

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第12期

Vol.34 No.12

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

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

电子产品加工制造企业挥发性有机物(VOCs)排放特征

崔如, 马永亮*

(清华大学环境学院国家环境保护大气复合污染来源与控制重点实验室, 北京 100084)

摘要: 根据美国 EPA 挥发性有机物标准检测法 TO-11 及 TO-14/15, 采用 VOCs 快速检测仪、Summa 罐及 DNPH 吸附管, 对我国某大型电子产品加工制造企业中不同工艺环节生产车间内部及生产线最终废气排放管道中 VOCs 含量水平及组分特征进行检测。结果表明, 该企业涉及 VOCs 排放工艺中压铸车间总挥发性有机物(TVOCs)浓度为 $0.1 \sim 0.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、机加工车间 TVOCs 浓度为 $1.5 \sim 2.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、喷涂车间中 TVOCs 浓度为 $20 \sim 200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 各车间 VOCs 组分主要包括烷类、烯炔类、芳香类、酮类、酯类和醚类, 共 20 余种。其中涂装车间内苯系物及酮类物质为主要 VOCs 组分, 各物质浓度分别为苯 $0.02 \sim 0.34 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、甲苯 $0.24 \sim 3.35 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、乙苯 $0.04 \sim 1.33 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、对二甲苯 $0.13 \sim 0.96 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、邻/间二甲苯 $0.02 \sim 1.18 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、丙酮 $0.29 \sim 15.77 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、2-丁酮 $0.06 \sim 22.88 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、环己酮 $0.02 \sim 25.79 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、甲基异丁基甲酮 $0 \sim 21.29 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。根据该企业生产特征及工艺数据计算, 其单条生产线 VOCs 年排放量为 14 t, 整个厂区年排放量约为 840 t。结合生产流程及生产工艺分析, 喷涂过程中的溶剂使用是电子产品加工制造企业的 VOCs 主要排放来源, 废气排放口是重点排放点。

关键词: 电子产品; 加工制造; 挥发性有机物; 涂装; 排放特征

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)12-4585-07

Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission from Electronic Products Processing and Manufacturing Factory

CUI Ru, MA Yong-liang

(State Environmental Protection Key Laboratory of Sources and Control of Air Pollution Complex, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on the EPA method TO-11 and 14/15 for measurement of toxic organics in air samples, fast VOCs detector, Summa canister and DNPH absorbent were used to determine the VOCs concentrations and the compositions in the ambient air of the workshops for different processes as well as the emission concentration in the exhaust gas. In all processes that involved VOCs release, concentrations of total VOCs in the workshops were $0.1 \sim 0.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, $1.5 \sim 2.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ and $20 \sim 200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ for casting, cutting and painting respectively. Main compositions of VOCs in those workshops were alkanes, eneynes, aromatics, ketones, esters and ethers, totally over 20 different species. The main compositions in painting workshop were aromatics and ketones, among which the concentration of benzene was $0.02 \sim 0.34 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, toluene was $0.24 \sim 3.35 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, ethyl benzene was $0.04 \sim 1.33 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, *p*-xylene was $0.13 \sim 0.96 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, *m*-xylene was $0.02 \sim 1.18 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, acetone was $0.29 \sim 15.77 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 2-butanone was $0.06 \sim 22.88 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, cyclohexene was $0.02 \sim 25.79 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, and methyl isobutyl ketone was $0 \sim 21.29 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. The VOCs emission from painting process was about $14 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ for one single manufacturing line, and $840 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ for the whole factory. According to the work flows and product processes, the solvent used during painting process was the main source of VOCs emission, and the exhaust gas was the main emission point.

Key words: electronic products; processing and manufacturing; volatile organic compounds (VOC); painting process; source profile

随着科学技术持续进步, 近十多年来中国的电子产业保持了长时期持续高增长, 目前成为国民经济中发展速度最快、规模最大、出口最多、效益最好的第一支柱产业^[1]。据工信部统计, 2011 年我国手机全年总产量为 114 297.6 万部, 成为世界第一大手机生产国。但电子产品加工制造过程中涉及多个溶剂使用环节, 加之我国电子制造业大多属于产业链的下游, 因此电子产品加工制造造成的 VOCs 排放会对环境空气质量及公众健康造成严重影响。

