

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业VOCs排放特征及管控对策

孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金



制药



喷涂



橡胶

京津冀

长三角

珠三角

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年3月

第42卷 第3期

Vol.42 No.3

目次

经济快速发展区场地污染特征、源-汇关系与管控对策专辑

我国经济快速发展区工业 VOCs 排放特征及管控对策 孟博文, 李永波, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 周喜斌, 李金灵, 苏贵金 (1023)

长江经济带湖北省人为源 VOCs 排放清单及变化特征 代伶文, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 黄利宏 (1039)

经济快速发展区六氯丁二烯的来源与分布特征 陶誉铭, 孟晶, 李倩倩, 史斌, 苏贵金, 郭立新 (1053)

近 20 年中国表层土壤中多环芳烃时空分布特征及源解析 马妍, 程芦, 阮子渊, 史鹏飞, 路超君, 运晓彤, 李璐嫣, 徐雁秋, 史怡 (1065)

电子废物拆解区微塑料与周围土壤环境之间的关系 柴炳文, 尹华, 魏强, 卢桂宁, 党志 (1073)

焦化场地内外土壤重金属空间分布及驱动因子差异分析 顾高铨, 万小铭, 曾伟斌, 雷梅 (1081)

典型石化工业城市土壤重金属源解析及空间分布模拟 孙雪菲, 张丽霞, 董玉龙, 朱林宇, 王政, 吕建树 (1093)

多功能区工业园土壤和地表灰尘重金属污染及生态风险差异分析 曾伟斌, 顾高铨, 万小铭, 雷梅 (1105)

龙岩市某铁锰矿区土壤重金属地球化学空间分布特征与来源分析 王蕊, 陈楠, 张二喜, 李小赛 (1114)

基于全周期场地概念模型的场地环境精准调查应用案例 李培中, 吴乃瑾, 王海见, 张骥, 荣立明, 李翔, 魏文侠, 宋云 (1123)

造纸厂土壤中短链和中链氯化石蜡的污染特征和风险评估 张佩萱, 高丽荣, 宋世杰, 乔林, 徐驰, 黄帝, 王爽, 蒋思静, 郑明辉 (1131)

典型再生铜冶炼厂周边土壤中 PCDD/Fs、PCBs 和 PCNs 的污染特征及健康风险评估 胡吉成, 郭静, 许晨阳, 金军 (1141)

柠檬酸与磷共存对土壤吸附镉的影响 宋子腾, 左继超, 胡红青 (1152)

两种能源草田间条件下对镉和锌的吸收累积 郑瑞伦, 石东, 刘文菊, 孙国新, 侯新村, 胡艳霞, 朱毅, 武菊英 (1158)

钒钛磁铁矿尾矿库复垦土地及周边土壤-玉米重金属迁移富集特征 孙厚云, 卫晓锋, 孙晓明, 贾凤超, 李多杰, 李健 (1166)

盐胁迫下八宝景天不同生态型对土壤中 Cd 积累特征 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 万小铭, 孟晓飞, 陈同斌, 何孟轲, 周小勇, 徐铁兵 (1177)

水分条件对生物炭钝化水稻土铅镉复合污染的影响 汤家庆, 张绪, 黄国勇, 胡红青 (1185)

壳聚糖改性生物炭对水稻土甲基汞生成及其稻米积累的影响 杨雪玲, 王明星, 徐国敏, 王定勇 (1191)

铬污染对土壤细菌群落结构及其构建机制的影响 于皓, 安益君, 金德才, 靳拓, 王兴润 (1197)

研究报告

COVID-19 疫情期间京津冀大气污染物变化及影响因素分析 赵雪, 沈楠驰, 李令军, 武高峰, 陶静, 赵文吉 (1205)

2020 年初疫情管控对山东省空气质量影响的模拟 刘厚凤, 徐薇, 魏敏, 隋潇, 许鹏举, 李明燕, 张美根 (1215)

南京北郊 PM_{2.5} 中有机组分的吸光性质及来源 尚玥, 余欢, 茅宇豪, 王成, 谢鸣捷 (1228)

西安市大气棕碳污染特性及发色团种类 陈前, 陈庆彩 (1236)

淄博市道路尘细粒子携带金属元素的来源与健康风险评价 郭清源, 白雯宇, 赵雪艳, 郭丽瑶, 王敬华, 耿春梅, 王晓雨, 王静, 杨文, 白志鹏 (1245)

