

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:以南京市江北工业区为例 胡崑,王鸣,郑军,王红丽,卢兴东,景盛翱,陈超(493)

南京工业区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,郭凤艳,刘锦(511)

某石油化工园区秋季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)

某典型石油化工园区冬季大气中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)

上海地区住宅儿童卧室室内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)

研究报告

北京市PM_{2.5}时空分布特征及其与PM₁₀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CH₄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)

巢湖水体可溶态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,周徽(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)

三峡库区兰陵溪小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,刘泽璐,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降解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,王隽,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,关宏伟,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,鲁垠涛,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 迟菽琳,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)

《环境科学》征稿简则(584) 《环境科学》征订启事(683) 信息(799,908,934)

杭州市工业源 VOCs 排放清单及排放特征

卢滨¹, 黄成^{2*}, 卢清³, 杨强¹, 井宝莉¹, 夏阳¹, 唐伟¹, 顾泽平⁴

(1. 杭州市环境保护科学研究院, 杭州 310014; 2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 3. 环境保护部华南环境科学研究所城市生态环境研究中心, 广州 510655; 4. 杭州市环境监察支队, 杭州 310004)

摘要: 杭州市作为 2016 年国际峰会、2022 年亚运会等一系列重大活动的举办地, 对 VOC 源排放清单的研究, 尤其是工业源 VOCs 的影响越来越受到管理部门和当地居民的重视. 通过采取自下而上的方式, 首次对杭州市涉及 VOCs 排放的 30 多个行业的 3 518 家企业逐一进行了详细的调查和估算, 并在此基础上建立了杭州市工业源 VOCs 排放清单. 从区域排放、排放强度、空间分布等不同角度对杭州市工业源 VOCs 排放特征进行了系统分析. 研究表明, 2015 年杭州市工业源 VOCs 排放量为 36 839.5 t; 印刷和记录媒介复制、化学原料和化学制品制造、金属制品、纺织、橡胶和塑料制品行业是杭州市工业源 VOCs 排放量最大的五个行业; 排放总量最大是萧山区, 其次是富阳区和大江东产业集聚区; 工业源 VOCs 排放强度最高的区域为富阳区、建德市和临安市; 工业源 VOCs 排放主要集中在萧山区、大江东、富阳区、余杭区等工业企业较为密集的区域.

关键词: VOCs; 排放清单; 杭州; 排放强度; 空间分布; 大气污染

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)02-0533-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201706062

Emission Inventory and Pollution Characteristics of Industrial VOCs in Hangzhou, China

LU Bin¹, HUANG Cheng^{2*}, LU Qing³, YANG Qiang¹, JING Bao-li¹, XIA Yang¹, TANG Wei¹, GU Ze-ping⁴

(1. Hangzhou Institute of Environment Sciences, Hangzhou 310014, China; 2. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 3. Urban Environment and Ecology Research Center, South China Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China; 4. Hangzhou Environmental Supervision Detachment, Hangzhou 310004, China)

Abstract: For the 2022 Asian Games, a series of major events were held in Hangzhou City in 2016 at the international summit, where research on VOC emission inventories, especially on industrial VOCs, has attracted the attention of local residents and management departments. By taking a bottom-up approach, 3 518 enterprises in more than 30 industries in Hangzhou were investigated and an industrial VOCs emission inventory for Hangzhou was established. Based on the data on regional emissions, emissions intensity, and spatial distribution, the industrial VOCs emissions in Hangzhou were systematically analyzed. The VOC emissions from industrial sources in Hangzhou amounted to 36 839.5 tons in 2015. Printing and reproduction of recorded media; chemical raw materials and chemical products manufacturing; and the metal, textile, rubber, and plastics products industries were the most important sources of industrial VOC emissions in Hangzhou. The largest industrial VOC emissions were measured in Xiaoshan District, followed by Fuyang District and Dajiangdong Industrial Agglomeration Area. The highest VOC emissions intensity was detected in Fuyang District, Jiande City, and Lin'an City. Industrial VOC emissions were mainly concentrated in more intensive industrial areas in Xiaoshan, Fuyang, Yuhang, and Dajiangdong Districts.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); emission inventory; Hangzhou; emission intensity; spatial allocation; air pollution

挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 是对流层臭氧生成的重要前体物, 它在光照条件下与 NO_x 发生光化学反应生成 O₃ 及其他光化学氧化物; 同时也是大气中细颗粒物和二次有机气溶胶的重要前体物之一^[1-6], 对人体也具有一定的危害^[7,8], 但我国尚未明确环保管理工作中的 VOCs 国家定义^[9]. 污染源排放清单是大气环境科研与管理的重要基础与依据. 近年来, 我国有关专家和学者针对 VOCs 排放清单已经开展了大量研究, 以污染源普查、环境统计和城市统计数据分别建立了全

国^[10]、长三角^[11]、珠三角^[2,12]、长株潭城市群^[13]以及省级层面^[14,15]的 VOCs 排放清单. 随着环境管理需求的提升, 区域尺度 VOCs 排放清单已难以满足城市地区管控要求, 近期, 许多研究将 VOCs 排放清单进一步提升至城市尺度, 聂磊等^[16]以北京

收稿日期: 2017-06-07; 修订日期: 2017-10-20

基金项目: 杭州市科技引导课题项目 (20163501Y53)

作者简介: 卢滨 (1980 ~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为大气污染源清单和环境模拟, E-mail: lubin2002@qq.com

* 通信作者, E-mail: huangc@saes.sh.cn

市 VOCs 污染普查结果总结出一套较为完整的城市尺度 VOCs 污染源排放清单编制方法. 李璇等^[17]收集了宁波市各类 VOC 人为源的活动水平数据, 采用“自下而上”的估算方法, 建立了宁波 2010 年人为源 VOC 的排放清单. 卢清等^[18]采取实地调查的方式获取活动水平, 采用排放因子法和物料衡算法估算, 研究建立了上海市青浦区的工业源 VOCs 排放清单. 杭州市作为 2016 年国际峰会、2022 年亚运会等一系列重大活动的举办地, PM_{2.5} 和 O₃ 污染的协同控制是杭州大气污染防治面临的首要难题, 摸清 VOCs 排放特征尤为关键.

