维梁,高扬,郝卓,于贵瑞(2317)
三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较	姜伟,周川,纪道斌,刘德富,任豫霜,Douglas Haffner,谢德体,张磊(2326)
滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征	王一茹,王圣瑞,焦立新,张云,高秋生,杨枫(2336)
香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算	罗玉红,聂小倩,李晓玲,戴泽龙,胥焘,黄应平(2345)
大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价	张家泉,田倩,许大毛,占长林,刘婷,姚瑞珍,刘先利,肖文胜(2355)
海水淡化低温多效蒸馏工艺(LT-MED)沿程溴代消毒副产物的生成	齐菲,孙迎雪,杨哲,胡春芳,常学明,胡洪营(2364)
两种水体铜配合容量测试方法的适用性比较及应用	王晨烨,姜括,谢文龙,汪磊(2373)
高地下水位地区透水铺装控制径流污染的现场实验	金建荣,李田,时珍宝(2379)
稳定型纳米零价铁去除地下水中2,4-二氯苯酚	张永祥,常杉,李飞,徐毅,高维春(2385)
超声、紫外增强H ₂ O ₂ /KI降解磺胺甲基嘧啶	魏红,孙博成,杨小雨,李克斌(2393)
不同铅负载量改性膨润土对水中磷酸盐吸附作用的对比	姜博汇,林建伟,詹艳慧,邢云青,黄宏,储鸣,王星星(2400)
铁炭内电解垂直流人工湿地对污水厂尾水深度脱氮效果	郑晓英,朱星,周翔,徐亚东,王菊,韦诚,高雅洁,周橄(2412)
组合生物滤池对养殖废水的净化效率及影响因素分析	张世羊,张胜花,张翔凌,王广军(2419)
温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响	张玲,彭党聪,常蝶(2429)
海洋厌氧氨氧化菌的富集培养及其脱氮特性	冯莉,于德爽,李津,单晓静,杨振琳(2435)
不同生物过滤系统铵态氮转化速率及生物膜特性分析	周洪玉,韩梅琳,仇天雷,高敏,孙兴滨,王旭明(2444)
磷酸盐对厌氧氨氧化活性污泥脱氮效能的影响	周正,刘凯,王凡,林兴,李祥,黄勇,顾澄伟(2453)
碳源胁迫下脱氮除磷颗粒污泥性能变化及其机制	秦诗友,陈威,马兆瑞,刘小英,陈晓国,余文韬,夏媛媛,黄健(2461)
外源Ca ²⁺ 对SBR启动期活性污泥胞外多聚物的动态影响	任丽飞,杨新萍,张雯雯(2470)
膨胀污泥中丝状菌的分离鉴定与特性分析	张崇森,牛全睿,徐丽梅,王陇梅,王岱,武少华(2477)
反硝化悬浮填料适用性及其微生物群落结构解析	谭阳,李激,徐巧,付磊,尤世界,王硕(2486)
硫代硫酸钠对排硫硫杆菌固碳能力的影响及其作用机制	李欢,王磊,王亚楠(2496)
关帝山森林土壤真菌群落结构与遗传多样性特征	乔沙沙,周永娜,柴宝峰,贾彤,李鑫(2502)
基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析	陈秀端,卢新卫(2513)
基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评价:以PAHs为例	佟瑞鹏,杨校毅(2522)
Eh、pH和铁对水稻土钾释放的影响机制	钟松雄,尹光彩,陈志良,林亲铁,黄润林,刘德玲,彭焕龙,黄玲,王欣,蒋晓璐(2530)
典型土壤不同提取态Cd与水稻吸收累积的关系	陈齐,邓潇,陈珊,侯红波,彭佩钦,廖柏寒(2538)
复合改良剂对Cd污染稻田早晚稻产地修复效果	陈立伟,杨文骏,辜娇峰,周航,高子翔,廖柏寒(2546)
两种钝化剂对土壤Pb、Cd、As复合污染的菜地修复效果	田桃,雷鸣,周航,杨文骏,廖柏寒,胡立琼,曾敏(2553)
大豆和小麦根系对非的吸持作用及其生物有效性	王红菊,李倩倩,沈羽,顾若尘,盛好,占新华(2561)
源自腐殖土的溶解性有机质组分对棕壤和黑土吸附苯并三唑的影响	杨宁伟,毕二平(2568)
地形、树种和土壤属性对喀斯特山区土壤胞外酶活性的影响	罗攀,陈浩,肖孔操,杨利琼,文丽,李德军(2577)
长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤N ₂ O排放的影响	郝耀旭,刘继璇,袁梦轩,周应田,杨学云,顾江新(2586)
基于大气被动式采样的人体头发中类二噁英多氯联苯暴露的途径	袁浩东,白瑶,李秋旭,王英,金军(2594)
广西刁江野生鱼类重金属积累特征及其健康风险评价	王俊能,马鹏程,张丽娟,陈棉彪,黄楚珊,柳晓琳,胡国成,许振成(2600)
活性炭在中高温条件下对玉米秸秆厌氧发酵的影响	甘荣,葛明民,刘勇迪,贾红华,闫志英,雍晓雨,吴夏荒,周俊(2607)
工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展	王红丽,杨肇勋,景盛翱(2617)
《环境科学》征稿简则(2452) 《环境科学》征订启事(2560) 信息(2201, 2230, 2384)	

工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展

王红丽¹, 杨肇勋^{1,2}, 景盛翱¹

(1. 上海市环境科学研究院, 国家环境保护城市大气复合污染成因与防治重点实验室, 上海 200233; 2. 复旦大学环境科学与工程系, 上海市大气颗粒物污染及防治重点实验室, 上海 200433)

摘要: 工艺过程源和溶剂使用源是我国大气挥发性有机物(VOCs)最主要的工业来源, 近年来源成分谱的研究逐步受到重视。本文总结梳理了2000年以来国内外有关工艺过程源和溶剂使用源排放VOCs特征的相关研究, 对比分析了不同研究结果的差异, 结合不同研究的对象和方法, 探讨了影响溶剂使用和工艺过程源排放成分谱研究的主要影响因素。结果表明, 工艺过程源下分的32个三级子类(参照国家《大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南》源分类方法)中, 有相关研究报道的包括八类; 溶剂使用源下分的10个三级子类中, 有相关研究报道的包括四类。总体而言, 细化的行业研究种类比较少, 不同行业排放VOCs组成差异大, 可比性较差。污染源采集测试方法对同一行业源排放成分谱研究结果有较大影响。此外, 成分谱中VOCs物质名录的不统一也不利于不同研究结果的比较; 含氧VOCs是上述两类污染源排放的重要组分, 需要纳入测量范围。未来, 有必要建立开放交互式的工艺过程源和溶剂使用源排放VOCs成分谱库平台, 鼓励并形成不同研究结果的共享及录入机制; 并建立相关研究成果数据入库规范, 包括研究的对象、方法、地区、时段以及样本量等详细信息, 以便开展不同VOCs源成分谱不确定性评判。

关键词: 挥发性有机物; 工艺过程源; 溶剂使用; 排放源成分谱; 研究进展

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)06-2617-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201611119

Volatile Organic Compounds (VOCs) Source Profiles of Industrial Processing and Solvent Use Emissions: A Review

