

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第2期

Vol.39 No.2

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

特别策划:挥发性有机污染物(VOCs)排放特征、减排控制、环境政策研究专辑(III)

序	郝郑平(477)
我国机动车排放 VOCs 及其大气环境影响	陈天增,葛艳丽,刘永春,贺泓(478)
基于 PMF 量化工业排放对大气挥发性有机物(VOCs)的影响:以南京市江北工业为例	胡崑,王鸣,郑军,王红丽,卢兴东,景盛翱,陈超(493)
南京工业挥发性有机物来源解析及其对臭氧贡献评估	张玉欣,安俊琳,王俊秀,师远哲,刘静达,梁静舒(502)
某工业园区 VOCs 臭氧生成潜势及优控物种	武蕾丹,王秀艳,杨文,郭风艳,刘锦(511)
某石化工业园区秋季 VOCs 污染特征及来源解析	胡天鹏,李刚,毛瑶,郑煌,秦世斌,闵洋,张家泉,邢新丽,祁士华(517)
某典型石化工业园区冬季大气中 VOCs 污染特征	毛瑶,李刚,胡天鹏,郑煌,安艺伟,闵洋,邢新丽,祁士华(525)
杭州市工业源 VOCs 排放清单及排放特征	卢滨,黄成,卢清,杨强,井宝莉,夏阳,唐伟,顾泽平(533)
秦皇岛市工业行业挥发性有机物排放特征	虎啸宇,刘航,王乃玉,王灿,揣莹(543)
浙江省汽摩配行业挥发性有机物排放特征及排放系数	杨忠平,王浙明,何志桥,徐志荣,滕富华,张华岳(551)
汽车制造企业恶臭来源及影响分析	石田立,张伟霞,陈小方,张嘉妮,梁小明,范丽雅,叶代启(557)
典型酿造业厂界无组织排放 VOCs 污染特征与风险评价	高占啟,胡冠九,王荃,朱冰清,陈素兰(567)
成都市大气环境 VOCs 污染特征及其健康风险评价	李友平,唐娅,范忠雨,蒲敏,章金莲,杨铮铮,吴大磊(576)
上海市住宅区儿童卧室中甲醛和苯系物浓度的现场检测分析	蒋巧云,刘平平,王雪颖,路荣春,刘炜,周华元,龚莹莹,周亚欣,黄晨(585)
江苏省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献	夏思佳,刘倩,赵秋月(592)
江门市人为源挥发性有机物排放清单	陈小方,张伟霞,陈柄旭,张嘉妮,范丽雅,叶代启(600)
长江三角洲 2014 年天然源 BVOCs 排放、组成及时空分布	刘岩,李莉,安静宇,张伟,严茹莎,黄凌,黄成,王红丽,王卿,王敏(608)
北京城市副中心(通州区)加油站 VOCs 排放清单	黄玉虎,胡玮,李贝贝,纪旋,肖宇,任碧琪,秦建平(618)
公交车使用废食用油制生物柴油的污染物排放及 VOCs 成分谱	胡志远,林骠骑,黄成,王红丽,景盛翱,楼狄明(626)
生物滴滤塔净化甲基叔丁基醚废气的研究	褚其英,姚露露,吕雄标,叶杰旭,叶虹霓,潘梁柱,陈建孟,陈东之(633)
低温等离子体-生物耦合系统对复合 CVOCs 的降解	郭海倩,缪晶晶,姜理英,张迪(640)
水质异味期间钱塘江杭州段表层水体中挥发性和半挥发性有机物污染特征及健康风险评价	陈峰,唐访良,徐建芬,王奕奕,阮东德,张伟,周姗(648)
城市自来水管网中挥发性有机物的空间分布特征	许美佳,王海亮,李春梅,徐雄,王东红(655)
不同通勤模式暴露于 VOCs 的健康风险评价	佟瑞鹏,张磊(663)
家具制造过程中 VOCs 的来源分析及环境健康风险评价	佟瑞鹏,张磊,杨校毅,朱旭波,任传耕(672)
北京市 PM _{2.5} 时空分布特征及其与 PM ₁₀ 关系的时空变异特征	杨文涛,姚诗琪,邓敏,王艳军(684)
小型池塘水-气界面 CH ₄ 冒泡通量的观测	张秀芳,肖薇,张弥,王伟,赵佳玉,胡勇博,谢成玉,张圳,谢燕红,黄文晶(691)
中国七大流域全氟烷基酸污染水平与饮水暴露风险	王鑫璇,张鸿,王艳萍,罗骥(703)
铁岭市河流氮素时空分布及源解析	杨丽标,雷坤,乔飞,孟伟(711)
基于三维荧光及平行因子分析的川西高原河流水体 CDOM 特征	刘堰杨,秦纪洪,刘琛,孙辉,唐翔宇,范诗雨(720)
宁波市地表水重金属污染现状和健康风险评价	徐美娟,鲍波,陈春燕,王永川,高夫燕,虞效益(729)
巢湖水体可溶性重金属时空分布及污染评价	吴蕾,刘桂建,周春财,刘荣琼(738)
广西龙江沉积物重金属污染现状及生物有效性	蓝小龙,宁增平,肖青相,黄正玉,刘意章,肖唐付,赵彦龙,吴世良(748)
内电解人工湿地冬季低温尾水强化脱氮机制	郑晓英,朱星,王菊,周翔,徐亚东,韦诚,高雅洁,周敏(758)
河道型水库支流库湾营养盐动态补给过程	徐雅倩,徐飘,杨正健,刘德富,马骏(765)
降雨对蓝藻水华消退影响及其机制分析	刘心愿,宋林旭,纪道斌,刘德富,崔玉洁,黄佳维,赵冲,唐咏春,平明明(774)
城市河流沉水植物与大型底栖动物群落的关系	梁晓东,余杨,张敏,段龙飞,彭文启(783)
三峡库区兰陵溪流域径流氮磷输出及其降雨径流过程特征	张林,黄志霖,肖文发,曾立雄,宋文梅(792)
基于污染评价的地下水中优控污染物筛选	赵鹏,何江涛,王曼丽,黄德亮,王磊,梁雨(800)
硫和石英砂比对自养填充床反应器去除高浓度高氯酸盐的影响	陶华强,邵冬海,张超,宋圆圆,逯彩彩,郭建博(811)
活性炭/高分子复合水凝胶对水中亚甲基蓝和 Cu(II) 的去除性能	孔岩,庄媛,石宝友,韩志勇,郝昊天,韩昆,于建伟(819)
三维网状 HZO@SGH 对水中氟离子的吸附作用和机制	马福臻,周少奇,刘泽琚,支亮亮,周璇(828)
MgO/活性炭催化臭氧氧化降解有机物的作用机制	许珊珊,林存旺,丁亚磊,童少平(838)
污水厂二级出水中难凝有机物的臭氧化特性	侯瑞,金鑫,金鹏康,苟邦耀,王晓昌(844)
染料探针技术对二级出水中优势污染物的定量检测	孟晓荣,王穗桢,王磊,王旭东,乔茹凯,任婷婷,唐卫婷(852)
污水处理厂厌氧氨氧化工艺小试	李冬,赵世勋,王俊安,朱金凤,关宏泽,张杰(859)
间歇曝气模式下曝气量对短程硝化恢复的影响	刘宏,南彦斌,李慧,王翔,彭永臻,陈永志(865)
好氧/除磷颗粒对亚硝化颗粒污泥启动的影响	李冬,郭跃洲,曹美忠,张泽文,李帅,张杰(872)
处理垃圾渗滤液的 SBR 中微生物种群与污泥比阻	蔡丽云,黄泽彬,须子唯,江志斌,林莉莉,黄宇(880)
基于城镇化进程表层土壤多环芳烃来源解析及风险评价	姚宏,张士超,刘明丽,王静,鲁根涛,于晓华(889)
西江流域土壤砷含量空间变异与污染评价	刘畅,宋波,张云霞,雷梅,田美玲,余元元,庞瑞(899)
开封城市土壤磷素组成特征及流失风险	白秀玲,马建华,孙艳丽,刘德新(909)
电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价	尹伊梦,赵委托,黄庭,程胜高,赵珍丽,余葱葱(916)
上海市稻米中有机氯农药残留水平及健康风险评价	孟媛,刘翠翠,仇雁翎,周轶慧,朱志良(927)
四环素类抗生素对不同蔬菜生长的影响及其富集转运特征	迟荪琳,王卫中,徐卫红,李桃,李彦华,张春来(935)
硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤 As-Cd 生物有效性及稻米累积阻控	李园星露,叶长城,刘玉玲,李丹阳,刘寿涛,罗海艳,刘孝利,铁柏清,孙健(944)
电子垃圾拆解工人的肝功能和肾功能健康状况及影响因素分析:以清远市龙塘镇为例	严晓,李淑圆,王美欢,许榕发,郑晶,任明忠(953)

家具制造过程中 VOCs 的来源分析及环境健康风险评估

佟瑞鹏¹, 张磊¹, 杨校毅¹, 朱旭波², 任传耕²

(1. 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083; 2. 华润置地有限公司, 深圳 518001)