有研究表明工业源是 VOCs 贡献的第一大源^[19], 而在长三角地区工业源 VOCs 占人为源排放总量的 30% ~ 50%^[20~22]. 目前针对 VOCs 排放清单的研究多以天然源和人为源分类^[15,16,23~25], 针对工业源 VOCs 的实地调查以及工业源 VOCs 的排放特征研究较少^[26]. 加强对工业源 VOCs 排放规律的研究, 有利于对 VOCs 重点排放行业的辨识, 可对产业结构和产业布局产生一定的指导意义. 杭州市工业门类复杂, 低小散企业众多, 依据现有的 VOCs 排放清单编制方法难以摸清杭州市工业源 VOCs 实际排放特征和治理现状. 为此, 本文首次以杭州市全域所有涉及 VOCs 排放的工业企业为研究对象, 采用发表调查、企业网上填表和实地调查等多种组合方法获取详细的活动水平数据, 同时针对固定燃烧、生产过程和溶剂使用等 3 类来源, 分别采用物料衡算和排放因子法, 全面系统地建立了 2015 年杭州市工业源 VOCs 排放清

单, 并在此基础上进一步分析全市工业源 VOCs 的排放特征, 旨在为杭州市 VOCs 污染防治提供精准的科学依据, 也为下一步产业结构调整和产业布局优化提供了支撑.

1 材料与方法

1.1 研究对象

研究对象基本涵盖了杭州市域内的涉及 VOCs 排放的工业企业, 以污染源普查、环境统计、排污申报等资料作为调查对象的基础, 汇总整理出杭州市 VOCs 排放企业 3 518 家, 包括了印刷和记录媒介复制、化学原料和化学制品制造、金属制品、纺织、橡胶和塑料制品、家具制造、非金属矿物制品、皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋、造纸和纸制品、化学纤维制造、汽车制造等 30 多个行业.

1.2 研究区域

研究区域为杭州市全域, 包括上城区、下城区、江干区、拱墅区、西湖区、滨江区、下沙经济技术开发区(经开区)、之江旅游度假区(之江)、大江东产业集聚区(大江东)、萧山区、余杭区、富阳区、桐庐县、淳安县、临安市、建德市等 16 个区县(市), 市域面积约为 16 596 km², 具体见图 1.

1.3 调查方法

建立工业源 VOCs 排放清单的重点是获取各工业企业的活动水平. 本次调查完全采取自下而上的方式, 对每一家企业逐一进行调查, 采取的方式包括现场培训填表、企业网上填表、专人实地调查等, 全面调查了企业基本信息、原辅材料与产品信



图 1 研究区域示意

Fig. 1 Research domain

息、生产工艺过程、溶剂回收和废弃情况、燃料消耗量、储罐、废气排放治理设施等情况。为确保采集的活动水平数据真实可靠，充分发挥属地环保、专家、科研人员的专长，对企业填报的数据进行了多级审核、反馈和修改，以提高工业企业活动水平数据的可靠性。

1.4 估算方法

本研究针对 VOCs 不同产生源分别采用物料衡算法和排放系数法(表 1)进行估算。

(1)溶剂使用源采用物料衡算法估算，计算见式(1)。

$$E_{VOCs} = E_{总产生} - E_{回收回用} - E_{进入固废危废} -$$

$$E_{进入废水} - E_{废气处理设施削减} + E_{污水处理过程产生} \quad (1)$$

式中， E_{VOCs} 为生产过程或溶剂使用的 VOCs 排放量， $t \cdot a^{-1}$ ； $E_{总产生}$ 为根据含 VOCs 原辅料的年使用量和成分，产品及副产物的年产量和成分，以及原辅料的转化效率等资料，通过物料衡算进行估算， $t \cdot a^{-1}$ ； $E_{回收回用}$ 为生产过程或溶剂使用过程中回收回用的 VOCs 量， $t \cdot a^{-1}$ ； $E_{进入固废危废}$ 为固废危废中的 VOCs 量， $t \cdot a^{-1}$ ； $E_{进入废水}$ 为进入废水中的 VOCs 量， $t \cdot a^{-1}$ ； $E_{废气处理设施削减}$ 为废气处理设施的削减量，优先采用有处理装置前后浓度数据的监测报告，如没有监测数据，则根据同类型的废气处理工艺取平均值后进行估算，计算见式(2)， $t \cdot a^{-1}$ ；

表 1 VOCs 排放因子

Table 1 Emission factors of VOCs

行业/锅炉/炉窑	工艺/燃料类型	产品类型/燃烧方式	单位	排放因子 /kg·t ⁻¹	行业	工艺类型	产品类型	单位	排放因子 /kg·t ⁻¹
电厂	煤炭	层燃	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.03	农副产品加工	饲料加工	—	kg·t ⁻¹ (以产品计)	1
		室燃	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.03		植物油加工	—	kg·t ⁻¹ (以产品计)	4
		循环流化床	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.03		制糖	—	kg·t ⁻¹ (以产品计)	0.195
		— ¹⁾	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.09		焙烤食品	面包	kg·t ⁻¹ (以产品计)	4.714
	污泥等垃圾焚烧	—	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.01		制造	饼干等	kg·t ⁻¹ (以产品计)	1
锅炉	煤炭	层燃	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.03	食品制造	饮料制造	酒精	kg·t ⁻¹ (以产品计)	32.105
		室燃	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.03			白酒	kg·t ⁻¹ (以产品计)	14.447
		循环流化床	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.03		红酒	kg·t ⁻¹ (以产品计)	3.853	
		茶浴炉	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	2.09		啤酒	kg·t ⁻¹ (以产品计)	0.25	
	天然气	—	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.09		胶合板	—	kg·m ⁻³ (以产品计)	0.249
水泥窑	煤炭	层燃	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.03	刨花板	—	kg·t ⁻¹ (以产品计)	0.263	
		室燃	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.03	碎木板	—	kg·t ⁻¹ (以产品计)	0.921	
		循环流化床	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.03	木材加工	纤维板	—	kg·t ⁻¹ (以产品计)	1.018
		—	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.09	其他木制品	—	kg·t ⁻¹ (以产品计)	0.1	
	天然气	—	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.09	—	—	kg·t ⁻¹ (以焦炭产量计)	0.073	
砖瓦窑	燃煤	—	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.012	炼焦	有机化学原料	平均	kg·t ⁻¹ (以产品计)	17.61
	燃生物质	—	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.09		肥料	合成氨	kg·t ⁻¹ (以产品计)	4.72
	燃天然气	—	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.012		农药	—	kg·m ⁻³ (以产品计)	0.001
烧结炉	—	—	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.1	涂料油墨	溶剂型涂料	—	kg·t ⁻¹ (以产品计)	15
高炉	—	—	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.001		清漆	—	kg·t ⁻¹ (以产品计)	46.25
转炉	—	—	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.008		水性涂料	—	kg·t ⁻¹ (以产品计)	3
冲天炉	—	—	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.09		油性油墨	—	kg·t ⁻¹ (以产品计)	75
电炉	—	—	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.09		矿物油墨	—	kg·t ⁻¹ (以产品计)	20
橡胶和塑料制品业	反射炉	—	—	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.09	水性油墨	—	kg·t ⁻¹ (以产品计)	15
		—	—	kg·t ⁻¹ (以燃料计)	0.09	化学原料和化学制品制造业	合成树脂	平均	kg·t ⁻¹ (以产品计)	5.77
	橡胶制品	轮胎	kg·个 ⁻¹ (以产品计)	0.33	合成橡胶	平均	kg·t ⁻¹ (以产品计)	4.184	
		橡胶制品	kg·t ⁻¹ (以产品计)	6.641	合成纤维单体	平均	kg·t ⁻¹ (以产品计)	48.79	
		塑料制品	kg·t ⁻¹ (以产品计)	0.539	粘合剂	—	kg·t ⁻¹ (以产品计)	227	
非金属矿物制品业	塑料制品	PU 革	kg·t ⁻¹ (以产品计)	147	专用化学品	促进剂	kg·t ⁻¹ (以产品计)	1.872	
	—	PVC 革	kg·t ⁻¹ (以产品计)	10.2	炭黑	—	kg·t ⁻¹ (以产品计)	26.203	
	—	砖瓦	kg·t ⁻¹ (以产品计)	0.015	日用化学品	活性剂	kg·t ⁻¹ (以产品计)	0.983	
黑色金属冶炼和压延加工业	砖瓦等建材	—	kg·t ⁻¹ (以产品计)	0.015	香料	—	kg·t ⁻¹ (以产品计)	22.89	
	沥青制品	kg·t ⁻¹ (以产品计)	0.016	纤维制造	—	kg·t ⁻¹ (以产品计)	42.312		
	玻璃及其制品	玻璃纤维	kg·t ⁻¹ (以原料计)	0.15	纤维加工	—	kg·t ⁻¹ (以产品计)	0.36	
造纸	陶瓷及其制品	—	kg·t ⁻¹ (以产品计)	29	石油炼制	—	—	kg·t ⁻¹ (以原油加工量计)	1.82
	—	—	—	—		—	—	—	—
造纸	纸浆制造	—	kg·t ⁻¹ (以产品计)	0.66					
	—	—	—	—					

