

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)	

汽车涂料生产环节 VOCs 的排放特征及安全评价

曾培源^{1,2,3}, 李建军^{2,3*}, 廖东奇^{2,3}, 涂翔^{2,3}, 许玫英^{2,3}, 孙国萍^{2,3}

(1. 广东工业大学环境科学与工程学院, 广州 510006; 2. 广东省微生物研究所, 广州 510070; 3. 省部共建华南应用微生物国家重点实验室, 广州 510070)

摘要: 选择某汽车涂料的生产车间为研究对象, 根据汽车涂料生产工艺的不同环节, 在 3 个生产车间选定了 8 个采样点, 用气质联用仪分析了汽车涂料车间内不同生产环节的挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 的种类及浓度水平, 并通过比较各种 VOC 的浓度与国家卫生部规定的工作场所所有毒物质职业接触限值中短时接触容许浓度, 对车间工人健康的影响进行了评价。结果表明, 汽车涂料生产车间内共检测出 15 种主要的 VOCs, 包括苯、甲苯、乙苯、二甲苯、乙酸乙酯、乙酸丁酯、甲基异丁基酮、丙二醇甲醚醋酸酯、三甲苯、乙二醇丁醚等, 其浓度检出范围为 0.51 ~ 593.14 mg·m⁻³。生产车间各生产环节处 TVOCs 浓度显著不同, 同一生产环节不同批次的气体样品中 VOCs 浓度也存在较大差异。二甲苯和乙酸丁酯是生产车间室内空气的主要 VOCs。在生产高峰期部分 VOCs 浓度超过了工作场所所有毒物质职业接触限值, 需采取相应控制措施以保障工人健康。

关键词: 汽车涂料; 挥发性有机物; 排放特征; 安全评价; 职业接触限值

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)12-4592-07

Emission Characteristics and Safety Evaluation of Volatile Organic Compounds in Manufacturing Processes of Automotive Coatings

ZENG Pei-yuan^{1,2,3}, LI Jian-jun^{2,3}, LIAO Dong-qi^{2,3}, TU Xiang^{2,3}, XU Mei-ying^{2,3}, SUN Guo-ping^{2,3}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Institute of Microbiology, Guangzhou 510070, China; 3. State Key Laboratory of Applied Microbiology, South China (The Ministry-Province Joint Development), Guangzhou 510070, China)

Abstract: Emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) were investigated in an automotive coating manufacturing enterprise. Air samples were taken from eight different manufacturing areas in three workshops, and the species of VOCs and their concentrations were measured by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). Safety evaluation was also conducted by comparing the concentration of VOCs with the permissible concentration-short term exposure limit (PC-STEL) regulated by the Ministry of Health. The results showed that fifteen VOCs were detected in the indoor air of the automotive coatings workshop, including benzene, toluene, ethylbenzene, xylene, ethyl acetate, butyl acetate, methyl isobutyl ketone, propylene glycol monomethyl ether acetate, trimethylbenzene and ethylene glycol monobutyl ether. Their concentrations widely ranged from 0.51 to 593.14 mg·m⁻³. The concentrations of TVOCs were significantly different among different manufacturing processes. Even in the same manufacturing process, the concentrations of each component measured at different times were also greatly different. The predominant VOCs of indoor air in the workshop were identified to be ethylbenzene and butyl acetate. The concentrations of most VOCs exceeded the occupational exposure limits, so the corresponding control measures should be taken to protect the health of the workers.

Key words: automotive coatings; volatile organic compounds (VOCs); emission characteristics; safety evaluation; occupational exposure limits (OELs)

挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 是指标准状态下, 蒸气压在 0.1 mmHg (13.3 Pa) 以上, 沸点在 260℃ 以下的有机化学物质, 是常见的大气污染物。国内有关 VOCs 污染源清单的研究结果表明, 包括众多工业活动和溶剂使用在内的工业源是 VOCs 的第一大污染源^[1,2]。VOCs 是 O₃、PM_{2.5} 等大气二次污染物的重要前驱体, 引发城市灰霾、光化学烟雾等^[3], 长期接触高浓度 VOCs 可出现头痛、恶心、呕吐、乏力、抽搐、昏迷等症状, 并损害肝脏、肾脏、大脑等重要器官^[4-6]。

