

# 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 <sup>+</sup> 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) |                                                   |

# 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<sup>1,2</sup>, 王铁宇<sup>2\*</sup>, 庞博<sup>2,3</sup>, 朱朝云<sup>2</sup>, 王道涵<sup>1</sup>, 吕永龙<sup>2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 阜新 123000; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 3. 沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866)

**摘要:** 采用苏玛罐收集样品, 气相色谱-质谱联用方法对河北省张家口市3个代表性农药企业场地内挥发性有机物(VOCs)进行监测分析, 研究了VOCs的污染特征及健康风险。结果表明, 在3个农药场地内均存在着比较严重的总挥发性有机物(TVOC)污染, 各场地正己烷( $6\ 161.90 \sim 6\ 910.00\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、苯( $126.00 \sim 179.30\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、1,3-丁二烯( $115.00 \sim 177.30\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )的含量远超过USEPA风险系统中对应的慢性吸入参考值( $700$ 、 $30$ 、 $2\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 场地B二氯甲烷的含量( $724.00\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )也超过对应的参考浓度( $600\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )。各场地VOCs经吸入途径的非致癌风险数量级为 $1.00\text{E}-04 \sim 1.00\text{E}+00$ , 经皮肤暴露的非致癌风险数量级为 $1.00\text{E}-09 \sim 1.00\text{E}-05$ , 其中正己烷( $2.52\text{E}+00 \sim 2.83\text{E}+00$ )、二氯甲烷( $2.08\text{E}+00 \sim 2.97\text{E}+00$ )的非致癌风险指数均超过了1, 场地B中苯的非致癌风险指数( $1.10\text{E}+00$ )也超过了1。各场地VOCs经吸入暴露的致癌风险数量级均在 $1.00\text{E}-08 \sim 1.00\text{E}-03$ 之间, 各化合物经皮肤暴露的致癌风险数量级在 $1.00\text{E}-13 \sim 1.00\text{E}-08$ 之间, 各场地中1,3-丁二烯的吸入致癌风险指数均超过了 $1.0\text{E}-04$ , 属于高致癌风险污染物, 而苯的吸入致癌风险也已经超过了国际辐射防护委员会(ICRP)推荐的有毒有害物质个人年风险最大可接受水平( $5.0\text{E}-05$ )。皮肤暴露途径引起的健康风险与吸入暴露有相同的趋势, 但风险值远小于吸入暴露的风险值, 占总风险值的比例不足0.01%, 说明该农药场地挥发性有机物引起人体健康风险的主要途径为吸入暴露。

**关键词:** 农药企业; 挥发性有机物; 空气; 健康风险评价; 吸入暴露; 皮肤暴露

中图分类号: X511; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)12-4577-08

## Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric Volatile Organic Compounds (VOCs) in Pesticide Factory

TAN Bing<sup>1,2</sup>, WANG Tie-yu<sup>2</sup>, PANG Bo<sup>2,3</sup>, ZHU Zhao-yun<sup>2</sup>, WANG Dao-han<sup>1</sup>, LÜ Yong-long<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Sciences and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

**Abstract:** A method for determining volatile organic compounds (VOCs) in air by summa canister collecting and gas chromatography/mass spectroscopy detecting was adopted. Pollution condition and characteristics of VOCs were discussed in three representative pesticide factories in Zhangjiakou City, Hebei Province. Meanwhile, an internationally recognized four-step evaluation model of health risk assessment was applied to preliminarily assess the health risk caused by atmospheric VOCs in different exposure ways, inhalation and dermal exposure. Results showed that serious total VOCs pollution existed in all factories. Concentrations of *n*-hexane ( $6\ 161.90 \sim 6\ 910.00\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), benzene ( $126.00 \sim 179.30\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) and 1,3-butadiene ( $115.00 \sim 177.30\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) exceeded the Chronic Inhalation Reference Concentrations recommended by USEPA, corresponding to 700, 30 and  $2\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , respectively. Concentration of dichloromethane ( $724.00\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) in factory B was also higher than the reference concentration ( $600\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Results of health risk assessment indicated that non-carcinogenic risk indexes of VOCs ranged from  $1.00\text{E}-04$  to  $1.00\text{E}+00$  by inhalation exposure, and  $1.00\text{E}-09$  to  $1.00\text{E}-05$  by dermal exposure. Risk indexes of *n*-hexane and dichloromethane by inhalation exposure in all factories exceeded 1, and risk index of benzene by inhalation in factory B was also higher than 1. Carcinogenic risk indexes exposed to VOCs ranged from  $1.00\text{E}-08$  to  $1.00\text{E}-03$  by inhalation exposure and  $1.00\text{E}-13$  to  $1.00\text{E}-08$  by dermal exposure. Cancer risk of 1,3-butadiene by inhalation exceeded  $1.0\text{E}-04$ , which lead to definite risk, and those of benzene by inhalation also exceeded the maximum allowable level recommended by International Commission on Radiological Protection ( $5.0\text{E}-05$ ). The risks of dermal exposure presented the same trend as inhalation exposure, but the level was much lower than that of inhalation exposure. Thus, inhalation exposure of atmospheric VOCs was the dominant way of health risk in these factories.