1)“—”表示排放因子不细分工艺、燃料类型、产品类型或燃烧方式

$E_{\text{污水处理过程产生}}$:企业自备的废水处理设施在废水处理过程中产生的 VOCs 量, $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$.

$$E_{\text{废气处理设施削减}} = E_{\text{生产工段产生量}} \times \eta_{\text{收集}} \times \eta_{\text{去除}} \quad (2)$$

式中, $E_{\text{生产工段产生量}}$ 为生产工段产生的 VOCs 量, $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$; $\eta_{\text{收集}}$ 为 VOCs 的收集效率, %; $\eta_{\text{去除}}$ 为废气处理设施 VOCs 的去除效率, %.

(2) 工艺过程源和固定燃烧源采用排放系数法估算.

对生产过程中存在发生化学变化的工艺过程源, 如石化、化工、橡胶、塑料等 VOCs 排放源, 本研究主要采用排放系数法进行计算. 此外, 对电厂和锅炉等固定燃烧源的 VOCs 排放量计算方法同样采用排放系数法, 本研究对火电厂各类机组 VOCs 产生量采用式(3)计算:

$$Q_p = \sum_{i=1}^m S_i F_i \quad (3)$$

表 2 工业源 VOCs 治理设施情况汇总

Table 2 After-treatment equipment information of industrial VOCs

主要行业	VOCs 末端治理设施及比例(以企业数量计)/%											
	焚烧	直接催化燃烧	活性炭吸附催化燃烧	活性炭吸附冷凝回收	低温等离子	光催化氧化	水/酸/碱吸收	静电	生物法	一次性活性炭	其它方法	无治理
印刷和记录媒介复制	2.33	2.33	1.55	0.78	3.10	1.55	1.55	0.78	0.78	17.83	0.78	66.67
化学原料和化学制品制造	5.16	0.00	0.00	5.81	2.58	5.16	34.19	0.65	1.94	23.23	0.65	20.65
金属制品	1.54	6.15	10.77	0.00	7.69	0.00	7.69	0.00	0.00	27.69	0.00	38.46
纺织	2.35	0.00	0.59	2.35	0.59	2.35	20.00	46.47	0.59	8.24	0.00	16.47
橡胶和塑料制品	0.00	1.40	2.10	0.00	0.90	8.00	9.70	1.31	1.39	8.00	0.00	67.30
家具制造	0.00	0.00	0.00	0.00	3.10	0.00	47.60	0.00	0.00	22.30	0.00	27.10
非金属矿物制品	11.11	11.11	0.00	0.00	11.11	0.00	0.00	22.22	0.00	0.00	0.00	44.44
皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.94	0.00	0.00	17.65	0.00	79.41
造纸和纸制品	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.55	0.00	4.55	0.00	0.00	90.91
化学纤维制造	12.77	0.00	0.00	2.13	6.38	2.13	23.40	10.64	0.00	17.02	0.00	25.53
汽车制造	30.43	0.00	8.70	0.00	8.70	0.00	8.70	0.00	0.00	30.43	0.00	13.04
通用设备制造	0.00	0.00	0.00	0.00	12.90	0.00	12.90	3.23	0.00	32.26	0.00	38.71
文教、工美、体育和娱乐用品制造	0.00	0.00	0.00	0.00	2.21	0.00	40.44	0.00	0.00	38.97	2.21	16.18
黑色金属冶炼和压延加工	0.00	0.00	50.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	50.00
计算机、通信和其他电子设备制造	0.00	1.30	1.30	0.00	0.00	1.30	2.60	0.00	3.90	5.19	0.00	84.42
专用设备制造	0.00	0.00	7.69	0.00	23.08	0.00	7.69	0.00	0.00	46.15	0.00	15.38
有色金属冶炼和压延加工	0.00	3.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	96.43

2 结果与讨论

2.1 2015 年杭州市工业源 VOCs 排放清单

根据调查和估算, 杭州市 3 518 家的工业源 VOCs 排放清单见表 3. 研究表明, 杭州市工业源 VOCs 排放总量为 36 839.5 t, 其中印刷和记录媒介复制、化学原料和化学制品制造、金属制品、纺织、橡胶和塑料制品行业是杭州市工业源 VOCs 排

式中, Q_p 为 VOCs 产生量, $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$; S_i 为燃料使用量, $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$; F_i 为基于单位燃料使用量的排放系数, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (以 VOCs/燃料计).