由于大量使用有机溶剂, 涂料行业是大气 VOCs 的重要工业源^[7]。研究发现 2006 年珠三角地区涂料及油墨生产 VOC 年排放量为 1.8 万 t^[8]。自 2009 年起, 我国已成为涂料第一生产大国, 因此, 涂料行业贡献的 VOCs 不容忽视。涂料生产过程中产生的 VOCs 是影响车间内空气质量的主要原因。汽车涂

收稿日期: 2013-06-28; 修订日期: 2013-08-21

基金项目: 广东省产学研结合项目 (2012B09100160); 广东省科技攻关项目 (2011A030700002)

作者简介: 曾培源 (1989 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为工业废气治理技术, E-mail: zengpeiyuan1989@163.com

* 通讯联系人, E-mail: lijianjun1672@163.com

料按照固定的工艺流程在车间内生产,不同的生产环节均需一定数量的工人操作。大多数工人每天平均有 8 h 在车间内作业,长期接触多种挥发性有机物,其健康将受到威胁。近年来,有机溶剂职业中毒事件时有发生,已引起了社会及各方面的高度关注。据报道,在职业中毒事件中,有机溶剂造成的约占 80%~90%^[9]。有关涂料车间室内空气污染状况的调查研究非常有限。Colman Lerner 等^[10] 报道了汽车表面涂装厂和化学实验室内 VOCs 排放特征及与接触限值的比较,发现汽车表面涂装厂和化学实验室都存在着致癌风险。在国内,区润桦调查了汽车涂装工艺的 VOCs 浓度排放特征^[11]。余宇帆比较了涂料车间 VOCs 的有组织排放和无组织排放^[8]。除此之外,未见有关涂料生产车间内不同生产环节 VOCs 排放以及对车间工人健康危害的报道。因此,本研究以某汽车涂料生产车间为对象,调查了汽车涂料的不同生产环节 VOCs 种类及浓度,评价了车间有毒物质职业危害状况,旨在为汽车涂料行业开展清洁生产以及合理选择排放控制技术提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集

调查对象为广州市某规模较大的汽车涂料企业,以生产汽车表面涂装的色漆、清漆、稀释剂、固化剂为主,年生产量超过 7 000 t。生产环节包括投料、分散、研磨、质检和包装。为了研究汽车涂料整个生产过程的 VOCs 排放特征和健康影响,在 3 个车间的 8 个生产环节的工人活动区域均设置采样点(图 1)。

2012 年 12 月~2013 年 1 月对汽车涂料厂车间进行了 8 次采样。采用活性炭采样管(溶剂解析型)连接小流量大气采样泵(Apex, Casella CELL 公司, UK),以 $0.1 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 的流量采集 15 min,采样总体

积为 1.5 L,每次采样时间为 09:00~11:00 点的生产高峰期,按号码顺序(图 1)依次采样。采样点位于工人操作区域呼吸带,距离地面 1.5 m 处,现场采样按 GBZ 159-2004《工作场所空气中有害物质监测的采样规范》^[12] 执行。采样期间室内环境温度范围为 13~19℃,平均相对湿度 54%~68%,大气压为 101.6~102.2 kPa,采样结束后,样品密封冷藏带回实验室,8 h 内测定。

1.2 样品分析

样品分析参照国家标准方法(HJ 584-2010)^[13]。吸附管样品用二硫化碳(色谱纯, CNW Technologies GmbH, Germany)解析 1 h 后,用 GC-MS (Finnigan Trace DSQ, Thermo, USA) 进行定性定量分析。色谱柱为 HP-INNOWAX 柱 ($30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.5 \mu\text{m}$),注射温度 200℃,进样量为 1 μL ,不分流。色谱柱采用程序升温,起始温度为 35℃ (3 min),随后以 $11 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度升温至 150℃,保持 1 min,再升温至 200℃。载气为氦气,流速为 $1.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。质谱检测器采用全扫描(SCAN)模式,电离方式是 EI,离子源温度为 200℃,扫描范围 (m/z) 为 29~200。

进样分析不同浓度的标准液,根据各目标组分质量和响应值绘制校准曲线。

1.3 质量控制与保证

采样前用校准流量计校准采样器流量,采样前后流量误差范围 <5% 实际误差。在采样管前端连接装有无水硫酸钠的玻璃管和装有玻璃棉的气管,以去除空气中水分及颗粒物的影响。设置实验室空白、现场空白和平行样。活性炭采样管加标回收率在 98.6%~101.8% 之间。