我国针对人为源 VOCs 排放研究起步较晚, 且早期主要侧重对 VOCs 排放总量及排放源分配的研

究^[2~7]。近年来, 我国部分学者针对某些特定行业排放特征进行了相应研究, 但多数是针对传统排放行业^[8~13]。然而我国产业结构庞大、生产部门繁多、生产工艺各有不同, 且新兴行业的迅速发展以及管理体制落后使得工业源 VOCs 排放问题已经成为困扰很多城市及地区的重要环境问题^[14]。随着我国电子产品制造业的发展, 目前在全国范围内已

收稿日期: 2013-03-15; 修订日期: 2013-04-24

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB951803)

作者简介: 崔如(1986~), 女, 硕士, 主要研究方向为挥发性有机物排放特征, E-mail: cuiiruthu@yahoo.cn

* 通讯联系人, E-mail: liang@tsinghua.edu.cn

形成例如昆山和东莞的电子产业集群. 由于受经济利益等原因驱使,产业集群周围往往建有住宅区,因而产业集群的 VOCs 集中排放使得住宅区空气质量受到严重影响,并且也对周围居民以及厂区职工的健康造成威胁^[15~18].

与传统加工制造部门不同,电子产品制造企业的主要溶剂使用环节之一是电子产品外壳及骨架涂装过程,属于电子产品附属部件而非核心部件,因而其污染控制管理通常较为薄弱;与家具、船舶及汽车制造等行业相比,其产品体积小;但与传统加工制造业相比,由于电子产品加工制造最终输出产品为中高端电子产品,对于生产技术及管理要求均较高,因而只有具有一定规模和实力的厂商才有能力进行生产,致使污染物排放源规模较大. 此外,随着近年来经济发展、劳动力转移及环境管理标准的改变,很多聚集在南方的大型生产厂家开始不断向北方转移,从而带动了排放问题的北移.

基于以上特征造成电子产品加工制造行业 VOCs 排放特征不同于其他行业,且其作为 VOCs 排放源的属性容易被忽略. 由于电子产品加工制造兴起时间较晚,目前针对其 VOCs 排放问题的相关研究也较少. 本研究针对电子产品加工制造过程各环节特点,参考挥发性有机物采样标准方法 TO-14/15^[19, 20]及 TO-11^[21],对我国某大型电子产品加工制造企业不同车间内及最终排气中的 VOCs 浓度及物种构成进行分析,以为同行业 VOCs 排放研究提供基础信息.

1 电子产品加工制造 VOCs 排放来源

电子产品加工制造行业 VOCs 排放来源主要分为两部分:电路板加工和产品外壳生产. 由于目前对于电路板加工制造 VOCs 排放已有相关成果^[22],因而本文主要针对电子产品外壳生产的 VOCs 进行研究. 电子产品外壳生产主要包括型材压铸、机加工及涂装. 压铸过程 VOCs 源于所使用的脱模液在高温状态下随水蒸气挥发进入环境;机加工过程 VOCs 源于所使用的切削液在刀具进行冷却和润滑过程中在高温条件下挥发进入环境. 涂装过程主要分为底漆喷涂、色漆喷涂和面漆喷涂,其 VOCs 主要来源于溶剂、稀释剂及助剂的使用过程中的挥发^[23],常用溶剂包括水、环己酮、邻二甲苯、间二甲苯、对二甲苯、甲苯、2-丁酮、丙酮、正丁醇、正己烷、丙二醇及其他醇醚类物质^[24].

2 材料与方法

2.1 样品采集

原件生产过程中共经过原材料压铸成型、机加工去除毛刺及涂装这 3 个主要步骤. 其中涂装过程包括底漆喷涂、色漆喷涂、面漆喷涂及干燥等流程,且涉及 VOCs 排放的主要环节包括调漆、供漆和喷涂过程.

结合生产过程特点,研究中分别针对压铸车间、机加工车间及涂装车间喷涂室进行 Summa 罐采样及总 VOCs 检测. 根据总体 VOCs 产生情况及 3 种工艺车间布置区别,重点针对涂装车间不同工序、不同产品及不同工艺条件下车间环境空气及排气中 VOCs 进行采样分析. 对于非甲烷碳氢化合物使用 Summa 罐采集,并采用 GC/MS 进行分析;对于羰基化合物使用 DNPH 吸附,并采用 HPLC 进行分析.