WANG Hong-li¹, YANG Zhao-xun^{1,2}, JING Sheng-ao¹

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Formation and Prevention of Urban Air Pollution Complex, Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Atmospheric Particle Pollution and Prevention, Department of Environmental Science & Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Industrial processing and solvent use are two most important industrial sources of volatile organic compounds (VOCs) in China, and the source profile study has attracted increasing attention recently. Studies of VOCs source profiles from industrial processing and solvent use since the year of 2000 were summarized in this study, focusing on the comparison among different studies and the potential impact of different research methods. In general, studies were very limited and focused on few sources. Specifically, only 8 of 32 sub-categories of the industrial processing (according to the source classification method of the National Guidelines for VOCs Inventories Preparation) have been reported, and in terms of the solvent use sources, 4 of 10 sub-categories have been reported. There were large differences among the VOCs patterns of different sub categories emissions of industrial processing or solvent use. In terms of studies of the similar emissions, significant differences of VOCs profiles were resulted from the different research methods, such as the different sampling methods and VOCs analysis techniques. In addition, the non-uniformity of VOC species in the source profile caused difficulty for the comparison of different research results. Oxygen-containing VOCs were important components of the above two types of pollution sources and needed to be included in the measurement. An opening and interactive database of VOCs from industrial processing and solvent use is critically essential in the future, and mechanisms of sharing and inputting relative research results should be formed to encourage researchers to join the database establishment. Correspondingly, detailed quality assurance and quality control procedures are also very important, which include the detailed information such as research objectives, sampling and analysis methods, research region and time, and test times, et al. Based on the community above, a better uncertainty analysis could be carried out for the VOCs emissions profiles, which is critically important to understand the VOCs emission characteristics of the industrial processing and solvent use.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); industrial processing; solvent use; source profile; research progress

收稿日期: 2016-11-15; 修订日期: 2016-12-17

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201409008); 上海市科委扬帆计划项目(14YF1413200); 国家科技支撑计划项目(2014BAC22B03); 国家重点研发计划项目(2016YFC0202201)

作者简介: 王红丽(1983~), 女, 博士, 主要研究方向为大气VOCs来源及其对二次污染的贡献, E-mail: wanghl@saes.sh.cn; hongliwang@live.cn

挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 是大气中细颗粒物和臭氧的重要前体物^[1~3], 对人群健康、生产生活具有极大的危害风险^[4]. VOCs 防治已经成为当前大气污染防治的关键.

VOCs 的准确测量及污染来源研究是大气复合污染防控工作的基础. 研究建立不同行业的 VOCs 排放源成分谱有助于识别和量化不同污染源对大气污染的贡献. VOCs 物质众多, 测量复杂, 不同的物质测量方法也不尽相同. 目前, VOCs 源排放成分谱研究中, 主要涉及的 VOCs 物质大概可以分为烷烃类、烯烃类、芳香烃类、醛酮类、醇酚类、酯类等.

研究表明, 道路机动车排放、生物质燃烧、溶剂使用和工艺过程源排放是我国 VOCs 排放最主要的 4 个来源^[5,6]. 不同行业间排放物质组成特征存在明显差异^[7,8]. 道路机动车排放和生物质燃烧, 主要产污环节都是不同含碳物质的燃烧过程, 排放环节相对单一, 不同研究之间可比性较好^[9~14]; 相对而言, 溶剂使用和工艺过程源排放环节复杂、不同工艺原辅料差异大、排放相对分散, 给 VOCs 排放源成分谱的研究带来很大的挑战.

目前关于溶剂使用和工艺过程源的研究报道也比较多, 涉及不同的行业和排放环节、采用了不同的测试方法、甚至研究的 VOCs 物质名录也有差异. 为进一步了解溶剂使用和工艺过程源排放成分谱特征, 本文调研梳理了 2000 年以来国内外发表的有关溶剂使用和工艺过程源排放研究的报道, 对比分析了不同研究结果的差异, 结合不同研究的研究对象和研究方法, 探讨了影响溶剂使用和工艺过程源排放成分谱研究的主要影响因素. 本文结果对于未来研究溶剂使用和工艺过程源排放成分谱特征的研究有一定的指导意义.

1 排放源成分谱研究进展概述

本研究采用中国知网和 Web of Science 数据库检索得到 2000 ~ 2016 年研究工艺过程源和溶剂使用 VOCs 排放源成分谱的中英文文献共 63 篇. 结果表明, 工艺过程源和溶剂使用源排放 VOCs 成分谱的研究近年来逐步受到重视, 发表的成果论文逐年增加, 近 3 年每年发表文章数量为 10 篇左右; 不同研究中测试样本量差异比较大, 变化范围为 12 ~ 265 组, 如图 1 所示.

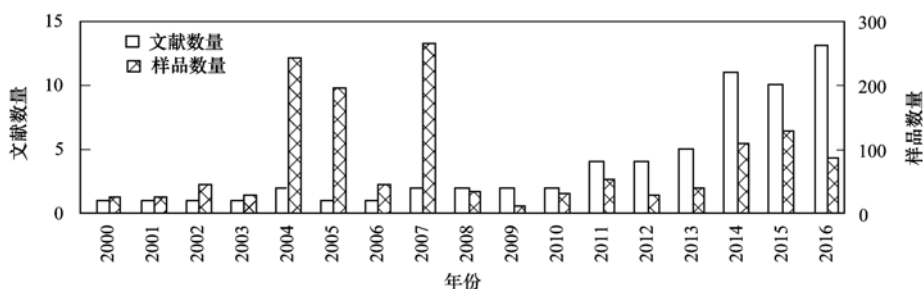


图 1 不同年份研究文献数量和样本量

Fig. 1 Amounts of documents and samples in different years

63 篇研究中有 42 篇详细介绍了研究测试方法. 总体而言, 工艺过程源和溶剂使用的 VOCs 排放源的成分谱测试方法大致可以分为 4 类, 分别是模拟舱挥发废气试验 (simulation)、烟囱排气或生产车间空气采集 (chimney&workshop)、顶空挥发试验 (headspace) 以及下风向环境空气采集 (downwind) 等, 其中烟囱排气或生产车间空气采集和模拟舱挥发废气试验应用最为广泛.

从研究区域分布来看, 目前国内的研究报道最多, 国外也有个别报道. 就国内而言, 研究主要集中在东部地区, 其中珠三角研究报道最多, 累计有 10 篇研究报道, 其次是北京和天津地区合计报道 9 篇; 长三角和东北地区分别报道 8 篇和 6 篇; 其他地

区也有个别报道.

2 典型行业源成分谱特征

63 篇文献报道中, 其中有 30 篇文献详细报道了 VOCs 源成分谱的数据. 不同报道研究的 VOCs 物质组分名录存在一定的差异, 累计包括 107 种组分, 如表 1 所列, 主要涉及的 VOCs 物质大概可以分为烷烃类、烯烃类、芳香烃类、醛酮类、醇酚类、酯类等. 本章节基于文献报道的成分谱数据, 参照文献[15]的源分类方法, 进一步梳理分析了工艺过程源以及溶剂使用源及其下级分类源排放 VOCs 的成分谱特征及测试方法对结果的影响.

表 1 主要 107 种 VOCs 在不同分类行业不同研究方法下的测量结果¹⁾/%

[illegible]

2.1 工艺过程源的排放源成分谱特征及影响因素

根据文献[15],工艺过程源包括石油化工业和其他工艺过程共2个二级分类.石油化工业类下分17个三级分类,其他工艺过程类下分15个三级分类.目前VOCs源谱研究涉及的行业主要包括石油化工类下分的药品制造、涂料、油墨、颜料以及类

似产品制造、塑料人造革及合成革制造、天然原油和天然气开采、精炼石油产品以及基础化学原料制造,以及其他工艺过程类下分的人造板制造、炼焦等8个三级分类行业.不同行业研究报道文献数量、测试样本量、研究的物质组分以及相关文献如表2所列.