摘要: 目前国内外仅对家具生产中涂装环节 VOCs 的来源进行分析, 且主要关注的是家具制造完成之后释放的 VOCs 及其对室内空气的影响, 因此本文对完整家具制造过程中 VOCs 的来源进行探究, 并引入蒙特卡罗模拟方法, 运用改进的概率风险评估模型, 对家具制造过程中贴皮、喷底漆、喷面漆、清洗、喷胶、粘棉、巡检等工序 9 个工位的工人进行致癌和非致癌健康风险评估, 并筛选出对健康风险影响较大的暴露参数。结果表明, 喷底漆、喷面漆工序使用的各类油漆、稀释剂和固化剂会产生苯、甲苯、二甲苯、苯乙烯、丁酮、环己酮、乙酸丁酯、乙酸乙酯等 VOCs, 贴皮工序、喷胶工序、粘棉工序使用的胶水类化学原料会产生二氯甲烷和乙酸乙酯, 清洗工序用到的脱漆剂会产生二氯甲烷; 暴露于苯和二氯甲烷的各工位致癌风险值均超过 10^{-6} , 除暴露于苯的擦色、喷底漆和巡检工位外, 其它各工位超过 10^{-6} 的概率皆大于 95%, 喷面漆工人的苯致癌风险最大, 为 $3.07 \times 10^{-6} \pm 1.73 \times 10^{-6}$, 贴皮工人的二氯甲烷致癌风险最大, 为 $5.14 \times 10^{-6} \pm 2.70 \times 10^{-6}$, 另外, 各工位中只有喷面漆工人的非致癌风险大于 1; 暴露持续时间(ED)、致癌物的浓度(C)、呼吸速率(InhR)、暴露时间(ET)、暴露频率(EF)是对致癌风险影响较大的参数, 体重(BW)对致癌风险具有负敏感度。除浓度外, 对非致癌风险结果影响较大的暴露参数依次为: 暴露持续时间(ED)、暴露时间(ET)、暴露频率(EF)。

关键词: VOCs; 家具制造; 来源; 致癌概率风险; 非致癌概率风险

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)02-0672-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201710114

Source Analysis and Environmental Health Risk Assessment of VOCs in Furniture Manufacturing

TONG Rui-peng¹, ZHANG Lei¹, YANG Xiao-yi¹, ZHU Xu-bo², REN Chuan-geng²

(1. School of Resources & Safety Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. China Resources Land Limited, Shenzhen 518001, China)

Abstract: Regarding furniture manufacturing, scholars have only studied the sources of VOCs in the spraying process, yet the main concern is the release of VOCs after the completion of the manufacturing process and its impact on indoor air quality. Therefore, in this study, the sources of VOCs for the entire process of furniture manufacturing were explored and probabilistic risk models were improved. Then, the carcinogenicity and non-carcinogenic health risks to workers at nine workstations in a furniture factory were evaluated via a Monte Carlo simulation method, and the sensitivity of each exposure parameter was analyzed. The results are as follows. The various types of paints, diluents, and curing agents used in the process of spraying primer paint and spraying surface paint release VOCs, such as benzene, toluene, xylene, styrene, butanone, cyclohexanone, butyl acetate, and ethyl acetate. The glue used in the leather pasting process, the glue process, and the viscose process generates VOCs, such as dichloromethane and ethyl acetate, and the paint remover used in the cleaning process emits dichloromethane. The carcinogenic risk at each station was more than 10^{-6} . For benzene exposure, the probability of exceeding 10^{-6} was greater than 95% for all stations, excluding SWB, SWP, and CWP. The carcinogenic risk of workers exposed to benzene was the highest at SWS, at $3.07 \times 10^{-6} \pm 1.73 \times 10^{-6}$, and the carcinogenic risk of workers exposed to dichloromethane was the greatest at SWL, with a value of $5.14 \times 10^{-6} \pm 2.70 \times 10^{-6}$. The only non-carcinogenic risk greater than 1 was to SWS workers. The parameters that had the greatest impact on the carcinogenic risk assessment were exposure day (ED), concentration (C), exposure time (ET), and exposure frequency (EF). In the non-carcinogenic risk assessment, the most influential variables were ED, ET, and EF. In addition, concentration also had a significant impact on the evaluation results.

Key words: VOCs; furniture manufacturing; source; carcinogenic probabilistic risk; non-carcinogenic probabilistic risk

挥发性有机物(VOCs)是近地层臭氧和二次有机气溶胶的重要前体物, 参与大气光化学反应, 增强大气的氧化能力, 却也因此影响空气质量, 危害人体健康, 是重要的空气污染物^[1,2]。VOCs 来源于生产、生活等各方面^[3,4], 在生产中, VOCs 主要来自工业固定源, 包含汽车制造、印刷、设备涂装、电子制造、家具和生物制药等六大行业^[5]。

关于 VOCs 的工业排放, 目前涉及冬季典型霾污染期间化工园区^[6]、电子垃圾分解厂^[7]、北京某炼油厂^[8]及汽车喷涂、电子光刻、印刷 3 类典型溶

收稿日期: 2017-10-17; 修订日期: 2017-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51674268)

作者简介: 佟瑞鹏(1977~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为职业健康与环境健康风险评估等, E-mail: tongrp@cumt.edu.cn

剂使用^[9]等企业 VOCs 的污染特征及来源研究。就 VOCs 对人体造成的危害,学者评估了其在煤矿^[10]、废弃固体塑料回收^[11]、农药生产^[12]、制药^[13]等行业的健康风险。在家具行业,其制造过程会产生苯、甲苯、二甲苯等 VOCs,污染环境、危害工人健康^[14,15]。在我国五大家具产区的珠江三角洲地区,家具制造业已成为该地区 VOCs 的第一大固定污染排放源,占总排放的 23.3%^[16]。近年来,随着“大气十条”和“十三五”生态环境保护规划等相关法规的相继颁布实施,对污染行业提出了新的要求。因此,对家具制造行业 VOCs 的排放进行有效防控和治理已经成为当务之急。但现有研究仅着眼于家具制造过程中涂装环节 VOCs 的产生,很少对整个家具制造过程中产生 VOCs 的工序加以探究;且主要关注的是家具制造完成之后在销售存放^[17]和使用过程中^[18~20]释放的 VOCs 及其对室内空气的影响,很少评估制造过程中 VOCs 导致的环境健康风险。家具在销售存放和使用过程中 VOCs 的排放随着时间的推移会逐渐下降,而且与温度、相对湿度等因素有关,并对办公、家居环境及公众的健康造成影响;而家具制造过程中高浓度的 VOCs 主要对职业人群的健康造成危害,而且由于生产的需求,VOCs 的排放是一个长期、稳定的过程,并伴随家具制造企业工人的整个职业周期。因此,亟需对家具制造过程中 VOCs 产生的工序及其导致的环境健康风险进行探究和评价。

鉴于此,以中国广东省珠海市某家具制造厂为对象,通过 2014~2016 年连续 3 a 对该厂的跟踪研究,探究 VOCs 在家具制造过程中的产生工序,对其浓度进行采样检测并分析来源。采用美国环保署 (USEPA) 推荐的健康风险暴露模型,运用蒙特卡罗随机模拟,评估 VOCs 造成的致癌概率风险及非致癌概率风险,并通过敏感性分析筛选与健康风险相关的重要因素。最后,根据分析结果给出了家具行业 VOCs 的排放及健康风险防控措施与建议,以期为加快环境污染防治、改善生态环境质量、实现绿色低碳发展做出贡献。

1 材料与方法

1.1 研究对象

研究对象为广东省珠海市某家具制造厂,隶属于国内一家综合型的国有地产开发企业,该厂主要生产办公用品及民用家具,季产办公桌 4.7 万套、文件柜 5.3 万套,月产民用家具 5.2 千套。该厂所

在的珠江三角洲地区是国内最大的家具产区和出口基地,其产值占全国的三分之一以上,出口总量则占一半以上,这个地区具有完整的生产体系、发达的销售市场和健全的配套产业。作为当地一家典型的家具制造企业,该厂生产流程规范,工艺成熟稳定,季度、月份产量均衡,在当地乃至全国都具有很强的代表性。另外,该家具企业是一家综合型的家具制造商,木制家具和金属家具的生产工艺、流程不仅符合相关规程而且能代表一般家具制造企业的基本情况。因此,本文以该家具制造厂为例,对家具制造过程中 VOCs 的来源进行探究,并对 VOCs 造成的职业环境健康风险进行评价。

1.2 样品采集

样品采集时间分别为 2014~2016 年每年的 9 月 19~21 日,现场采样气象条件为:温度 31.3~34.1℃,相对湿度 53.6%~53.7%,气压 100.7~101.1 kPa,风速为 0.2 m·s⁻¹。采样当天生产设备运行情况及生产情况与平时的工作状态基本一致。采样按照 GBZ 159-2004《工作场所空气中有害物质检测的采样规范》的规定,采用定点、分时段短时间采样法,均匀分布采样点,同时严格按照国家标准的相关要求,选择有代表性的工作地点,其中包括逸散或存在有害物质的工作地点、劳动者接触时间最长的工作地点。每年每次采样 3 个工作日,依据对 VOCs 的来源分析,每次设置采样点 9 个,采样点项数 48 个,涉及苯、甲苯、二甲苯、苯乙烯、丁酮、环己酮、乙酸丁酯、乙酸乙酯、二氯甲烷共 9 种 VOCs 的采样。每个采样点分别于每个工作日的 09:00~10:00、15:00~16:00 和 20:00~21:00 采样 3 次,共得到样品数 1296 份,其中有效样品 1274 份,样品有效率为 98.3%。采样仪器、空气收集器等见表 1。

1.3 样品分析

实验室检验时温度为 20.0~23.0℃,相对湿度为 52.0%~58.0%,气压为 101.0~102.2 kPa。按照 GBZ/T 160.42-2007《工作场所空气有毒物质测定 芳香烃类化合物》等标准规定的要求^[21~25],通过热解吸-气相色谱法,将利用碳管收集的苯、甲苯、二甲苯、苯乙烯等气体注入气相色谱仪 GC-2010plus 进行定性、定量分析;把气袋中收集的二氯甲烷样品,采用直接进样-气相色谱法注入气相色谱仪 GC-2014 进行监测分析,具体信息见表 1。

1.4 健康风险评价模型

由于各工位工人在工作时皆佩戴有自吸过滤半

表 1 VOCs 采样分析的仪器和方法

Table 1 Instruments and methods for VOCs collection and analysis

VOCs	采样仪器	空气收集器	采样流量 /L·min ⁻¹	监测仪器	监测方法
苯、甲苯、二甲苯、苯乙烯 环己酮、丁酮 乙酸丁酯、乙酸乙酯	定点:大气采样器 EM-500	碳管	定点:0.1	气相色谱仪:GC-2010plus	热解吸-气相色谱法
二氯甲烷	—	气袋	—	气相色谱仪:GC-2014	直接进样-气相色谱法