采样过程针对笔记本电脑、相机和电纸书的底漆、色漆及面漆喷涂过程在涂装车间内部及生产线废气排放口进行了 Summa 罐及 DNPH 吸附采样,并针对笔记本电脑涂装过程在底漆、色漆及面漆的供漆室和调漆室进行采样. 喷涂车间采样点设于喷涂流水线旁 1 m 距离处,距地面 0.7 m 高. 废气排放管道采样借助 Teflon 管将气体抽取至 Summa 罐及吸附管中实现. 采样过程中 Summa 罐采样时间为 30 min;DNPH 采样时间根据 VOCs 检测仪 5 min 内峰值结果设定为 10~20 min. 为避免在 HPLC 分析过程中臭氧存在对酮类物质的干扰,此处采用 KI 臭氧去除小柱 (Agela Tech) 排除臭氧干扰^[25]. 采样系统中连接管路材质均为 Teflon 材料,采样流量设为 $0.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,DNPH 采样具体管路连接如图 1 所示.

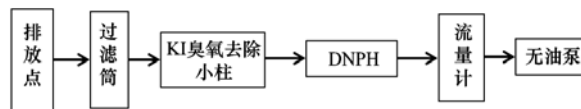


图 1 DNP-HPLC 分析方法采样系统

Fig. 1 Sampling system for DNPH-HPLC method

2.2 样品分析

Summa 罐中的样品,使用 VOCs 预浓缩仪 (Preconcentrator, Entech Model 7100A),按照 TO-15 的方法进行三级模块预浓缩,进样量为 800 mL^[13]. 预处理之后,采用 GC/MS (GC Model 6890, MSD Model 5937N) 分析,与 NIST05 数据库进行比对定性,使用外标标准曲线法定量. 标准曲线使用 PAMs 标准气体 (Spectra gases, 美国) 和 TO-14 (U. S.

EPA,1999) 标准气体 (Scott specialty Gases, 美国) 确定. 所使用的色谱柱为 Agilent 19091S2001 (HP-PONA), 规格为 50 m×200 μm×0.5 μm.

DNPH 样品使用乙腈 (G. T. Baker, 色谱纯) 分 4 次洗脱后定容至 5 mL. 随后使用 HPLC-UV 检测 (Perkin Elmer, Series 2000UV/VIS Detector), 采用梯度洗脱的方式进行分析. UV 检测波长为 360 nm; 色谱柱使用 ODS 反向柱 (Agilent HC-C18, 250 mm×4.6 mm, 5 μm), 色谱柱温度为 30℃, 进样量为 20 μL; 流动相为水和乙腈, 使用醛酮类衍生物-DNPH 标准物质 (AccuStandard) 对酮类组分的浓度进行精确定量.

3 结果与讨论

3.1 不同加工车间 TVOCs 浓度及物种分布

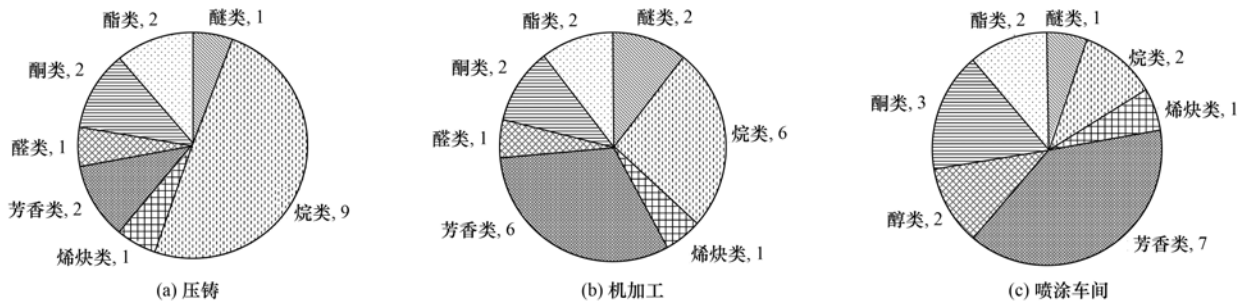


图2 压铸、机加工及喷涂车间 VOCs 物种构成

Fig. 2 Composition of VOCs in casting, cutting and painting workshop

3.2 涂装车间 TVOCs 浓度水平

3.2.1 喷涂室 TVOCs 浓度及主要物种分析

对于黑色笔记本电脑、电子书及相机三类产品 TVOCs 检测结果表明, 笔记本及电子书不同漆层喷涂过程中, 车间内 TVOCs 浓度差异不大, 而相机的底漆及色漆喷涂过程中车间内的 TVOCs 浓度远高于面漆, 如表 1 所示.