**Key words:** pesticide factory; volatile organic compounds (VOCs); atmosphere; health risk assessment; inhalation exposure; dermal exposure

收稿日期: 2013-01-23; 修订日期: 2013-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171394); 环境保护公益性行业科研专项(201009032)

作者简介: 谭冰(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为区域污染风险评价与生态修复, E-mail: tanbing2011@126.com

\* 通讯联系人, E-mail: wangty@cees.ac.cn

挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 是空气中普遍存在且组成、来源复杂的一类有机污染物,其主要成分为烃类、氧烃类、含卤烃类、氮烃及硫烃类、低沸点的多环芳烃类等<sup>[1,2]</sup>。主要有天然源和人为源两种<sup>[3]</sup>,其中,人为来源十分复杂,包括燃料燃烧、机动车尾气、溶剂使用、工业排放等。VOCs 的危害很明显,除了令人不悦的气味外,VOC 会刺激眼睛和上呼吸道系统,短时间暴露会使人感到头痛、恶心、呕吐、四肢乏力;严重时抽搐、昏迷、记忆力减退。长时间暴露于一定浓度的 VOCs 环境中,会对人的肝脏、肾脏、大脑和神经系统造成一定的伤害<sup>[4]</sup>。

污染场地大气污染物污染状况及职业健康危害一直是研究的热点,多见于对挥发性有机物、苯系物、多环芳烃等的研究<sup>[5~10]</sup>。农药企业在生产中大量用到有机溶剂,包括苯类、卤代烃类溶剂,甚至包括已经列入环保部“双高”(高污染、高环境风险)名录的溶剂,除了会因挥发造成无组织排放外,企业生产、生活还会排放一定量的 VOCs 废气。同时,由于大气 VOCs 不是国家相关空气质量标准中的受控物质,长期以来在我国缺乏系统规范的监测,对 VOCs 的水平、组成变化及其环境影响也缺乏深入研究<sup>[11~13]</sup>。因此,农药行业等工业区的 VOCs 污染一直是研究工作的难点。本文以河北省张家口市 3 个代表性农药化工企业厂区为研究对象,3 家企业均生产除草剂类农药,生产过程中用到大量甲苯、二甲苯等芳香烃以及卤代烃类有机物。分别采集各企业场地生产区的大气样品,重点研究农药场地 VOCs 污染特征及其职业暴露危害,以便引起人们对职业性暴露危害的重视,提高对空气中 VOCs 污染的警觉性,以期制定相关行业环境空气中 VOCs 质量标准提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

空气中 VOCs 的分析采用 EPA 推荐的 TO-15 方法<sup>[14]</sup>,VOCs 经负压富集到特制罐中,在低温下进行浓缩后气体利用 Agilent 7890A-5975C GC/MS 分析。该方法中采用的特制不锈钢罐 (Summa),内壁经电子抛光和惰性化处理,避免光照引起的化学反应,几乎对空气中 VOCs 没有吸附作用,能保持样品的完整性,最大限度地降低现场采样的不确定性误差,准确性和重现性都较高<sup>[15~18]</sup>。采样前需用清洗仪将 Summa 罐清洗干净并抽真空至负压状态。在

采样地点将阀门打开,当罐内外压力平衡后,关闭阀门,带回实验室待分析,同时记录采样时大气温度与压力。

### 1.2 样品分析

标准气体:美国 Spectra gases 生产的 TO-14A, 39 组分混合标准气体,混合标准气体及 TO-15 subset, 25 组分混合标准气体,标准气体各组分原始浓度为  $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。标准气体由 ENTECH 4600A 动态稀释仪稀释制的标准曲线,采用外标定量法。

前处理方法:已采集样品的苏玛罐放在美国 ENTECH 7016CA 自动进样器上,准确抽取 400 mL 样品于 ENTECH 7100 预浓缩仪中,经过低温浓缩处理后进入色谱仪分析。预浓缩仪通过 3 级冷阱浓缩:1 级冷阱温度为  $-150^\circ\text{C}$ ,解吸温度为  $10^\circ\text{C}$ ; 2 级冷阱温度为  $-30^\circ\text{C}$ ,解吸温度为  $180^\circ\text{C}$ ; 3 级冷阱温度为  $-160^\circ\text{C}$ 。

仪器设备:安捷伦 7890A-5975C 气相色谱-质谱联用仪,美国 ENTECH 7100 预浓缩仪,美国 ENTECH 7016CA 自动进样装置,ENTECH 4600A 动态稀释仪,ENTECH 3100 自动清罐仪。气罐——Summa 罐(内壁经硅烷化处理),美国 ENTECH 公司生产,6L。

色谱和质谱条件:进样口温度为  $200^\circ\text{C}$ ;分流进样,分流比为 20:1;传输线温度为  $160^\circ\text{C}$ ;四级杆温度为  $150^\circ\text{C}$ ;载气:氦气,柱流量为  $1.5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ ;升温程序为:初始温度  $40^\circ\text{C}$ ,保持 0.5 min,以  $3^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  升温至  $80^\circ\text{C}$ ,保持 2 min,再以  $15^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$  升温至  $200^\circ\text{C}$ ,保持 10 min;色谱柱类型为 DB-624 毛细管色谱柱 ( $60 \text{ m} \times 250 \mu\text{m} \times 1.4 \mu\text{m}$ );EI 离子源,温度为  $230^\circ\text{C}$ ,电子化能量为 2 200 V,扫描模式为 SCAN 与 SIM 同时扫描,扫描范围 40 ~ 300 u,扫描速度为  $5.36 \text{ scans} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

质量控制:每次分析时,需测试一个实验空白,实验空白用 ENTECH 3100 自动清罐仪配制一个高纯氮气进行测试,以检测仪器测试过程中是否存在污染。各物质的检出限采用信噪比  $S/N \geq 3$  来确定,以  $S/N \geq 10$  做为定量限。通过配制质控样品,即用 ENTECH 4600A 动态稀释仪,用高纯氮气将标气稀释 50 倍,稀释后的浓度为  $20 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ,重复测定两次,两次测试的浓度的相对标准偏差均小于 10%,同时所测得的浓度与标准值的相对误差也低于 10%,均符合要求。