北京市控制 PM_{2.5} 污染的健康效益评估 杜沛, 王建州 (1255)

西宁市大气污染来源和输送季节特征 刘娜, 余晔, 马学谦 (1268)

青岛近海不同污染过程下大气颗粒态氮磷浓度分布特征 袁刚, 祁建华, 丁雪 (1280)

基于走航监测的长三角工业园区周边大气挥发性有机物污染特征 王红丽, 高雅琴, 景盛翱, 楼晟荣, 胡馨遥, 安静宇, 吴宇航, 高伟, 朱亮, 黄成 (1298)

山地型城市冬季大气重污染过程特征及成因分析 刘伟诚, 牛月圆, 吴婧, 闫雨龙, 胡冬梅, 邱雄辉, 彭林 (1306)

兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献 王文鹏, 王占祥, 李继祥, 高宏, 黄韬, 毛潇萱, 马建民 (1315)

2012~2019 年北京市储油库 VOCs 去除及排放水平变化监测分析 华岚英, 崔彤, 李金香, 邹本东, 杨妍妍, 程刚 (1328)

生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单 马占云, 姜显聪, 任佳雪, 张阳, 冯鹏, 高庆先, 孟丹 (1333)

长江口邻近海域表层沉积物中的细菌藎多醇及对低氧区的响应判别 尹美玲, 段丽琴, 宋金明, 张乃星 (1343)

鄱阳湖流域水体和水产品中苯酚的暴露特征及人体健康风险评估 徐倩云, 艾舜豪, 高祥云, 王晓南, 刘征涛, 赵师晴, 葛刚, 李霖 (1354)

衡水湖湿地水环境质量时空变化特征及污染源分析 刘魏魏, 郭子良, 王大安, 张曼胤, 张余广 (1361)

丹江口水库及其入库支流水体中微塑料组成与分布特征 潘雄, 林莉, 张胜, 翟文亮, 陶晶祥, 李丹文 (1372)

金盆水库暴雨径流时空演变过程及水质评价 黄诚, 黄廷林, 李扬, 李楠, 齐允之, 司凡, 华逢耀, 赵凌云 (1380)

汛期暴雨径流对饮用水水库溶解性有机质 (DOM) 光谱特征的影响 李程遥, 黄廷林, 温成成, 梁伟光, 林子深, 杨尚业, 李凯, 蔡晓春 (1391)

苏州古城区河道碳氮磷类污染物的分布特征 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 郑凯旋, 李忠磊, 杨婷, 金军 (1403)

娘子关泉群水化学特征及成因 唐春雷, 赵春红, 申豪梁, 梁永平, 王志恒 (1416)

过氧化钙重塑底泥对水中磷酸盐的吸附作用 徐楚天, 李大鹏, 王子良, 吴宇涵, 许鑫澎, 黄勇 (1424)

亚热带丘陵区绿狐尾藻人工湿地处理养猪废水氮磷去向 王丽莎, 李希, 李裕元, 张满意, 吴金水 (1433)

紫外/亚硫酸盐高级还原工艺加速降解水中难降解含碘造影剂 刘子奇, 仇付国, 赖曼婷, 李津, 董慧岭, 强志民 (1443)

太阳能热活化过硫酸盐降解染料罗丹明 B 的效能 马萌, 许路, 金鑫, 金鹏康 (1451)

一步法 La@MgFe₂O₄ 的制备及其吸附水中磷的性能 白润英, 宋博文, 张彧, 郝俊峰, 刘建明, 刘宇红 (1461)

工程规模长填龄渗滤液膜生物-纳滤组合设施各单元污染物去除效能 邵立明, 邓樱桃, 仇俊杰, 吕凡, 章骅, 何晶晶 (1469)

ANAMMOX 培养物中硫酸盐型氨氧化生物转化机制 毕贞, 董石语, 黄勇 (1477)

不同季节城市污水处理厂微生物群落特性 贺赞, 李魁晓, 王佳伟, 王慰, 樊鹏超, 陈行行, 王军静 (1488)

麻黄碱在斑马鱼体内的器官特异性蓄积及毒代动力学 殷行行, 郭昌胜, 邓洋慧, 邱紫雯, 张艳, 滕彦国, 徐建 (1496)