表 1 笔记本底架、电子书及相机外壳喷涂过程 TVOCs 浓度¹⁾/mg·m⁻³

Table 1 Concentration of TVOCs during painting process of laptop chassis, e-book and camera/mg·m⁻³

产品	漆层	TVOCs
笔记本 (黑色)	底漆	35
	色/面漆	35
电子书	底漆	20
	色漆	24
	面漆	21
相机	底漆	135
	色漆	200
	面漆	30

1) 由于喷涂特点, 仅对笔记本进行底漆和面漆 (色/面漆) 喷涂, 此处统称为色/面漆

在电子产品加工制造厂区, 尽管三类加工车间使用的溶剂类型、溶剂量均不同, 但在各车间均有强烈的刺激性气味. 对于三类车间 TVOCs 的检测结果表明, 压铸车间 TVOCs 浓度为 0.1 ~ 0.5 mg·m⁻³、机加工车间 TVOCs 浓度为 1.5 ~ 2.5 mg·m⁻³、喷涂车间喷涂室 TVOCs 浓度为 20 ~ 200 mg·m⁻³, 即喷涂过程 VOCs 排放水平远远高于其他两类车间. 由于产品生产流程差异, 造成厂区内喷涂车间数量及生产负荷远远高于压铸及机加工车间, 因而是电子产品加工过程中 VOCs 主要的来源. 此外, 尽管三类车间使用的溶剂类型不同, 但其挥发出来的 VOCs 物种类型均包括烷类、烯炔类、芳香类、酮类、酯类和醚类, 且 VOCs 物种数量均约为 20 种. 但就物种分布而言, 压铸和机加工车间中烷类物质数量较高且多数并非溶剂中原始组分, 如图 2 所示.

由于电子产品涂装过程中 VOCs 的产生主要是由于稀释剂及助剂的挥发造成的, 尽管对于不同产品其所使用的涂料及其组分有所差异, 但通过对不同产品涂装过程中各工序所产生 VOCs 的物种类型进行鉴别可知, 电子产品加工制造业涂装过程产生的 VOCs 物种数量为 15 ~ 25 种, 主要类别包括烷类、醇类、醚类、酮类、酯类及苯系物, 其中丁烷、二甲醚、丙酮、2-丁酮、环己酮、甲基异丁基甲酮、乙酸乙酯、乙酸丁酯、异丙醇、2-甲基-1-丙醇、1-丁醇、苯、甲苯、乙苯、对二甲苯、邻/间二甲苯, 即以苯系物及酮类为主. 四类电子产品涂装过程主要工艺环节车间中 VOCs 物种分布如表 2 所示.

3.2.2 不同产品喷涂车间内苯系物及酮类浓度

由上述 VOCs 物种类型分析可知, 在各喷涂工艺环节中 VOCs 主要组成物质为苯系物和酮类物质, 其中苯系物在各采样点物种总数中占 20% ~ 40%, 而酮类物质物种数量占 15% ~ 25%. 喷涂过程中车间内苯系物浓度对于喷涂室 TVOCs 贡献中,

笔记本为 <5%、电纸书为 <16%、相机为 <16% ; 其中各产品底、色、面三道工序中色漆中苯系物总浓度占相应 TVOCs 浓度最低(<5%),面漆中则占比最高(5% ~ 16%). 酮类物质总浓度对于各产品喷涂室 TVOCs 浓度贡献中,笔记本为 20% ~ 60%、电纸书为 35% ~ 70%、相机为 15% ~ 35%. 两类物质浓度之和在各产品喷涂过程排放总量中贡献率均高于 25% ,其对于电纸书底漆喷涂所排放的 TVOCs

贡献高达 80%. 根据对三类产品苯系物及酮类物质的浓度分析可知,与酮类物质相比,苯系物各单一物种浓度总体而言相对较低,如表 3 ~ 5 所示. 苯系物中,甲苯浓度在各产品喷涂过程中浓度相对较高,而苯的浓度则明显低于其他物质. 造成上述现象的原因在于尽管苯系物为涂料行业用量最大的溶剂,但由于苯系物,特别是苯对于人体健康的威胁^[26],目前已逐步淘汰^[27].

