

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.11

第40卷 第11期

目次

2018年中国长江三角洲地区气溶胶的垂直分布特征	沈吉, 曹念文(4743)
2018年石家庄市秋冬季典型霾污染特征	宿文康, 鲍晓磊, 倪爽英, 赵卫凤(4755)
武汉市PM _{2.5} 化学组分时空分布及聚类分析	张会涛, 田瑛泽, 刘保双, 杨佳美, 郁佳, 官攀, 吴建会, 张裕芬(4764)
郑州市某生活区大气PM _{2.5} 中重金属污染特征及生态、健康风险评估	何瑞东, 张轶舜, 陈永阳, 靳孟洁, 韩士杰, 赵金帅, 张瑞芹, 燕启社(4774)
厦门市降水中金属元素含量分布特征及来源解析	王珊珊, 程奕枫, 颜金培, 胡恭任(4783)
2015~2017年上海郊区大气新粒子生成特征	霍俊涛, 王新宁, 段玉森, 伏晴艳, 陈冰怡(4791)
太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析	闫世明, 王雁, 郭伟, 李莹, 张逢生(4801)
东北区域空气质量时空分布特征及重度污染成因分析	陈卫卫, 刘阳, 吴雪伟, 鲍秋阳, 高枳亭, 张学磊, 赵红梅, 张世春, 修艾军, 程天海(4810)
艾比湖流域气溶胶光学厚度时空演变及影响因素	陈香月, 丁建丽, 王敬哲, 葛翔宇, 梁静(4824)
中国住宅室内BTEX浓度水平及其影响因素	侯贝贝, 尹奕卉, 裴晶晶, 刘俊杰(4833)
石家庄地区芳香族化合物的污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 刘永桥, 杨玉磊, 赵清, 陈曦, 徐静(4841)
郑州市碳素行业无组织VOCs排放特征分析及健康风险评估	张轶舜, 王佳, 韩士杰, 何瑞东, 陈永阳, 靳孟洁, 赵庆炎, 张瑞芹, 燕启社(4847)
典型化工行业有害VOCs排放清单及长三角地区应用	鲁君, 黄奕玮, 黄成(4856)
2013~2017年江苏省人为源氨排放清单的建立及特征	侯新红, 于兴娜, 沈丽, 赵睿东, 王国祯, 张毓秀(4862)
焦化厂建构筑物和生产设施表面PAHs的赋存特征及健康风险	赵一澍, 廖晓勇, 李尤, 罗俊鹏, 龚雪刚, 侯艺璇(4870)
中国南海流沙湾中雄激素、糖皮质激素和孕激素的污染特征及其生态风险评价	杨雷, 张晋娜, 徐敏, 彭涛, 史文俊, 石义静, 应光国(4879)
岩溶流域洪水过程水化学动态变化及影响因素	原雅琼, 孙平安, 苏钊, 于爽, 钟丽华, 何师意, 徐茜(4889)
长江水体常量和微量元素的来源、分布与向海输送	吴文涛, 冉祥滨, 李景喜, 王昊, 李梦露, 刘军, 臧家业(4900)
望虞河西岸河网重金属污染特征及生态风险评价	徐晨, 王沛芳, 陈娟, 袁秋生, 胡斌(4914)
不同雨强对太湖河网河道入湖营养盐负荷影响	陈洁, 朱广伟, 许海, 詹旭, 朱梦圆, 宣文怡, 黄亚文(4924)
合肥市十八联圩湿地表层沉积物营养盐与重金属分布及污染评价	陈娜, 许凡, 谢三桃, 郭天星, 彭久赞, 雷琦, 张玮, 王丽卿(4932)
三峡库区不同河段支流丰水期叶绿素a和营养盐的空间分布特征	杨凡, 杨正健, 纪道斌, 苏青青, 龙良红, 刘心愿, 王耀耀, 赵冲(4944)
丹江口水库氮磷内源释放对比	王志齐, 刘新星, 姚志宏, 姚伦广, 常跃, 刘卓初, 曹连海(4953)
不同沉水植物净水能力与植株体细菌群落组成相关性	李琳, 岳春雷, 张华, 李贺鹏, 杨乐, 王琚(4962)
纳米氧化锌粒径对人工湿地性能及微生物群落的影响	王森, 任伶, 刘琳琳, 李颖, 张振, 孔范龙(4971)
水生植物生物炭去除水体中氮磷性能	刘舒蕾, 彭慧君, 杨佳怡, 肖琳(4980)
MgO改性莲蓬壳生物炭的制备及其磷吸附特性	王盛华, 朱丹晨, 邵敬爱, 向家涛, 杨海平, 易娟, 张世红, 陈汉平(4987)
微塑料对短流程膜工艺中膜污染的影响	王博东, 薛文静, 吕永涛, 苗瑞, 马百文(4996)
基于铁锰泥的除硝颗粒吸附剂制备及其比较	曾辉平, 于亚萍, 吕赛赛, 李冬, 张杰(5002)
氯氧铁非均相催化过氧化氢降解罗丹明B	张少朋, 陈瑞, 白淑琴, 刘锐平(5009)
天津市规模化奶牛养殖场废水中典型抗生素处理效果及生态风险评估	陈乾, 赵润, 牟美睿, 白鸽, 史宏伟, 刘海学, 吴惠惠(5015)
废水处理系统中抗生素抗性基因分布特征	姚鹏城, 陈嘉瑜, 张永明, 温东辉, 陈吕军(5024)
全程自养脱氮耦合反硝化除磷的启动及稳定运行	印雯, 陈亚, 张钰, 徐乐中, 吴鹏, 刘文如(5032)
FeCl ₃ -生化耦合技术调控未知诱因的污泥膨胀	魏东洋, 肖才林, 周雯, 李睿华, 曹茜(5040)
污泥龄对除磷亚硝化颗粒系统的影响	李冬, 刘博, 王文琪, 曹美忠, 李帅, 张杰(5048)
厌氧氨氧化耦合反硝化工艺的启动及微生物群落变化特征	宋壮壮, 吕爽, 刘哲, 时兴东, 潘傲, 张智(5057)
基质暴露水平对ANAMMOX微生物活性及生物量的影响	陈方敏, 高佳琦, 黄勇, 胡羽婷, 李祥, 顾澄伟, 谈新伟, 殷记强, 方文桦, 倪敏(5066)
太浦河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析	李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 朱永青, 彭月, 王凯, 李士俊(5073)
土壤重金属污染风险筛选值划分方法:以Cd为例	王锐, 张风雷, 徐姝姝, 张永文(5082)
半壁山金矿矿业活动区砷赋存的矿物特征及其对农田土壤砷累积的影响	温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 李鸣凤(5090)
土壤调理剂对镉污染稻田修复效果	周利军, 武琳, 林小兵, 王惠明, 刘晖, 张鸿燕, 胡敏, 石利萍, 张云, 黄欠如(5098)
改性蒙脱土对稻田土壤甲基汞的阻控修复	韩怡新, 何天容, 王祖波(5107)
铈锰改性生物炭对土壤As的固定效应	梁婷, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧(5114)
温和预氧化提高后续生物修复石油污染土壤	徐金兰, 王慧芳, 王荣, 章秋菊, 王杰(5124)
重金属污染农田生菜根际重金属固定细菌群落组成及其阻控效应	王铁军, 苏楠楠, 雷鹏, 邱明洋, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉(5133)
双氰胺和3,4-二甲吡唑磷酸盐对蔬菜种植土壤氨氧化细菌和古菌的影响	郭俊丽, 刘毅, 魏文学, 葛体达, 王光军(5142)
不同再生水灌溉方式对土壤-辣椒系统中细菌群落多样性及病原菌丰度的影响	崔丙健, 高峰, 胡超, 李中阳, 樊向阳, 崔二革(5151)
黄土高原地区两种土地利用方式CO ₂ 和N ₂ O排放特征	韩佳乐, 郝珊, 刘振杰, 张曼, 张阿凤(5164)
生物炭对华北平原4种典型土壤N ₂ O排放的影响	张秀玲, 孙贇, 张水清, 岳克, 曹红亮, 林杉(5173)
优化施肥模式对我国热带地区水稻-豇豆轮作系统N ₂ O和CH ₄ 排放的影响	胡玉麟, 汤水荣, 陶凯, 何秋香, 田伟, 秦兴华, 伍延正, 孟磊(5182)
《环境科学》征订启事(4995)	
《环境科学》征稿简则(5039)	
信息(4782, 4979, 5056)	