内蒙古白云鄂博矿区土壤稀土元素污染特征及评价 王哲, 赵莹晨, 骆逸飞, 郑春丽, 卞园, 张光宇 (1503)

广西典型岩溶区农田土壤-作物系统 Cd 迁移富集影响因素 马宏宏, 彭敏, 郭飞, 刘飞, 唐世琪, 杨峰, 张富贵, 周亚龙, 杨柯, 李括, 刘秀金 (1514)

超顺磁性纳米材料对镉污染稻田土壤微生物和酶的影响 方丹丹, 张立志, 王强 (1523)

水分管理与施硅对水稻根表铁膜及砷镉吸收的影响 陈佳, 赵秀兰 (1535)

四环素类抗生素对土壤-生菜系统的生物效应及其迁移降解特性 王卫中, 迟苏琳, 徐卫红 (1545)

地膜覆盖对菜地垄沟 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 熊维霞, 江长胜, 赵仲婧, 曾唯, 胡曼利, 涂婷婷, 陈俊江, 郝庆菊 (1559)

对比研究生物炭和秸秆对麦玉轮作系统 N₂O 排放的影响 唐占明, 刘杏认, 张晴雯, 李贵春 (1569)

流域水生态空间管控下生境监测方法概述 阴琨, 刘海江, 王光, 金小伟 (1581)

《环境科学》征订启事 (1151) 《环境科学》征稿简则 (1342) 信息 (1402, 1415, 1580)

生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单

马占云¹, 姜昱聪², 任佳雪², 张阳³, 冯鹏⁴, 高庆先^{1*}, 孟丹²

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 3. 大连市生态环境事务服务中心, 大连 116000; 4. 中国资源卫星应用中心, 北京 100094)

摘要: 为全面评估中国大陆地区生活垃圾处理大气污染物排放状况, 系统收集和整理全国 31 个省市基础统计信息, 采取排放因子法建立了 2016 年中国大陆地区生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单。结果表明, 2016 年, 全国生活垃圾填埋处理排放气态污染物的 CH₄、VOCs、NH₃、TSP、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 总量分别是 3 472 084.50、185 117.10、66.45、54.94、25.99 和 3.92 t, 焚烧处理排放气态污染物的 CH₄、SO₂、NO_x、NH₃、VOCs、CO、TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 和 BC 总量分别是 25 389.10、6 419.30、70 923.84、221.36、435.33、3 025.19、221.36、221.36、2.21 和 2.86 t。通过对固体废弃物处理源、大气污染物时空分布特征以及对各省市焚烧厂在生活垃圾无害化处理厂数量的占比分析, 确定生活垃圾焚烧源和填埋源处理排放的气态污染物总量在 2010~2016 年期间呈现上升趋势, 2016 年生活垃圾填埋处理是我国最主要的垃圾处理方式, 主要集中在中部和西部等人口密度适中和土地资源较多的地区, 生活垃圾焚烧处理主要集中在长三角、珠三角和京津冀等地区的发达城市。

关键词: 城市生活垃圾; 填埋处理; 焚烧处理; 大气污染物; 排放清单

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)03-1333-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202006177

Emission Inventory of Air pollutants for the Harmless Treatment of Municipal Solid Waste

MA Zhan-yun¹, JIANG Yu-cong², REN Jia-xue², ZHANG Yang³, FENG Peng⁴, GAO Qing-xian^{1*}, MENG Dan²

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 3. Dalian Ecological and Environmental Affairs Service Center, Dalian 116000, China; 4. China Center for Resource Satellite Data and Applications, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to comprehensively assess the emission status of air pollutants from domestic waste treatment plants in mainland China, the basic statistical information of 31 provinces and cities in China was systematically collected and collated. The emission factor method was adopted to establish the 2016 list of air pollutants for the harmless treatment of domestic garbage in mainland China. The results showed that in 2016, the total amount of CH₄, VOCs, NH₃, TSP, PM₁₀, and PM_{2.5} gaseous pollutants discharged from domestic waste landfills was 3 472 084.50, 185 117.10, 66.45, 54.94, 25.99, and 3.92 t, respectively. The total amount of CH₄, SO₂, NO_x, NH₃, VOCs, CO, TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, and BC of gaseous pollutants discharged from incineration facilities was 25 389.10, 6 419.30, 70 923.84, 221.36, 435.33, 3 025.19, 221.36, 221.36, 2.21, and 2.86 t, respectively. Through the analysis of solid waste treatment sources, partial, and temporal distribution characteristics of air pollutants, and the proportion of incineration plants in the provinces and municipalities to the number of household harmless waste treatment plants, it was determined that the total amount of gaseous pollutants discharged from domestic waste incineration sources and landfill sources had an upward trend during the period 2010-2016. In 2016, domestic landfill treatment was the most important waste treatment method in China, and mainly concentrated in areas with moderate population density and large land resources, such as central and western regions. Domestic waste incineration treatment facilities are mainly concentrated in developed cities in the Yangtze River Delta, Pearl River Delta, and the Beijing-Tianjin-Hebei Region.