(3) VOCs 排放系数的来源

本研究采用的 VOCs 排放系数主要来自我国人为源挥发性有机物排放清单技术指南、美国 AP-42 排放系数集、台湾《公私场所固定污染源申报空气污染防制费之挥发性有机物之行业制程排放系数、操作单元(含设备组件)排放系数、控制效率及其他计量规定》等相关资料, 汇总形成了工业源 VOCs 排放系数(表 1).

(4) 末端治理措施调查

为掌握各企业 VOCs 治理情况, 本研究对工业源 VOCs 企业采用的末端治理设施的情况进行了调查和分析, 其中主要行业的工业源 VOCs 治理设施的调查统计结果见表 2.

放量最大的 5 个行业, 排放量分别为 5 122.2、5 078.3、4 922.2、4 116.4、3 459.8 t. 排放量前五的行业 VOCs 合计排放量占全市工业源 VOCs 的 61.6%, 前十个行业排放量占到全市排放量的 85%. 家具制造、非金属矿物制品、皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋 3 个行业 VOCs 排放量占比在 5% 以上, 其余 20 多个行业的占比均在 5% 以下, 排放量相对较小.

表 3 工业源 VOCs 排放源调查结果
Table 3 Industrial VOCs emissions inventory in Hangzhou

行业	企业数量/家	排放量/t	占总排放量比例/%	单位企业排放量 /t·家 ⁻¹	单位产值排放量 /t·亿元 ⁻¹
印刷和记录媒介复制	459	5 122.2	13.90	11.2	85.35
化学原料和化学制品制造	323	5 078.3	13.79	15.7	5.19
金属制品	133	4 922.4	13.36	37.0	11.71
纺织	375	4 116.4	11.17	11.0	4.46
橡胶和塑料制品	235	3 459.8	9.39	14.7	5.52
家具制造	331	2 030.3	5.51	6.1	13.33
非金属矿物制品	209	2 016.1	5.47	9.6	4.39
皮革、毛皮、羽毛及其制品和制鞋	137	1 978.4	5.37	14.4	12.42
造纸和纸制品	174	1 748.6	4.75	10.0	4.94
化学纤维制造	48	1 006.0	2.73	21.0	1.73
汽车制造	29	713.0	1.94	24.6	1.06
通用设备制造	90	700.1	1.90	7.8	0.80
文教、工美、体育和娱乐用品制造	110	685.6	1.86	6.2	4.24
黑色金属冶炼和压延加工	44	553.1	1.50	12.6	2.75
计算机、通信和其他电子设备制造	90	379.7	1.03	4.2	0.33
专用设备制造	28	330.0	0.90	11.8	1.84
有色金属冶炼和压延加工	28	321.7	0.87	11.5	0.74
电力、热力生产和供应	36	315.5	0.86	8.8	0.46
电气机械和器材制造	31	263.5	0.72	8.5	0.24
酒、饮料和精制茶制造	36	210.4	0.57	5.8	0.99
医药制造	30	198.1	0.54	6.6	0.55
木材加工和木、竹、藤、棕、草制品	120	159.6	0.43	1.3	6.07
机动车、电子产品和日用产品修理	50	132.0	0.36	2.6	— ¹⁾
铁路、船舶、航空航天和其他运输设备制造	11	120.4	0.33	10.9	2.63
农副食品加工	170	76.3	0.21	0.4	0.57
生态保护和环境治理	4	71.0	0.19	17.7	—
食品制造	73	63.3	0.17	0.9	0.33
仪器仪表制造	1	27.6	0.07	27.6	0.12
废弃资源综合利用	3	11.9	0.03	4.0	0.11
烟草制品	1	5.9	0.02	5.9	0.02
纺织服装、服饰	29	5.7	0.02	0.2	0.02
其它行业	80	16.9	0.05	0.2	—
合计/平均	3 518	36 839.5	100	10.5	—

1) “—”表示文章中因缺少该行业产值而没有相关数据

本研究表明, 杭州市工业源 VOCs 平均每家企业排放量约为 10.5 t, 但各行业平均每家企业的排放量差异明显, 在全市平均值以上的行业有 14 个, 具体结果见图 2。其中金属制品行业的单位企业排放量最大, 平均每家企业的排放量达到 37 t, 其次分别是仪器仪表制造、汽车制造、化学纤维制造等行业。印刷和记录媒介复制行业的 VOCs 排放总量最大, 但平均排放量却只有 11.2 t, 考虑到该行业的企业数量达到 459 家, 表明该行业以中小企业为主, 企业数量多、单个企业排放量小, 呈现多小散的特征, 对 VOCs 污染治理和环境管理工作带来很大难度。

2.2 工业 VOCs 区域排放特征

2.2.1 不同区域的 VOCs 排放量

研究按区域对工业源 VOCs 排放量进行了统计

分析, 结果见图 3, 排放总量最大是萧山区(0.89 万 t), 其次是富阳区(0.74 万 t)和大江东产业集聚区(0.59 万 t), 这些地区都是杭州市工业制造业相对发达的区域, 工业企业集中度相对较高。杭州主城区所辖的上城区、下城区、西湖区、江干区、拱墅区和滨江区, 以及西南部的淳安县, VOCs 排放总量均较少。主城区由于城市化进程的加快, 工业用地实现退二进三、腾笼换鸟等举措, 大量工业企业迁出城区, 因此中心城区的几个区域的工业 VOCs 排放量大大降低。位于杭州市西南的淳安县以旅游业为主, 工业企业数量较少, 因此工业 VOCs 排放量也相应较小。