典型化工行业有害 VOCs 排放清单及长三角地区应用

鲁君, 黄奕玮, 黄成*

(上海市环境科学研究院, 国家环境保护城市大气复合污染成因与防治重点实验室, 上海 200233)

摘要: 以美国加州和中国台湾有害挥发性有机物(HVOCs)排污收费物种为依据, 筛选8种HVOCs物种, 分别为苯、甲苯、二甲苯、乙苯、苯乙烯、二氯甲烷、1,1-二氯乙烯和三氯乙烯, 通过排放因子法, 建立了2014年的长三角地区典型化工行业总VOCs排放清单, VOCs排放量为13.55万t, 结合工艺源项HVOCs物种排放占比, 建立了长三角地区典型化工行业的HVOCs排放清单, 2014年排放量HVOCs约为5.24万t, 其中占比最高的HVOCs物种为二氯甲烷和苯, HVOCs占VOCs排放较大的工艺源项为聚氨酯类树脂、烷基苯、乙苯、丙烯酸树脂、氯苯、乙苯、环己酮、乙烯及聚苯乙烯等的生产。

关键词: 毒害; 挥发性有机物(VOCs); 排放清单; 化工; 长三角地区

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)11-4856-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201901217

Hazardous Volatile Organic Compound Emission Inventory Study and Its Application in a Typical Chemical Industry in the Yangtze River Delta

LU Jun, HUANG Yi-wei, HUANG Cheng*

(State Environmental Protection Key Laboratory of the Cause and Protection of Urban Air Pollution Complex, Shanghai Academy of Environment Sciences, Shanghai 200233, China)

Abstract: Based on hazardous volatile organic compound (HVOCs) species recommended by the California Air Resources Board and Taiwan Environmental Agency (China), eight HVOCs species were focused on, namely benzene, toluene, xylene, ethylbenzene, styrene, dichloromethane, 1,1-dichloroethylene, and trichloroethylene. A top-down method was used to establish a VOCs emission inventory for typical chemical industries in the Yangtze River Delta (YRD). The total VOCs emission in 2014 was 135 500 tons. The HVOCs emission inventory of a typical chemical industry in the YRD was also established from different chemical processes and approximately 52 400 tons of HVOCs was emitted in 2014. The most abundant HVOCs species were dichloromethane and benzene. The major chemical processes of HVOCs emissions were for producing polyurethane resin, alkylbenzene, ethylbenzene, acrylic resin, chlorobenzene, ethylbenzene, cyclohexanone, ethylene, and polystyrene.

Key words: hazardous; volatile organic compounds (VOCs); emission inventory; chemical industry; Yangtze River Delta

有毒空气污染物是我国工业高速发展的副产物, 组成范围不断扩大, 危害日益严重, 已成为我国新时期关系民生的环境问题^[1]。挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是典型的大气污染物, 在大气化学反应中扮演重要角色, 产生臭氧及二次气溶胶(SOA)^[2~5], 人为源排放的VOCs已经成为城市以及重点工业区域环境空气污染的重要组成部分^[6~9], 不仅会增加环境大气氧化性, 还可能引发环境大气的毒性, 直接威胁人体健康^[10~15]。早在1984年, 美国加州发布了有害空气污染物名录及控制条例, 后续建立了疑似致癌的21种空气污染物, 1990年美国《清洁空气法案》修正, 建立了187种有害大气污染名录, 其中33种属于VOCs, 即有害挥发性有机物污染物(hazardous volatile organic compounds, HVOCs)^[16~18]。研究显示化工类企业聚集区域的人群具有较高的白血病、黑色素瘤及其他遗传毒性发病率^[19,20], 美国Heartland化工地区HVOCs浓度趋势与癌症发生率具有密切相关性^[21]。