表2 不同行业研究报道文献数量、测试样本量、研究的物质组分数量以及相关文献

Table 2 Summary of literatures on VOCs source profile from different emissions, including literature amounts, test sample sizes and component amounts

一级分类	二级分类 (文献数量/总样本量)	三级分类	文献数量	各研究样本量	各研究分析物种数量	文献
工艺过程源	石油化工(11/384)	药品制造	1	32	16	[16]
		涂料、油墨、颜料以及类似产品制造	4	45,26,6,9	56,263,103,8	[17~20]
		塑料人造革及合成革制造	2	未报道,195	未报道,13	[21,22]
		精炼石油产品	3	16,24,24	82,56,56	[23~25]
		基础化学原料制造	1	5	82	[23]
		天然原油和天然气开采	1	26	8	[27]
	其他工艺(4/17)	人造板制造	1	6	大类	[28]
		炼焦	3	4,2,5	68/17/51	[26,29,30]
溶剂使用源	表面涂层(16/247)	建筑涂料	1	27	103	[19]
		家具制造	4	4,27,19,6	56,103,8,15	[8,19,32,33]
		汽车制造	4	3,8,4,6	56,15,103,4	[8,11,19,31]
		工艺表面涂层	6	12,3,10,5,46,60	25,4,21,85,12,14	[8,35~39]
		其他分类行业	1	7	8	[34]

2.1.1 工艺过程源的排放源成分谱特征

基于表2中所列文献报道的数据,分析了石油化工业和其他工艺过程排放VOCs的成分谱特征,如图2和图3所示.对于石油化工业排放VOCs成分谱而言,不同行业差别较大.对于精炼石油产品以及基础化学原料制造而言,主要成分是烃类物质,其中精炼石油产品行业的主要排放物质是烷烃和烯烃类物质,基础化学原料制造的主要排放组分有烷烃、烯烃和芳香烃等.对于其他4个石油化工业而言,含氧VOCs质量占比均超过50%,是最主要的排放组分;不同的三级分类行业含氧VOCs的种类差异较大,如图2所示.药品制造排放的含氧VOCs中醛酮类最为丰富,在含氧VOCs中的质量分数占比高达62%^[16];涂料、油墨、颜料以及类似产品制造过程中排放的酯类物质占总含氧VOCs比例达到90%^[17~20];塑料人造革及合成革制造过程中排放的醛酮类占含氧VOCs的比例高达74%^[21,22,26];天然原油和天然气开采中醛酮类、醇酚类和酯类含氧VOCs的含量分布则较为均匀^[26].对于其他工艺过程而言^[28~30],人造板制造过程排放的烷烃的排放比例占50%以上,而炼焦过程排放的VOCs主要是芳香烃和烯烃,以及一些烷烃和含氧VOCs,如图3所示.

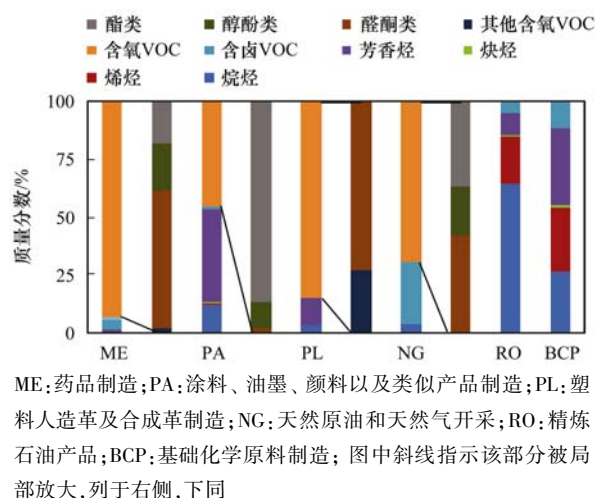


图2 石油化工业排放源成分谱的化学组成

Fig. 2 VOCs composition in emission of petrochemical industry

2.1.2 测试方法对工艺过程源的排放源成分谱特征的影响

由表2可知,现有关于工艺过程源成分谱的研究中,涂料、油墨、颜料以及类似产品制造和炼焦过程比起工艺过程源中其他分类行业有较多的文献数据报道.本章节对比分析了不同采集测试方法对同一行业排放VOCs成分谱特征的影响.

对于涂料、油墨、颜料以及类似产品制造过程排放VOCs成分谱研究而言,目前常用的采集测试

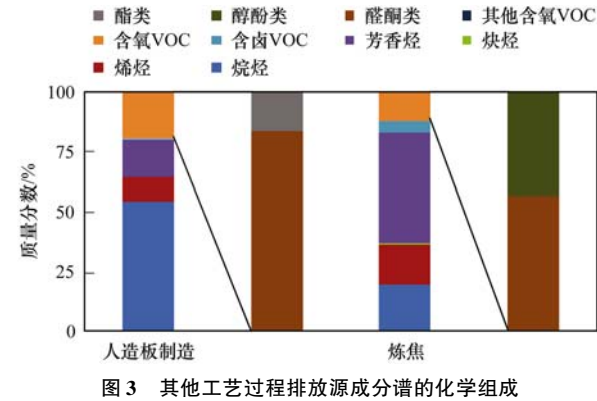


图 3 VOCs composition in emission of other industrial processes

方法包括烟囱排气或生产车间空气采集法和顶空挥发试验法^[17~20]。两种废气采集方法获得的VOCs成分谱特征差异较大,如图4和图5所示。相比顶空挥发试验法,烟囱排气或生产车间空气采集法获得VOCs成分谱中卤代烃有一定的质量贡献;此外,就具体物质名录而言,前者获得成分谱组分名录相对单一,主要是乙酸丁酯和苯系物,而烟囱排气或生产车间空气采集法获得的成分谱中组分比较丰富。这主要是由于顶空挥发试验法获得VOCs谱主要取决于涂料、油墨、颜料以及类似产品中溶剂原料成分特征;而在实际生成制造涂料、油墨、颜料以及类似产品过程,可能由于生成工艺的原因不免会使用和其他产生其他VOCs物质。

对于炼焦过程排放VOCs成分谱研究而言,常用的采集测试方法主要包括烟囱排气及生产车间空气采集和下风向环境空气采集两种方法^[26,29,30]。两种方法获得的炼焦行业排放VOCs成分谱特征差异很大,如图6和图7所示。烟囱排气及生产车间空

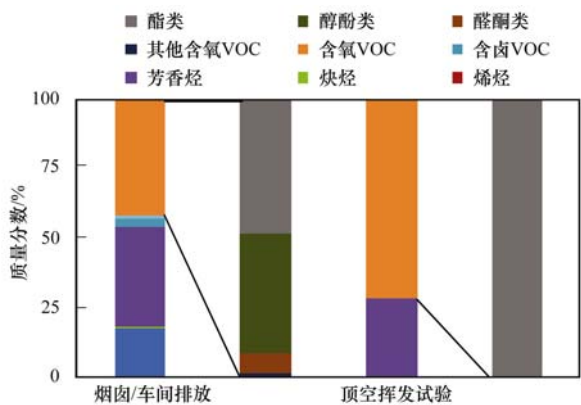


图 4 不同分析方法下的涂料生产排放源成分谱的化学组成
Fig. 4 VOCs composition in emission of manufacture of paints under different analysis methods