2 结果与分析

2.1 汽车涂料生产环节主要 VOCs 种类及浓度变化

表 1 是各生产环节检出的 VOCs 平均浓度,共

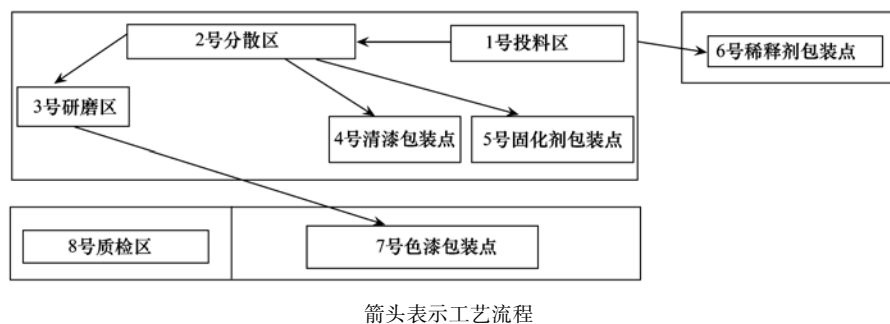


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Schematic diagram of the sampling sites

表 1 汽车涂料车间各生产环节 VOCs 平均浓度¹⁾/mg·m⁻³

Table 1 Average concentrations of VOCs among different producing areas of the automotive coatings workshop/mg·m⁻³

VOCs 化合物名称	投料区	分散区	研磨区	清漆包装	固化剂包装	色漆包装	稀释剂包装	质检区
苯	6.00 ± 7.70	14.78 ± 22.43	19.63 ± 24.60	25.28 ± 27.09	4.66 ± 11.64	22.33 ± 16.62	0.67 ± 0.90	0.55 ± 0.99
甲苯	160.90 ± 93.83	207.52 ± 173.56	437.20 ± 249.40	191.91 ± 88.16	352.59 ± 141.42	210.83 ± 115.67	198.26 ± 215.77	66.88 ± 35.39
乙苯	110.16 ± 53.12	225.92 ± 181.93	261.59 ± 182.52	166.02 ± 90.66	92.56 ± 68.35	179.54 ± 112.42	132.25 ± 100.61	92.07 ± 42.21
对二甲苯	80.77 ± 51.72	204.48 ± 150.35	241.08 ± 177.16	155.15 ± 114.09	90.00 ± 75.15	197.26 ± 233.83	135.95 ± 120.23	55.82 ± 27.54
间二甲苯	119.53 ± 61.79	219.65 ± 127.78	352.68 ± 262.73	218.36 ± 111.41	142.61 ± 97.91	265.15 ± 265.40	227.39 ± 205.55	95.89 ± 40.17
邻二甲苯	63.42 ± 47.36	135.59 ± 99.43	194.66 ± 112.84	145.55 ± 133.63	94.41 ± 105.02	147.53 ± 127.51	125.87 ± 100.92	56.41 ± 37.68
1,3,5-三甲苯	43.47 ± 55.28	20.54 ± 22.75	42.07 ± 55.72	30.52 ± 40.57	21.65 ± 36.11	33.18 ± 37.78	29.09 ± 37.78	12.15 ± 13.77
1,2,4-三甲苯	1.74 ± 1.45	2.81 ± 3.81	2.34 ± 1.75	7.92 ± 12.87	9.13 ± 14.51	4.20 ± 3.62	3.04 ± 3.30	1.89 ± 2.00
1,2,3-三甲苯	0.60 ± 0.65	1.93 ± 3.92	0.51 ± 0.60	2.36 ± 2.88	2.18 ± 3.03	2.77 ± 3.53	1.14 ± 1.40	1.16 ± 1.55
乙酸乙酯	9.86 ± 15.08	361.41 ± 303.82	47.07 ± 62.09	24.84 ± 43.97	7.49 ± 5.66	73.41 ± 150.13	6.18 ± 5.68	7.10 ± 5.93
乙酸仲丁酯	31.29 ± 40.12	48.65 ± 59.30	354.86 ± 618.59	91.94 ± 160.44	83.62 ± 115.37	141.64 ± 170.51	503.26 ± 458.47	26.28 ± 29.83
乙酸丁酯	219.88 ± 152.80	504.07 ± 390.80	593.14 ± 306.15	299.91 ± 119.48	550.05 ± 262.95	429.60 ± 229.28	500.82 ± 270.17	178.88 ± 125.12
丙二醇甲醚醋酸酯	20.79 ± 21.77	44.65 ± 54.19	172.78 ± 169.67	79.87 ± 61.03	56.96 ± 78.01	62.63 ± 68.06	35.68 ± 59.57	16.03 ± 20.45
甲基异丁基酮	56.10 ± 40.68	157.32 ± 128.75	298.76 ± 205.75	150.52 ± 119.10	87.86 ± 88.79	158.43 ± 131.29	378.66 ± 379.33	26.37 ± 26.01
乙二醇丁醚	2.62 ± 4.62	6.91 ± 15.58	24.99 ± 57.49	5.89 ± 11.78	3.71 ± 8.01	4.08 ± 5.07	2.54 ± 3.64	1.45 ± 1.65
TVOC	931.21	2 005.78	3 027.00	1 570.73	1 582.77	1 876.37	2 276.17	635.86
Std	382.65	1 300.07	1 434.16	632.34	484.45	848.41	1 566.47	272.69