长江三角洲地区(长三角地区)包括上海市、江

苏省、浙江省和安徽省, 面积占国土面积的2.2%, 但人口占16.1%(2016年统计数据)^[22], 第一产业和第二产业的生产总值占比22.7%和13.7%, 可见长三角地区工业发达且人口密集。据文献报道长三角地区所在的东部地区是VOCs排放的重点区域^[23,24], 各类工业对VOCs排放贡献较高, 而且石化和化工过程是长三角地区排放的主要源, 占VOCs排放总量的40%以上^[25]。国内已开展了大量VOCs排放清单工作^[26~30], 但针对VOCs组分的排放清单研究目前较少, 与毒害相关的物种清单研究更少^[33]。

鉴于此, 本文筛选了美国加州空气质量委员会^[11]及中国台湾环境署^[34]对有害的VOCs单独收费物种作为研究对象, 针对长三角地区典型化工行业, 首次建立了2014年该地区典型化工行业

收稿日期: 2019-01-25; 修订日期: 2019-06-11

基金项目: 上海市重大环保科研项目(2017-02); 国家自然科学基金项目(21777101); 国家重点研发计划项目(2018YFC0213800)

作者简介: 鲁君(1984~), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气污染源排放与控制, E-mail: lujun@saes.sh.cn

* 通信作者, E-mail: huangc@saes.sh.cn

HVOCs 排放清单，以期为后续该区域研究环境大气对人群健康影响提供科学基础，并为该区域有害大气污染物防控提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究对象及范围

本研究建立的 HVOCs 排放清单基准年为 2014 年，研究区域为长三角地区三省一市，包括江苏

省、浙江省、安徽省和上海市共 41 个城市，区域面积达到 35 万 km² 以上，见图 1。本研究排放清单建立参考文献[35]（“手册”）和文献[36]（“指南”）中关于源的分类方法，污染源范围为典型有机化工行业，共涉及如表 1 所示的 24 类工序^[34]。本研究涉及的毒害 VOCs 清单的物种为：苯、甲苯、二甲苯、三氯乙烯、二氯甲烷、乙苯、苯乙烯和 1,1-二氯乙烷。

表 1 典型有机化工行业毒害 VOCs 排放因子

Table 1 VOCs emission factors used in this study

序号	生产工艺 (产品)	排放因子 /g·kg ⁻¹	文献	物种占比 ^[34] /%							
				苯	甲苯	二甲苯	三氯乙烯	二氯甲烷	乙苯	苯乙烯	1,1-二氯乙烷
1	原料药	137.8	[36]					53%			
2	农药	0.001	[34]	12	5						
3	聚氨酯类树脂	0.25	[34]		31	51					
4	聚氯乙烯	0.74	[35]				0				
5	烷基苯	18.4	[34]	2	0	0				0	
6	合成橡胶	7.17	[35]							40	
7	酚类	7.71	[34]	0					0		
8	丙烯酸树脂	0.6	[34]		20	18				28	
9	环氧树脂	2.25	[34]		17		38				
10	苯乙烯	0.22	[35]	23	9				10	5	
11	合成乳胶	2.68	[34]							40	
12	氯化甲烷	81.4	[35]					62			
13	对苯二甲酸/酯	19.8	[35]	12	5	3					
14	醇酸树脂	6.42	[34]		1	7					
15	聚乙烯	10	[35]	23	9				10	5	
16	氯苯	1.49	[34]	0.001							
17	乙苯	0.1	[35]	64	1				8		
18	二氯乙烯	1.75	[34]								100
19	环己酮	22.22	[34]	0							
20	二氯乙烯	2.5	[36]					70			
21	乙烯	0.1	[35]	2	1						
22	聚苯乙烯	5.4	[36]							9	
23	硝基苯	1.35	[34]	100							
24	异丙苯	0.551	[34]	38	1						

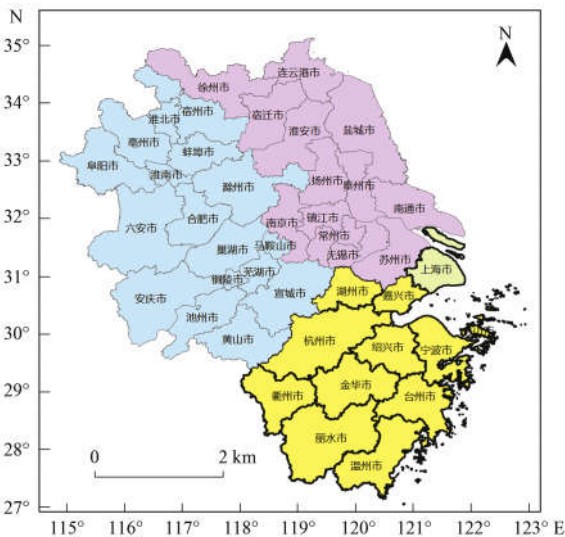


图 1 本研究覆盖的长三角城市

Fig. 1 Cities in the Yangtze River Delta in this study

1.2 估算方法

HVOCs 物种排放清单建立的前提为总 VOCs 排放清单的建立，总排放清单的估算方法为采用排放因子法，对长三角地区化工行业 VOCs 排放总量进行估算，如公式(1)，HVOCs 物种的排放清单通过公式(2)估算：

$$E_j = \sum A_j \times EF_j \tag{1}$$

$$E_i = \sum E_j \times EF_{i,j} \tag{2}$$

式中， E_j 为 j 类污染源的 VOCs 排放总量， j 为污染源项（指本研究所指的化工工序）， A_j 为 j 类污染源的活动水平数据，如原料消耗量，产品生产量等， EF_j 为 j 类污染源的 VOCs 排放因子； E_i 为 i 物种的排放量， $EF_{i,j}$ 为 i 物种在 j 污染源项 VOCs 排放量中的占比， i 为 HVOCs 物种，分别包括：苯、甲苯、二

甲苯、乙苯、苯乙烯、二氯甲烷、1,1-二氯乙烯和三氯乙烯.