面罩式防毒面具、手袖套、围裙、工服、劳保鞋等个人防护用品,同时厂区的 VOCs 以蒸气的形式存在,因此,在进行健康风险评价时仅考虑经呼吸途径由 VOCs 引起的致癌风险和非致癌风险,采用 USEPA^[26~28]推荐的风险评价模型,并结合研究对象加以改进,如下。

(1) 致癌风险模型

$$LADD = \frac{C \times (1 - FE) \times InhR \times IAF \times ET \times LRF \times EF \times ED}{LT \times BW \times 365} \quad (1)$$

$$CR = LADD \times SF \quad (2)$$

$$TCR = \sum_{i=1}^m CR_i \quad (3)$$

式中, LADD 为终生日均暴露量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$]; C 为空气中某种 VOCs 的含量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$), FE 为过滤效率,指所研究家具厂工人在工作时佩戴的自吸过滤半面罩式防毒面具对 VOCs 的过滤效率; 365 为每年的天数 ($\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$), SF 为致癌斜率因子 ($\text{kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$); CR 为致癌风险; TCR 为所有具有致癌效应 VOCs 的总致癌风险; m 为具有致癌效应 VOCs 的种类,其它参数含义及取值如表 2。

(2) 非致癌风险模型

$$EC = \frac{C \times (1 - FE) \times ET \times EF \times ED}{AT} \quad (4)$$

$$HQ = \frac{EC}{RfC} \quad (5)$$

$$THQ = \sum_{j=1}^n HQ_j \quad (6)$$

式中, EC 为暴露浓度 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$), RfC 为参考剂量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); HQ 为危害商,用以表征 VOCs 的非致癌风险; THQ 为所有具有非致癌效应 VOCs 的总危害商; n 为具有非致癌效应 VOCs 的种类,其它参数含义及取值如表 2。

(3) 参数取值

依据世界卫生组织 (WHO) 和国际癌症研究机构 (IARC) 的研究结果,苯和二氯甲烷为人类致癌物,甲苯、二甲苯和苯乙烯等 3 种有害挥发物为非致癌物。根据 USEPA 的风险信息系统 (IRIS)^[29] 可得苯、甲苯、二甲苯、苯乙烯和二氯甲烷 5 种 VOCs 的 SF 值和 RfC 值,具体数值见表 2;丁酮、环己酮、乙酸丁酯和乙酸乙酯暂无相关的参数,因此不对其进行健康风险评价。需要注意的是,致癌物也会产生非致癌风险,对其非致癌风险同样采用公式 (4) ~ (6) 进行计算^[30]。

表 2 5 种 VOCs 的致癌倾斜因子及参考浓度

Table 2 Cancer slope factors and reference concentrations of five VOCs

参数	苯	甲苯	二甲苯	苯乙烯	二氯甲烷
$SF/\text{mg}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{d}$	2.90×10^{-2}	—	—	—	2.00×10^{-3}
$RfC/\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	3.00×10^{-2}	5	1.00×10^{-1}	1	6.00×10^{-1}

以家具厂的一线操作工人为健康风险受体,经由实地调研,同时参考文献[31],可以确定评价模型各参数取值。另外,该家具厂选用的自吸过滤半面罩式防毒面具符合强制性的国家标准 GB 2890-2009《呼吸防护 自吸过滤式防毒面具》的相关规定,过滤件的过滤性能级别为 P2(中等能力),过滤效率为 99%,各相关参数取值见表 3。

2 结果与讨论

2.1 VOCs 来源分析

2.1.1 VOCs 来源探究

经调查,该家具厂由木厂(WF)、实木厂(SW)、椅厂(CF)和铁厂(IF)这 4 个车间组成,另有化学品仓(CW)1 个。家具厂的 VOCs 主要来源于白乳胶等

胶水类化学原料、各种漆类原料以及稀释剂等调节漆类的化学原料。这些原料都存储在化学品仓，主要用于实木厂，铁厂和椅厂用量较少。由此可得，该家具厂产生 VOCs 的地点主要是化学品仓和实木厂，在铁厂和椅厂也会产生少量的 VOCs。该家具企业的家具生产工艺、排污节点及产生 VOCs 的化学原料见表

4。需要说明的是，该家具企业是一家综合型的家具制造商，共有木厂、实木厂、铁厂和椅厂这 4 个车间，生产工艺各不相同，而一般的木制家具制造企业与实木厂的生产工艺基本一致。

为辨识实木厂、铁厂和椅厂产生 VOCs 的具体工序，对各车间进一步探究，如表 4。在实木厂，产

表 3 VOCs 造成健康风险评价中各参数取值

Table 3 Values of parameters in assessment of health risk caused by VOCs					
参数	含义	单位	分布	取值	数据来源
EF	暴露频率	$d \cdot a^{-1}$	$T^{1)}$	264;292;324	本研究
ET	暴露时间	$h \cdot d^{-1}$	T	8;10;12	本研究
ED	暴露持续时间	a	$LN^{2)}$	11.5 ± 4.6	本研究
BW	体重	kg	$N^{3)}$	63.56 ± 5.67	本研究
AT	平均暴露时间	h	—	33 580	本研究
InhR	呼吸速率	$m^3 \cdot h^{-1}$	LN	1.69 ± 0.41	[32]
LT	终生时间	a	—	72.4	[32]
IAF	呼吸调整因子	—	—	1	[33]
LRF	肺部滞留因子	—	—	1	[33]
FE	过滤效率	%	—	99.0	[34]

1) T:三角分布, 3 个参数值分别为最小值、最可能值和最大值; 2) LN:对数正态分布, 参数值为算数平均数 ± 标准差; 3) N:正态分布, 参数值为算数平均数 ± 标准差,下同

表 4 家具厂生产工艺、排污节点及产生 VOCs 的化学原料¹⁾

Table 4 Production process, pollution discharge nodes and VOCs produced by chemical materials in the furniture factory			
车间	生产工艺及排污节点	化学原料	产生的 VOCs
木厂	木板料 → 开料 → 开槽、钻孔 → 封边 → 成品入库 ↓ W ↓ N ↓ W ↓ N ↓ N	—	—
实木厂	配料 → 零部件制造 → 弯曲件制造 → 雕刻 → 贴皮 → 调漆 → 修补 → 磨平 → 烘干 → 成品入库 ↓ W ↓ N ↓ N ↓ VOCs ↓ VOCs ↓ VOCs ↓ VOCs ↓ VOCs ↓ VOCs ↓ W ↓ N ↓ VOCs	白乳胶、立时得胶水、PE 透明底漆、黑色仿皮漆、白色仿皮漆、透明腻子、PU 亚光清面漆系列、底材封闭底漆、稀释剂、固化剂	苯、甲苯、二甲苯、苯乙烯、乙酸乙酯、乙酸丁酯、丁酮、环己酮、甲基异丁基甲酮、二价酸酯、丙二醇甲醚乙酸酯、二氯甲烷
铁厂	铁板料 → 开料 → 冲压 → 成型 → 清洗 → 烘干 → 喷涂 → 成品入库 ↓ O ↓ N ↓ VOCs ↓ N ↓ VOCs ↓ VOCs ↓ N	脱漆剂、立时得胶水	乙酸乙酯、二氯甲烷
椅厂	原料 → 开料 → 开棉 → 裁剪 → 粘棉 → 车缝 → 组装 → 成品入库 ↓ O ↓ N ↓ VOCs ↓ N ↓ O ↓ N ↓ N	立时得胶水	乙酸乙酯、二氯甲烷

1) W:木粉尘; N:噪声; O:其他粉尘

生 VOCs 的工序主要有贴皮和喷底漆、喷面漆工序. 在贴皮工序中, 使用冷、热压机对半成品家具进行贴皮时分别用到白乳胶和立时得胶水, 因此产生二氯甲烷, 乙酸乙酯两种 VOCs. 在喷底漆、喷面漆工序中, 对半成品进行喷漆, 用到 PE 透明底漆等各种漆、稀释剂及固化剂, 因此产生苯、甲苯、二甲苯、苯乙烯、丁酮、环己酮、乙酸丁酯和乙酸乙酯这 8 种 VOCs.

在铁厂, 清洗和喷胶工序需要使用脱漆剂和立时得胶水, 因此都会产生二氯甲烷, 另外在喷胶产生乙酸乙酯. 在椅厂的粘棉工序中, 需精细加工椅子, 用到立时得胶水, 因此产生二氯甲烷和乙酸乙酯两种 VOCs.

2.1.2 VOCs 检测结果

经由以上分析, 可得家具厂中接触 VOCs 的工序. 经采样分析, 可得接触 VOCs 的具体工位和所接触 VOCs 的种类. 由于甲基异丁基甲酮、二价酸酯和丙二醇甲醚乙酸酯等无相应的监测方法及

职业接触限值, 故不把以上项目作为研究的重点. 仅对化学毒物大、化学毒性强、用量或生成量较大、作业人员接触机会多、有监测方法和职业接触限值的职业病危害因素, 如苯、甲苯、二甲苯、苯乙烯、丁酮、环己酮、乙酸丁酯、乙酸乙酯和二氯甲烷等 9 种 VOCs 的浓度进行监测, 并通过 Crystal Ball 11.1 选择 A-D 检验算法 (anderson-darling test) 对浓度值进行拟合优度检验, 以分析 VOCs 的样本含量服从何种分布, 分布拟合结果见表 5.