气采集法获得的VOCs成分中,烯烃和烷烃类物质的质量分数分别高达43%和39%,其次是芳香烃贡献15%;而下风向环境空气采集法获得VOCs成分中,芳香烃类物质含量最大,其次是含氧VOCs和烷烃类物质,还有一定的卤代烃物质。就VOCs具体物质而言,烟囱排气及生产车间空气采集法获得的VOCs成分谱中乙烯、乙烷、丙烯和丙烷最为丰富,合计贡献约70%;而下风向环境空气采集法获得的VOCs成分谱中,苯系物比较丰富,如图7所示。值得注意的是,下风向环境空气采集法受到其他污染源的影响会比较大。

2.2 溶剂使用的排放源成分谱特征及影响因素

根据文献^[15],溶剂使用源包括染色过程、沥青铺路、表面涂层(surface coating)、农药使用和其他等5个二级分类,目前VOCs源成分谱研究主要集中在表面涂层源排放过程,共检索到16篇研究报

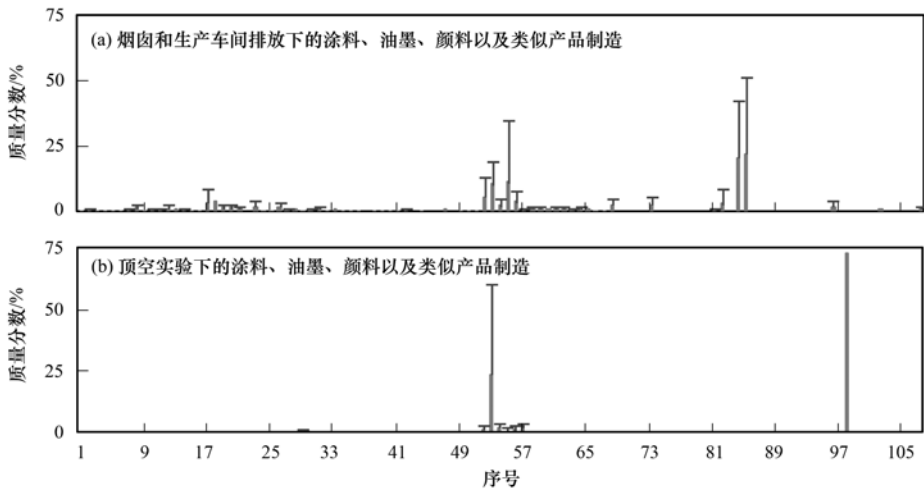


图 5 不同分析方法下涂料生产排放源成分谱特征
横坐标序号对应的物质见表1,下同

Fig. 5 Source profiles of manufacture of paints under different analysis methods

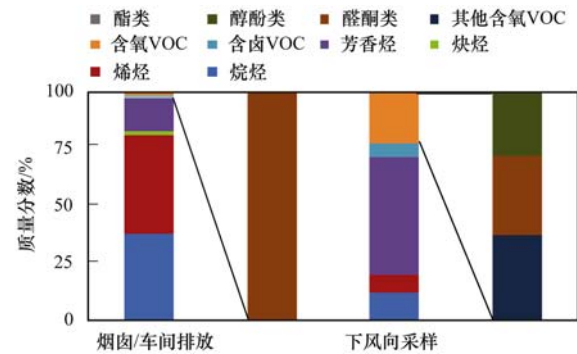


图6 不同分析方法下的炼焦排放源成分谱的化学组成

Fig. 6 VOCs composition in emission of coking under different analysis methods

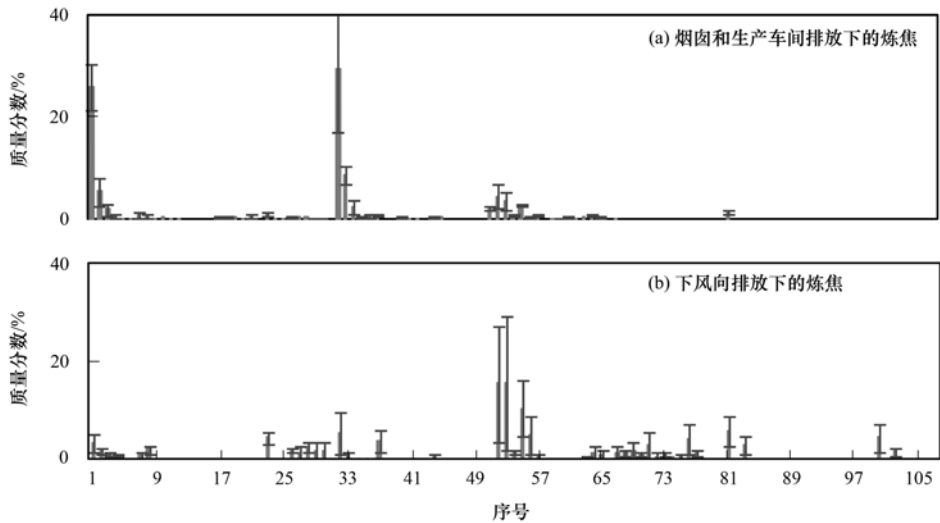


图7 不同分析方法下炼焦排放源成分谱特征

Fig. 7 Source profiles of coking under different analysis methods

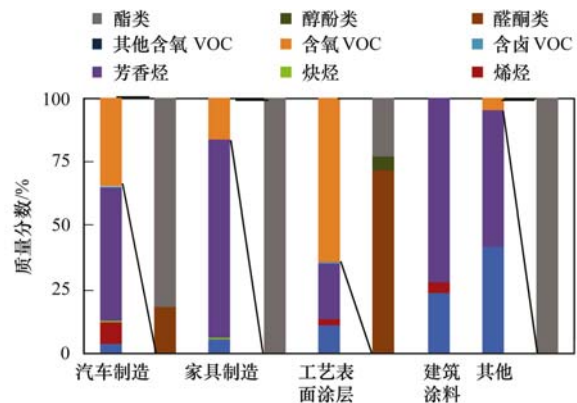


图8 表面涂层排放源成分谱的化学组成

Fig. 8 VOCs composition in emission of surface coating

为芳香烃和含氧 VOCs 物质;不同行业排放 VOCs 组成存在一定差异。具体而言,汽车制造^[8,11,19,31]、家具制造^[8,19,32,33]、建筑涂料^[19]及其他分类行业^[34]排放的 VOCs 中,含量最丰富的均是芳香烃物质,质量分数占比均超过 50%;而工艺表面涂层排放的 VOCs 中醛酮类物质含量最大,约占总 VOCs 的质量

道。表面涂层类下分 8 个三级分类,其中 VOCs 源成分谱研究主要集中在建筑涂料 (architectural paints)、家具制造 (furniture production)、汽车制造 (automobile production)、工艺表面涂层 (process surface coating) 等 4 个行业。不同行业研究报道文献数量、测试样本量、研究的物质组分以及相关文献如表 2 所列。

2.2.1 溶剂使用的排放源成分谱特征

基于表 2 所列文献报道的数据,分析了溶剂使用源下设的表面涂层排放 VOCs 成分谱特征,如图 8 所示。从中可见,表面涂层过程排放的 VOCs 主要

分数为 47%^[8,35~39]。

溶剂使用源 VOCs 排放成分谱与溶剂的成分组成有关。一般而言,有机溶剂的种类主要包括醇类、脂肪烃类、酮类、醚类、萜烯类、卤代烃类、芳香烃类、酯类、聚合物等^[40]。在实际研究中,受限于各类 VOCs 物质的测量分析方法,目前一般分析的物质主要包括脂肪烃类、芳香烃类、卤代烃类、以及部分含氧 VOCs 物质^[41],具体物质名录见表 1。从中可知,溶剂使用源排放 VOCs 成分谱中特征物质主要包括甲苯、二甲苯、乙苯、乙酸丁酯、丙酮、2-丁酮、环己酮、甲基异丁基甲酮等物质,这些物质与溶剂的主要成分比较相似;不同行业成分存在一定差异,可能是由于不同行业对溶剂的要求不同导致。

2.2.2 溶剂使用的排放源成分谱特征影响因素

由表 2 可知,现有关于溶剂使用源排放成分谱中,家具制造和工艺表面涂层比溶剂使用中其他分类行业有较多的文献数据报道。本章节对比分析了

不同采集测试方法对同一行业排放 VOCs 成分谱特征的影响.