1.3 活动水平确定

本研究所使用的污染源活动水平数据来源于如下途径:环境统计数据及典型城市开展的污染源调查,对三省一市各污染源项的活动水平数据进行收集和整理,共计1 040家工业企业,2 351个工序,采集的主要活动水平数据包括原辅料使用量、燃料使用量、产品产量、废气捕集效率及治理效率等.

1.4 排放因子确定

本研究估算化工行业 HVOCs 排放清单所选取的排放因子见表 1,不同工序的 VOCs 排放因子主要来自于文献[34~36],HVOCs 物种在行业工序中占比取自文献[34].

2 结果与讨论

2.1 2014 年 VOCs 总排放清单

通过对长三角地区典型化工行业 VOCs 排放因子以及不同排放源的活动水平数据的收集与整理,计算得到该地区化工行业 VOCs 的排放总量及省市分布(见表 2 和图 2).由表 2 可知,2014 年长三角地区典型化工行业的 VOCs 排放量约为 13.55 万 t,其中江苏省和浙江省占比最高,分别占排放总量的

47.2%和 35.7%,其次是安徽省,占 8.6%,上海占总量的 8.5%.

表 2 2014 年长三角地区典型化工行业 VOCs 排放清单

Table 2 VOCs emission inventory of a typical chemical industry in YRD in 2014		
省份	VOCs 排放量/ $t \cdot a^{-1}$	排放占比/%
安徽省	11 607	8.6
江苏省	64 009	47.2
上海市	11 573	8.5
浙江省	48 328	35.7
合计	135 517	100

由图 2 可知,各省份内不同城市排放贡献具有差异性,江苏省中排放贡献最大的城市为南京市、盐城市、南通市、苏州市和泰州市,5 城占该省份总量的 75.5%;浙江省中排放贡献最大的城市为台州市、绍兴市、宁波市和金华市,4 城占该省份总量的 76.7%;安徽省中排放贡献最大的城市为滁州市、淮南市、池州市和蚌埠市,4 城占该省份总量的 82.9%.

2.2 毒害物种排放清单

基于典型化工行业总排放清单及特征生产工艺的 HVOCs 物种占比,计算获得各类工艺源项的 HVOCs 物种排放清单及贡献(见表 3 和图 3),由表 3 可知,2014 年长三角地区典型化工行业的 HVOCs

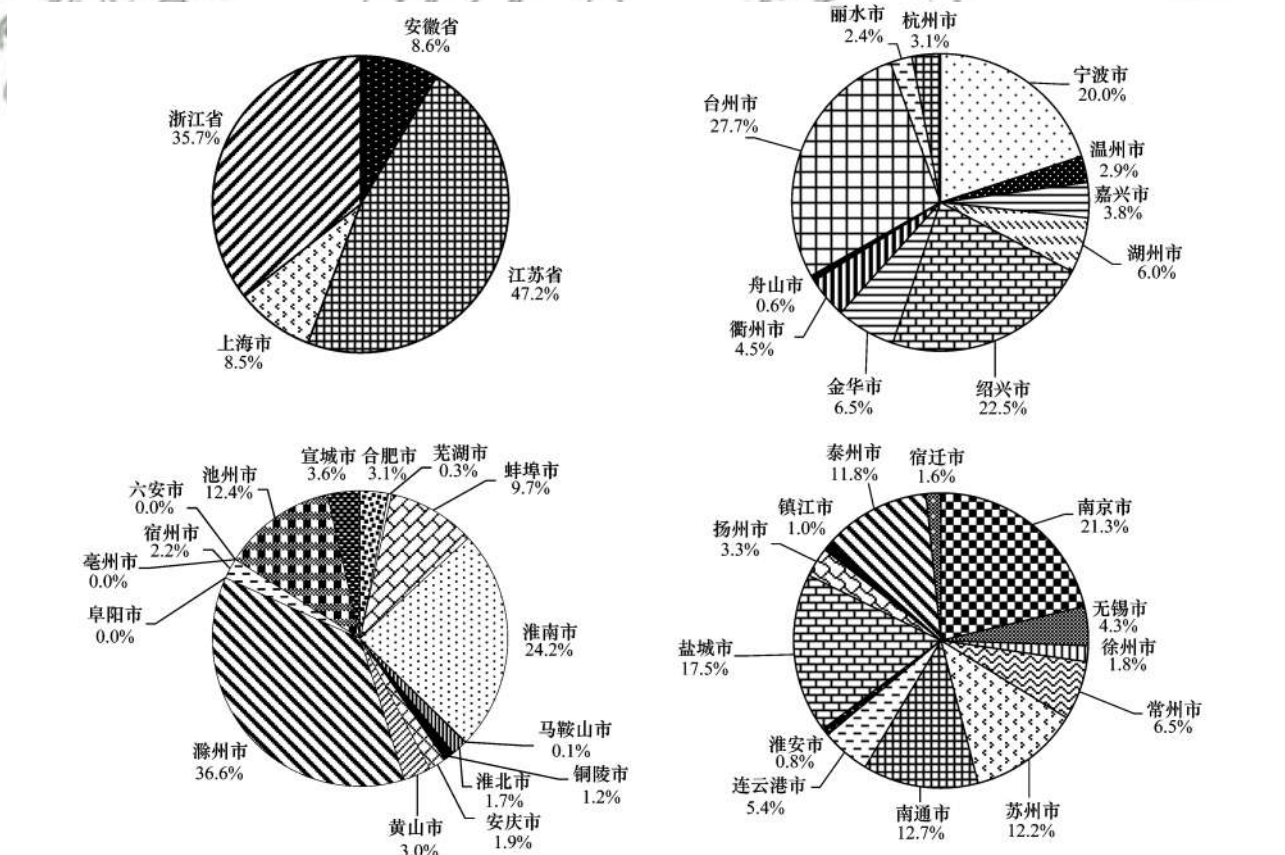


图 2 长三角地区典型化工行业 VOCs 排放清单分布

Fig. 2 Distribution of VOCs emission in a typical chemical industry in the Yangtze River Delta

表 3 2014 年长三角地区典型化工行业毒害 VOCs 物种排放清单¹⁾/t

Table 3 Hazardous VOCs emission inventory of a typical chemical industry in YRD in 2014/t