### 1.3 健康风险评价方法

目前,常用健康风险评价方法来源于 1983 年美

国国家科学院 (National Academy of Sciences) 提出的《联邦政府的风险评价: 管理程序》, 即为通常所说的“4 步法”: 危害鉴定、剂量反应关系评估、暴露评估和风险表征<sup>[19]</sup>。尽管当前各国对 VOCs 的健康风险评价方法和模型表现形式不尽相同, 但其原理基本一致, 并且都包括致癌与非致癌风险评价模型两部分<sup>[20~25]</sup>。本研究拟采用 USEPA 的暴露计算方法, 对典型农药化工污染场地大气中 VOCs 的健康风险进行评价。

### 1.3.1 暴露途径评价

暴露途径主要有: 经口、吸入、皮肤直接接触及食用场地上的植物果实等。由于采样区域主要污染物为挥发性有机物, 在常温下以蒸气形式存在于环境空气中, 因此本研究主要考虑吸入和皮肤接触途径。吸入和皮肤接触的日平均摄入量 CDI [ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ] 计算见下式<sup>[20,26,27]</sup>。

吸入摄入量:

$$\text{CDI}_{\text{吸入}} = \frac{c \times \text{IR} \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{ET}}{\text{BW} \times \text{AT} \times 365} \times \text{AF} \quad (1)$$

皮肤接触摄入量:

$$\text{CDI}_{\text{皮肤}} = \frac{c \times \text{SA} \times K_p \times \text{EF} \times \text{ED} \times \text{ET}}{\text{BW} \times \text{AT} \times 365} \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中,  $c$  为空气中污染物的浓度,  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; IR 为吸入空气量,  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; 吸收效率 AF 取 0.9; SA 为皮肤接触表面积,  $\text{cm}^2$ ;  $K_p$  为与空气接触时污染物的皮肤渗透系数,  $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ ; EF 为暴露频率,  $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$ ; ED 为暴露时间,  $\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$ ; ET 为暴露期, a; BW 为暴露人群平均体重, kg; AT 为平均作用时间, a。

### 1.3.2 致癌风险和非致癌风险

致癌风险通常用风险值 (Risk) 表示, 其定义为长期日摄入量与致癌斜率因子的乘积, 表示暴露于该物质而导致的一生中超过正常水平的癌症发病率。用式(3)计算<sup>[27]</sup>:

$$\text{Risk} = \text{CDI} \times \text{SF} \quad (3)$$

当计算值大于 0.01 时换算为高剂量暴露计算公式:  $\text{Risk} = 1 - \exp(-\text{CDI} \times \text{SF})$

非致癌风险通常用风险指数 (HI) 进行描述, 其定义为由于暴露造成的长期日摄入量与参考剂量的比值, 可用式(4)计算<sup>[27]</sup>:

$$\text{HI} = \frac{\text{CDI}}{\text{RfD}} \quad (4)$$

式中, CDI 为长期日摄入量,  $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ , 见公式(1)~(2); SF 为致癌物的斜率因子,  $(\text{kg} \cdot \text{d}) \cdot \text{mg}^{-1}$ ; RfD

为污染物的参考剂量,  $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ 。在进行非致癌风险评价时也要考虑到致癌物引起的非致癌风险。

## 2 结果与讨论

### 2.1 大气挥发性有机物分析

由表 1 可知, 在 A 企业场地内检出 20 种挥发性有机物, 在 B、C 这 2 个企业场地内分别检出 19 种, 各场地 VOCs 的组成大致相似, 主要有烷烃类、卤代烃、芳香烃、烯烃、含氧有机物。各类有机物中含量最丰富的为烷烃类, 以正己烷 ( $6161.90 \sim 6910.00 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )、环己烷 ( $1902.30 \sim 2671.60 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) 为代表, 种类最丰富的为卤代烃, 其中二氯甲烷含量最高 ( $507.40 \sim 724.00 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ), 芳香烃中以苯为主 ( $126.00 \sim 179.30 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ), 烯烃类以 1,3-丁二烯为主 ( $115.00 \sim 177.30 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ), 含氧有机物种类及含量较少。整体上, 各种 VOCs 浓度均低于文献[28]。但正己烷、苯、1,3-丁二烯含量超出了 USEPA 给出的慢性吸入参考浓度 ( $700$ 、 $30$ 、 $2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )<sup>[29]</sup>, 在场地 B 二氯甲烷含量  $724.00 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  也超过参考浓度限值  $600 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。在超标污染物中, 1,3-丁二烯的超标倍数较高 ( $57.5 \sim 88.65$ ), 正己烷、苯也具有较高的超标倍数 (最高分别达到  $9.87$ 、 $5.98$ )。值得注意的是, 1,3-丁二烯是一种具有麻醉性, 特别刺激粘膜的气体, 长期接触一定浓度的丁二烯会刺激中枢神经系统, 可出现头痛、头晕、全身乏力、记忆力减退、心悸等症状, 正己烷和苯也都具有高挥发性和脂溶性, 在人体内可以蓄积, 通过吸入或皮肤接触进入人体内可侵害神经系统。医学研究初步证实, 1,3-丁二烯、苯都具有一定的致癌性<sup>[30]</sup>。可以看出, 企业场地 VOCs 存在较为严重的潜在健康风险, 尤其需要引起重视的是 1,3-丁二烯、苯等致癌性物质。

从总量来看 (图 1), 各场地 TVOC 含量 ( $8990.20 \sim 10658.90 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) 超过了国内其他城市, 如北京城乡结合区 (均值  $431.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )<sup>[31]</sup>、天津 (最高  $480 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )<sup>[32]</sup>、沈阳 (最高  $639.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )<sup>[33]</sup> 等城市大气中的含量, 也远高于部分工业区含量<sup>[34~37]</sup>。说明在农药化工场地的 VOCs 浓度虽然均未超过国内相关职业标准限值, 但参比国际相关标准以及国内其他地区情况, 企业场地存在比较严重的 TVOC 污染风险。高浓度的 VOCs 除来源于场地内外道路机动车尾气排放、厂区及周边居民生产生活排放外, 农业化工企业内原辅料 VOCs 相关溶剂的使用与挥发是重要排放源。