对于都存在苯、甲苯、二甲苯、苯乙烯、丁酮、环己酮、乙酸丁酯和乙酸乙酯这 8 种 VOCs 的工位, VOCs 的总含量依照喷面漆工位、喷底漆工位、擦色工位、调漆工位、巡检工位由高到低. 这 8 种 VOCs 可以归为 3 类: 苯系物 (苯、甲苯、二甲苯)、酮类 (丁酮、环己酮) 和酯类 (乙酸丁酯、乙酸乙酯), 在以上 5 种工位中, 酯类的含量最高 (57.23%), 苯系物 (29.27%) 和酮类 (13.50%) 次之.

表 5 家具厂各工位 VOCs 的种类和含量/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$
Table 5 VOCs types and contents of each work station in the furniture factory/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$

VOCs	实木厂 (SW)				
	贴皮工位 (SWL)	喷底漆、喷面漆工序			
		擦色工位 (SWB)	调漆工位 (SWO)	喷底漆工位 (SWP)	喷面漆工位 (SWS)
苯	—	LN, 0.17 ± 0.05	T, 0.21; 0.32; 0.39	LN, 0.23 ± 0.07	LN, 0.31 ± 0.08
甲苯	—	LN, 0.45 ± 0.12	LN, 0.33 ± 0.08	N, 0.56 ± 0.19	LN, 0.67 ± 0.17
二甲苯	—	N, 1.24 ± 0.32	N, 1.17 ± 0.21	LN, 2.46 ± 0.24	T, 10.8; 13.3; 19.7
苯乙烯	—	LN, 0.72 ± 0.20	LN, 0.68 ± 0.17	LN, 1.13 ± 0.16	N, 1.07 ± 0.22
丁酮	—	LN, 2.07 ± 0.39	T, 1.24; 1.93; 2.87	T, 2.37; 2.96; 3.74	T, 2.85; 3.26; 3.84
环己酮	—	T, 0.17; 0.23; 0.26	N, 0.12 ± 0.01	LN, 0.17 ± 0.03	LN, 0.21 ± 0.04
乙酸丁酯	—	T, 0.16; 0.19; 0.23	LN, 0.08 ± 0.02	LN, 0.11 ± 0.04	T, 10.2; 30.8; 72.1
乙酸乙酯	T, 16.5; 17.4; 26.9	N, 0.13 ± 0.04	T, 0.11; 0.14; 0.20	LN, 0.09 ± 0.02	T, 1.32; 21.7; 36.9
二氯甲烷	LN, 7.52 ± 1.23	—	—	—	—

VOCs	铁厂 (IF)		椅厂 (CF)	化学品仓 (CW)
	脱漆工位 (IFR)	喷胶工位 (IFS)	喷胶工位 (IFS)	巡检工位 (CWP)
苯	—	—	—	N, 0.11 ± 0.02
甲苯	—	—	—	LN, 0.27 ± 0.06
二甲苯	—	—	—	T, 1.27; 1.74; 2.17
苯乙烯	—	—	—	LN, 0.46 ± 0.15
丁酮	—	—	—	LN, 1.61 ± 0.42
环己酮	—	—	—	LN, 0.07 ± 0.02
乙酸丁酯	—	—	—	T, 0.14; 0.17; 0.19
乙酸乙酯	—	T, 0.16; 0.20; 0.22	T, 0.19; 0.23; 0.25	N, 0.14 ± 0.03
二氯甲烷	LN, 4.58 ± 1.36	LN, 5.01 ± 1.27	T, 3.77; 4.96; 7.62	T, 2.36; 3.78; 5.33

在实木厂存在以上 8 种 VOCs 的 4 种工位中, 乙酸丁酯的总含量最高, 其次是乙酸乙酯、二甲苯和丁酮. 在喷面漆工位中含量最高的 VOCs 为乙酸丁酯, 乙酸乙酯和二甲苯的含量次之, 且以上 3 种 VOCs 的含量远高于其它工位. 3 类 VOCs 的含量也按照酯类 (59.82%)、苯系物 (27.88%) 和酮类

(12.30%) 的顺序含量由高到低. 由此, 在实木厂应重点关注这 4 种 VOCs.

对于存在 9 种 VOCs 的化学品仓巡检工位, 二氯甲烷的含量最高, 丁酮和甲苯的含量次之. 对于仅存在 1 种和 2 种 VOCs 的工位, 实木厂贴皮工位乙酸乙酯的含量远高于其它 2 种工位. 对于存在二

氯甲烷的 5 种工位, 其含量按照贴皮工位、喷胶工位(铁厂)、喷胶工位(椅厂)、脱漆工位、巡检工位依次降低, 且含量相当。

如表 5, 喷底漆和喷面漆工序的工人接触的 VOCs 的种类最多, 含量也较高。该家具厂各工位工人都佩戴有自吸过滤半面罩式防毒面具, 除喷底漆和喷面漆工位加装了效率有限的隔膜水帘^[35], 以吸收喷涂作业时大量挥发的 VOCs 外, 其它工位的 VOCs 基本属于无组织排放^[16]。贴皮工位、喷胶工位(铁厂)、喷胶工位(椅厂)接触的 VOCs 种类很少, 但其中二氯甲烷的含量较大。另外, 由于工作区域和工作性质, 巡检工人暴露于上述 9 种 VOCs, 应注意做好防护措施。

2.2 VOCs 健康风险评价

根据所建模型, 结合相关参数值, 运用蒙特卡罗随机模拟, 来处理风险评估中的参数不确定性^[36], 得到家具厂各工位工人暴露于 VOCs 的概率健康风险, 该过程通过 Crystal Ball 11.1 实现。在模拟运算过程中, 经实验发现, 当随机模拟的次数大于 4.5×10^3 次, 结果就趋于稳定, 为保障结果的稳定性及可信度, 本研究将模拟次数设为 1×10^4 次, 置信水平设为 95%。为筛选与健康风险相关的重要因素, 通过 Crystal Ball 11.1 对模型中各参数实现敏感性分析^[37], 得到各输入变量对风险结果的影响。所得风险分析和敏感性分析结果使用 Origin Pro 2017 进行作图。

2.2.1 致癌概率风险

对于致癌风险, 苯和二氯甲烷是其来源, 风险大小如图 1, 风险统计值如表 6。苯造成擦色(SWB)、调漆(SWO)、喷底漆(SWP)、喷面漆

(SWS)和巡检(CWP)5 种工位工人的致癌风险, 二氯甲烷造成贴皮(SWL)、脱漆(IFR)、喷胶(铁厂, IFS)、喷胶(椅厂, CFS)和巡检(CWP)5 种工位工人的致癌风险。风险值均呈对数正态分布, 且各风险值均超过 10^{-6} , 除由苯引起的擦色、喷底漆和巡检工位的致癌风险超过 10^{-6} 的概率为 25%、15% 和 55% 之外, 其它各工位超过 10^{-6} 的概率皆大于 95%, 但均不超过 10^{-4} 。根据 USEPA, 可接受致癌风险水平为 10^{-6} , 上限值为 10^{-4} , 若小于前者, 则可以接受; 介于两者之间, 则可能引起癌症; 若大于后者, 则引起癌症的风险性较大。由此, 可得各工位的致癌风险较高, 可能引起癌症, 需要采取措施进行防控。

对于苯造成的致癌风险, 喷面漆工位的风险值最大, 服从偏度为 2.02, 峰度为 10.37 的对数正态分布, 风险值的范围为 $4.54 \times 10^{-7} \sim 2.18 \times 10^{-5}$, 平均值为 3.07×10^{-6} 。调色工位的风险值与喷面漆工位的风险值最为接近, 服从偏度为 1.87, 峰度为 9.63 的对数正态分布, 风险值的范围为 $5.13 \times 10^{-7} \sim 1.91 \times 10^{-5}$, 平均值为 3.04×10^{-6} 。致癌风险较小的依次为: 喷底漆工位、擦色工位、巡检工位, 但皆超过 10^{-6} , 分别服从 $2.27 \times 10^{-6} \pm 1.35 \times 10^{-6}$ 、 $1.68 \times 10^{-6} \pm 9.92 \times 10^{-7}$ 和 $1.09 \times 10^{-6} \pm 5.75 \times 10^{-7}$ 的对数正态分布。为了更好地表示不同工位致癌风险的差异, 本文将各工位的致癌风险值进行以 e 为底的对数变换, 见图 1。

相比较而言, 二氯甲烷造成的致癌风险较大, 这与家具厂各工位二氯甲烷的浓度较大有关。其中, 贴皮工位的致癌风险最大, 服从偏度为 1.96, 峰度为 9.82 的对数正态分布, 风险值的范围为

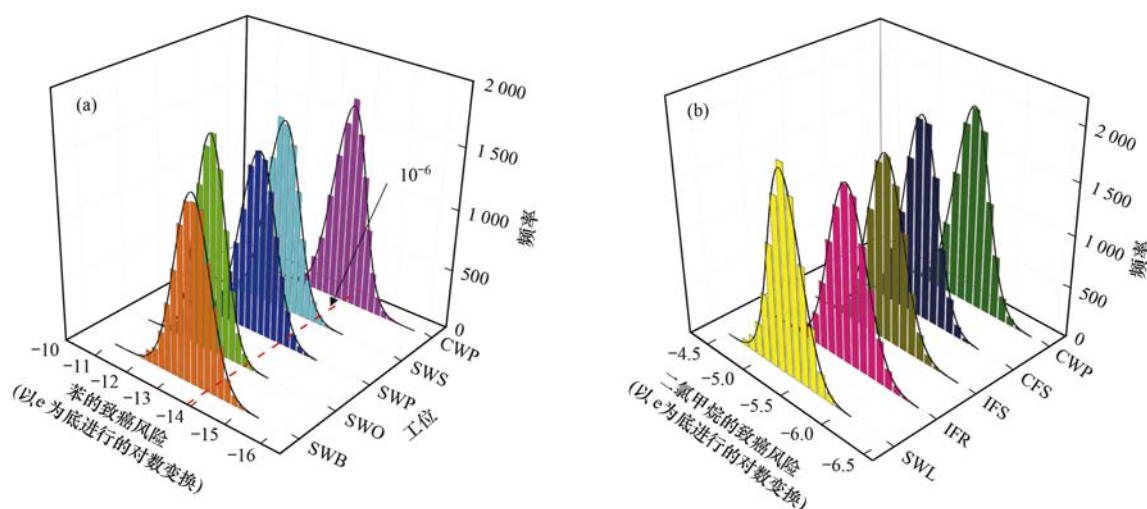


图 1 苯和二氯甲烷造成的致癌风险

Fig. 1 Carcinogenic risk caused by benzene and dichloromethane

$9.12 \times 10^{-7} \sim 2.94 \times 10^{-5}$, 平均值为 5.14×10^{-6} . 脱漆工位和铁厂的喷胶工位风险值较为接近, 平均值分别为 3.13×10^{-6} 、 3.43×10^{-6} , 但是脱漆工位的峰度为 13.54, 大于喷胶工位的 9.89, 说明脱漆工位的风险值分布更为集中, 而喷胶工位的风险值较为分散, 表现出喷胶工位不同工人的致癌风险个体差异较大. 与苯的致癌风险类似, 巡检工暴露于二氯甲烷的致癌风险也最小, 服从偏度为 1.93, 峰度为 9.98 的对数正态分布, 风险值范围为 $4.65 \times 10^{-7} \sim 1.65 \times 10^{-5}$, 平均值为 2.61×10^{-6} . 各工位的致癌风险结果见表 6.