2.2.2 不同区域 VOCs 重点行业分担率

图 4 是杭州市不同区域工业源 VOCs 排放的构成情况, 表 4 为各区域工业源 VOCs 主要排放行业

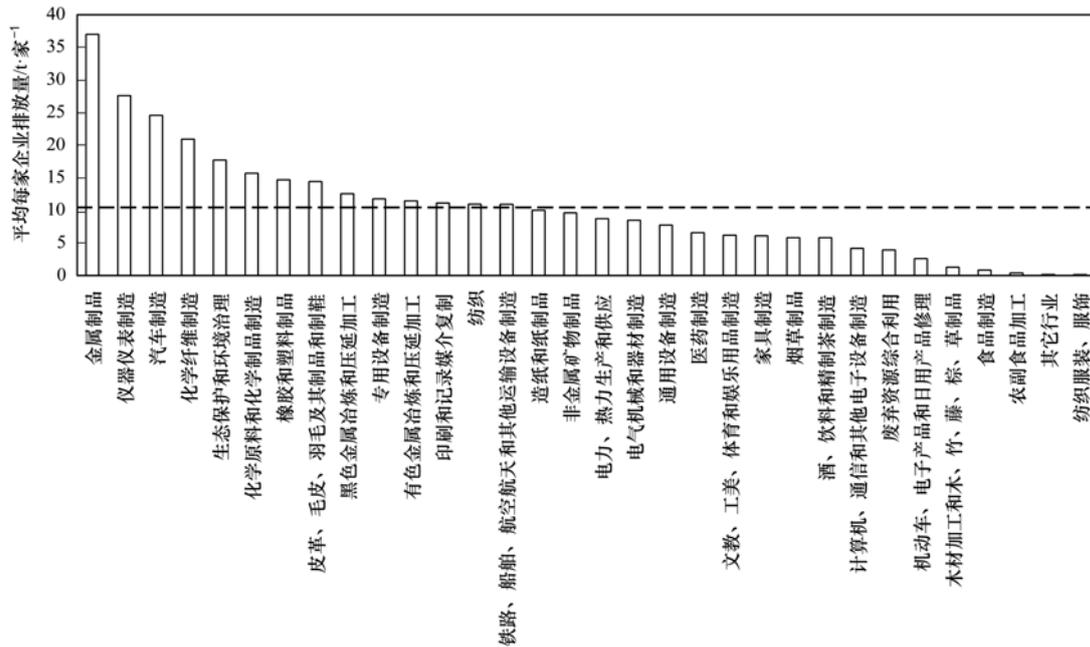


图 2 杭州市各行业 VOCs 平均排放量

Fig. 2 Average industrial VOCs emission per industry in Hangzhou

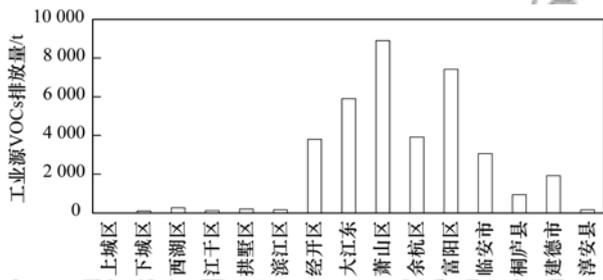


图 3 各区域工业源 VOCs 排放量

Fig. 3 Industrial VOCs emissions in each region of Hangzhou

及其分担率。杭州市的西湖区、江干区、经开区和临安市的工业源 VOCs 首要来源为印刷和记录媒介

复制行业(28.9%~80.1%),大江东和建德市两个地区的首要来源为化学原料和化学制品制造业(51.3%、29.5%)。杭州市主城区的5个区(上城区、下城区、西湖区、江干区、拱墅区)VOCs 排放行业集中度相对较高,前两位的行业排放占比都在83%以上,而萧山区和余杭区的VOCs 排放行业集中度低,排放量前两位的行业分担率仅占38.4%、40.0%,涉及VOCs 排放的行业多,控制难度相应增加。

2.3 工业源 VOCs 排放强度

2016 年杭州统计年鉴的工业总产值中未单列

表 4 杭州市各区域工业源 VOCs 主要来源及分担率

Table 4 Main sources and contributions to industrial VOCs emissions in each region of Hangzhou

区域	首要来源		次要来源	
	行业	分担率/%	行业	分担率/%
上城区	机动车、电子产品和日用产品修理	80.1	印刷和记录媒介复制	19.9
下城区	通用设备制造	66.0	印刷和记录媒介复制	31.7
西湖区	印刷和记录媒介复制	53.1	金属制品	35.5
江干区	印刷和记录媒介复制	64.3	医药制造	19.6
拱墅区	电力、热力生产和供应	47.2	化学原料和化学制品制造	39.2
滨江区	电气机械和器材制造	30.2	金属制品	27.9
经开区	印刷和记录媒介复制	65.5	橡胶和塑料制品	14.0
大江东	化学原料和化学制品制造	51.3	纺织	22.4
萧山区	家具制造	20.0	纺织	18.4
余杭区	纺织	22.5	印刷和记录媒介复制	17.5
富阳区	金属制品	48.5	造纸和纸制品	12.5
临安市	印刷和记录媒介复制	28.9	造纸和纸制品	23.3
桐庐县	文教、工美、体育和娱乐用品制造	42.0	非金属矿物制品	20.3
建德市	化学原料和化学制品制造	29.5	非金属矿物制品	27.6
淳安县	酒、饮料和精制茶制造	45.3	纺织	21.8