表 1 各场地 VOCs 的含量及分类

| Table 1 Concentrations and classification of VOCs in each sampling area |            |                                              |           |          |                                                        |
|-------------------------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------|-----------|----------|--------------------------------------------------------|
| 类别                                                                      | 化合物        | 各场地挥发性有机物组成/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ |           |          | RfC <sup>1)</sup><br>/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ |
|                                                                         |            | 场地 A                                         | 场地 B      | 场地 C     |                                                        |
| 烷烃                                                                      | 正己烷        | 6 910.00                                     | 6 680.80  | 6 161.90 | 700                                                    |
|                                                                         | 环己烷        | 2 501.90                                     | 2 671.60  | 1 902.30 |                                                        |
| 卤代烃                                                                     | 二氯甲烷       | 507.40                                       | 724.00    | 511.40   | 600                                                    |
|                                                                         | 三氯甲烷       | 5.20                                         | 7.00      | 5.10     |                                                        |
|                                                                         | 氯甲烷        | 5.10                                         | 1.30      | 4.30     |                                                        |
|                                                                         | 间-二氯苯      | 3.50                                         | 4.90      | 3.80     |                                                        |
|                                                                         | 四氯乙烯       | 2.20                                         | 3.10      | 2.30     |                                                        |
|                                                                         | 三氯乙烯       | 3.50                                         | 5.00      | nd       |                                                        |
|                                                                         | 二硫化碳       | 3.50                                         | 6.40      | 2.20     |                                                        |
|                                                                         | 对-二氯苯      | 1.10                                         | 1.50      | 1.20     |                                                        |
|                                                                         | 邻-二氯苯      | 0.70                                         | 0.90      | 0.70     |                                                        |
| 芳香烃                                                                     | 苯          | 126.90                                       | 179.30    | 126.00   | 30                                                     |
|                                                                         | 甲苯         | 109.00                                       | 153.70    | 110.00   |                                                        |
|                                                                         | 二甲苯        | 13.70                                        | 20.10     | 14.20    |                                                        |
|                                                                         | 乙苯         | 13.50                                        | nd        | 13.90    |                                                        |
|                                                                         | 三甲苯        | 3.70                                         | 5.40      | 4.40     |                                                        |
|                                                                         | 1-乙基-4-甲基苯 | 1.20                                         | 1.30      | 0.70     |                                                        |
| 烯烃                                                                      | 1,3-丁二烯    | 151.00                                       | 177.30    | 115.00   | 2                                                      |
|                                                                         | 苯乙烯        | 3.50                                         | 5.00      | 3.60     |                                                        |
| 醛酯                                                                      | 丙酮         | 17.10                                        | 10.30     | 7.20     |                                                        |
| 总量                                                                      |            | 10 383.70                                    | 10 658.90 | 8 990.20 |                                                        |

1) 慢性吸入参考浓度 (chronic inhalation reference concentration) 是 EPA 通过估算给出的某种污染物吸入人体但长期内不可能会造成有害影响的浓度值

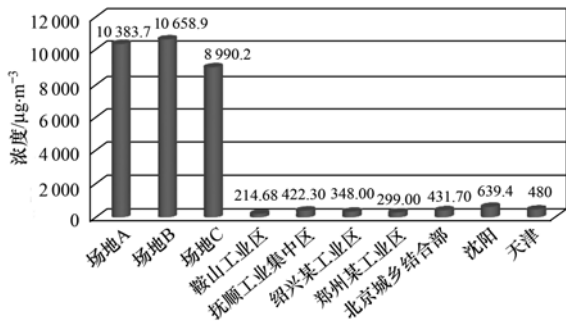


图 1 采样点 VOCs 总含量与国内城市的对比

Fig. 1 Comparison of VOCs concentrations with other domestic cities

2.2 VOCs 健康风险评价

评价参数在基于采样区域背景调查、USEPA 暴露参数手册<sup>[38]</sup>及国内外相关研究的基础上选取<sup>[39,40]</sup>. 吸入空气量 IR 参照 EPA 规定,成年人每分吸入空气量为 4.5 L,即 0.27 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>; 厂内职工皮肤接触表面积 SA 仅考虑头部和手部暴露,取 2 200 cm<sup>2</sup>; 皮肤渗透系数 K<sub>p</sub> 为实验数据,因化合物不同而异,为方便计算取默认值 10<sup>-3</sup> cm·h<sup>-1</sup>; 暴露频率 EF、暴露时间 ED 在背景调查的基础上分别取 300 d·a<sup>-1</sup>、8 h·d<sup>-1</sup>; 暴露期 ET 取污染场地评估技术导则中规定的 25 a; 平均体重 BW 取

污染场地内职工平均体重 65 kg; 平均作用时间 AT,对致癌风险取其平均寿命 70 a,非致癌风险取暴露期 25 a. 计算中使用的各种物质的化学剂毒理学参数 (RfD 和 SF) 均有 RAIS<sup>[41]</sup> 系统查得,具体见表 2. 根据表 2 中化合物毒性因子,考虑到部分有机物无可数据,本研究拟对 15 种化合物进行非致癌风险评价,9 种化合物进行致癌风险评价.

2.2.1 非致癌风险评价

利用 USEPA 风险评价模型分别对各农药场地空气中 15 种 VOCs 进行了不同途径的非致癌健康风险评价,包括烷烃类、氯代烃类,苯系物和醛酯类等,结果如图 2、3. 对于非致癌风险,当风险指数未超过 1 时不会对人体造成明显伤害. 场地 A、B、C 各化合物经吸入途径的非致癌风险指数分别在 1.91E-04~2.83E+00、2.46E-04~2.97E+00、1.91E-04~2.52E+00 之间. 各场地中正己烷 (2.52E+00~2.83E+00)、二氯甲烷 (2.08E+00~2.97E+00) 吸入途径的非致癌风险指数超过了 1,此外场地 B 中苯的经吸入途径的非致癌风险指数 (1.10E+00) 也超过了 1. 经皮肤接触的非致癌风险场地 A、B、C 分别在 1.73E-09~2.56E-05、

$2.23\text{E}-09 \sim 2.69\text{E}-05$ 、 $1.73\text{E}-09 \sim 2.29\text{E}-05$  之间,各化合物的非致癌风险指数均远小于 1.