分析以上结果, 喷面漆和喷底漆工人暴露于苯的致癌风险最大. 究其原因, 喷涂作业方式大部分为空气喷涂, 油漆以气雾形式悬浮在空气中, 形成含有有机溶剂的雾滴, 有机溶剂大量挥发, 使车间内的 VOCs 浓度急剧升高^[37]. 另外, 调漆工位工人

的致癌风险也较大, 这与调漆过程中 VOCs 的排放量较大有关. 该家具制造厂的调漆过程为敞开式操作, 没有专用的调漆房, 不仅存在有机溶剂挥发, 而且废气难以收集^[38]. 与其它工位工人不同, 巡检工人同时受到苯和二氯甲烷造成的致癌风险, 总和达到 3.7×10^{-6} , 接近致癌风险最大容许值的 4 倍, 应该引起高度重视并采取防控措施.

2.2.2 非致癌概率风险

擦色(SWB)、调漆(SWO)、喷底漆(SWP)和喷面漆(SWS)工人吸入苯、甲苯、二甲苯和苯乙烯皆会造成非致癌风险, 贴皮(SWL)、脱漆(IFR)、喷胶(铁厂, IFS)和喷胶(椅厂, CFS)工人会受到二氯甲烷造成的非致癌风险, 由于工作特点, 上述 5 种 VOCs 都会对巡检工人造成非致癌风险. 各工位工人总的非致癌风险值如表 7, 经对数变换后的风险大小如图 2.

表 6 苯和二氯甲烷造成致癌风险统计值

Table 6 Statistical values of carcinogenic risk caused by benzene and dichloromethane

风险来源	工位	最小值	最大值	平均值	标准差	偏度	峰度	百分位/%			
								5	50	75	95
苯	擦色(SWB)	2.23×10^{-7}	1.36×10^{-5}	1.68×10^{-6}	9.92×10^{-7}	2.17	12.39	6.24×10^{-7}	1.45×10^{-6}	2.08×10^{-6}	3.54×10^{-6}
	调漆(SWO)	5.13×10^{-7}	1.91×10^{-5}	3.04×10^{-6}	1.54×10^{-6}	1.87	9.63	1.30×10^{-6}	2.69×10^{-6}	3.70×10^{-6}	5.92×10^{-6}
	喷底漆(SWP)	3.17×10^{-7}	1.85×10^{-5}	2.27×10^{-6}	1.35×10^{-6}	2.18	12.25	8.28×10^{-7}	1.95×10^{-6}	2.78×10^{-6}	4.83×10^{-6}
	喷面漆(SWS)	4.54×10^{-7}	2.18×10^{-5}	3.07×10^{-6}	1.73×10^{-6}	2.02	10.37	1.17×10^{-6}	2.68×10^{-6}	3.72×10^{-6}	6.37×10^{-6}
	巡检(CWP)	1.20×10^{-7}	8.93×10^{-6}	1.09×10^{-6}	5.75×10^{-7}	1.97	11.67	4.45×10^{-7}	9.58×10^{-7}	1.33×10^{-6}	2.18×10^{-6}
二氯甲烷	贴皮(SWL)	9.12×10^{-7}	2.94×10^{-5}	5.14×10^{-6}	2.70×10^{-6}	1.96	9.82	2.16×10^{-6}	4.52×10^{-6}	6.24×10^{-6}	1.03×10^{-5}
	脱漆(IFR)	4.52×10^{-7}	2.63×10^{-5}	3.13×10^{-6}	1.85×10^{-6}	2.29	13.54	1.15×10^{-6}	2.69×10^{-6}	3.87×10^{-6}	6.50×10^{-6}
	喷胶(IFS)	4.51×10^{-7}	2.12×10^{-5}	3.43×10^{-6}	1.94×10^{-6}	2.00	9.89	1.33×10^{-6}	2.97×10^{-6}	4.20×10^{-6}	7.09×10^{-6}
	喷胶(CFS)	6.69×10^{-7}	2.27×10^{-5}	3.72×10^{-6}	1.93×10^{-6}	1.90	9.51	1.57×10^{-6}	3.27×10^{-6}	4.51×10^{-6}	7.36×10^{-6}
	巡检(CWP)	4.65×10^{-7}	1.65×10^{-5}	2.61×10^{-6}	1.36×10^{-6}	1.93	9.98	1.09×10^{-6}	2.30×10^{-6}	3.18×10^{-6}	5.20×10^{-6}

表 7 各工位的非致癌风险统计值

Table 7 Statistical values of non-carcinogenic risk for each station

工位	最小值	最大值	平均值	标准差	偏度	峰度	百分位/%				
							5	25	50	75	95
擦色(SWB)	0.03	0.79	0.19	0.09	1.41	6.27	0.08	0.13	0.17	0.23	0.36
调漆(SWO)	0.05	0.98	0.23	0.10	1.42	6.81	0.11	0.16	0.21	0.28	0.41
喷底漆(SWP)	0.07	1.41	0.34	0.14	1.40	6.54	0.16	0.23	0.31	0.41	0.60
喷面漆(SWS)	0.39	7.22	1.59	0.69	1.53	7.07	0.75	1.11	1.45	1.92	2.89
巡检(CWP)	0.06	1.11	0.28	0.12	1.34	6.24	0.13	0.20	0.26	0.34	0.50
贴皮(SWL)	0.03	0.53	0.13	0.06	1.44	6.57	0.06	0.09	0.12	0.15	0.24
脱漆(IFR)	0.01	0.44	0.08	0.04	1.78	8.66	0.03	0.05	0.07	0.09	0.15
喷胶(IFS)	0.01	0.50	0.08	0.04	1.71	9.03	0.04	0.05	0.07	0.10	0.16
喷胶(CFS)	0.02	0.41	0.09	0.04	1.41	6.44	0.04	0.06	0.08	0.11	0.17

喷面漆工人受到非致癌风险最大, 服从 1.59 ± 0.69 的对数正态分布, 风险值的范围为 0.39 ~ 7.22, 偏度为 1.53, 峰度为 7.07, 超过 1 的概率为 80%. 根据 USEPA 推荐的标准, 非致癌风险 ≤ 1 表示暴露量低于会产生不良反应的阈值, 预期将不会

对人体造成显著危害, 非致癌风险 > 1 表示暴露量超过阈值, 可能产生毒性. 喷面漆工人的非致癌风险大于推荐的标准, 应该采取相应的措施, 以避免车间内的 VOCs 对工人健康造成威胁. 其他工位工人的非致癌风险平均值皆小于 1, 较大的有喷底漆

工人和巡检工人，分别服从 0.34 ± 0.14 、 0.28 ± 0.12 的对数正态分布，超过 1 的概率仅为 1% 和 0.1%。如图 2 所示，贴皮、脱漆、喷胶（铁厂）和喷胶（椅厂）这 4 种工位工人的非致癌风险远小于 1，预期将不会对工人产生危害。

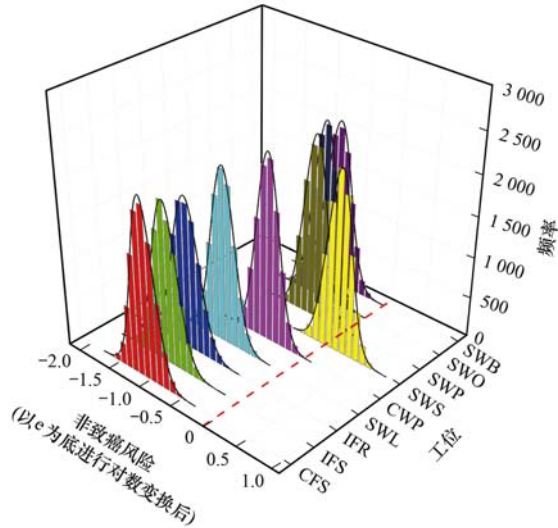


图 2 各工位的非致癌风险
Fig. 2 Non-carcinogenic risk for each station

喷面漆和喷底漆工人的非致癌风险最大，远高于喷胶（铁厂）和喷胶（椅厂）工人的非致癌风险。一方面是由于涂装工艺使用的涂料 VOCs 含量普遍较粘胶剂高^[15]，另一方面是由于涂装过程中为保证涂层厚度需多次涂布^[38]。另外，巡检工人由于接触 VOCs 的种类最多，受到的非致癌风险也较大。如图 2 所示，喷面漆（SWS）工人的非致癌风险概率分布偏度为 1.53，高于其它 4 个工位的工人，呈现为右偏分布^[39]。这说明，大多数的个体数值偏低，