表 2 涂装过程不同工艺环节 VOCs 组分
Table 2 Composition of VOCs during different procedures of painting

类型	笔记本 面漆调漆室	手机 色漆供漆室	笔记本 底漆喷涂室	相机 色漆喷涂室	电纸书 面漆喷涂室
烷类	2-甲基戊烷 戊烷	戊烷	无	丁烷	丁烷
醇类	异丙醇 2-甲基-1-丙醇 1-丁醇	异丙醇 2-甲基-1-丙醇 1-丁醇	2-甲基-1-丙醇 1-丁醇 丁氧基乙醇	异丙醇 2-甲基-1-丙醇 1-丁醇	异丙醇 2-甲基-1-丙醇 1-丁醇
醚类	二甲醚	无	二甲醚	二甲醚	二甲醚
酮类	丙酮 2-丁酮 环己酮 甲基异丁基甲酮	丙酮 2-丁酮 环己酮 甲基异丁基甲酮	丙酮 环己酮	丙酮 2-丁酮 环己酮 甲基异丁基甲酮	丙酮 2-丁酮 环己酮 甲基异丁基甲酮
苯系物	苯 甲苯 乙苯 对二甲苯 邻/间二甲苯 三甲基苯	甲苯 乙苯 对二甲苯 邻/间二甲苯	苯 甲苯 乙苯 对二甲苯 邻/间二甲苯 三甲基苯 乙苯 丙苯	甲苯 乙苯 对二甲苯 邻/间二甲苯	苯 甲苯 乙苯 对二甲苯 邻/间二甲苯
酯类	乙酸乙酯 乙酸丙酯 乙酸丁酯 1-甲氧基-2-乙酸丙酯	乙酸乙酯 乙酸丁酯 丙基乙氧基乙酯	乙酸乙酯 乙酸丁酯	乙酸乙酯 乙酸丁酯 1-甲氧基-2-乙酸丙酯	乙酸丁酯

表 3 笔记本底架喷涂过程苯系物及酮类物质车间浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$
Table 3 Concentrations of BTEX and ketone during
laptop chassis painting/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$

项目	底漆	色/面漆
苯	0.04	0.06
甲苯	0.35	1.28
乙苯	0.21	0.23
对二甲苯	0.29	0.18
间/邻二甲苯	0.60	0.02
丙酮	0.29	12.86
2-丁酮	0.28	0.06
环己酮	6.54	6.89
甲基异丁基甲酮	未检出	1.66

3.2.3 涂料颜色对 VOCs 浓度水平的影响

不同产品根据其外观需要,所使用涂料配方有所不同. 根据对笔记本底架黑色、金色及银色这 3 种涂料的色/面漆喷涂过程进行检测,结果表明使用黑色、金色及银色这 3 种涂料喷涂过程中喷涂室中

表 4 电纸书外壳喷涂过程苯系物及酮类物质车间浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$
Table 4 Concentrations of BTEX and ketone during
e-book shell painting/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$

项目	底漆	色漆	面漆
苯	0.03	0.02	0.14
甲苯	0.63	0.64	1.11
乙苯	0.38	0.16	0.04
对二甲苯	0.43	0.13	0.96
间/邻二甲苯	0.50	0.11	1.18
丙酮	2.68	2.18	1.90
2-丁酮	7.99	1.45	2.84
环己酮	0.04	0.02	0.02
甲基异丁基甲酮	3.03	5.37	3.39

TVOCs 浓度分别为 35、130 和 $50\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. 对于 3 种颜色涂料喷涂过程车间内 VOCs 物种分析可知,3 种颜色涂料挥发出的物种数量均约为 25 种,其中苯系物物种数量占 20% ~ 40%、酮类物质仅占总物种

数量的 17%。但由表 6 中数据可知, 尽管两类物质物种数量占 TVOCs 总物种数低, 但在 3 种颜色涂料喷涂过程中, 车间内苯系物和酮类物质浓度之和占 TVOCs 的 50% ~ 90%。

表 5 相机喷涂过程车间内苯系物及酮类物质浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 5 Concentrations of BTEX and ketone during camera shell painting/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$