1)表中数据为平均值 + 标准差

检出 15 种 VOCs,有 9 种苯系物(苯、甲苯、乙苯、邻二甲苯、间二甲苯、对二甲苯、1,2,3-三甲苯、1,2,4-三甲苯、1,3,5-三甲苯)和 4 种酯类(乙酸乙酯、乙酸丁酯、乙酸仲丁酯、丙二醇甲醚醋酸酯),另外还有 1 种酮类(甲基异丁基酮)和 1 种醚类(乙二醇丁醚),其浓度检出范围为 0.51 ~ 593.14 mg·m⁻³. 这 15 种 VOCs 基本上为汽车涂料生产过程中所使用的有机溶剂. 苯因其具有明确的致癌作用是各国禁止使用的溶剂,且国家质检总局规定苯在汽车涂料中限用溶剂含量不能超过 0.3%^[14]. 本研究结果中检出的低浓度苯可能是其它溶剂中的杂质,例如工业用的二甲苯中就混有苯、乙苯等. 此外,表 1 中数据的标准差显示各成分浓度在较大范围内波动,表明生产不同产品时所使用的溶剂种类和数量的变化较大.

TVOC 浓度用方差分析(ANOVA)进行统计,结果表明,8 个生产环节按浓度高低大致可分为两类,一类浓度较高,包括研磨区、稀释剂包装区、分散区和色漆包装区;另一类浓度较低,包括固化剂包装区、清漆包装区、投料区和质检区. 其中,第一类的研磨区 TVOC 平均浓度最高,达到(3 042.77 ± 1 437.24)mg·m⁻³,与第二类的固化剂包装区、清漆包装区、投料区和质检区差异极显著($P < 0.01$). 稀释剂包装区的浓度仅次于研磨区,TVOC 平均浓度为(2 276.61 ± 1 566.57)mg·m⁻³,与第二类的投料区和质检区存在极显著差异($P < 0.01$). 分散区

为第三高,但仅与第二类的质检区存在极显著差异($P < 0.01$). 而在 0.05 的概率水平上,研磨区除了和稀释剂包装区无差异外,与其它区域均有显著差异. 稀释剂包装区和分散区与投料区、质检区均有显著差异. 而第二类区域之间 TVOC 的浓度变化无显著差异,TVOC 平均浓度相对较低,其中质检区最低,为(638.32 ± 277.4)mg·m⁻³. 上述结果表明不同区域的 TVOC 浓度存在较大差异,这主要与不同区域的功能相关.

此外,从表 1 还可以看出,在同一生产环节 15 种 VOCs 浓度也存在着较大差异. 以 TVOC 平均浓度最高的研磨区为例,统计各污染物浓度占 TVOC 比例. 从图 2 可以看出,研磨区每次样品中有不少 VOCs 组分比例变化较大. 浓度变化最为显著的是乙酸仲丁酯,其百分比最低时仅为 0.54%,而最高可达 31%. 甲基异丁基酮、二甲苯、甲苯和乙苯等均存在类似的情况. 汽车涂料生产过程中出现的 VOCs 浓度变化可能与所使用的溶剂组合发生变化及每次所生产的涂料产品不同有关. 在检出的 15 种 VOCs 中,乙酸仲丁酯、甲基异丁酮、甲苯、乙酸丁酯、乙苯和二甲苯是研磨区检出比例较高的 6 种 VOCs. 从图 2 还可以看出,二甲苯的百分比(质量分数,下同)在各次分析中均高于 10%,最高可达到 46%. 乙酸丁酯次之,其浓度占 TVOC 的范围为 10.61% ~ 31.6%. 分析其他区域结果表明,二甲苯和乙酸丁酯所占比例同样较高. 因此,二甲苯和乙