工艺源项	苯	甲苯	乙苯	苯乙烯	二甲苯	三氯乙烯	二氯甲烷	1,1-二氯乙烷
原料药	3 775	1 285	25	415	695	8	28 770	614
农药	536	1 447	2	389	269	12	4 753	0
聚氨酯类树脂	721	281	0	27	470	0	579	0
聚氯乙烯	1 849	1	0	0	90	0	10	0
烷基苯	1 677	5	0	2	7	0	0	0
合成橡胶	252	347	113	321	176	0	316	0
酚类	101	38	38	29	144	5	342	0
丙烯酸树脂	2	166	0	188	185	0	20	0
环氧树脂	0	79	0	26	162	0	27	0
苯乙烯	99	12	30	13	24	0	0	0
合成乳胶	5	18	0	60	2	0	76	0
氯化甲烷	0	22	0	0	49	0	4	0
对苯二甲酸/酯	0	0	0	33	12	0	14	0
醇酸树脂	0	5	0	13	5	0	21	0
聚乙烯	0	0	0	36	0	0	0	0
氯苯	0	1	0	0	3	0	15	0
乙苯	0	6	0	0	10	0	0	0
二氯乙烯	0	0	0	0	0	0	0	11
环己酮	0	0	0	0	0	0	9	0
二氯乙烯	0	0	0	0	0	0	5	2
乙烯	0	0	0	0	0	0	4	0
聚苯乙烯	0	0	0	0	0	0	1	0
硝基苯	0	0	0	0	0	0	0	0
异丙苯	0	0	0	0	0	0	0	0
合计	9 018	3 715	209	1 550	2 304	26	34 967	627

1) “0”指文献[34]中暂无物种排放因子,或年排放量低于0.5 t

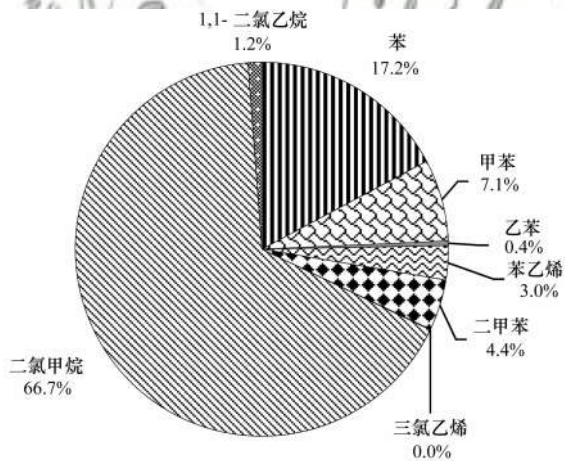


图 3 长三角地区典型化工行业毒害 VOCs 物种排放贡献

Fig. 3 Contribution of HVOCs species emission from a typical chemical industry in the Yangtze River Delta

的排放量约为 5.24 万 t，其中二氯甲烷占比最高，占总量的 66.7%，其次为苯，占总量的 17.2%，其他 6 个物种排放贡献约占 16%。

2.3 基于毒害物种的污染源排放与特征

分析工艺源项的 HVOCs 排放清单，进一步分析各个源项特征，图 4 为各排放工艺源项中 HVOCs 的排放占比（即：HVOCs/VOCs），占比为 39.5% ± 43.0%，工艺源项差异性较大，HVOCs 占比较大工

艺为聚氨酯类树脂、烷基苯、乙苯、丙烯酸树脂、氯苯、环己酮、乙烯及聚苯乙烯生产等生产工艺，贡献均大于 50%，HVOCs 占比相对较小的为酚类、合成橡胶、合成乳胶、硝基苯和异丙苯等生产工艺，贡献均小于 20%。

图 5 为本研究建立的化工行业 HVOCs 排放清单及各工序的排放贡献，由此可见，长三角地区化工行业 HVOCs 排放清单中，原料药生产排放贡献最大，占总量的 67.9%，其次为农药生产，占 14.1%，其他生产工艺占比均低于 5%。

2.4 不确定分析

总体而言，估算过程中不确定性的主要来源有：①活动水平数据的选取，本研究中化工行业的活动数据主要来自于环境统计数据，而环境统计数据一般是只对规模以上企业进行统计，这些统计信息不能反映该地区化工行业中的中小规模的企业排放量，由此会带来一定的不确定性；②排放因子的选取，部分排放因子的选取来源于国家或清华大学发布的清单指南，上述因子的来源均不能真实反映现阶段长三角地区的 VOCs 排放水平，而且部分缺失工艺的排放因子取自中国台湾环境署，不同的地区、原料选取不同、使用工艺不同等原因，选取