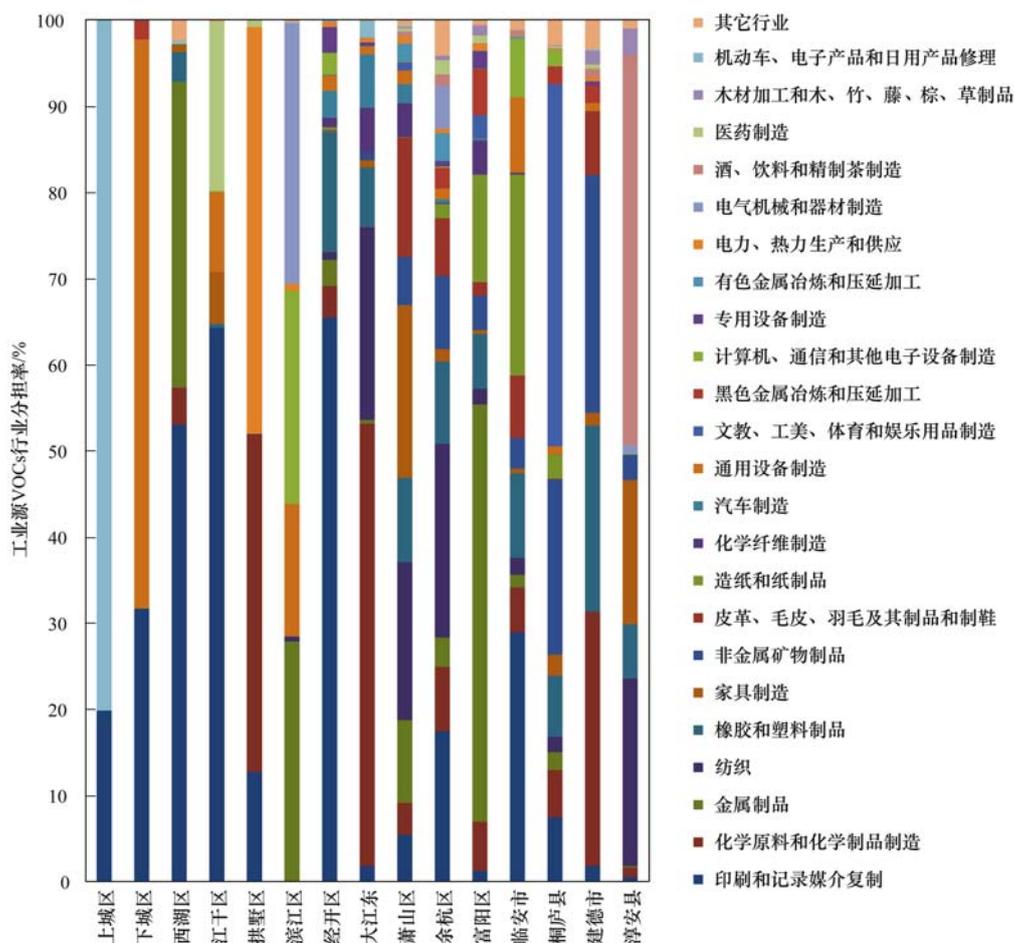


图4 各区域工业源 VOCs 行业分担率

Fig. 4 Contributions to Industrial VOCs emissions by industry categories in each region of Hangzhou

主城区、滨江区、经开区和大江东等区域的工业总产值，因此本文在研究区域 VOCs 排放强度时，上城区、下城区、西湖区、江干区、拱墅区、滨江区、经开区合并为市区，大江东并入萧山区分别予以合并计算。图5为杭州市各区域工业源 VOCs 排放强度。其中杭州市区的工业源 VOCs 排放强度最小，仅为 $0.44 \text{ t} \cdot \text{亿元}^{-1}$ 。排放强度最高的为富阳区，达到 $5.83 \text{ t} \cdot \text{亿元}^{-1}$ ，这与富阳当地产业结构仍以传统产业为主有关。排放强度其次的是建德市和临安市，分别为 $4.60 \text{ t} \cdot \text{亿元}^{-1}$ 和 $4.49 \text{ t} \cdot \text{亿元}^{-1}$ ，均为杭州市区的10倍以上。这些地区应通过产业结构升级实现工业产值增加的同时降低污染排放。

2.4 空间分布特征

基于每家工业企业的地理信息和 VOCs 排放量，对杭州市工业源 VOCs 排放量进行空间分配，具体结果见图6。杭州市工业源 VOCs 排放主要集中在杭州市东部的萧山区、大江东、富阳区、余杭区等工业企业较为密集的区域，杭州市西部区县主要为丘陵，企业数量相对较少。VOCs 排放量较大

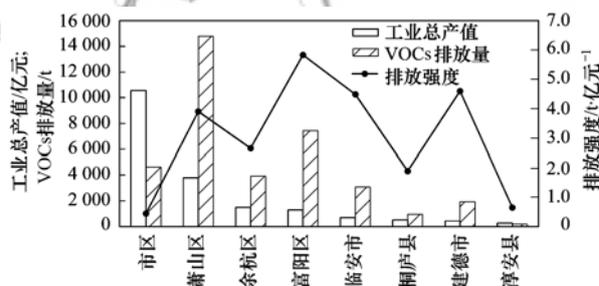


图5 各区域工业源 VOCs 排放强度

Fig. 5 Emission intensity of industrial VOCs in each region of Hangzhou

的工业企业主要分布在经开区、大江东、萧山区等工业发达地区。从图中企业的排放量看，杭州市工业源 VOCs 排放企业呈明显的低小散特征。从分布区域上看，杭州市的 VOCs 排放企业分布广，零散分布的数量多。

2.5 和其他城市工业 VOCs 的比较

将研究结果与相关文献进行比较可知，天津、广州、长沙、宁波、苏州等城市的工业源 VOCs 主要来源各不相同，主要与当地的产业结构和经济发

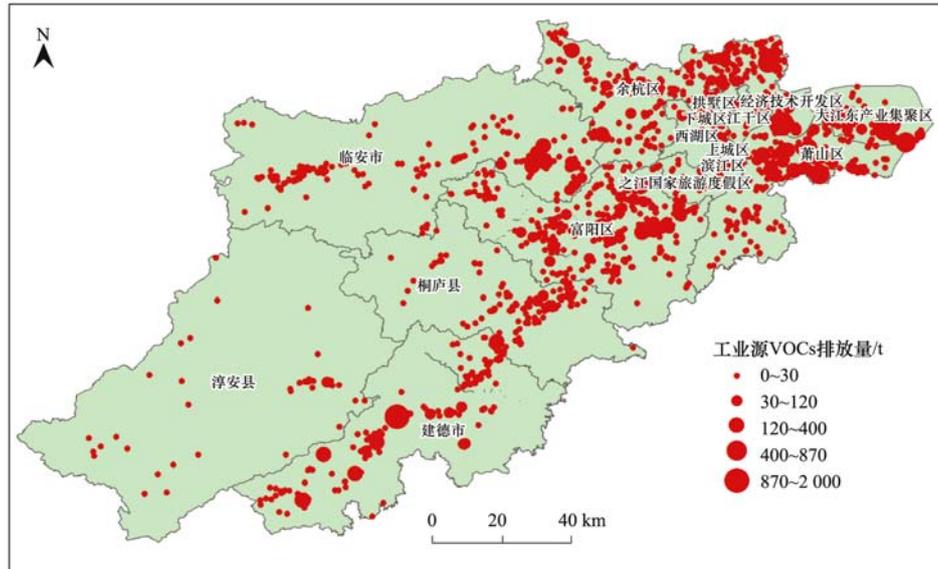


图6 杭州市工业源 VOCs 排放的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of industrial VOCs emissions in Hangzhou