项目	底漆	色漆	面漆
苯	0.04	未检出	0.04
甲苯	3.35	2.46	1.42
乙苯	1.04	0.72	1.77
对二甲苯	0.93	0.53	0.75
间/邻二甲苯	0.40	0.47	0.74
丙酮	2.66	0.64	0.41
2-丁酮	19.71	26.88	4.26
环己酮	19.94	0.19	3.72
甲基异丁基甲酮	0.66	4.00	1.00

表 6 不同颜色笔记本喷涂过程中车间内苯系物及酮类物质浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 6 Concentrations of BTEX and ketone during laptop chassis painting of different colors/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$

项目	色/面漆 (黑色)	色/面漆 (沙滩金)	色/面漆 (银色)
苯	0.06	0.04	0.03
甲苯	1.28	2.08	2.22
乙苯	0.23	0.63	0.83
对二甲苯	0.18	0.61	0.72
间/邻二甲苯	0.02	0.45	0.45
丙酮	12.86	15.74	15.77
2-丁酮	0.06	0.57	0.18
环己酮	6.89	25.79	14.86
甲基异丁基甲酮	未检出	21.29	12.24

表 7 笔记本底架供漆室及调漆室苯系物及酮类物质浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 7 Concentrations of BTEX and ketone during the mixing and supplying of painting materials/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$

项目	底漆调漆室	底漆供漆室	面漆调漆室	面漆供漆室
苯	0.34	0.04	0.04	0.07
甲苯	1.75	0.25	2.62	6.90
乙苯	1.33	0.47	0.34	0.29
对二甲苯	0.27	0.18	0.38	0.53
间/邻二甲苯	0.04	0.08	0.17	0.11
丙酮	0.44	1.27	4.18	16.28
2-丁酮	0.41	微量	0.14	0.11
环己酮	5.53	3.15	2.27	2.60
甲基异丁基甲酮	5.40	5.86	0.82	4.55

但由于压铸及机加工车间内 VOCs 浓度水平低, 且车间中无集中通风设备, 属于无组织排放, 因而难以确定其排放总量。涂装车间中 VOCs 随抽风过程进入最终废气排放管道, 因此通过测量废气中 VOCs 浓度及风量等信息可对此集中排放 VOCs 总量进行计算。

3.2.4 调漆室及供漆室排放情况

目前, 在对喷涂过程 VOCs 进行的少量研究仅关注喷涂过程中造成的 VOCs 释放^[28], 但忽略了涂料在调配混合及输送过程中可能造成的 VOCs 排放。本研究对于笔记本底架底漆及色/面漆的调漆室及供漆室 TVOCs 检测表明, 其底漆调漆室及供漆室中 TVOCs 浓度分别为 $35\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $82\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 其色/面漆调漆室和供漆室 TVOCs 浓度分别为 $58\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $76\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。底漆及色/面漆的供漆室和调漆室中苯系物及酮类物质占 TVOCs 质量分数均在 20% ~ 45% (表 7)。

3.3 废气排放管道 VOCs 排放情况

电子产品加工过程中由于工艺需要, 对于生产线内底漆、色漆及面漆的所有喷涂室和相应供漆室调漆室进行供风和排风设置, 各喷涂车间内气体部分经水幕吸收后在抽风机作用下集中进入废气排放管道排放。检测结果表明生产线废气排放管道在常温且饱和湿度条件下 TVOCs 浓度 $50\sim120\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$, 废气排放口 VOCs 物种构成如图 3 所示, 由此可知废气排放中物种数量与喷涂室中物种数量相近, 约为 20 种, 且主要物种为芳香类、酯类和酮类物质。废气中苯系物及酮类物质平均浓度如表 8 所示, 其中苯系物浓度对 TVOCs 浓度贡献低于 5%, 而酮类物质浓度贡献约为 30%。

3.4 排放总量计算

如前文所述, 电子产品加工制造企业中 VOCs 由压铸、机加工及涂装这 3 个过程溶剂使用产生。

涂装车间中 VOCs 来源包括供漆、调漆、喷涂以及产品干燥过程。通常干燥过程中产生的 VOCs 可通过蓄热燃烧及废气回用等方式处理, 因而生产线最终排放废气中 VOCs 为供漆、调漆及喷涂过程所贡献。为估算本文电子产品加工制造企业 VOCs 排放总量, 笔者根据所研究企业加工车间数量、车