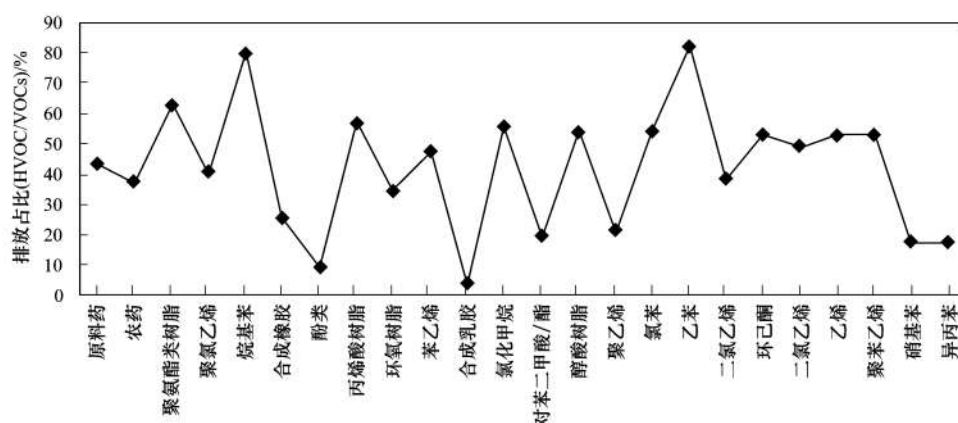


图4 典型化工行业 HVOCs/VOCs 排放占比

Fig. 4 Proportion of HVOCs/VOCs in typical chemical processes

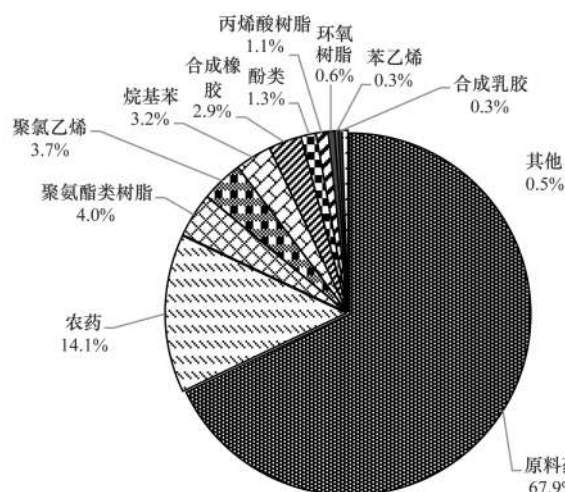


图5 化工行业典型工序的排放贡献

Fig. 5 Contribution of processes in a typical chemical industry

非本地排放因子,亦是本研究清单估算不确定性的主要来源之一;③HVOCs物种的占比,由于目前尚无HVOCs物种占比的相关报道,物种占比选自中国台湾环境署推荐物种占比,不同地区排放要求及治理水平的差异,亦是本研究清单估算的不确定性来源。

3 结论

(1)2014 年长三角地区典型化工行业的 VOCs 的排放量约为 13.55 万 t,其中江苏省和浙江省占比最高,分别占排放总量的 47.2% 和 35.7%,其次是安徽省,占 8.6%,上海占总量的 8.5%。

(2)2014 年长三角地区典型化工行业的毒害 VOCs 的排放量约为 5.24 万 t,其中二氯甲烷占比最高,占总量的 66.7%,其次为苯,占总量的 17.2%。

(3)长三角地区典型化工行业中,工艺源项中 HVOCs 排放占比为 $39.5\% \pm 43.0\%$,工艺源项差异性较大,HVOCs 占比较大的为聚氨酯类树脂、烷

基苯、乙苯、丙烯酸树脂、氯苯、环己酮、乙烯及聚苯乙烯生产等生产工艺源项。

参考文献:

- [1] 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. Chen Y, Li L N, Yang C Y, et al. Countermeasures for priority control of toxic VOC pollution [J]. Environmental Science, 2011, 32(12): 3469-3475.
- [2] Sillman S. The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments [J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(12): 1821-1845.
- [3] Robinson A L, Donahue N M, Shrivastava M K, et al. Rethinking organic aerosols: semivolatile emissions and photochemical aging [J]. Science, 2007, 315(5816): 1259-1262.
- [4] Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(12-14): 2063-2101.
- [5] Massolo L, Rehwagen M, Porta A, et al. Indoor-outdoor distribution and risk assessment of volatile organic compounds in the atmosphere of industrial and urban areas [J]. Environmental Toxicology, 2010, 25(4): 339-349.
- [6] 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. Wei W. Study on current and future anthropogenic emissions of volatile organic compounds in China [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [7] 张靖,邵敏,苏芳.北京市大气中挥发性有机物的组成特征 [J].环境科学研究,2004,17(5):1-5. Zhang J, Shao M, Su F. Study on composition of ambient volatile organic compounds (VOCs) in Beijing city [J]. Research of Environmental Sciences, 2004, 17(5): 1-5.
- [8] 魏恩棋,时庭锐,李利荣,等.天津市大气中挥发性有机物的组成及分布特点 [J].中国环境监测,2010,26(4):4-8. Wei E Q, Shi T R, Li L R, et al. The composition and distribution of VOCs in the atmosphere of Tianjin [J]. Environmental Monitoring in China, 2010, 26(4): 4-8.
- [9] 王伯光,张远航,邵敏,等.广州地区大气中 C2~C9 非甲烷碳氢化合物的人为来源 [J].环境科学学报,2008,28(7):1430-1440. Wang B G, Zhang Y H, Shao M, et al. Sources apportionment of anthropogenic C2 ~ C9 non-methane hydrocarbons in the atmosphere of Guangzhou, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(7): 1430-1440.
- [10] Tagiyeva N, Sheikh A. Domestic exposure to volatile organic