对于家具制造行业而言, 烟囱排气或生产车间空气采集法和模拟舱挥发气体采集方法是目前研究源成分谱的常用方法^[8,19,32,33]. 两种方法获得的 VOCs 组成特征比较相似, 芳香烃类物质和含氧 VOCs 是最主要的组成, 如图 9 所示; 就具体组成而言, 两种方法获得 VOCs 成分谱也比较相似, 最主要的物质是苯系物以及乙酸丁酯, 如图 10 所示.

对于工艺表面涂层排放 VOCs 成分谱研究而言, 目前主要有 2 种方法, 包括烟囱排气或生产车间

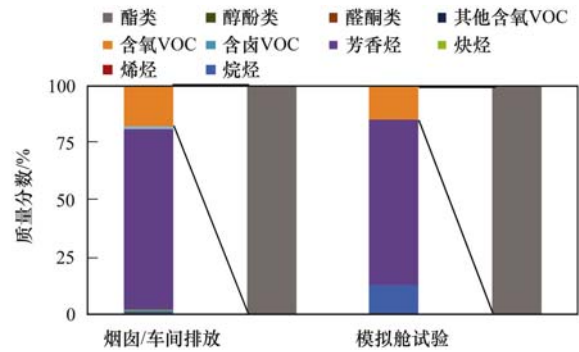


图 9 不同分析方法下的家具制造排放源成分谱的化学组成
Fig. 9 VOCs composition in emission of furniture production under different analysis methods

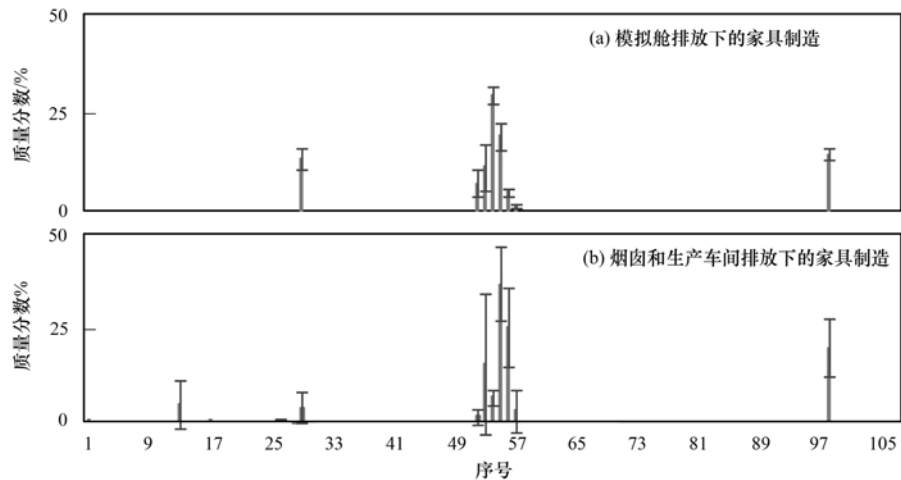


图 10 不同分析方法下家具制造排放源成分谱特征
Fig. 10 Source profiles of furniture production under different analysis methods

空气采集法和顶空挥发试验法等^[8,35~39]. 两种方法获得的工艺涂层排放 VOCs 源成分谱主要包括含氧 VOCs、芳香烃以及烷烃类物质, 但不同方法获得各类物质相对贡献差异较大, 如图 11 所示. 烟囱排气或生产车间空气采集法获得的 VOCs 成分谱中含氧 VOCs 的质量贡献高达 65%, 其次是芳香烃和烷烃, 二者贡献分别为 20% 和 12%; 顶空挥发试验法获得

的 VOCs 成分谱中, 含氧 VOCs 和芳香烃分别贡献 38% 和 37%, 其次是烷烃 (10%). 两种方法获得的 VOCs 成分谱组成特征可比性较差, 如图 12.

2.3 源成分谱影响因素及不确定性讨论

工艺过程源和溶剂使用涉及行业众多, 种类繁多, 近年来相关研究逐渐增多, 但仍十分有限, 不同研究结果之间存在一定差异, 可比性较差. 究其原因, 主要有以下三方面. 一是工艺过程源和溶剂使用涉及行业分类复杂, 各类研究的对象比较单一, 主要是针对某一些行业甚至某个工艺环节开展研究, 导致不同研究结果无法比较. 二是研究测试方法的不同对同一行业的研究结果影响也比较大, 研究测试方法对源成分谱的影响主要是由于不同的采集测试方法获得的样品对源排放的代表性不同, 比如前文提到的在研究对象的下风向环境空气采集法获得的源样品很有可能受其他排放源的影响. 三是不同研究获得 VOCs 成分谱中物质名录也存在较大差异, 导致不同结果可比性较差.

基于上述问题, 未来工艺过程源和溶剂使用源

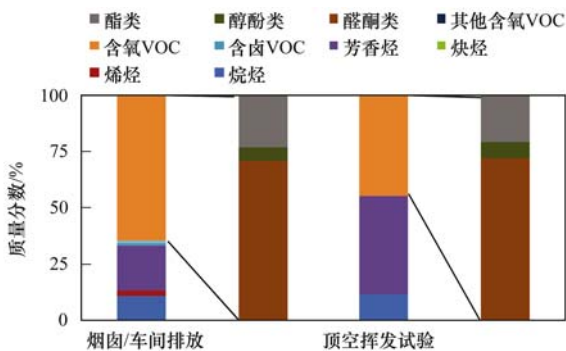


图 11 不同分析方法下的工艺表面涂层排放源成分谱的化学组成
Fig. 11 VOCs composition in emission of industrial surface coating under different analysis methods

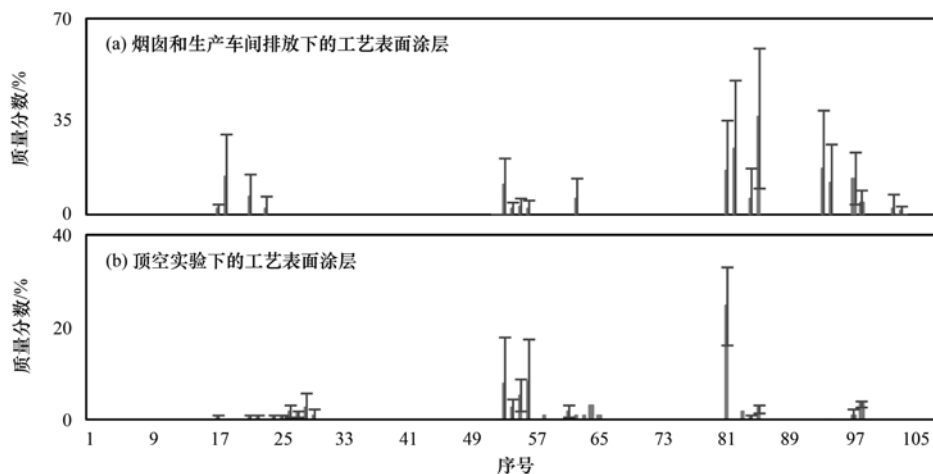


图 12 不同分析方法下工艺表面涂层排放源成分谱特征

Fig. 12 Source profile of industrial surface coating under different analysis methods