展水平相关。工业源 VOCs 排放量最大的行业，天津市为石油炼制与石油加工行业，其次是油品储运、合成材料行业、黑色和有色金属冶炼、火力发电^[24]；广州市为石油炼制与石油化工、油品储运、交通运输设备制造与维修、有机化工、建筑装饰^[27]；苏州市排放量居前的行业为金属制品制造、通用设备及专用设备制造、机械制造、塑料制品制造、轮胎制造等行业^[25]；宁波市为化学原料及化学制品制造业、石油加工业、饮料制造业、交通运输设备制造、电力热力的生产和供应业^[17]；长沙市则主要来自汽车制造、家电涂层及印刷等行业^[23]。虽然各城市工业源 VOCs 排放居前的行业各不相同，但化学原料及化学制品制造、印刷、金属制品等行业出现频率较高，是 VOCs 排放的重点行业。在工业源 VOCs 排放量行业占比方面，天津市前 5 个行业占工业源 VOCs 总量的 63.4%^[24]，广州市 VOCs 前 12 位污染源占总量的 87.3%^[27]，苏州市前 6 个行业排放量占总排放量的 80% 以上^[25]，与前文中杭州市行业排放量的特征基本相同。

2.6 不确定性分析

在本文的工业源 VOCs 排放估算过程中，研究对象主要通过对杭州市工业企业的筛选，确定杭州市 30 多个典型 VOCs 排放行业 3 518 家企业为调查对象，这些企业的 VOCs 排放基本能够代表该地区的工业源 VOCs 排放水平。另外，VOCs 排放估算所需的企业生产工艺特征、原辅材料和产品、废气排放治理设施等关键参数主要通过网上填报、部分现

场核实的方式获得，在目前环保监管日趋严格的背景下，获取的数据较为可靠，基本能够代表企业的总体情况，该部分对清单估算的不确定性影响相对较小。

采用蒙特卡罗模拟对清单的不确定性进行定量分析，结果显示：杭州市工业源的 VOCs 排放估算在 95% 置信区间不确定范围为 $[-28\%, 67\%]$ ，其不确定性范围属正常情况，尽管本研究试图通过网上填报的方式获取企业所有使用的含 VOCs 产品 VOCs 含量信息，但由于类别繁多，各类别 VOCs 含量差异较大，尚未获取部分企业、部分产品的含量信息，在估算过程中通过参考同类型企业以及经验数据进行估算，给估算结果带来了一定的不确定性；另外，如石化、化工、橡胶、塑料等行业的 VOCs 排放主要根据排放系数法进行估算，排放系数在参考企业的监测数据的基础上，主要采用国内外已有研究成果，这对估算结果带来了一定的不确定性。对比之前清单研究结果，巍巍等^[29]报道的中国人源 VOCs 排放清单的不确定性和余宇帆等^[12]报道的珠三角地区重点 VOCs 排放行业的不确定性相比，本研究在基于企业的 VOCs 排放清单估算方面有了一定提高和改善。

总体而言，本研究工业源 VOCs 排放清单的不确定性主要来源有：一是获取的活动水平数据，在调查工业企业的过程中，由于各企业填表人对生产工艺和环保设施无法做到同时熟悉，尽管采取了多轮次的审核和补充调查，仍无法得到完全准确的活

动水平数据。此外,由于 VOCs 治理设施和环保管理水平的参差不齐,在设施去除效率、收集效率和运行时间上无法得到准确数据,也增加了 VOCs 排放清单的不确定性;二是可选用的排放系数,本研究对固定燃烧源采用排放因子进行估算,尽管大部分排放因子优先采用国家排放清单编制指南的数据,但仍然有大量系数来源于美国和欧盟的研究成果,与我国尤其是杭州市的实际情况存在一定的差异,在一定程度上增加了估算结果的不确定性;三是选取的工业企业,尽管本研究通过各种途径尽可能获取所有杭州市工业企业名单,并通过行业排放特征的方法判断可能的 VOCs 排放企业,并将其纳入至调查中,调查企业多达 3 518 家工业企业,涉及了印刷和记录媒介复制、化学原料和化学制品制造、金属制品、纺织等 30 多个行业,但仍有低小散企业未在本次调查的名单中,若将本研究的估算结果等同于杭州市工业源的 VOCs 排放总量,亦会存在一定的不确定性。

3 结论

(1)研究表明,2015 年杭州市工业源 VOCs 排放总量约为 3.7 万 t,其中印刷和记录媒介复制、化学原料和化学制品制造、金属制品、纺织、橡胶和塑料制品行业是最主要的 5 个行业,占工业总量的 61.69%。

(2)比较各行业排放水平可以发现,金属制品行业的单位企业排放量最大,平均每家企业的排放量达到 37 t。印刷和记录媒介复制行业的平均排放量仅 11.2 t,该行业的企业数量多、单个企业排放量小,呈现出明显的多小散的特征。

(3)按地区对工业源 VOCs 排放特征进行分析,排放总量最大是萧山区(0.89 万 t),其次是富阳区(0.74 万 t)和大江东产业集聚区(0.59 万 t)。杭州主城区以及西南部的淳安县,VOCs 排放总量均较少,结论与杭州市各区域经济社会发展水平高度吻合。

(4)实地调查发现,杭州市工业源 VOCs 排放呈现分布广且零散,集中度低,呈明显的低小散特征。其中,纸制品、电子、皮革、印刷、橡胶和塑料制品等行业 VOCs 治理设施覆盖率低,催化燃烧等高效净化技术应用率仍相对较低。

参考文献:

[1] De Gouw J, Jimenez J L. Organic aerosols in the earth's atmosphere[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**

(20): 7614-7618.