- compounds in relation to asthma and allergy in children and adults[J]. *Expert Review of Clinical Immunology*, 2014, **10** (12): 1611-1639.
- [11] Propper R, Wong P, Bui S, *et al.* Ambient and emission trends of toxic air contaminants in California[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(19): 11329-11339.
- [12] Forrest M S, Lan Q, Hubbard A E, *et al.* Discovery of novel biomarkers by microarray analysis of peripheral blood mononuclear cell gene expression in benzene-exposed workers [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2005, **113**(6): 801-807.
- [13] Cheng H, Sathiakumar N, Graff J, *et al.* 1,3-Butadiene and leukemia among synthetic rubber industry workers; exposure-response relationships [J]. *Chemico-Biological Interactions*, 2007, **166**(1-3): 15-24.
- [14] Kirman C R, Albertini R A, Gargas M L. 1,3-Butadiene: III. Assessing carcinogenic modes of action[J]. *Critical Reviews in Toxicology*, 2010, **40** Suppl 1: 74-92.
- [15] 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.
- [16] California Air Resources Board. Toxic air contaminant identification list [EB/OL]. www.arb.ca.gov/toxics/id/taclist.htm, 2015-04-25.
- [17] Office of Environmental Health Hazard Assessment and Air Resources Board. Consolidated table of OEHHA/ARB approved risk assessment health values [EB/OL]. www.arb.ca.gov/toxics/healthval/contable.pdf, 2015-05-13.
- [18] USEPA. Section 112 (a)-definitions (hazardous air pollutants) [EB/OL]. www.epa.gov/ttn/atw/112a_def.html, 2015-04-24.
- [19] Barregard L, Holmberg E, Sallsten G. Leukaemia incidence in people living close to an oil refinery [J]. *Environmental Research*, 2009, **109**(8): 985-990.
- [20] Basso E, Cevoli C, Papacchini M, *et al.* Cytogenetic biomonitoring on a group of petroleum refinery workers [J]. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 2011, **52**(6): 440-447.
- [21] Simpson I J, Marrero J E, Batterman S, *et al.* Air quality in the industrial heartland of Alberta, Canada and potential impacts on human health [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **81**: 702-709.
- [22] 国务院人口普查办公室. 中国 2010 年人口普查资料 [EB/OL]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/pcsj/rkpc/6rp/index.htm>, 2019-05-17.
- [23] Wei W, Wang S X, Chatani S, *et al.* Emission and speciation of non-methane volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42** (20): 4976-4988.
- [24] 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, Lü Y L. Characteristics and countermeasures of volatile organic compounds (VOCs) emission in China [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4756-4763.
- [25] 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.
- [26] Bo Y, Cai H, Xie S D. Spatial and temporal variation of historical anthropogenic NMVOCs emission inventories in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(23): 7297-7316.
- [27] 郝欢, 万梅, 戎宇, 等. 嘉兴市 2015 年人为源 VOCs 排放清单[J]. *环境科学*, 2018, **39**(11): 4892-4900.
- Hao H, Wan M, Rong Y, *et al.* VOCs emission inventory of anthropogenic sources in Jiaxing [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(11): 4892-4900.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 韩丽, 王幸锐, 何敏, 等. 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[J]. *环境科学*, 2013, **34**(12): 4535-4542.
- Han L, Wang X R, He M, *et al.* Inventory and environmental impact of VOCs emission from the typical anthropogenic sources in Sichuan province [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4535-4542.
- [31] 陈小方, 张嘉妮, 张伟霞, 等. 化工园区挥发性有机物排放清单及其环境影响[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(11): 4062-4071.
- Chen X F, Zhang J N, Zhang W X, *et al.* VOCs emission inventory of a chemical industry park and its influence on atmospheric environment [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(11): 4062-4071.
- [32] 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.
- [33] Liang X M, Chen X F, Zhang J N, *et al.* Reactivity-based industrial volatile organic compounds emission inventory and its implications for ozone control strategies in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **162**: 115-126.
- [34] 中国台湾环境保护署. 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(含设备元件)排放系数、控制效率及其他计量规定[R]. 中国台北: 中国台湾环境保护署, 2009.
- [35] 贺克斌, 王书肖, 张强. 城市大气污染物排放清单编制技术手册[R]. 北京: 清华大学, 2015.
- [36] 环境保护部. 大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南(试行)[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2014.