排放 VOCs 成分谱的研究建议从以下几方面进一步开展. 一是建立针对工艺过程源和溶剂使用源排放 VOCs 测试方法的技术规范, 包括污染源样品采集地点、采集频率、采集方法、样品储存及运输方法、样品分析方法、分析物质名录, 以及相关质控方法等. 二是进一步丰富源排放成分谱的研究, 细化行业分类以及工艺环节, 特别是注重开展不同工艺及流程排放成分谱的研究, 识别影响 VOCs 源成分谱测量的影响因素. 三是建立开放式的工艺过程源和溶剂使用源排放 VOCs 成分谱库平台, 鼓励形成不同研究结果共享录入机制; 并建立相关研究成果数据入库规范, 包括研究对象、研究测试方法、研究地区、研究时段以及样本量等信息, 以便开展不同 VOCs 源成分谱不确定性评判.

3 结论

(1) 工艺过程源和溶剂使用源排放 VOCs 成分谱的研究近年来逐步增多, 发表的成果论文逐年增加, 近三年每年发表文章数量为 10 篇左右; 研究地区主要集中在东部地区, 其中珠三角地区研究相对最多累计有 10 篇相关报道, 其次是北京和天津地区, 长三角和中国东北地区也有一些研究; 研究方法大致可以分为 4 类, 分别是模拟舱挥发废气试验、烟囱排气或生产车间空气采集、顶空挥发试验以及下风向环境空气采集等, 其中烟囱排气或生产车间空气采集和模拟舱挥发废气试验应用最为广泛. 不同研究中采集的样本量差异比较大, 变化范围为 5 ~ 265 组.

(2) 对于工艺过程源, 目前研究主要集中在石油化工类下分的药品制造、涂料、油墨、颜料以及

类似产品制造, 塑料人造革及合成革制造, 天然原油和天然气开采, 精炼石油产品, 基础化学原料制造, 以及其他工艺过程类下分的人造板制造、炼焦等 8 个三级分类行业, 其中尤以涂料、油墨、颜料以及类似产品制造研究最多, 累计研究样本量将近 90 组, 其他行业的研究样本量比较少. 石油炼制排放 VOCs 中烷烃类比较丰富, 化工类源排放 VOCs 中含氧 VOCs 最为丰富, 但不同行业具体组分差异较大; 其他工艺类源排放的烃类化合物比较丰富; 溶剂使用源排放的 VOCs 中, 芳香烃和含氧 VOC 最为主要, 不同行业具体 VOCs 成分谱存在一定差异. 相对于工艺过程源, 溶剂使用源排放 VOCs 成分谱研究结果可比性略好.

(3) 导致工艺过程源和溶剂使用源排放 VOCs 成分谱不同研究结果差异性较大的原因有三类, 一是行业差异性大, 排放环节众多, 不同的研究涉及的研究对象不同; 二是缺乏规范化的研究测试方法, 不同的研究测试方法获得的研究结果可比性较差; 三是缺乏针对污染源的 VOCs 分析规范, 不同研究的 VOCs 名录差异大, 部分研究缺乏含氧 VOCs 等工艺过程源和溶剂使用源排放关键组分的测量结果. 未来有必要从上述 3 个方面进一步细化工艺过程源和溶剂使用源排放成分谱的研究, 建立成分谱研究规范.

参考文献:

- [1] 郝吉明, 吕子峰, 楚碧武, 等. 大气二次有机气溶胶污染特征及模拟研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
Hao J M, Lv Z F, Chu B W, et al. Characterization, experimental study and modeling of atmospheric secondary organic aerosol[M]. Beijing: China Science Publishing House, 2015.
- [2] Seinfeld J H, Pandis S N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change (2nd ed.) [M]. New York:

- Wiley-Interscience, 2006.
- [3] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006.
- Tang X Y, Zhang Y H, Shao M. Atmospheric environmental chemistry (2nd ed.) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [4] Fiore A M, Dentener F J, Wild O, *et al.* Multimodel estimates of intercontinental source-receptor relationships for ozone pollution [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, **114** (D4): D04301.
- [5] Bo Y, Cai H, Xie S D. Spatial and temporal variation of emission inventories for historical anthropogenic NMVOCs in China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8** (3): 11519-11566.
- [6] Wei W, Wang S X, Chatani S, *et al.* Emission and speciation of non-methane volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42** (20): 4976-4988.
- [7] 卢清, 鲁君, 黄成, 等. 上海市青浦区工业源 VOCs 排放清单调查研究[J]. *上海环境科学*, 2015, **34** (3): 108-112.
- Lu Q, Lu J, Huang C, *et al.* A research on industrial VOCs emission inventory in Qingpu district of Shanghai[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2015, **34** (3): 108-112.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Guo H, Zou S C, Tsai W Y, *et al.* Emission characteristics of nonmethane hydrocarbons from private cars and taxis at different driving speeds in Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45** (16): 2711-2721.
- [11] 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.
- [12] 乔月珍, 王红丽, 黄成, 等. 机动车尾气排放 VOCs 源成分谱及其大气反应活性[J]. *环境科学*, 2012, **33** (4): 1071-1079.
- Qiao Y Z, Wang H L, Huang C, *et al.* Source profile and chemical reactivity of volatile organic compounds from vehicle exhaust [J]. *Environmental Science*, 2012, **33** (4): 1071-1079.
- [13] Qiu K Q, Yang L X, Lin J M, *et al.* Historical industrial emissions of non-methane volatile organic compounds in China for the period of 1980-2010 [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **86**: 102-112.
- [14] 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.
- [15] 国家环境保护部. 大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南[R]. 公告 2014 年第 55 号, 2014.
- [16] 何华飞, 王浙明, 许明珠, 等. 制药行业 VOCs 排放特征及控制对策研究——以浙江为例[J]. *中国环境科学*, 2012, **32** (12): 2271-2277.
- He H F, Wang Z M, Xu M Z, *et al.* Studies on the emission characteristics and countermeasures of VOCs from pharmaceutical industry-Based on Zhejiang Province [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32** (12): 2271-2277.
- [17] 陆思华, 白郁华, 陈运宽, 等. 北京市机动车排放挥发性有机化合物的特征[J]. *中国环境科学*, 2003, **23** (2): 127-130.
- Lu S H, Bai Y H, Chen Y K, *et al.* The characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emitted from motor vehicle in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2003, **23** (2): 127-130.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 潘洁晨. 涂料中 VOC 的散发与残留研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015. 11-31.
- Pan J C. Study of the emission and the residual of VOC in paint [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. 11-31.
- [21] 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.
- [22] Kim K H, Hong Y J, Pal R, *et al.* Investigation of carbonyl compounds in air from various industrial emission sources [J]. *Chemosphere*, 2008, **70** (5): 807-820.
- [23] Mo Z W, Shao M, Lu S H, *et al.* Process-specific emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from petrochemical facilities in the Yangtze River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **533**: 422-431.
- [24] Wei W, Cheng S Y, Li G H, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emitted from a petroleum refinery in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **89**: 358-366.
- [25] Wei W, Cheng S Y, Li G H, *et al.* Characteristics of ozone and ozone precursors (VOCs and NO_x) around a petroleum refinery in Beijing, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26** (2): 332-342.
- [26] 董艳平, 喻义勇, 母应锋, 等. 基于 GC-MS 方法的焦化行业特征挥发性有机物分析[J]. *环境监测管理与技术*, 2016, **28** (3): 65-68.
- Dong Y P, Yu Y Y, Mu Y F, *et al.* Characteristic analysis of VOCs from coking chemical industry by GC-MS [J]. *The*

- Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2016, **28**(3): 65-68.
- [27] Cetin E, Odabasi M, Seyfioglu R. Ambient volatile organic compound (VOC) concentrations around a petrochemical complex and a petroleum refinery [J]. Science of the Total Environment, 2003, **312**(1-3): 103-112.
- [28] 赵杨, 沈隽, 赵桂玲. 胶合板 VOC 释放率测量及其对室内环境影响评价[J]. 安全与环境学报, 2015, **15**(1): 316-319.
- Zhao Y, Shen J, Zhao G L. Measuring the VOC emission-releasing rate and assessment of the impact of plywood on the indoor environment [J]. Journal of Safety and Environment, 2015, **15**(1): 316-319.
- [29] 贾记红, 黄成, 陈长虹, 等. 炼焦过程挥发性有机物排放特征及其大气化学反应活性[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(5): 905-912.
- Jia J H, Huang C, Chen C H, *et al.* Emission characterization and ambient chemical reactivity of volatile organic compound s (VOCs) from coking processes [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, **29**(5): 905-912.
- [30] 何秋生, 王新明, 赵利容, 等. 炼焦过程中挥发性有机物成分谱特征初步研究[J]. 中国环境监测, 2005, **21**(1): 61-65.
- He Q S, Wang X M, Zhao L R, *et al.* Preliminary study on profiles of VOCs emitted from coking [J]. Environmental Monitoring in China, 2005, **21**(1): 61-65.
- [31] 曾培源, 李建军, 廖东奇, 等. 汽车涂料生产环节 VOCs 的排放特征及安全评价[J]. 环境科学, 2013, **34**(12): 4592-4598.
- Zeng P Y, Li J J, Liao D Q, *et al.* Emission characteristics and safety evaluation of volatile organic compounds in manufacturing processes of automotive coatings [J]. Environmental Science, 2013, **34**(12): 4592-4598.
- [32] 谭赞华. 广东省木制家具行业挥发性有机物(VOCs)排放特征研究[J]. 广东化工, 2012, **39**(1): 45-46, 76.
- Tan Y H. Study on the emission of volatile organic compounds (VOCs) from woodiness furniture manufacture industry of Guangdong [J]. Guangdong Chemical Industry, 2012, **39**(1): 45-46, 76.
- [33] 龙玲, 李光荣, 周玉成. 大气候室测定家具中甲醛及其他 VOC 的释放量[J]. 木材工业, 2011, **25**(1): 12-15.
- Long L, Li G R, Zhou Y C. Formaldehyde and other volatile organic compound emissions from furniture in a full-scale chamber [J]. China Wood Industry, 2011, **25**(1): 12-15.
- [34] 蔡宗平, 蔡慧华. 印刷行业 VOCs 排放特征研究[J]. 环境科学与管理, 2013, **38**(8): 166-172.
- Cai Z P, Cai H H. Study on characteristics of VOCs emission from printing industry [J]. Environmental Science and Management, 2013, **38**(8): 166-172.
- [35] 崔如, 马永亮. 电子产品加工制造企业挥发性有机物(VOCs)排放特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(12): 4585-4591.
- Cui R, Ma Y L. Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emission from electronic products processing and manufacturing factory [J]. Environmental Science, 2013, **34**(12): 4585-4591.
- [36] 陈峰, 沈隽, 苏雪瑶. 表面装饰对刨花板总有机挥发物和甲醛释放的影响[J]. 东北林业大学学报, 2010, **38**(6): 76-77, 80.
- Chen F, Shen J, Su X Y. Effect of surface finish of particleboards on reducing emission of total volatile organic compounds and formaldehyde [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, **38**(6): 76-77, 80.
- [37] 区家敏. 珠江三角洲 VOCs 排放来源识别、验证与基于反应活性的控制对策研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014. 42-59.
- Ou J M. Characterization and validation of Volatile Organic Compounds (VOCs) emission sources and reactivity-based control strategy in the Pearl River Delta region [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. 42-59.
- [38] 肖景方, 叶代启, 刘巧, 等. 消费电子产品生产过程中挥发性有机物(VOCs)排放特征的研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(6): 1612-1619.
- Xiao J F, Ye D Q, Liu Q, *et al.* Emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from the manufacturing process of consumer electronic products [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(6): 1612-1619.
- [39] 何梦林, 王旎, 陈扬达, 等. 广东省典型电子工业企业挥发性有机物排放特征研究[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(5): 1581-1588.
- He M L, Wang N, Chen Y D, *et al.* Emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from electronic manufacturing factory of Guangdong Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(5): 1581-1588.
- [40] 上海市环境保护局. DB31/881-2015, 涂料、油墨及其类似产品制造工业大气污染物排放标准[S].
- Shanghai Environmental Protection Bureau. DB31/881-2015, Air emission standard for manufacture of paint, ink and allied products [S].
- [41] 王红丽, 景盛翱, 王倩, 等. 溶剂使用源有组织排放 VOCs 监测方法及组成特征[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(10): 1433-1439.
- Wang H L, Jing S A, Wang Q, *et al.* Measurement and characterization of emissions of volatile organic compounds (VOCs) in solvent use [J]. Research of Environment Sciences, 2016, **29**(10): 1433-1439.