间中生产线数量、每条生产线废气排放量、废气排放口浓度对单位生产线的排放量进行计算. 经检测,各生产线满负荷稳定运行条件下生产线废气排放管道中 TVOCs 浓度为 $50 \sim 120 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,排气管道中风速为 $8.5 \sim 11.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,折合生产线废气排放量为 $20\,000 \sim 60\,000 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. 计算中生产线按每日两班工作制,即每日工作 20 h,全年运行 240 d,得出电子产品加工制造厂每条生产线 VOCs 年平均排放量约为 14 t. 厂区 60 条涂装生产年 VOCs 排放量约为 840 t. 经物料衡算后理论总排放量为 872 t,证明涂装过程中 VOCs 主要以集中排放形式进入大气.

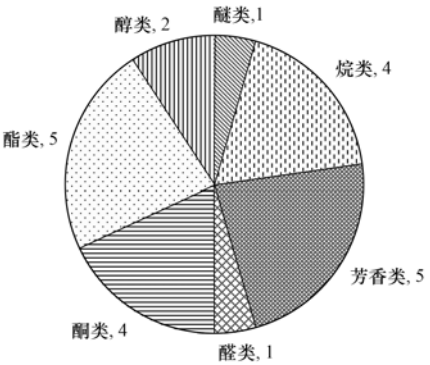


图 3 涂装车间废气排放管道中 VOCs 物种构成
Fig. 3 Composition of VOCs in the exhaust gas from painting workshop

表 8 涂装车间废气排放管道中苯系物及酮类物质浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 8 Concentrations of BTEX and ketone in the exhaust gas from painting workshop/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$

物种	浓度
苯	0.02
甲苯	1.96
乙苯	0.51
对二甲苯	0.05
间/邻二甲苯	0.01
丙酮	7.88
2-丁酮	12.48
环己酮	2.21
甲基异丁基甲酮	2.62

4 结论

(1)电子产品加工制造企业工艺流程中涉及 VOCs 排放的型材压铸、机加工及涂装过程中产生的 VOCs 物种均在 20 种左右,主要包括烷类、烯炔类、芳香类、酮类、酯类和醚类物质. 其中涂装车间总 VOCs 浓度范围为 $20 \sim 200 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,远远高于其他两类车间,是主要 VOCs 排放来源.

(2)电子产品加工制造企业涂装过程中车间内 VOCs 物种以苯系物及酮类物质为主. 但苯系物在

各过程中对于总 VOCs 浓度贡献率较低. 与苯系物相比,酮类物质浓度明显较高;苯系物中甲苯浓度较其他物种高.

(3)涂装车间中不同产品喷涂室中 TVOCs 浓度为 $20 \sim 200 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,除喷涂室外供漆室和调漆室也是重要的 VOCs 来源,其 TVOCs 浓度为 $35 \sim 78 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$.

(4)该企业其单条涂装生产线每年 VOCs 排放量为 14 t,整个厂区全年 VOCs 排放量约为 840 t. 由于此类型企业作为劳动密集型产业,很容易带动周围经济发展形成小型人口聚集地. 但由于涂料及溶剂使用,其作为大型 VOCs 排放源长期向周围环境无间断排放,必然会对当地空气质量造成影响,其排放异味也会对周围居民日常生活质量造成干扰,并对居民身体健康造成潜在威胁.

参考文献:

[1] 傅江帆. 中国电子制造业产业链地理集聚[J]. 哈尔滨工业大学学报(社会科学版), 2011, 13(6): 35-40.

[2] Wei W, Wang S X, Hao J M, et al. Projection of anthropogenic volatile organic compounds (VOCs) emissions in China for the period 2010- 2020 [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45 (38): 6863-6871.

[3] 余宇帆, 卢清, 郑君瑜, 等. 珠江三角洲地区重点 VOC 排放行业的排放清单[J]. 中国环境科学, 2011, 31(2): 195-201.

[4] 郑君瑜, 张礼俊, 钟流举, 等. 珠江三角洲大气面源排放清单及空间分布特征[J]. 中国环境科学, 2009, 29(5): 455-460.

[5] 魏巍, 王书肖, 郝吉明. 中国涂料应用过程挥发性有机物的排放计算及未来发展趋势预测[J]. 环境科学, 2009, 30 (10): 2809-2815.