- [2] Zhen J Y, Shao M, Che W W, *et al.* Speciated VOC emission inventory and spatial patterns of ozone formation potential in the Pearl River Delta, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(22): 8580-8586.
- [3] Meng Z, Dabdub D, Seinfeld J H. Chemical coupling between atmospheric ozone and particulate matter [J]. *Science*, 1997, **277**(5322): 116-119.
- [4] 王雪松, 李金龙. 人为源排放 VOC 对北京地区臭氧生成的贡献[J]. *中国环境科学*, 2002, **22**(6): 501-505.
Wang X S, Li J L. The contribution of anthropogenic hydrocarbons to ozone formation in Beijing areas [J]. *China Environmental Science*, 2002, **22**(6): 501-505.
- [5] 王红丽. 上海市大气挥发性有机物化学消耗与臭氧生成的关系[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3159-3167.
Wang H L. Chemical loss of volatile organic compounds and its impact on the formation of ozone in Shanghai [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3159-3167.
- [6] 邹宇, 邓雪娇, 李菲, 等. 广州番禺大气成分站复合污染过程 VOCs 对 O₃ 与 SOA 的生成潜势[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2246-2255.
Zou Y, Deng X J, Li F, *et al.* Effect of VOCs on O₃ and SOA formation potential during the combined pollution process in Guangzhou Panyu atmospheric composition station [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2246-2255.
- [7] 宫庆超, 牛志广, 陈彦熹, 等. 环境空气中挥发性有机物的健康风险评估研究进展[J]. *安全与环境学报*, 2012, **12**(3): 84-88.
Gong Q C, Niu Z G, Chen Y X, *et al.* Research advances review on the health-hazard assessment of volatile organic compounds in ambient atmosphere [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2012, **12**(3): 84-88.
- [8] U. S. Environmental Protection Agency. The Clean Air Act Amendments of 1990 [EB/OL]. <https://www.epa.gov/clean-air-act-overview>, 2016.
- [9] 杨一鸣, 崔积山, 童莉, 等. 美国 VOCs 定义演变历程对我国 VOCs 环境管控的启示[J]. *环境科学研究*, 2017, **30**(3): 368-379.
Yang Y M, Cui J S, Tong L, *et al.* Evolution of the definition of volatile organic compounds in the United States and its implications for China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, **30**(3): 368-379.
- [10] 梁小明, 张嘉妮, 陈小方, 等. 我国人为源挥发性有机物反应性排放清单[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 845-854.
Liang X M, Zhang J N, Chen X F, *et al.* Reactivity-based anthropogenic VOCs emission inventory in China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 845-854.
- [11] Huang C, Chen C H, Li L, *et al.* Emission inventory of anthropogenic air pollutants and VOC species in the Yangtze River Delta region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(9): 4105-4120.
- [12] 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.
- [13] 尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 等. 长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响[J]. 环境科学, 2017, **38**(2): 461-468.
You X Y, Luo D T, Liu Z, *et al.* Inventory and environmental impact of VOCs emission from anthropogenic source in Chang-Zhu-Tan region [J]. Environmental Science, 2017, **38**(2): 461-468.
- [14] 闫雨龙, 彭林. 山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献[J]. 环境科学, 2016, **37**(11): 4086-4093.
Yan Y L, Peng L. Emission inventory of anthropogenic VOCs and its contribution to ozone formation in Shanxi Province [J]. Environmental Science, 2016, **37**(11): 4086-4093.
- [15] 潘月云, 李楠, 郑君瑜, 等. 广东省人为源大气污染物排放清单及特征研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(9): 2655-2669.
Pan Y Y, Li N, Zheng J Y, *et al.* Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in Guangdong Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(9): 2655-2669.
- [16] 聂磊, 李靖, 王敏燕, 等. 城市尺度 VOCs 污染源排放清单编制方法的构建[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(S1): 6-11.
Nie L, Li J, Wang M Y, *et al.* Establishment of emission inventory compiling methods for VOCs pollutant sources in city scale [J]. China Environmental Science, 2011, **31**(S1): 6-11.
- [17] 李璇, 王雪松, 刘中, 等. 宁波人为源 VOC 清单及重点工业行业贡献分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2497-2502.
Li X, Wang X S, Liu Z, *et al.* Anthropogenic VOC emission inventory and contribution from industrial sources in Ningbo [J]. Environmental Science, 2014, **35**(7): 2497-2502.
- [18] 卢清, 鲁君, 黄成, 等. 上海市青浦区工业源 VOCs 排放清单调查研究[J]. 上海环境科学, 2015, **34**(3): 108-112.
Lu Q, Lu J, Huang C, *et al.* Research on industrial VOCs emission inventory in Qingpu district of Shanghai [J]. Shanghai Environmental Sciences, 2015, **34**(3): 108-112.
- [19] Dumanoglu Y, Kara M, Altioek H, *et al.* Spatial and seasonal variation and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in a heavily industrialized region [J]. Atmospheric Environment, 2014, **98**: 168-178.
- [20] Wei W, Wang S X, Hao J M, *et al.* Projection of anthropogenic volatile organic compounds (VOCs) emissions in China for the period 2010-2020 [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(38): 6863-6871.
- [21] 黄成, 陈长虹, 李莉, 等. 长江三角洲地区人为源大气污染物排放特征研究[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(9): 1858-1871.
Huang C, Chen C H, Li L, *et al.* Anthropogenic air pollutant emission characteristics in the Yangtze River Delta region, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, **31**(9): 1858-1871.
- [22] Fu X, Wang S X, Zhao B, *et al.* Emission inventory of primary pollutants and chemical speciation in 2010 for the Yangtze River Delta region, China [J]. Atmospheric Environment, 2013, **70**: 39-50.
- [23] 陈军, 李楠, 谭菊, 等. 长沙市人为源大气污染物排放清单及特征研究[J]. 环境科学学报, 2017, **37**(3): 833-843.
Chen J, Li N, Tan J, *et al.* Emission inventory and characteristics of anthropogenic air pollutant sources in Changsha [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, **37**(3): 833-843.
- [24] 刘佳泓, 易晓娟, 武丹. 天津市人为源挥发性有机物排放特征研究[J]. 环境与可持续发展, 2013, **38**(2): 80-82.
Liu J H, Yi X J, Wu D. Characteristic of anthropogenic source volatile organic compounds emission in Tianjin [J]. Environment and Sustainable Development, 2013, **38**(2): 80-82.
- [25] 刘松华, 周静. 苏州市人为源挥发性有机物排放清单研究[J]. 环境与可持续发展, 2015, **40**(1): 163-165.
Liu S H, Zhou J. Research on the anthropogenic source VOCs emission inventory of Suzhou City [J]. Environment and Sustainable Development, 2015, **40**(1): 163-165.
- [26] 王铁宇, 李奇锋, 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, Lü Y L. Characteristics and countermeasures of volatile organic compounds (VOCs) emission in China [J]. Environmental Science, 2013, **34**(12): 4756-4763.
- [27] 赵建国, 罗红成, 黄碧纯, 等. 广州市工业挥发性有机物排放特征研究[J]. 环境污染与防治, 2012, **34**(2): 96-101.
- [28] 钟流举, 郑君瑜, 雷国强, 等. 大气污染物排放源清单不确定性定量分析方法及案例研究[J]. 环境科学研究, 2007, **20**(4): 15-20.
Zhong L J, Zheng J Y, Lei G Q, *et al.* Quantitative uncertainty analysis in air pollutant emission inventories; methodology and case study [J]. Research of Environmental Sciences, 2007, **20**(4): 15-20.
- [29] 魏巍, 王书肖, 郝吉明. 中国人为源 VOC 排放清单不确定性研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 305-312.
Wei W, Wang S X, Hao J M. Uncertainty analysis of emission inventory for volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. Environmental Science, 2011, **32**(2): 305-312.

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 Chaoju 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)