CONTENTS

Comparison of Models on Spatial Variation of PM _{2.5} Concentration; A Case of Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Jian-sheng, WANG Xi, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (2191)
Change of Atmospheric Pollution Diffusion Conditions in Beijing in Recent 35 Years	GUO Chun-wei, SUN Zhao-bin, LI Zi-ming, <i>et al.</i> (2202)
Precipitation and Its Effects on Atmospheric Pollutants in a Representative Region of Beijing in Summer	HAN Li-hui, ZHANG Hai-liang, XIANG Xin, <i>et al.</i> (2211)
Impact of Mountain-Valley Wind Circulation on Typical Cases of Air Pollution in Beijing	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2218)
Fugitive Dust Emission Characteristics from Building Construction Sites of Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (2231)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Emitted from Biomass-pellets-fired Boilers	WU Chang-da, ZHANG Chun-lin, BAI Li, <i>et al.</i> (2238)
Effect of VOCs on O ₃ and SOA Formation Potential During the Combined Pollution Process in Guangzhou Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (2246)
Characteristic Study on the "Weekend Effect" of Atmospheric O ₃ in Northern Suburb of Nanjing	WANG Jun-xiu, AN Jun-lin, SHAO Ping, <i>et al.</i> (2256)
Atmospheric Ammonia/Ammonium-nitrogen Concentrations and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	WANG Jie-fei, ZHU Xiao, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2264)
Species of Iron in Size-resolved Particle Emitted from Xuanwei Coal Combustion and Their Oxidative Potential	WANG Qiang-xiang, TAN Zheng-ying, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2273)
Dioxin Pollution and Occupational Inhalation Exposure of PCDD/Fs in Municipal Solid Waste Incinerator	DU Guo-yong, WANG Qian, ZHANG Shu-lin, <i>et al.</i> (2280)
Characteristics of Mercury Emissions from Modern Dry Processing Cement Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (2287)
Correlations of Light-duty Gasoline Vehicle Emissions Based on VMAS and CVS Measurement Systems	WANG Hong-yu, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2294)
Emission Characteristics of Particulate Matter from Diesel Buses Meeting Different China Emission Standards Fueled with Biodiesel	LOU Di-ming, ZHAO Cheng-zhi, XU Ning, <i>et al.</i> (2301)
Spatial Variation and Environmental Significance of δ ¹⁸ O and δD Isotope Composition in Xijiang River	XU Qi, LI Jian-hong, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (2308)
Comparative Study of SWAT and DNDC Applied to N Leach and Export from Subtropical Watershed	HAN Ning, CHEN Wei-liang, GAO Yang, <i>et al.</i> (2317)
Comparison of Relationship Between Conduction and Algal Bloom in Pengxi River and Modao River in Three Gorges Reservoir	JIANG Wei, ZHOU Chuan, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2326)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediment Pore Water and Overlying Water of Dianchi Caohai Lake	WANG Yi-ru, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2336)
Distribution and Emission Flux Estimation of Phosphorus in the Sediment and Interstitial Water of Xiangxi River	LUO Yu-hong, NIE Xiao-qian, LI Xiao-ling, <i>et al.</i> (2345)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment from Daye Lake	ZHANG Jia-quan, TIAN Qian, XU Da-mao, <i>et al.</i> (2355)
Formation of Brominated Disinfection By-products in Low Temperature Multi-effect Distillation (LT-MED) Process for Seawater Desalination	QI Fei, SUN Ying-xue, YANG Zhe, <i>et al.</i> (2364)
Applicability Comparison and Application Study of Two Methods for Determination of the Copper Complexing Capacity of Waters	WANG Chen-ye, JIANG Kuo, XIE Wen-long, <i>et al.</i> (2373)
Performance of Applying Scale Permeable Pavements for Control of Runoff Pollution in an Area with High Groundwater Level	JIN Jian-rong, LI Tian, SHI Zhen-bao (2379)
Removal of 2,4-dichlorophenol in Underground Water by Stabilized Nano Zero-valent Iron	ZHANG Yong-xiang, CHANG Shan, LI Fei, <i>et al.</i> (2385)
Enhancement of Sulfamerazine Degradation Under H ₂ O ₂ /KI System by Ultrasound and UVA Irradiation	WEI Hong, SUN Bo-cheng, YANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (2393)
Comparison of Phosphate Adsorption onto Zirconium-Modified Bentonites with Different Zirconium Loading Levels	JINAG Bo-hui, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2400)
Removal of Nitrogen in Municipal Secondary Effluent by a Vertical Flow Constructed Wetland Associated with Iron-carbon Internal Electrolysis	ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, ZHOU Xiang, <i>et al.</i> (2412)
Purification Efficiency and Influencing Factors of Combined Bio-filters for Aquaculture Wastewater	ZHANG Shi-yang, ZHANG Sheng-hua, ZHANG Xiang-ling, <i>et al.</i> (2419)
Effect of Temperature on PAO Activity and Substrate Competition	ZHANG Ling, PENG Dang-cong, CHANG Die (2429)
Enrichment and Nitrogen Removal Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	FENG Li, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2435)
Ammonia Removal Rate and Microbial Community Structures in Different Biofilters for Treating Aquaculture Wastewater	ZHOU Hong-yu, HAN Mei-lin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (2444)
Influence of Phosphate on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	ZHOU Zheng, LIU Kai, WANG Fan, <i>et al.</i> (2453)
Characteristics and Mechanism of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal Granular Sludge Under Carbon Source Stress	QIN Shi-you, CHEN Wei, MA Zhao-rui, <i>et al.</i> (2461)
Evolution of Extracellular Polymeric Substances of the Activated Sludge with Calcium Ion Addition During Set-up Period of Sequencing Batch Reactors	REN Li-fei, YANG Xin-ping, ZHANG Wen-wen (2470)
Isolation, Identification and Characterization of the Filamentous Microorganisms from Bulking Sludge	ZHANG Chong-miao, NIU Quan-rui, XU Li-mei, <i>et al.</i> (2477)
Applicability and Microbial Community Structure of Denitrification Suspended Carriers	TAN Yang, LI Ji, XU Qiao, <i>et al.</i> (2486)
Effect of Thiosulfate on the Carbon Fixation Capability of <i>Thiobacillus thioparus</i> and Its Mechanism	LI Huan, WANG Lei, WANG Ya-nan (2496)
Characteristics of Fungi Community Structure and Genetic Diversity of Forests in Guandi Mountains	QIAO Sha-sha, ZHOU Yong-na, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (2502)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in City Residential Areas Based on the Receptor Model and Geostatistics	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei (2513)
Environmental Health Risk Assessment of Contaminated Soil Based on Monte Carlo Method; A Case of PAHs	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi (2522)
Influencing Mechanism of Eh, pH and Iron on the Release of Arsenic in Paddy Soil	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2530)
Correlations Between Different Extractable Cadmium Levels in Typical Soils and Cadmium Accumulation in Rice	CHEN Qi, DENG Xiao, CHEN Shan, <i>et al.</i> (2538)
Remedying Effects of a Combined Amendment for Paddy Soil Polluted with Cd for Spring and Autumn Rice	CHEN Li-wei, YANG Wen-tao, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (2546)
Effects of Two Amendments on Remedying Garden Soil Complexly Contaminated with Pb, Cd and As	TIAN Tao, LEI Ming, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (2553)
Sorption of Phenanthrene to Soybean and Wheat Roots and the Bioavailability of Sorbed Phenanthrene	WANG Hong-ju, LI Qian-qian, SHEN Yu, <i>et al.</i> (2561)
Effects of Dissolved Organic Matter Fractions Extracted from Humus Soil on Sorption of Benzotriazole in Brown Soil and Black Soil	YANG Ning-wei, BI Er-ping (2568)
Effects of Topography, Tree Species and Soil Properties on Soil Enzyme Activity in Karst Regions	LUO Pan, CHEN Hao, XIAO Kong-cai, <i>et al.</i> (2577)
Effects of Long-term Organic Amendments on Soil N ₂ O Emissions from Winter Wheat-maize Cropping Systems in the Guanzhong Plain	HAO Yao-xu, LIU Ji-xuan, YUAN Meng-xuan, <i>et al.</i> (2586)
Exposure Route of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in Hair Based on Passive Sampling	YUAN Hao-dong, BAI Yao, LI Qiu-xu, <i>et al.</i> (2594)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wild Fish Species from Diaojiang River, Guangxi	WANG Jun-neng, MA Peng-cheng, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (2600)
Effect of Activated Carbon Addition on the Anaerobic Fermentation of Corn Straw in Mesophilic and Thermophilic Conditions	GAN Rong, GE Ming-min, LIU Yong-di, <i>et al.</i> (2607)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Source Profiles of Industrial Processing and Solvent Use Emissions; A Review	WANG Hong-li, YANG Zhao-xun, JING Sheng-ao (2617)