而数据右端存在很多极端值。如表 7，喷面漆工人的非致癌风险 75% 和 95% 分位数分别为 1.92 和 2.89，而最大值达到 7.22，但这些极端值对应的频数都很小，表现为右侧长长的拖尾。

2.2.3 敏感性分析

通过敏感性分析可以得到各输入变量对输出结果的影响，本文利用斯皮尔曼秩相关系数法得到各暴露参数的敏感度。若敏感度大于 0，则表示与风险结果有正相关性；若敏感度小于 0，则表示与风险结果有负相关性。其相关性的由敏感度的绝对值判定，敏感度绝对值越大，则相关性越强，对风险结果影响也越大。

擦色（SWB）、调漆（SWO）、喷底漆（SWP）、喷面漆（SWS）和巡检（CWP）5 个工位的工人暴露于苯的致癌风险敏感性分析如图 3（a）所示。各暴露参数中，暴露持续时间（ED）的敏感度最大，达到了 73.66%。其它敏感度较大的参数依次为： $C_{\text{苯}}$ 、呼吸速率（InhR）、暴露时间（ET）、暴露频率（EF），敏感度分别为 43.87%、34.57%、14.39%、7.46%。体重具有负敏感性，敏感度为 -16.97%。二氯甲烷的致癌风险敏感性分析结果与其相似，如图 3（b），贴皮（SWL）、脱漆（IFR）、喷胶（铁厂，IFS）、喷胶（椅厂，CFS）和巡检（CWP）这 5 个工位工人敏感度较大的参数依次为：暴露持续时间（ED）、 $C_{\text{二氯甲烷}}$ 、呼吸速率（InhR）、暴露时间（ET）、暴露频率（EF），敏感度分别为 75.57%、40.06%、35.63%、14.97%、7.49%。体重具有负敏感性，敏感度为 -17.34%。

各工位工人总的非致癌风险敏感性分析结果见

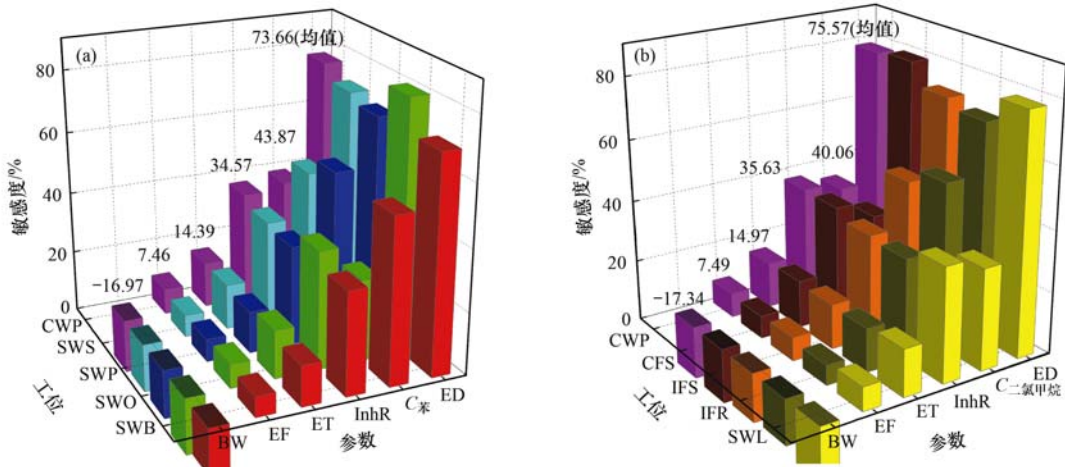


图 3 各工位工人暴露于苯和二氯甲烷的致癌风险敏感性分析
Fig. 3 Carcinogenic risk sensitivity analysis for workers exposed to benzene and dichloromethane

C_i : 该种 VOC 的浓度，下同

图4. 擦色(SWB)、调漆(SWO)、喷底漆(SWP)、喷面漆(SWS)和巡检(CWP)工人敏感度较大的参数依次为暴露持续时间(ED)、 $C_{\text{二甲苯}}$ 、暴露时间(ET)、 $C_{\text{苯}}$ 、暴露频率(EF)、 $C_{\text{苯乙烯}}$ 、 $C_{\text{甲苯}}$, 敏感度分别为 91.99%、23.90%、21.50%、11.66%、9.79%、1.20%、0.51%。其中, 巡检(CWP)还受到二氯甲烷的非致癌风险, $C_{\text{二氯甲烷}}$ 的敏感度为

8.07%。与上述 5 个工位的工人不同, 贴皮(SWL)、脱漆(IFR)、喷胶(铁厂, IFS)、喷胶(椅厂, CFS)4 个工位的工人只受到二氯甲烷造成的非致癌风险, 敏感度较大的参数依次为暴露持续时间(ED)、 $C_{\text{二氯甲烷}}$ 、暴露时间(ET)、暴露频率(EF), 敏感度分别为 84.27%、45.33%、19.75%、8.53%。

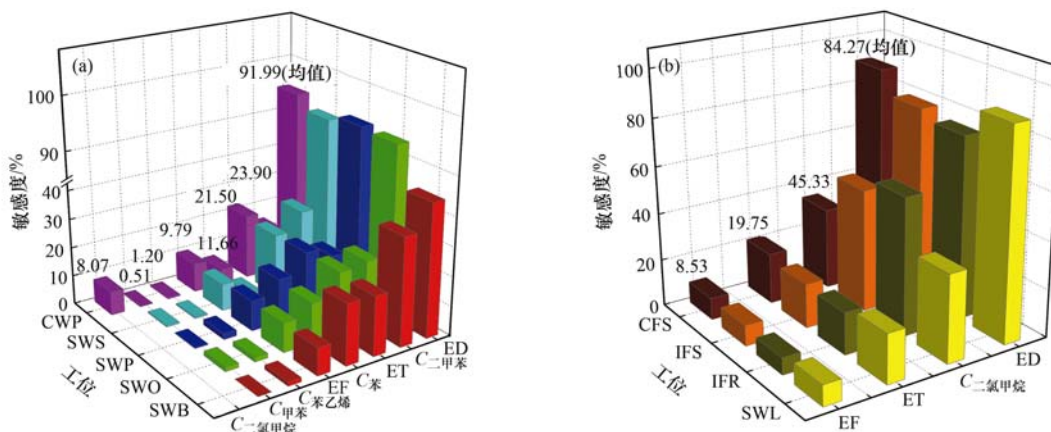


图4 各工位的非致癌风险敏感性分析

Fig. 4 Non-carcinogenic risk sensitivity analysis for each station

2.2.4 不确定性分析

同时应该注意到, 本研究也存在一定的不足。由于现有监测方法和仪器设备等因素的限制, 本研究仅对化学毒物大、化学毒性强、用量或生成量较大、作业人员接触机会多的 9 种 VOCs 的浓度进行监测分析, 并对其中的苯、甲苯、二甲苯、苯乙烯、二氯甲烷造成的健康风险进行评价, 加上样本采集时间为 9 月, 这可能使评价结果存在一定的不确定性。另外, 不确定性也可能来自参数 SF 和 RfC。USEPA 提供的 SF 和 RfC 是假设呼吸速率为 $20 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, 体重为 70 kg 的成人吸入一个单位化学物质的终生健康风险。根据中国人群暴露参数手册, 中国人群长期呼吸速率为 $15.7 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。USEPA 定义的呼吸速率与中国人口的实际状况存在差异, 这也可能会产生不确定性。

2.3 控制措施及建议

(1) 健康风险评价结果表明, 各工位工人的致癌风险皆超过 10^{-6} 。这与溶剂型涂料的大量使用有关, 建议采用低 VOCs 含量的水溶性涂料^[40]。

(2) 除涂装环节外, 家具厂在贴皮、清洗、喷胶、粘棉工序中都会产生 VOCs, 其中贴皮、脱漆、喷胶(铁厂)、喷胶(椅厂)工位工人的致癌风险平均值分别为 5.14×10^{-6} 、 3.13×10^{-6} 、 3.43×10^{-6} 、 3.72×10^{-6} , 皆在 3×10^{-6} 以上。然而仅在喷底漆

和喷面漆工序设置隔膜水帘, 其它工序的 VOCs 均以无组织形式进入环境, 不仅影响环境空气质量, 还可能对周围人群的健康造成威胁。而且水帘主要用于去除喷涂时产生的漆雾, 但是漆雾中的大部分 VOCs 为非水溶性 VOCs, 不能得到有效去除, 其中的循环水在过饱和后也会成为重要的 VOCs 排放源^[41]。该家具厂可以采用效率更高、效果更好地活性炭吸附技术^[42]来处理各工序中的有机废气, 以减少 VOCs 的排放。

(3) 由于调漆过程为敞开式操作, 调漆工人的致癌风险较大, 平均值为 3.04×10^{-6} , 应该设置专门的调漆房, 以减少 VOCs 排放, 并对废气进行处理。

(4) 家具厂内的涂料、稀释剂、胶粘剂等各类化学原料都储存在化学品仓, 应该加强管理、分类排放, 每年定期对化学品泄漏等职业卫生中毒的应急预案进行演练。另外, 由于工作性质巡检工人暴露于各种 VOCs, 存在较大的健康风险, 应该注意佩戴防护用品, 做好各类化学品的密封工作, 并定期对包括巡检工在内的各工位工人进行职业健康检查。

3 结论

(1) 家具制造过程中, 实木厂的喷底漆、喷面漆工序使用的各种漆、稀释剂和固化剂会产生苯、甲苯、二甲苯、苯乙烯、丁酮、环己酮、乙酸丁酯、

乙酸乙酯等 VOCs, 实木厂的贴皮工序、铁厂的喷胶工序、椅厂的粘棉工序使用的立时得胶水会产生二氯甲烷、乙酸乙酯等 VOCs, 铁厂的清洗工序用到的脱漆剂会产生二氯甲烷等 VOCs, 另外, 化学品仓内储存和运输环节中由于有机溶剂挥发也存在各种 VOCs。