Key words: municipal solid waste; landfill treatment; incineration; air pollutants; emissions inventories

随着我国工业化进程的加快发展, 城市生活垃圾问题逐渐受到人们关注。当前, 我国每年生活垃圾以 10% 的速度增长^[1]。“垃圾围城”问题日益突出, 我国 668 座城市, 有将近 2/3 的城市被垃圾环带包围。

根据 2018 年城市建设统计年鉴, 我国生活垃圾清运量为 22 801.75 万 t, 填埋处理和焚烧处理量分别为 11 706.02 万 t 和 1 184.92 万 t, 占无害化处理量的 52% 和 45%。垃圾填埋和焚烧作为我国主要的生活垃圾处理方式, 技术较为成熟, 已逐渐成为大城市

竞相采用的城市垃圾处理技术和最重要的垃圾处理方式^[2]。然而由于生活垃圾填埋处理和焚烧处理所产生的大气污染物造成的环境二次污染问题十分严重, 产生的大气污染物排放到空气中, 不仅造成全球气候变化, 而且对全球的生态环境产生严重影响

收稿日期: 2020-06-17; 修订日期: 2020-10-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1507701); 环境保护政策、法规、规划及标准项目(14402600000190006); 美国环保协会项目(2019-434)

作者简介: 马占云(1980~), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向为环境环境与气候变化, E-mail: mazy@craes.org.cn

* 通信作者, E-mail: gaoqx@craes.org.cn

响^[3].

大气污染物排放清单是当前较为常用的大气污染物核算方法,能够真实地反映大气污染物排放水平、特征及分布.近年来,各地逐渐开展了针对地区和城市的生活垃圾无害化处理排放清单研究工作.生活垃圾填埋处理方面,韦保仁等^[4]对苏州市垃圾填埋的生命周期清单进行了分析;曾灿等^[5]计算了宁波市 2005~2013 年的废弃物温室气体排放量清单;余国泰^[6]通过对 46 个主要城市生活垃圾清运量及甲烷的排放量统计和调研,实际上为今后进一步研究来自废弃物甲烷排放进行了初步的探索性研究;同时,为非工业源甲烷排放量及其预测与制定排放清单提供依据.生活垃圾焚烧处理方面,Wang 等^[7]构建了我国 2013 年城市固体废物开放焚烧 9 种重金属大气排放清单,弥补了生活垃圾焚烧大气污染物排放领域长时间的空白.我国虽在排放清单方面有一定的经验积累,但是至今仍然没有统一的排放清单技术规范.我国大气污染物排放清单编制主要基于两类方法.一是自上而下,以省(自治区、直辖市)为空间单位,时间上以年为单位,主要利用排放因子和基于统计的活动水平数据计算各种污染源及各类污染物的排放量;二是自下而上,基于排放源的逐个调查或者污染申报的数据来进行计算和编制.

本文参考了城市温室气体排放清单的主要参考编制方法,分析了国内城市大气污染物清单中不同大气污染物对应的计算方法和参数选取等方面的差异.并以此为依据,结合我国实际情况,通过获取各省市生活垃圾无害化处理活动水平数据及大气污染物排放因子,自上而下计算了 2016 年中国大陆地区 31 个省市生活垃圾填埋和焚烧处理大气污染物排放清单,并分别从区域及各省市角度对污染物排放的空间分布特征进行了分析.通过建立我国生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单,动态反映地区能源结构,废弃物的种类和数量、行业和地区分布情况,主要大气污染物的产生、排放处理措施,以及在各区域清单的分布情况,以期研究污染物总量减排和空气质量达标等环境管理问题,及相关气候变化模型和制订空气污染物控制对策提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域及对象