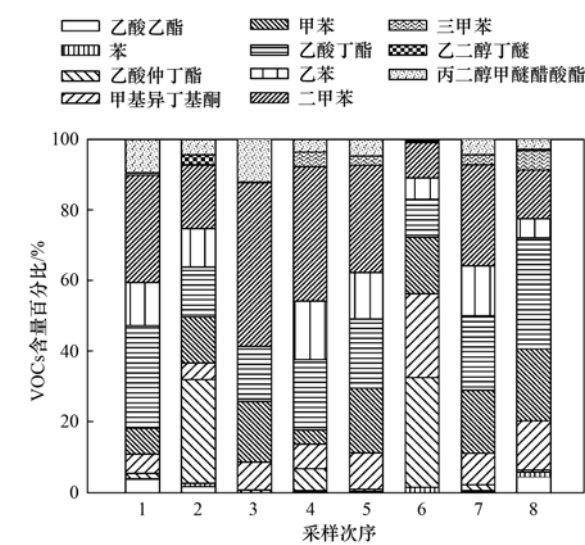


图2 研磨区不同批次样品中各 VOCs 含量百分比
Fig. 2 Percentages of VOCs in the grinding region varied with sampling times

酸丁酯为汽车涂料生产环节释放的主要 VOCs。

15 种 VOCs 按照化学结构可分为苯系物、酯类、酮类、醚类四类,图3显示了四类物质在不同生产环节的质量浓度百分比。可以看出,在 8 个生产环节所占比均较高的 VOCs 种类是苯系物和酯类化合物,两类化合物在不同生产环节的百分比之和

可占到 TVOC 的 83.29% ~ 95.65%。其中含量最高的是苯系物,其浓度范围为 382.82 ~ 1 551.77 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,含量范围为 37.43% ~ 63.27%。其次为酯类,范围为 228.29 ~ 1 252.69 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。由此可见苯系物和酯类为该厂生产汽车涂料使用的主要两类 VOCs。

在生产车间各个环节中还有些其他溶剂成分,如酮类和醚类,浓度范围分别为:26.37 ~ 378.66 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、1.45 ~ 24.99 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。醚类化合物含量相比其他三类化合物很少,含量低于 1%,表明醚类溶剂的使用较少。

2.2 汽车涂料各生产环节 VOCs 浓度与职业接触限值的比较

在检出的 15 种 VOCs 中,国家卫生部规定了苯、甲苯、乙苯、二甲苯(邻、间和对这 3 种异构体)、乙酸丁酯、乙酸乙酯 8 种有毒物质的职业接触限值中短时接触容许浓度(表 2)。通过比较该汽车涂料车间 8 个生产区域 8 次采样分析的 VOCs 浓度与相应接触限值,发现这 8 种 VOCs 浓度在多个生产环节超过了规定限值(表 3)。从监测合格率来看,甲苯和间二甲苯的合格率最低,均为 21.9%。超标最严重者为间二甲苯,最高超标 8.47 倍。其次依次为对二甲苯(6.59 倍),甲苯(6.34 倍),苯(6.05

表 2 车间有毒物质职业接触限值及危害^[15,16]

Table 2 Occupational exposure limits and hazard of toxic substance in the workshop

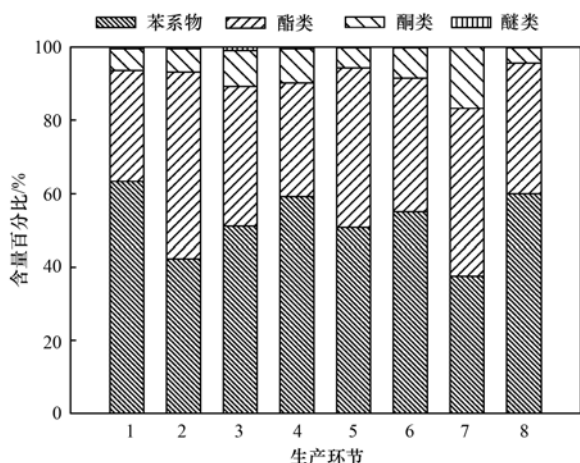
VOCs 化合物名称	卫生部 PC-STEEL ¹⁾ / $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	危害
苯	10	Skin ²⁾ ; A1 ³⁾ ; 白血病
甲苯	100	Skin; A4; 上呼吸道刺激; 中枢神经系统损害; 眼刺激,
乙苯	150	A3; 上呼吸道和眼刺激; 中枢神经系统损害
二甲苯(邻、间和对异构体)	100	A4; 上呼吸道和眼刺激; 中枢神经系统损害
乙酸丁酯	300	眼和上呼吸道刺激
乙酸乙酯	300	上呼吸道和眼刺激