(2) 各工位工人致癌风险值均呈对数正态分布, 且均超过 10^{-6} , 除暴露于苯的擦色、喷底漆和巡检工位外, 其它各工位超过 10^{-6} 的概率皆大于 95%, 但均不超过 10^{-4} 。喷面漆工人的苯致癌风险最大, 为 $3.07 \times 10^{-6} \pm 1.73 \times 10^{-6}$, 贴皮工人的二氯甲烷致癌风险最大, 为 $5.14 \times 10^{-6} \pm 2.70 \times 10^{-6}$ 。各工位工人的非致癌风险较小, 只有喷面漆工人的非致癌风险大于 1。

(3) 对苯的致癌风险影响较大的暴露参数依次为: 暴露持续时间 (ED)、浓度 (C)、呼吸速率 (InhR)、暴露时间 (ET)、暴露频率 (EF), 敏感度分别为 73.66%、43.87%、34.57%、14.39%、7.46%, 体重具有负敏感性, 敏感度为 -16.97%, 二氯甲烷敏感性分析结果与其相似。除浓度外, 对非致癌风险结果影响较大的暴露参数依次为: 暴露持续时间 (ED)、暴露时间 (ET)、暴露频率 (EF)。

参考文献:

- [1] Su F C, Mukherjee B, Batterman S. Modeling and analysis of personal exposures to VOC mixtures using copulas [J]. *Environment International*, 2014, **63**: 236-245.
- [2] Rohr A C. The health significance of gas-and particle-phase terpene oxidation products: a review [J]. *Environment International*, 2013, **60**: 145-162.
- [3] 王铁宇, 李奇峰, 吕永龙. 我国 VOCs 的排放特征及控制对策研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(12): 4756-4763.
Wang T Y, Li Q F, Li Y L. Characteristics and countermeasures of volatile organic compounds (VOCs) emission in China[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4756-4763.
- [4] Gong Y, Wei Y J, Cheng J H, *et al.* Health risk assessment and personal exposure to Volatile Organic Compounds (VOCs) in metro carriages—a case study in Shanghai, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 1432-1438.
- [5] Wang H L, Nie L, Li J, *et al.* Characterization and assessment of volatile organic compounds (VOCs) emissions from typical industries[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(7): 724-730.
- [6] 高松, 崔虎雄, 伏晴艳, 等. 某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4094-4102.
Gao S, Cui H X, Fu Q Y, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs of high pollution process at chemical industrial area in winter of China[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4094-4102.
- [7] An T C, Huang Y, Li G Y, *et al.* Pollution profiles and health risk assessment of VOCs emitted during e-waste dismantling processes associated with different dismantling methods [J]. *Environment International*, 2014, **73**: 186-194.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Weng Z H, Mudd G M, Martin T, *et al.* Pollutant loads from coal mining in Australia: discerning trends from the national pollutant inventory (NPI)[J]. *Environmental Science & Policy*, 2012, **19-20**: 78-89.
- [11] He Z G, Li G Y, Chen J Y, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of volatile organic compounds emitted from different plastic solid waste recycling workshops [J]. *Environment International*, 2015, **77**: 85-94.
- [12] 谭冰, 王铁宇, 庞博, 等. 农药企业场地空气中挥发性有机物污染特征及健康风险[J]. *环境科学*, 2013, **34**(12): 4577-4584.
Tan B, Wang T Y, Pang B, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of atmospheric volatile organic compounds (VOCs) in pesticide factory[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4577-4584.
- [13] 周静博, 李亚卿, 洪纲, 等. 石家庄市制药行业 VOCs 排放特征分析及健康风险评价[J]. *生态毒理学报*, 2015, **10**(4): 177-186.
Zhou J B, Li Y Q, Hong G, *et al.* Characteristics and health risk assessment of VOCs emitted from pharmaceutical industry of Shijiazhuang city[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2015, **10**(4): 177-186.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
Yu Y F, Lu Q, Zheng J Y, *et al.* VOC emission inventory and its uncertainty from the key VOC-related industries in the Pearl River Delta Region[J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(2): 195-201.
- [17] 张银, 王秀艳, 高爽. 天津某家具城挥发性有机物健康风险评估[J]. *环境科学*, 2013, **34**(12): 4565-4570.
Zhang Y, Wang X Y, Gao S. Health risk assessment of VOCs

- from a furniture mall in Tianjin[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4565-4570.
- [18] Miao Y F, Deng F M, Chen Y L, *et al.* Detection of volatile organic compounds released by wood furniture based on a cataluminescence test system[J]. *Luminescence*, 2016, **31**(2): 407-413.
- [19] Xiong J Y, Zhang P P, Huang S D, *et al.* Comprehensive influence of environmental factors on the emission rate of formaldehyde and VOCs in building materials: correlation development and exposure assessment [J]. *Environmental Research*, 2016, **151**: 734-741.
- [20] Kang J, Liu J J, Pei J J. The indoor volatile organic compound (VOC) characteristics and source identification in a new university campus in Tianjin, China[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2017, **67**(6): 725-737.
- [21] GBZ/T 160.42-2007, 工作场所空气有毒物质测定 芳香烃类化合物[S].
GBZ/T 160.42-2007, Determination of aromatic hydrocarbons in the air of workplace[S].
- [22] GBZ/T 160.56-2004, 工作场所空气有毒物质测定脂环酮和芳香族酮类化合物[S].
GBZ/T 160.56-2004, Methods for determination of cyclic and aromatic ketones in the air of workplace[S].
- [23] GBZ/T 160.55-2007, 工作场所空气有毒物质测定 脂肪族酮类化合物[S].
GBZ/T 160.55-2007, Determination of aliphatic ketones in the air of workplace[S].
- [24] GBZ/T 160.63-2007, 工作场所空气有毒物质测定 饱和脂肪族酯类化合物[S].
GBZ/T 160.63-2007, Determination of saturated aliphatic esters in the air of workplace[S].
- [25] GBZ/T 160.45-2007, 工作场所空气有毒物质测定 卤代烷烃类化合物[S].
GBZ/T 160.45-2007, Determination of halogenated alkanes in the air of workplace[S].
- [26] U. S. Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for superfund; Volume I: human health evaluation manual (Part A)[R]. EPA/540/1-89/002. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1989.
- [27] U. S. Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for superfund; volume 1--human health evaluation manual supplement to Part A; community involvement in superfund risk assessments [R]. EPA- 540-R- 98- 042. Washington, DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1999.
- [28] U. S. Environmental Protection Agency. Risk assessment guidance for superfund volume I: human health evaluation manual (Part F, supplemental guidance for inhalation risk assessment) [R]. EPA- 540-R- 070- 002. Washington, DC: Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, 2009.
- [29] U. S. EPA. Integrated risk information system (IRIS)[EB/OL]. <http://www.epa.gov/iris/>. 2003-04-17.
- [30] 周裕敏, 郝郑平, 王海林. 北京城乡结合地空气中挥发性有机物健康风险评估[J]. *环境科学*, 2011, **32**(12): 3566-3570.
Zhou Y M, Hao Z P, Wang H L. Health risk assessment of atmospheric volatile organic compounds in urban-rural juncture belt area [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(12): 3566-3570.
- [31] 中华人民共和国环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Exposure factors handbook of Chinese population [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013.
- [32] 王宗爽, 段小丽, 刘平, 等. 环境健康风险评估中我国居民暴露参数探讨[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(10): 1164-1170.
Wang Z S, Duan X L, Liu P, *et al.* Human exposure factors of Chinese people in environmental health risk assessment [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(10): 1164-1170.
- [33] Yan Y L, Peng L, Cheng N, *et al.* Health risk assessment of toxic VOCs species for the coal fire well drillers [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(19): 15132-15144.
- [34] GB 2890-2009, 呼吸防护 自吸过滤式防毒面具[S].
GB 2890- 2009, Respiratory protection—non-powered air-purifying respirators[S].
- [35] 潘锦, 彭虹, 吴文威, 等. 家具制造企业密集区空气中 VOCs 污染状况及健康风险评估[J]. *环境监测管理与技术*, 2015, **27**(3): 41-44.
Pan J, Peng H, Wu W W, *et al.* Pollution situation and health risk assessment of volatile organic compounds from dense area of furniture manufacturers[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2015, **27**(3): 41-44.
- [36] Chen S C, Liao C M. Health risk assessment on human exposed to environmental polycyclic aromatic hydrocarbons pollution sources[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **366**(1): 112-123.
- [37] Ao Q. Uncertainty analysis in Monte Carlo criticality computations[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, **241**(12): 4697-4703.
- [38] 罗超, 蔡慧华, 刘玲英. 木质家具制造行业挥发性有机化合物排放现状研究[J]. *广东化工*, 2012, **39**(5): 347-348, 350.
Luo C, Cai H H, Liu L Y. Study on emission pattern of volatile organic compounds from wood furniture manufacturing industry [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2012, **39**(5): 347-348, 350.
- [39] 邓兆卉. 收入分配公平性的偏态分布描述方法研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2009.
Deng Z H. Study on fairness of income distribution based on descriptive statistics of skewed distribution [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2009.
- [40] Simion A I, Ionita I, Grigoras C G, *et al.* Development and optimization of water based paint formula in order to reduce VOCs emissions [J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2015, **14**(2): 277-288.
- [41] 姚轶, 王浙明, 何志桥, 等. 浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4080-4085.
Yao Y, Wang Z M, He Z Q, *et al.* Pollution characteristics and emission coefficient of volatile organic compounds from woodwork-

making industry in Zhejiang province [J]. Environmental Science, 2016, 37(11): 4080-4085.

[42] 栾志强, 郝郑平, 王喜芹. 工业固定源 VOCs 治理技术分析评估[J]. 环境科学, 2011, 32(12): 3476-3486.