本研究以中国大陆地区 31 个省市及七大地理区域为研究对象,基准年为 2016 年,中国城市统计年鉴^[8]和中国统计年鉴^[9]为基础资料,结合我国环境统计年报和污染普查等最新统计数据,参考国内

外生活垃圾填埋和焚烧所产生的主要大气污染物排放因子,计算各类大气污染物排放量,建立 2016 年中国 31 个省、市、自治区生活垃圾填埋和焚烧处理大气污染物排放清单.具体包括生活垃圾填埋处理的 VOCs、TSP、PM₁₀、PM_{2.5} 和 CH₄ 等大气污染物的排放量,废弃物焚烧处理的 CH₄、CO、NO_x、SO₂、PM_{2.5}、PM₁₀、TSP、BC、CO₂ 和 NH₃ 等大气污染物的排放量,其中 CH₄ 是废弃物处理主要的温室气体,在我国既作为温室气体又作为污染物来研究,所以本文也加入到污染物清单中进行分析.

1.2 计算方法及数据来源

1.2.1 计算方法

生活垃圾无害化处理的污染物排放计算方法一般以美国 EPA2013 的指南的方法为依据,采用排放因子法自上而下建立中国大陆地区 2016 年生活垃圾无害化处理大气污染物排放清单.废弃物源大气污染物核算的最基本的方法为活动水平数据乘以排放因子, $E = AD \times EF$,能获得活动水平和排放因子的直接利用公式计算,而 CH₄、NH₃ 和 PM_{2.5} 等污染物有其特定的计算方法,分别见公式(1)~(5):

$$CH_{4Emissions} = \sum_i (TOW_i \cdot EF_i) - R \quad (1)$$

CH₄ 排放量的最常用计算方法为基于政府间气候变化专门委员会(IPCC)指南提供的方法,该方法为自上而下的,计算的结果是从全国各区域以及各省份的,没有计算到各城市. CH₄ 排放量的计算方法因处理方式不同而存在差异,填埋处理采用一阶衰减法(first order dynamic, FOD),构建甲烷排放模型,具体计算方法如下:

$$CH_{4EmissionsT} = \left(\sum_x CH_{4产生x,T} - R_T \right) \cdot (1 - OX_T) \quad (2)$$

式中,CH_{4EmissionT}为 T 年的 CH₄ 排放量, Gg; T 为清单年份,指单个年份; x 为固体废物类别或类型/材料,如:纸张、厨余和织物等; R_T 为 T 年的 CH₄ 回收量, Gg; OX_T 为 T 年的 CH₄ 氧化因子.

焚烧处理 CH₄ 排放量基于废弃物焚化/露天燃烧的量和相关排放因子计算:

$$CH_{4Emissions} = \sum_i (IW_i \times EF_i) \times 10^{-6} \quad (3)$$

式中,CH_{4Emissions}为清单年的 CH₄ 排放量, Gg·a⁻¹; IW_i 为焚化或露天燃烧的固体废物类型 i (湿重)的数量, Gg·a⁻¹; EF_i 为综合排放因子, kg·Gg⁻¹, 以 CH₄·(废弃物)⁻¹计; 10⁻⁶为从 kg 到 Gg 的转换因子; EF_i 为焚化/露天燃烧废弃物的类型或类别.

大气 NH₃ 排放的计算采用排放系数的计算方

法, NH_3 排放的总量即为活动水平和排放系数的乘积.

$$E_{i,j,y} = A_{i,j,y} \times \text{EF}_{i,j,y} \times \gamma \quad (4)$$

式中, i 为地区(省、直辖市、自治区或县), j 为排放源, y 为年份, $E_{i,j,y}$ 为 y 年 i 地区 j 排放源的排放量. A 为活动水平, EF 为排放系数. γ 为大气氮-氨转换系数, 针对畜禽养殖业, 取 1.214, 其它行业取 1.0.

$\text{PM}_{2.5}$ 的排放采用大气细颗粒物一次源排放的计算方法:

$$E = A \times \text{EF} \times (1 - \eta) \quad (5)$$

式中, E 为生活垃圾焚烧处理排放源对应的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量. 对于点源, A 为该排放源的活动水平; 对于面源, A 为清单中最小行政区单元的活动水平. EF 为 $\text{PM}_{2.5}$ 的产生系数; η 为污染控制技术对 $\text{PM}_{2.5}$ 的去除效率.