1) PC-STEEL: permissible concentration-short term exposure limit(短时间接触容许浓度); 2) Skin: 皮肤吸收; 3) A1: 确定的人类致癌物; A2: 可疑的人类致癌物; A3: 确定的动物致癌物,但与人类的相关性未知; A4: 不能分类为人类致癌物

表 3 该汽车涂料生产车间空气安全评价结果

Table 3 Result of safety evaluation for indoor air of the automotive coatings workshop

有毒有害物质名称	监测点数	浓度范围 / $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	监测点合格率 /%	不同超标倍数的监测点次数			
				<1 倍	1 ~ 3 倍	3 ~ 5 倍	>5 倍
苯	8	0.006 ~ 62.66	70.3	4	7	5	3
甲苯	8	0.94 ~ 733.92	21.9	18	18	8	3
乙苯	8	22.80 ~ 613.76	54.7	22	6	1	0
对二甲苯	8	12.96 ~ 632.61	51.6	19	8	2	2
间二甲苯	8	27.57 ~ 947.07	21.9	26	17	4	3
邻二甲苯	8	3.38 ~ 356.83	51.6	19	10	2	0
乙酸丁酯	8	10.07 ~ 1 235.33	34.4	29	12	1	0
乙酸乙酯	8	3.38 ~ 750.88	93.8	3	1	0	0



1. 投料区; 2. 分散区; 3. 研磨区; 4. 清漆包装区;
5. 固化剂包装区; 6. 色漆包装区; 7. 稀释剂包装区; 8. 质检区

图3 汽车涂料车间各生产环节 VOCs 含量百分比

Fig. 3 Percentages of VOCs among different producing areas of the automotive coatings workshop

倍)。合格率最高的为乙酸乙酯(93.8%)。比较各环节接触限值超标情况,超标最严重的环节是研磨区,超标率最高达到70.3%,其次是超标率同为65.4%的清漆包装点和色漆包装点。而质检区的超标率相对最低,但仍达到14.1%。因此,汽车涂料整个生产车间普遍存在有毒物质职业危害的风险。

3 讨论

目前,汽车涂料车间内 VOCs 排放特征的调查报道有限,且多数与 VOCs 排放清单有关,很少涉及车间内不同生产环节 VOCs 排放差异的比较以及职业危害评估。在余宇帆研究中报道了珠三角涂料生产车间排放 VOCs 的特征谱,表明涂料车间废气中主要 VOCs 依次为乙酸乙酯、乙苯、甲苯、二甲苯、苯乙烯和乙酸丁酯等^[8]。佛山是广东省涂料企业较为集中的地区,陈敏敏调查了17家佛山涂料企业 VOCs 的排放特征,TVOC 浓度在 58.56 ~ 309.74 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,芳香族、酯类和酮类化合物是三类主要的污染物^[17]。本研究在车间内不同生产环节检出的15种 VOCs,均与该汽车涂料生产过程使用的有机溶剂有关。

色漆、清漆、固化剂、稀释剂为该汽车涂料厂的主要产品,生产工艺有所不同,其中色漆的生产工艺最为复杂,包括投料、分散、研磨、质检、包装全部的环节。清漆生产工艺较色漆少了研磨过程。固化剂和稀释剂生产工艺只需要投料完成后,质检合格即可包装。研究结果表明在不同的生产区域,TVOC 浓度存在明显差异,研磨区、稀释剂包装区、

分散区及色漆包装区 TVOC 浓度显著高于投料区、质检区和其它产品的包装区。可能的原因是各个生产区域功能不同造成的。例如研磨过程温度控制在 40 ~ 60℃,以及研磨精细程度要求等促使了该区域的有机溶剂挥发;在分散区,高速搅拌的目的是将涂料的成膜物质、颜料及助剂与有机溶剂充分混合。因此,这两个区域的有机溶剂容易挥发,使得 TVOC 浓度偏高。投料区和质检区检出的 TVOC 浓度相对较低,可能是因为投料过程操作时间短,一般 5 ~ 8 min 内完成;产品质检区域安装有集气罩,质检过程产生的废气能够得以及时收集排放。对于4种产品包装而言,TVOC 浓度较高的是稀释剂的包装区,原因是稀释剂的成分都是溶剂,而清漆和固化剂产品中溶剂大概占 40% ~ 50%,相对稀释剂产品溶剂量较少;色漆包装点由于是开放式包装环境,使得该点的 TVOC 浓度较高。