CONTENTS

Characteristics of Aerosol Vertical Distribution over the Yangtze River Delta Region of China in 2018	SHEN Ji, CAO Nian-wen (4743)
Characteristics of Haze Pollution Episodes During Autumn and Winter in 2018 in Shijiazhuang	SU Wen-kang, BAO Xiao-lei, NI Shuang-ying, <i>et al.</i> (4755)
Spatial Temporal Characteristics and Cluster Analysis of Chemical Components for Ambient PM _{2.5} in Wuhan	ZHANG Hui-tao, TIAN Ying-ze, LIU Bao-shuang, <i>et al.</i> (4764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Atmospheric PM _{2.5} in a Living Area of Zhengzhou City	HE Rui-dong, ZHANG Yi-shun, CHEN Yong-yang, <i>et al.</i> (4774)
Distribution Characteristics and Sources of Metal Elements in Rainwater in Xiamen	WANG Shan-shan, CHENG Yi-feng, YAN Jin-pei, <i>et al.</i> (4783)
First Long-Term Study of Atmospheric New Particle Formation in the Suburb of Shanghai from 2015 to 2017	HUO Jun-tao, WANG Xin-ning, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (4791)
Characteristics, Transportation, Pathways, and Potential Sources of Air Pollution During Autumn and Winter in Taiyuan	YAN Shi-ming, WANG Yan, GUO Wei, <i>et al.</i> (4801)
Spatial and Temporal Characteristics of Air Quality and Cause Analysis of Heavy Pollution in Northeast China	CHEN Wei-wei, LIU Yang, WU Xue-wei, <i>et al.</i> (4810)
Spatiotemporal Evolution and Driving Mechanism of Aerosol Optical Depth in the Ebinur Lake Basin	CHEN Xiang-yue, DING Jian-li, WANG Jing-zhe, <i>et al.</i> (4824)
Concentration Levels and Impact Factors of Benzene Series in Chinese Residential Building	HOU Bei-bei, YIN Yi-hui, PEI Jing-jing, <i>et al.</i> (4833)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Aromatic Compounds in Shijiazhuang	YANG Yang, LI Xing-ru, LIU Shui-qiao, <i>et al.</i> (4841)
Emission Characteristics Analysis and Health Risk Assessment of Unorganized VOCs in the Carbon Industry, Zhengzhou	ZHANG Yi-shun, WANG Jia, HAN Shi-jie, <i>et al.</i> (4847)
Hazardous Volatile Organic Compound Emission Inventory Study and Its Application in a Typical Chemical Industry in the Yangtze River Delta	LU Jun, HUANG Yi-wei, HUANG Cheng (4856)
Establishment and Characteristics of an Artificial Ammonia Emissions Inventory in Jiangsu Province from 2013 to 2017	HOU Xin-hong, YU Xing-na, SHEN Li, <i>et al.</i> (4862)
Occurrence Characteristics and Health Risks of PAHs on the Surface of Buildings and Devices in the Coking Plant	ZHAO Yi-shu, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4870)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Androgens, Glucocorticoids, and Progesterone in the Liusha Bay, South China Sea	YANG Lei, ZHANG Jin-na, XU Min, <i>et al.</i> (4879)
Dynamic Changes in Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in the Karst Watershed Flood Process	YUAN Ya-qiong, SUN Ping-an, SU Zhao, <i>et al.</i> (4889)
Sources, Distribution, and Fluxes of Major and Trace Elements in the Yangtze River	WU Wen-tao, RAN Xiang-bin, LI Jing-xi, <i>et al.</i> (4900)
Contaminant Characteristics and Ecological Risk Assessments of Heavy Metals from River Networks in the Western Area of the Wangyu River	XU Chen, WANG Pei-fang, CHEN Juan, <i>et al.</i> (4914)
Influence of Rainfall Intensity on the Nutrient Loading from an Inflowing River in the Plain River Network of the Taihu Catchment	CHEN Jie, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> (4924)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments from Shibalianwei Wetland in Hefei, Anhui Province, China	CHEN Shan, XU Fan, XIE San-tao, <i>et al.</i> (4932)
Spatial Distribution Characteristics of Chlorophyll-a and Nutrient Salts in Tributaries of Different River Sections in the Three Gorges Reservoir Area During the Flood Season	YANG Fan, YANG Zheng-jian, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4944)
Endogenous Release of Nitrogen and Phosphorus in the Danjiangkou Reservoir	WANG Zhi-qi, LIU Xin-xing, YAO Zhi-hong, <i>et al.</i> (4953)
Correlation Between Water Purification Capacity and Bacterial Community Composition of Different Submerged Macrophytes	LI Lin, YUE Chun-lei, ZHANG Hua, <i>et al.</i> (4962)
Size-dependent Effects of Zinc Oxide Nanoparticles on Performance and Microbial Community Structure of a Constructed Wetland	WANG Sen, REN Ling, LIU Lin-lin, <i>et al.</i> (4971)
Removal of Nitrogen and Phosphorus from Water by Biomass Carbon of Aquatic Plants	LIU Shu-lei, PENG Hui-jun, YANG Jia-yi, <i>et al.</i> (4980)
Preparation of MgO Modified Lotus Shell Biochar and Its Phosphorus Adsorption Characteristics	WANG Sheng-hua, ZHU Dan-chen, SHAO Jing-ai, <i>et al.</i> (4987)
Effects of Microplastics on Membrane Fouling During a Shortened Ultrafiltration Membrane Process	WANG Bo-dong, XUE Wen-jing, LÜ Yong-tao, <i>et al.</i> (4996)
Preparation and Comparison of Arsenic Removal Granular Adsorbent Based on Iron-Manganese Sludge	ZENG Hui-ping, YU Ya-ping, LÜ Sai-sai, <i>et al.</i> (5002)
Catalytic Degradation of Rhodamine B by FeOCl Activated Hydrogen Peroxide	ZHANG Shao-peng, CHEN Yu, BAI Shu-qin, <i>et al.</i> (5009)
Treatment Effect and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Wastewater from Large-scale Dairy Farms in Tianjin	CHEN Qian, ZHAO Run, MOU Mei-rui, <i>et al.</i> (5015)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	YAO Peng-cheng, CHEN Jia-yu, ZHANG Yong-ming, <i>et al.</i> (5024)
Start-up and Stable Operation of CANON Coupled with Denitrifying Phosphorus Removal	YIN Wen, CHEN Ya, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (5032)
Control of Sludge Bulking Caused by Unknown Reason Through FeCl ₃ Coupled with Biochemical Methods	WEI Dong-yang, XIAO Cai-lin, ZHOU Wen, <i>et al.</i> (5040)
Effects of Solid Retention Time on the Phosphorus Removal and Nitrosation Granules System	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (5048)
Start-up of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification Process and Changes in Microbial Community Characteristics	SONG Zhuang-zhuang, LÜ Shuang, LIU Zhe, <i>et al.</i> (5057)
Influence of Substrate Exposure Level on ANAMMOX Microbial Activity and Biomass	CHEN Fang-min, GAO Jia-qi, HUANG Yong, <i>et al.</i> (5066)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils in the Taige Canal Valley	LI Wei-di, CUI Yun-xia, ZENG Cheng-cheng, <i>et al.</i> (5073)
Method of Dividing the Value of Soil Heavy Metal Pollution Risk Screening: Using Cd as an Example	WANG Rui, ZHANG Feng-lei, XU Shu-shu, <i>et al.</i> (5082)
Mineral Characteristics of Arsenic in the Active Area of the Banbishan Gold Mine and Its Effect on Arsenic Accumulation in Farmland Soil	WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, SHEN Jun-feng, <i>et al.</i> (5090)
Remediation of Cadmium Contaminated Paddy Fields Using Soil Conditioners	ZHOU Li-jun, WU Lin, LIN Xiao-bing, <i>et al.</i> (5098)
Inhibition and Remediation of Methylmercury Contaminated Soil by Use of Modified Montmorillonite	HAN Yi-xin, HE Tian-rong, WANG Zu-bo (5107)
Cerium-manganese Modified Biochar Immobilizes Arsenic in Farmland Soils	LIANG Ting, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5114)
Improving Bioremediation of Crude Oil-contaminated Soil by Mild Pre-oxidation	XU Jin-lan, WANG Hui-fang, WANG Rong, <i>et al.</i> (5124)
Community Structure of Heavy Metal Immobilized Bacteria in the Lettuce (<i>Lactuca sativa</i> L.) Rhizosphere in Soil Polluted by Heavy Metals and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Lettuce	WANG Tie-jun, SU Nan-nan, LEI Peng, <i>et al.</i> (5133)
Impact of Dicyandiamide (DCD) and 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate (DMPP) on Ammonia-oxidizing Bacteria and Archaea in a Vegetable Planting Soil	GUO Jun-li, LIU Yi, WEI Wen-xue, <i>et al.</i> (5142)
Effect of Different Reclaimed Water Irrigation Methods on Bacterial Community Diversity and Pathogen Abundance in the Soil-Pepper Ecosystem	CUI Bing-jian, GAO Feng, HU Chao, <i>et al.</i> (5151)
Characteristics of CO ₂ and N ₂ O Emissions Under Two Land Use Types in the Loess Plateau of China	HAN Jia-le, HAO Shan, LIU Zhen-jie, <i>et al.</i> (5164)
Effects of Biochar on N ₂ O Emission from Four Typical Soils in the North China Plain	ZHANG Xiu-ling, SUN Yun, ZHANG Shui-qing, <i>et al.</i> (5173)
Effects of Optimizing Fertilization on N ₂ O and CH ₄ Emissions in a Paddy-Cowpea Rotation System in the Tropical Region of China	HU Yu-lin, TANG Shui-rong, TAO Kai, <i>et al.</i> (5182)