表 2 VOCs 化合物的毒性因子<sup>1)</sup>

| Table 2 Hazards of VOCs |                                                        |                                                       |                       |
|-------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------|
| 化合物                     | RfD/ $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ | SF/ $(\text{kg} \cdot \text{d}) \cdot \text{mg}^{-1}$ | IARC 分类 <sup>3)</sup> |
| 正己烷                     | 0.060 0                                                | — <sup>2)</sup>                                       | —                     |
| 环己烷                     | —                                                      | —                                                     | —                     |
| 二氯甲烷                    | 0.006 0                                                | 0.002 0                                               | G2B                   |
| 三氯甲烷                    | 0.010 0                                                | 0.031 0                                               | G2B                   |
| 氯甲烷                     | —                                                      | 0.013 0                                               | G3                    |
| 间-二氯苯                   | —                                                      | —                                                     | G3                    |
| 四氯乙烯                    | 0.006 0                                                | 0.002 1                                               | G2A                   |
| 三氯乙烯                    | 0.000 5                                                | 0.046 0                                               | G2A                   |
| 二硫化碳                    | 0.100 0                                                | —                                                     | —                     |
| 对-二氯苯                   | 0.070 0                                                | 0.005 4                                               | G2B                   |
| 邻-二氯苯                   | 0.090 0                                                | —                                                     | G3                    |
| 苯                       | 0.004 0                                                | 0.055 0                                               | G1                    |
| 甲苯                      | 0.080 0                                                | —                                                     | G3                    |
| 二甲苯                     | 0.200 0                                                | —                                                     | G3                    |
| 乙苯                      | 0.100 0                                                | 0.011 0                                               | G2B                   |
| 三甲苯                     | 0.050 0                                                | —                                                     | —                     |
| 1-乙基-4-甲基苯              | —                                                      | —                                                     | —                     |
| 1,3-丁二烯                 | —                                                      | 3.400                                                 | G1                    |
| 苯乙烯                     | 0.200 0                                                | —                                                     | G2B                   |
| 丙酮                      | 0.900 0                                                | —                                                     | —                     |

1) 各化合物的 RfD 和 SF 来自于美国能源部下属的 Oak Ridge 国家实验室建立的风险评估信息系统(RAIS), 该系统收集整理了包括 EPA 的综合风险信息系统(IRIS)、健康影响评价概要表(HEAST)以及暂定毒性数据库(PPRTV)等数据源中化学污染物对人体健康危害的数据; 2) “—”表示该物质尚无 EPA 或其他卫生环境组织收录认可的毒理学实验数据; 3) 国际癌症研究机构(IARC)将化合物的危害鉴定分为 5 大类: G1, 确认人类致癌物; G2A, 可能人类致癌物; G2B, 可疑人类致癌物; G3, 对人体致癌性尚未归类的物质或混合物; G4, 对人体可能没有致癌性的物质

VOCs 引起的非致癌风险应为不同途径的风险 为  $1.00\text{E}-04 \sim 1.00\text{E}+00$ , 经皮肤暴露的非致癌风  
值总和, 本研究中经吸入途径的非致癌风险数量级 险数量级为  $1.00\text{E}-09 \sim 1.00\text{E}-05$ , 皮肤暴露途径