调查结果还表明,同一生产环节,8次样品的各种 VOC 浓度也存在着较大差异,二甲苯和乙酸丁酯是汽车涂料生产车间内主要的 VOCs。大量有机溶剂的使用是汽车涂料车间内空气中 VOCs 的主要源。溶剂在涂料中的作用主要有两个:一是在制备涂料时溶解成膜物质,配成溶剂型涂料;二是在施工过程中稀释涂料,用来改善涂料的可涂布性和改善涂膜的性能。起前一种作用的溶剂称为真溶剂,起后一种作用的溶剂称为稀释剂。企业选择溶剂使用主要考虑4个方面,一是溶剂成本,企业希望在保证产品质量的同时尽可能选择成本较低的溶剂代替成本较高的同类型溶剂。二是溶剂溶解效果,为了让产品中树脂很好地成膜,需要添加一些强溶剂,比如甲基异丁基酮,溶解力强,乙酸丁酯、乙酸乙酯、丙二醇甲醚醋酸酯也属于强溶剂。三是溶剂挥发速率,不同溶剂挥发速率不一样。四是溶剂毒性,不同溶剂毒性大小不一样。实际溶剂的选择受多方面因素的影响,随着产品的更新,溶剂的使用组合也在发生变化。

涂料车间是大量有机溶剂使用的场所,劳动力集中。工人接触高浓度有毒有害物质会严重影响身体健康。为保护工人健康,各个国家均规定了有害物质接触限值。短时接触限值是防止劳动者短时间接触过高浓度有毒物质所致的刺激、窒息、神经抑制等急性毒性症状和慢性不可逆性损伤对健康的影响,保证工人的身体健康而设定的^[18]。本研究证明二甲苯和乙酸丁酯是该汽车涂料车间空气内最重要的两类 VOCs,车间内浓度超过标准次数最多。二

甲苯用途广泛,在涂料、燃料、橡胶和印刷等行业中代替苯作为溶剂或稀释剂,工业用二甲苯由邻、间、对 3 种异构体组成,以间二甲苯比例最大。二甲苯主要以呼吸道进入人体,在体内以脂肪组织和肾上腺分布最多。Fuente 等^[19]研究发现,长期暴露于二甲苯的工人听力会受到损害^[20]。乙酸丁酯毒性较小,Saillenfait 等^[21]发现,乙酸丁酯体积分数达到 $2\,000 \times 10^{-6}$,怀孕老鼠的增重才会降低。因此,国家卫生部规定的乙酸丁酯短时接触限值相对较高。其他 VOCs 组分的危害同样不容小视,如甲基异丁基酮对人体上呼吸道和眼有刺激作用,对肾有损害。乙酸仲丁酯对人的眼和上呼吸道产生刺激作用。三甲苯(混合异构体)对人体的中枢神经系统有损害作用,容易引起哮喘和血液效应。乙二醇丁醚能抑制中枢神经系统,高浓度可能造成头痛、恶心等,极高浓度可能造成死亡^[16]。

鉴于所使用的有机溶剂的毒性及超标情况,建议汽车涂料企业严格遵守国家相关规定,全程控制有机溶剂的逸散,定期检查有机溶剂储存和输送管道的密封性。投料、搅拌、包装等所有操作过程在负压或相对密封环境中进行,提高涂料生产的自动化水平。车间内需设置废气收集系统并采取可行的方法净化处理^[22,23],例如生物过滤技术已成功用于涂料车间废气的处理^[24~26]。同时为工人提供质量合格的防护用品,对工人进行安全防护教育以尽可能减小因接触高浓度有毒有害物质而对身体产生的伤害^[27,28]。

4 结论

(1) 采用活性炭吸附管/溶剂解析/GC-MS 方法,在广州某汽车涂料厂 3 个生产车间内 8 个生产环节共检测出 15 种主要 VOCs,在各个生产环节 TVOC 浓度存在差异,同一生产环节不同批次的气体样品中 VOCs 浓度也不相同。

(2) 苯系物、酯类是汽车涂料生产车间两类主要的 VOCs,在各个生产区域产生的总百分比约 90%。其中,二甲苯和乙酸丁酯平均含量最高。

(3) 汽车涂料厂车间各生产环节排放 VOCs 的浓度多数超过国家卫生部规定的短时接触限值,对车间工人健康存在较大职业危害隐患。

参考文献:

[1] 王海林,聂磊,李靖,等. 重点行业挥发性有机物排放特征与评估分析[J]. 科学通报, 2012, **57**(19): 1739-1746.