Luan Z Q, Hao Z P, Wang X Q. Evaluation of treatment technology of volatile organic compounds for fixed industrial resources[J]. Environmental Science, 2011, 32(12): 3476-3486.

欢迎订阅 2018 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行人,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2018 年为大 16 开本,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjlx@rcees.ac.cn;网址:www.hjlx.ac.cn

CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping (477)
VOCs Emission from Motor Vehicles in China and Its Impact on the Atmospheric Environment	CHEN Tian-zeng, GE Yan-li, LIU Yong-chun, <i>et al.</i> (478)
Quantification of the Influence of Industrial Emissions on Volatile Organic Compounds (VOCs) Using PMF Model; A Case Study of Jiangbei Industrial Zone in Nanjing	 HU Kun, WANG Ming, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (493)
Source Analysis of Volatile Organic Compounds in the Nanjing Industrial Area and Evaluation of Their Contribution to Ozone	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jun-xiu, <i>et al.</i> (502)
Ozone Formation Potential and Priority Species of VOCs in an Industrial Park	WU Lei-dan, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (511)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of a Petrochemical Industrial Park During Autumn in China	HU Tian-peng, LI Gang, MAO Yao, <i>et al.</i> (517)
Characteristics of VOCs Pollution in the Winter Atmosphere of a Typical Petrochemical Industry Park	MAO Yao, LI Gang, HU Tian-peng, <i>et al.</i> (525)
Emission Inventory and Pollution Characteristics of Industrial VOCs in Hangzhou, China	LU Bin, HUANG Cheng, LU Qing, <i>et al.</i> (533)
Industrial VOCs Emission in Qinhuangdao	HU Xiao-yu, LIU Hang, WANG Nai-yu, <i>et al.</i> (543)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Auto/motorcycle Parts & Accessories Manufacturing in Zhejiang Province	 YANG Zhong-ping, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (551)
Stench Sources and Impact Analysis in Automobile Making	SHI Tian-li, ZHANG Wei-xia, CHEN Xiao-fang, <i>et al.</i> (557)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs Fugitively Emitted from Typical Brewers	GAO Zhan-qi, HU Guan-ju, WANG Hui, <i>et al.</i> (567)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in Chengdu	LI You-ping, TANG Ya, FAN Zhong-yu, <i>et al.</i> (576)
Indoor Formaldehyde and Benzene Series in Shanghai Residences and Their Associations with Building Characteristics and Lifestyle Behaviors	 JIANG Qiao-yun, LIU Ping-ping, WANG Xue-ying, <i>et al.</i> (585)
Emission Inventory of Anthropogenically Sourced VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Jiangsu Province	XIA Si-jia, LIU Qian, ZHAO Qiu-yue (592)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs in Jiangmen City	CHEN Xiao-fang, ZHANG Wei-xia, CHEN Bing-xu, <i>et al.</i> (600)
Emissions, Chemical Composition, and Spatial and Temporal Allocation of the BVOCs in the Yangtze River Delta Region in 2014	LIU Yan, LI Li, AN Jing-yu, <i>et al.</i> (608)
VOCs Emission Inventory of Service Stations in a Subcenter (Tongzhou District) of the City of Beijing	HUANG Yu-hu, HU Wei, LI Bei-bei, <i>et al.</i> (618)
Pollutant Emissions from Diesel Buses Fueled with Waste Cooking Oil Based Biodiesel	HU Zhi-yuan, LIN Biao-qi, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (626)
Treatment of the Waste Gas Containing Methyl <i>tert</i> -Butyl Ether via a Biotrickling Filter	CHU Qi-ying, YAO Lu-lu, LÜ Xiong-biao, <i>et al.</i> (633)
Composite CVOCs Removal in a Combined System of Nonthermal Plasma and a Biotrickling Filter	GUO Hai-qian, MIAO Jing-jing, JIANG Li-ying, <i>et al.</i> (640)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds (VOCs) and Semi-volatile Organic Compounds (SVOCs) in Qiantang River's Hangzhou Section During a Water Odor Pollution Event	CHEN Feng, TANG Fang-liang, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (648)
Occurrence and Spatial Distribution of Volatile Organic Compounds in Urban Drinking Water Distribution Systems	XU Mei-jia, WANG Hai-liang, LI Chun-mei, <i>et al.</i> (655)
Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds for Different Commuting Modes	 TONG Rui-peng, ZHANG Lei (663)
Source Analysis and Environmental Health Risk Assessment of VOCs in Furniture Manufacturing	TONG Rui-peng, ZHANG Lei, YANG Xiao-yi, <i>et al.</i> (672)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of PM _{2.5} and Spatio-temporal Variation Characteristics of the Relationship Between PM _{2.5} and PM ₁₀ in Beijing	 YANG Wen-tao, YAO Shi-qi, DENG Min, <i>et al.</i> (684)
Quantification of Methane Ebullition Flux from Small Ponds Using the Inverted-Funnel Method	ZHANG Xiu-fang, XIAO Wei, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (691)
Contamination Levels and Exposure Risk via Drinking Water from Perfluoroalkyl Acids in Seven Major Drainage Basins of China	 WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, WANG Yan-ping, <i>et al.</i> (703)
Spatio-temporal Distribution and Source Apportionment of Nitrogen in Rivers of Tieling	YANG Li-biao, LEI Kun, QIAO Fei, <i>et al.</i> (711)
Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Rivers of Western Sichuan Plateau Based on EEM-PARAFAC Analysis	 LIU Yan-yang, QIN Ji-hong, LIU Chen, <i>et al.</i> (720)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Human Health Risk of Surface Waters in the City of Ningbo, China	XU Mei-juan, BAO Bo, CHEN Chun-yan, <i>et al.</i> (729)
Temporal-spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake	WU Lei, LIU Gui-jian, ZHOU Chun-cai, <i>et al.</i> (738)
Spatial Distribution, Sources and Bioavailability of Heavy Metals in the Surface Sediments of Longjiang River, Southern China	 LAN Xiao-long, NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, <i>et al.</i> (748)
Mechanism on Enhanced Nitrogen Removal in Municipal Secondary Effluent via Internal-Electrolysis Constructed Wetlands at Low Temperature in Winter	 ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, WANG Ju, <i>et al.</i> (758)
Dynamic Replenishment Process of Nutrients in Tributary of Channel Reservoir	XU Ya-qian, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (765)
Effect of the Rainfall on Extinction of Cyanobacteria Bloom and Its Mechanism Analysis	LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (774)
Relationship Between Macrophyte Communities and Macroinvertebrate Communities in an Urban Stream	QU Xiao-dong, YU Yang, ZHANG Min, <i>et al.</i> (783)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output in Runoff and Rainfall Runoff in Lanlingxi Watershed, Three Gorges Reservoir Area	 ZHANG Lin, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (792)
Screening Method of Priority Control Pollutants in Groundwater Based on Contamination Assessment	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (800)
Effect of Sulfur to Quartz Sand Ratios on the Removal of High-Concentration Perchlorate in Packed-Bed Reactors	TAO Hua-qiang, SHAO Dong-hai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (811)
Adsorption of Methylene Blue and Cu(II) by Activated Carbon/Macromolecule Composite Hydrogel	KONG Yan, ZHUANG Yuan, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (819)
Adsorption Performance and Mechanism of HZO@SGH for the Removal of Fluoride from Aqueous Solution	MA Fu-zhen, ZHOU Shao-qi, LIU Ze-jun, <i>et al.</i> (828)
Mechanism of MgO/GAC Catalyzed Ozonation of Organic Compounds	XU Shan-shan, LIN Cun-wang, DING Ya-lei, <i>et al.</i> (838)
Ozonation Characteristics of Low Coagulability Organic Matter from the Secondary Effluent of WWTPs	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> (844)
Quantitative Analysis of Dominant Pollutants in Secondary Effluent via Dye Probe Technology	MENG Xiao-rong, WANG Cong-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (852)
Lab-scale ANAMMOX Process in a Wastewater Treatment Plant	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (859)
Effect of Aeration Rate on Shortcut Nitrification Recovery in Intermittent Aeration Mode	LIU Hong, NAN Yan-bin, LI Hui, <i>et al.</i> (865)
Effect of Aerobic/Phosphorus Granules on Start-up of Partial Nitrification Granular Sludge	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (872)
Microbial Communities and Sludge Specific Resistance in Two SBRs Treating Leachate	CAI Li-yun, HUANG Ze-bin, XU Zi-wei, <i>et al.</i> (880)
Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from the Urbanization Process of Topsoil	YAO Hong, ZHANG Shi-chao, LIU Ming-li, <i>et al.</i> (889)
Spatial Variability and Contamination of Arsenic in Soils of Xijiang River Basin	LIU Chang, SONG Bo, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (899)
Characterization of Phosphorus in Urban Surface Soils in Kaifeng City and Its Risk of Loss	BAI Xiu-ling, MA Jian-hua, SUN Yan-Li, <i>et al.</i> (909)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in a Soil-Rice System in an E-waste Dismantling Area	YIN Yi-meng, ZHAO Wei-tuo, HUANG Ting, <i>et al.</i> (916)
Residue Levels and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Rice from Shanghai	MENG Yuan, LIU Cui-cui, QIU Yan-ling, <i>et al.</i> (927)
Effects of Tetracycline Antibiotics on Growth and Characteristics of Enrichment and Transformation in Two Vegetables	CHI Sun-lin, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (935)
Bioavailability of Silicon Fertilizer Coupled Water Management on Soil Bioavailability and Cumulative Control of Rice in Compound Contaminated Paddy Soils	 LI Yuan-xing-lu, YE Chang-cheng, LIU Yu-ling, <i>et al.</i> (944)
Liver and Kidney Function of E-waste Dismantling Workers and Potential Influencing Factors	YAN Xiao, LI Shu-yuan, WANG Mei-huan, <i>et al.</i> (953)