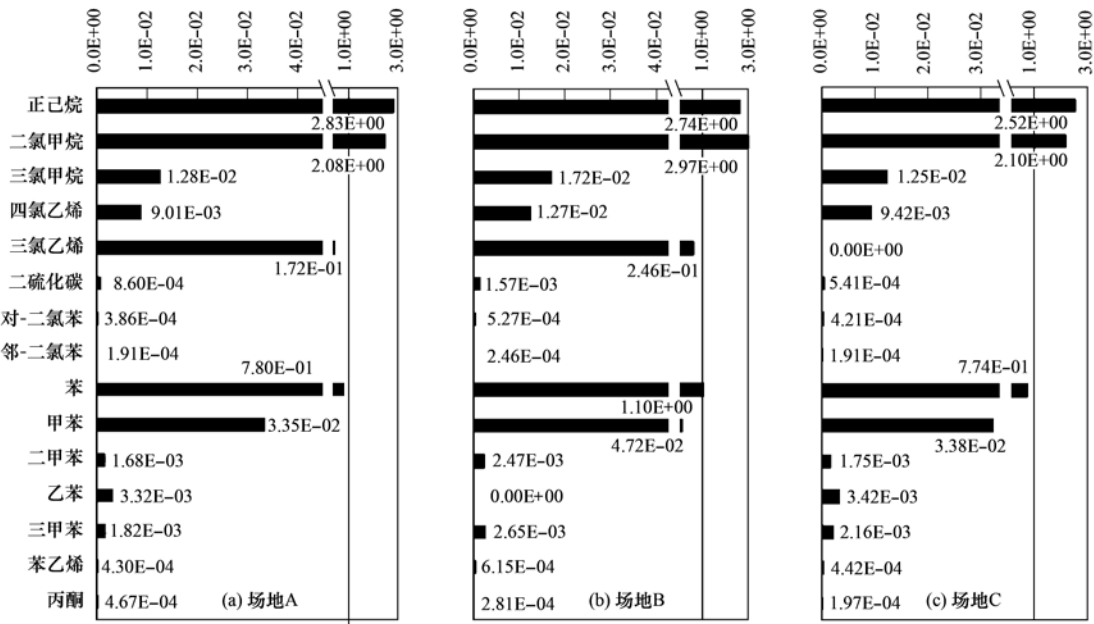


图 2 各场地 VOCs 经吸入途径的非致癌风险

Fig. 2 Non-carcinogenic risk of VOCs caused by inhalation

的非致癌风险指数占风险指数比例不足 0.01%,可见吸入暴露是引起非致癌风险的主要途径。各类有

机物中烷烃类、卤代烃类和苯系物的总风险较大,需要引起相关企业及环境管理部门的重视。

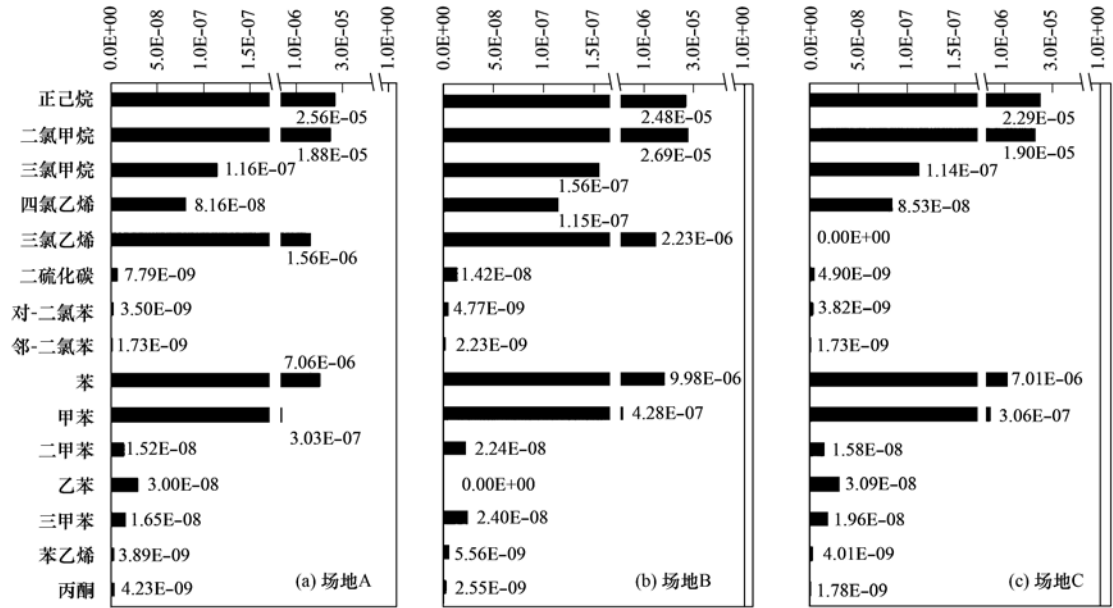


图 3 各场地 VOCs 经皮肤暴露途径的非致癌风险

Fig. 3 Non-carcinogenic risk of VOCs caused by dermal exposure

2.2.2 致癌风险评价

对农药场地内 9 种 VOCs 进行致癌风险评价,包括了 2 种 G1 类污染物(1,3-丁二烯、苯),2 种 G2A 类污染物(四氯乙烯、三氯乙烯),4 种 G2B 类污染物(二氯甲烷、三氯甲烷、对-二氯苯、乙苯),1 种 G3 类污染物(氯甲烷)。参照 EPA 的评价标准,一般人可接受的致癌风险为  $1.0E-06$ ,风险值小于  $1.0E-06$  表明不存在致癌风险,当致癌指数在  $1.0E-06 \sim 1.0E-04$  之间认为则表明存在致癌风险,但在可接受范围之内,风险值大于  $1.0E-04$  表明致癌风险较高,必须采取一定的措施。

图 4、5 所示评价结果,可以看出各污染场地 VOCs 经吸入暴露的致癌风险数量级均在  $1.00E-08 \sim 1.00E-03$  之间,场地 A 中二氯甲烷、三氯甲烷、三氯乙烯、苯、乙苯、1,3-丁二烯的风险指数超过了一般人可接受的致癌风险( $1.0E-06$ ),场地 B 中二氯甲烷、三氯甲烷、三氯乙烯、苯、1,3-丁二烯的风险指数超过了该水平,场地 C 中有二氯甲烷、三氯甲烷、苯、乙苯、1,3-丁二烯的风险指数也超过了该水平。各化合物经皮肤暴露的致癌风险数量级在  $1.00E-13 \sim 1.00E-08$  间,远小于  $1.0E-06$ ,说明经皮肤暴露引起的致癌风险较小,吸入暴露才是引起致癌风险的主要途径。

各物质不同途径的致癌风险指数均表现为四氯

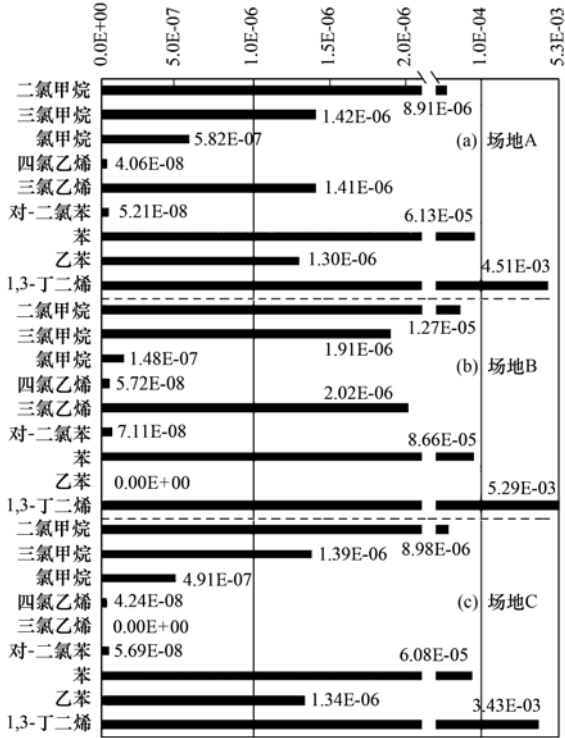


图 4 各场地 VOCs 经吸入途径的致癌风险

Fig. 4 Carcinogenic risk of VOCs caused by inhalation

乙烯 < 对-二氯苯 < 氯甲烷 < 乙苯 < 三氯甲烷 < 三氯乙烯 < 二氯甲烷 < 苯 < 1,3-丁二烯。G1 类污染物 1,3-丁二烯、苯的风险指数较高,各场地中 1,3-