[2] 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.

[3] Liu C M, Xu Z L, Du Y G, *et al.* Analyses of volatile organic compounds concentrations and variation trends in the air of Changchun, the northeast of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(26): 4459-4466.

[4] Zhou J, You Y, Bai Z P, *et al.* Health risk assessment of personal inhalation exposure to volatile organic compounds in Tianjin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2011, **409**(3): 452-459.

[5] Shirasu M, Touhara K. The scent of disease: volatile organic compounds of the human body related to disease and disorder [J]. *The Journal of Biochemistry*, 2011, **150**(3): 257-266.

[6] Rudnicka J, Kowalkowski T, Ligor T, *et al.* Determination of volatile organic compounds as biomarkers of lung cancer by SPME-GC-TOF/MS and chemometrics [J]. *Journal of Chromatography B: Biomedical Sciences and Applications*, 2011, **879**(30): 3360-3366.

[7] 陈颖,叶代启,刘秀珍,等. 我国工业源 VOCs 排放的源头追踪和行业特征研究[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(1): 48-55.

[8] 余宇帆. 珠江三角洲地区典型工业 VOCs 源排放成分谱研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012. 63-67.

[9] 姜金华. 我国有机溶剂危害的研究现状与防治[J]. 职业与健康, 2007, **23**(7): 552-553.

[10] Colman Lerner J E, Sanchez E 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.

[11] 区润桦. 汽车生产喷涂工艺中挥发性有机物的排放特征研究[D]. 广州: 暨南大学, 2010. 7-15.

[12] GBZ 159-2004, 工作场所空气中有毒物质监测的采样规范[S].

[13] HJ 584-2010, 环境空气 苯系物的测定 活性炭吸附/二硫化碳解吸-气相色谱法[S].

[14] GB 24409-2009, 汽车涂料中有害物质限量[S].

[15] GBZ 2. 1-2007. 工作场所有害因素职业接触限值 第 1 部分: 化学有害因素[S].

[16] 张敏,王丹,杜燮祯,等. ACGIH 有关化学因素的 TLVs[J]. 国外医学(卫生学分册), 2007, **34**(1): 4-24.

[17] 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.

[18] 肖经纬,李斌. 我国职业接触限值的研究进展[J]. 国外医学(卫生学分册), 2009, **36**(4): 213-215.

[19] Fuente A, McPherson B, Hood L J. Hearing loss associated with xylene exposure in a laboratory worker [J]. *Journal of the American Academy of Audiology*, 2012, **23**(10): 824-830.

[20] 王秀玲. 二甲苯毒理学研究进展[J]. 国外医学(卫生学分册), 1997, **24**(2): 77-79.

[21] Saillenfait A M, Gallissot F, Sabaté J P, *et al.* Developmental

- toxic effects of ethylbenzene or toluene alone and in combination with butyl acetate in rats after inhalation exposure[J]. *Journal of Applied Toxicology*, 2007, **27**(1): 32-42.
- [22] Álvarez-Hornos F J, Lafita C, Martínez-Soria V, *et al.* Evaluation of a pilot-scale biotrickling filter as a VOC control technology for the plastic coating sector [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2011, **58-59**: 154-161.
- [23] 涂伟萍, 程建华. 涂料生产与涂装过程中废气排放与治理[J]. *中国涂料*, 2013, **28**(2): 19-24.
- [24] Paca J, Halecky M, Misiaczek O, *et al.* Biofiltration of paint solvent mixtures in two reactor types: overloading by polar components[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 2012, **47**(7): 1036-1045.
- [25] Li J J, Ye G Y, Sun D F, *et al.* Performance of a biotrickling filter in the removal of waste gases containing low concentrations of mixed VOCs from a paint and coating plant [J]. *Biodegradation*, 2012, **23**(1): 177-187.
- [26] Mathur A K, Majumder C B. Biofiltration and kinetic aspects of a biotrickling filter for the removal of paint solvent mixture laden air stream[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **152**(3): 1027-1036.
- [27] GBZ/T 194-2007, 工作场所防止职业中毒卫生工程防护措施规范[S].
- [28] GBZ/T 195-2007, 有机溶剂作业场所个人职业病防护用品使用规范[S].

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

国内外公开发行人