[6] 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.

[7] Klimont Z, Streets D G, Gupta S, et al. Anthropogenic emissions of non-methane volatile organic compounds in China [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(8): 1309-1322.

[8] 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.

[9] 王宇楠, 叶代启, 林俊敏, 等. 漆包线行业挥发性有机物 (VOCs) 排放特征研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(6): 980-987.

[10] 陈敏敏. 佛山市涂料行业挥发性有机物 (VOCs) 排放特征调查与分析[J]. 广东化工, 2012, 39(6): 179-180, 100.

[11] 刘玲英, 蔡慧华, 罗超. 制鞋行业挥发性有机化合物 (VOCs) 排放特征研究[J]. 广东化工, 2012, 39(6): 288-289, 263.

[12] 孙筱强, 程水源, 魏巍, 等. 炼油厂 VOCs 排放及其对 O_3 生成的敏感性研究[J]. 安全与环境学报, 2011, 29(6): 101-105.

- [13] 张春洋, 马永亮. 中式餐饮业油烟中非甲烷碳氢化合物排放特征研究[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(8): 1768-1775.
- [14] 席劲瑛, 武俊良, 胡洪营, 等. 工业 VOCs 排放源废气排放特征调查与分析[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(11): 1558-1662.
- [15] Wu X M, Fan Z H, Zhu X L, *et al.* Exposures to volatile organic compounds (VOCs) and associated health risks of socio-economically disadvantaged population in a “hot spot” in Camden, New Jersey[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **57**: 72-79.
- [16] Lerner J E C, Sanchez T Y, Sambeth J E, *et al.* Characterization and health risk assessment of VOCs in occupational environments in Buenos Aires, Argentina [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **55**: 440-447.
- [17] Chang M H, Ha E H, Park H, *et al.* The effect of VOCs exposure during pregnancy on newborn's birth weight in mothers and children's environmental health (MOCEH) study [J]. *Epidemiology*, 2011, **22**(1): S162-S163.
- [18] Majumdar D, Dutta C, Mukherjee A K, *et al.* Source apportionment of VOCs at the petrol pumps in Kolkata, India; exposure of workers and assessment of associated health risk[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2008, **13**(8): 524-530.
- [19] Environmental Protection Agency. Compendium Method for the Determination of Volatile Organic Compounds (VOCs) in Ambient Air Using Specially Prepared Canisters with Subsequent Analysis by Gas Chromatography: Method TO-14 [R]. EPA/625/R-96/010b, January 1999.
- [20] Environmental Protection Agency. Compendium Method for the Determination of Volatile Organic Compounds (VOC) in Air Collected in Specially-prepared Canisters and Analyzed by Gas Chromatography/mass Spectrometry (GC/MS): Method TO-15 [R]. EPA/625/R-96/010b, January 1999.
- [21] Environmental Protection Agency. Compendium Method for the Determination of Formaldehyde in Ambient Air Using Adsorbent Cartridge Followed by High Performance Liquid Chromatography (HPLC): Method TO-11 [R]. EPA/625/R-96/010b, January 1999.
- [22] 马英歌. 印刷电路板(PCB)厂挥发性有机物(VOCs)排放指示物筛选[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 2967-2972.
- [23] 韩忠峰. 喷涂废气的全过程控制[J]. 现代涂料与涂装, 2007, **10**(1): 14-16, 24.
- [24] 徐翠香, 宋艳, 鲁钢. 涂料化学与涂装技术基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012. 1-70.
- [25] Pires M, Carvalho L R F. An artifact in air carbonyls sampling using C18 DNPH-coated cartridge[J]. *Analytica Chimica Acta*, 1998, **367**(1-3): 223-231.
- [26] Lee C, Hsieh S. Health risk assessment for human exposure to VOCs in a paint manufacturing plant of Taiwan [J]. *Epidemiology*, 2007, **18**(5): S70-S71.
- [27] 林宣益, 倪玉德. 涂料用溶剂与助剂[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012. 42-60.
- [28] 夏世斌, 于小雨, 张扬. 涂装车间作业场所 VOCs 定量分析[J]. 中国科技论文在线, 2009, **12**(24): 2560-2564.

CONTENTS

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

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年12月15日 34卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 12 Dec. 15, 2013

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行