丁二烯的吸入致癌风险指数均超过了  $1.0E-04$ , 属于高致癌风险污染物, 而苯的吸入致癌风险也已经超过了国际辐射防护委员会 (ICRP) 推荐的有毒有害物质个人年风险最大可接受水平 ( $5.0E-05$ )。G2A 类物质中三氯乙烯在场地 A、B 的吸入致癌风险指数也超过了一般人可接受的水平 ( $1.0E-06$ ), 场地 C 中未检测出三氯乙烯。G2B 类物质二氯甲烷、三氯甲烷、乙苯都具有较高的致癌风险指数。由此可见, 毒性较大的物质往往具有较高的健康风险。

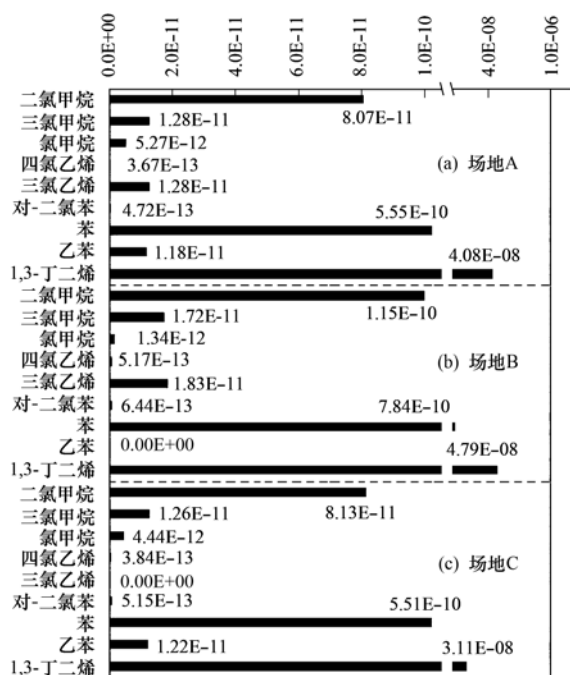


图5 各场地 VOCs 经皮肤暴露途径的致癌风险

Fig. 5 Carcinogenic risk of VOCs caused by dermal exposure

### 3 结论

(1) 利用苏玛罐采样, 气相色谱-质谱分析了河北省张家口市 3 家农药企业场地空气中 VOCs 含量, 结果表明在各场地 1,3-丁二烯、苯、正己烷的含量远超过 USEPA 的慢性吸入参考浓度。各场地 TVOC 的含量远超过国内其他城市的监测值, 农药场地存在比较严重的挥发性有机物污染, 其中以 1,3-丁二烯、苯的超标程度较高, 污染较为严重。

(2) 采用 USEPA 健康风险评价模型, 对各场地大气 VOCs 通过不同途径引起的人体健康风险进行评价, 结果表明, 在各农药场地均存在严重的 1,3-丁二烯、苯的潜在致癌风险危害, 其中 1,3-丁二烯经吸入途径引起的致癌风险已超过  $1.0E-04$ , 属于高致癌风险污染物, 苯的吸入致癌风险也已超过了

ICRP 推荐的个人年风险最大可接受水平 ( $5.0E-05$ )。同时, 各场地还存在较为严重的正己烷、二氯甲烷引起的非致癌风险危害, 风险指数均超过了 1, 需引起相关企业和环境管理部门重视。皮肤暴露途径引起的健康风险与吸入暴露有相同趋势, 但风险值远小于吸入暴露风险值, 吸入暴露仍是构成人体健康风险的主要途径。

### 参考文献:

- [1] Maroni M, Seifert B, Lindvall T. Indoor air quality: a comprehensive reference book [M]. Amsterdam: Elsevier Science, 1995.
- [2] 梁宝生, 田仁生. 总挥发性有机化合物 (TVOC) 室内空气质量评价标准的制订[J]. 重庆环境科学, 2003, 25(5): 1-3.
- [3] 史建武. 中国北方城市大气挥发性有机物活性及来源研究[D]. 天津: 南开大学, 2010. 4-6.
- [4] Sofuoğlu S C, Aslan G, Inal F, et al. An assessment of indoor air concentrations and health risks of volatile organic compounds in three primary schools[J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2011, 214(1): 38-46.
- [5] 王静, 朱利中, 沈学优. 某焦化厂空气中 PAHs 的污染现状及健康风险评价[J]. 环境科学, 2003, 24(1): 138-138.
- [6] 程淑群, 林忆兰, 张晓丽, 等. 重庆市某区中小型企业作业场所苯系物污染状况调查[J]. 现代预防医学, 2008, 35(12): 2221-2225.
- [7] Malherbe L, Mandin C. VOC emissions during outdoor ship painting and health-risk assessment [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(30): 6322-6330.
- [8] Chiang H L, Lin W H, Lai J S, et al. Wang. Inhalation risk assessment of exposure to the selected volatile organic compounds (VOCs) emitted from the facilities of a steel plant[J]. Journal of Environmental Science and Health Part A-Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering, 2010, 45(11): 1397-1405.
- [9] Nouwen J, Corneils C, De Fré R, et al. Health risk assessment of dioxin emissions from municipal waste incinerator: the Neerlandquarter (Wilrijk, Belgium) [J]. Chemosphere, 2001, 43(4-7): 909-923.
- [10] Zhang Y X, Tao S, Shen H Z, et al. Inhalation exposure to ambient polycyclic aromatic hydrocarbons and lung cancer risk of Chinese population[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(50): 21063-21067.
- [11] 魏巍. 中国人为源挥发性有机化合物的排放现状及未来趋势[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [12] 陈颖, 李丽娜, 杨常青, 等. 我国 VOC 类有毒空气污染物优先控制对策探讨[J]. 环境科学, 2011, 32(12): 3469-3475.
- [13] 张国宁, 郝郑平, 江梅, 等. 国外固定源 VOCs 排放控制法规与标准研究[J]. 环境科学, 2011, 32(12): 3501-3508.
- [14] US EPA Method TO-15. Determination of Volatile Organic Compounds (VOCs) in Air Collected In Specially-Prepared Canisters and Analyzed By Gas Chromatography/Mass

- Spectrometry (GC/MS)[EB/OL]. <http://www.epa.gov/ttn/amtic/files/ambient/airtox/to-15r.pdf>.
- [15] 孙焱婧, 刘娟, 伏晴艳, 等. 环境空气中 VOCs 在线监测法与 SUMMA 罐采样气相色谱-质谱法比对研究[J]. 中国环境监测, 2009, **25**(3): 23-28.
- [16] Hsieh C C, Tsai J H. VOC concentration characteristics in Southern Taiwan[J]. Chemosphere, 2003, **50**(4): 545-556.
- [17] Lee S C, Chiu M Y, Ho K F, *et al.* Volatile organic compounds (VOCs) in urban atmosphere of Hong Kong[J]. Chemosphere, 2002, **48**(3): 375-382.
- [18] McClenny W A, Pleil J D, Evans G F, *et al.* Canister-based method for monitoring toxic VOCs in ambient air[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 1991, **41**(10): 1308-1318.
- [19] U. S. NRC. Risk assessment in the Federal Government: managing the process[M]. Washington DC: National Academy Press, 1983. 1-8.
- [20] 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价[J]. 环境科学, 2011, **32**(12): 3566-3570.
- [21] 张平, 陈坤洋, 朱利中, 等. 公共场所 BTEX 的污染特征、源解析及健康风险[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(5): 779-784.
- [22] Ramirez N, Cuadras A, Rovira E, *et al.* Chronic risk assessment of exposure to volatile organic compounds in the atmosphere near the largest Mediterranean industrial site [J]. Environment International, 2012, **39**(1): 200-209.
- [23] 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, 2010, **409**(3): 452-459.
- [24] Kavcar P, Odabasi M, Kitis M, *et al.* Occurrence, oral exposure and risk assessment of volatile organic compounds in drinking water for Izmir[J]. Water Research, 2006, **40**(17): 3219-3230.
- [25] Durmusoglu E, Taspinar F, Karademir A. Health risk assessment of BTEX emissions in the landfill environment[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **176**(1-3): 870-877.
- [26] 段小丽, 聂静, 王宗爽, 等. 健康风险评价中人体暴露参数的国内外研究概况[J]. 环境与健康杂志, 2009, **29**(4): 370-373.
- [27] US EPA. Guidelines for Exposure Assessment [EB/OL]. <http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=15263>.
- [28] GBZ 2. 1-2007, 工作场所有害因素职业接触限值(第一部分: 化学有害因素)[S].
- [29] US EPA. Integrated Risk Information System[EB/OL]. <http://cfpub.epa.gov/ncea/iris/index.cfm?fuseaction=iris.showSubstanceList>.
- [30] WHO. Air quality guidelines for Europe (2nd ed.) [EB/OL]. <http://www.euro.who.int/en/what-we-publish/abstracts/air-quality-guidelines-for-europe>.
- [31] 周裕敏, 郝郑平, 王海林. 北京地区城乡结合部大气挥发性有机物污染及来源分析[J]. 环境科学, 2011, **32**(12): 3560-3565.
- [32] 曹文文, 史建武, 韩斌, 等. 我国北方典型城市大气中 VOCs 的组成及分布特征[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(2): 200-206.
- [33] 刘雅婷, 彭跃, 白志鹏, 等. 沈阳市大气挥发性有机物 (VOCs) 污染特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(9): 2777-2785.
- [34] 魏恩祺, 王艳丽, 时庭锐, 等. 鞍山市大气中挥发性有机物的污染特征研究[J]. 环境污染与防治, 2011, **33**(6): 61-64.
- [35] 费金岩, 朱焕山. 老工业区大气中挥发性有机物的分布和组成特征[J]. 环境科学与管理, 2012, **37**(5): 124-127.
- [36] 徐锋, 钱晓曙, 孙志刚, 等. 绍兴市某工业区大气中挥发性有机物污染状况的研究[J]. 中国环境监测, 2011, **27**(2): 45-47.
- [37] 王玲玲, 王潇磊, 南淑清, 等. 郑州市环境空气中挥发性有机物的组成及分布特点[J]. 中国环境监测, 2008, **24**(4): 66-69.
- [38] US EPA. Exposure Factors Handbook: 2011 Edition[EB/OL]. <http://www.epa.gov/ncea/pdfs/efh/front.pdf>.
- [39] US EPA. Dermal exposure assessment: principles and Applications[EB/OL]. <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=30001L2F.txt>.
- [40] 王喆, 刘少卿, 陈晓民, 等. 健康风险评价中中国人皮肤暴露面积的估算[J]. 安全与环境学报, 2008, **8**(4): 152-156.
- [41] U. S. Department of Energy (DOE), Oak Ridge Operations (ORO) Office. The Risk Assessment Information System[EB/OL]. <http://rais.ornl.gov/>.

## 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 <sub>x</sub> 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(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