1.2.2 活动水平及排放因子数据来源

活动水平数据是特定时期内(1 a)以及在界定地区里, 产大气污染物排放和清除的人为活动量, 如: 生活垃圾产生量, 能源、燃料或电力消耗量, 物质的产生量、提供服务的数量或受影响的土地面积等. 以 2016 年中国城市建设统计年鉴为基础资料, 利用我国环境统计年报、污染普查等最新统计数据, 此外, 其它数据来源于煤炭、电力和化工等行业统计年鉴, 相关单位和行业协会调研, 专家估计, 学术期刊杂志和研究报告等资料.

排放因子是用于量化单位活动水平的大气污染物排放量或清除量的系数, 通常是某一活动水平下的代表性排放速率. 如单位生活垃圾填埋或焚烧处理处置的 CH_4 和 VOCs 排放量等. 根据 IPCC 清单指南大气污染物清单编制, 需要根据活动水平数据和排放因子来计算大气污染物的排放量.

关于排放源清单方面的论文往往借鉴国外排放因子. 由于国外排放因子是根据当地的具体情况测定或计算得到的, 与我国实际情况有较大出入, 因而建立的排放清单存在很大的不确定性. 在排放因子的选择上主要遵循以下原则: 优先选取国内专家实测数据; 若无实测数据选取最为接近本研究基准年的文献成果; 最后考虑选取国外排放因子^[10~16]. 本文利用文献^[17~24], 根据生活垃圾处理方式选取合适的排放因子, 部分大气污染物排放因子的数据来源如表 1 所示.

1.3 相关参数的确定

1.3.1 $\text{PM}_{2.5}$ 去除效率

$\text{PM}_{2.5}$ 污染已成为突出的大气环境问题, $\text{PM}_{2.5}$ 的去除效率因控制技术而异, 不同的除尘技术和设备影响 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放量. 常规的高效除尘设备如电除尘

表 1 生活垃圾无害化处理的污染物排放因子

Table 1 Pollutant emission factors for the harmless treatment of domestic garbage

污染物	填埋处理量	文献	焚烧处理量	文献
VOCs	1.56 kg·mg ⁻¹	[20]	5.9 g·mg ⁻¹	[18]
PM _{2.5}	0.033 g·mg ⁻¹	[17]	3 g·mg ⁻¹	[19]
PM ₁₀	0.219 g·mg ⁻¹	[17]	3 g·mg ⁻¹	[19]
TSP	0.463 g·mg ⁻¹	[17]	3 g·mg ⁻¹	[19]
NH ₃	0.56 g·mg ⁻¹	[17]	3 g·mg ⁻¹	[18]
CO	— ¹⁾	—	41 g·mg ⁻¹	[18]

1) “—”表示文章中没有相关数据/未进行估算

器和袋式除尘器, 对于粒径小于 0.1 ~ 2.0 μm 的细粒子不能有效捕集, 当颗粒物直径小于 2 μm 时, 除尘效率会显著下降, 极端情况下, 效率甚至会下降到 50% 以下. 因此, 为减少 $\text{PM}_{2.5}$ 等细微颗粒的排放, 对现有除尘技术进行评估后发现, 相对实用高效且经济可行的控制 $\text{PM}_{2.5}$ 的技术主要是: 湿式除尘器、电袋混合式除尘器、凝并器和雾化除尘器. 这 4 种除尘器的除尘效率如表 2 所示^[15,16,25]. 由于电袋式除尘器效率高, 成为满足新的排放标准要求的高可靠性、高效率除尘器, 可适用于排放要求较高的城市周边工业如建材和冶金等行业企业, 在我国已得到广泛应用^[25~29]. 因此本研究选用电袋式除尘器除尘效率作为污染控制技术对 $\text{PM}_{2.5}$ 的去除效率.

表 2 除尘器除尘效率/%

Table 2 Dust removal efficiency of dust collector/%

除尘设备	凝并器	湿式除尘器	雾化除尘器	电袋混合式除尘器
效率	80	95	96	99.9

1.3.2 固体废弃物的类型 i (湿重) 的数量 IW_i

焚烧处理甲烷排放量的计算与固体废弃物类型 i (湿重) 的数量相关, 不同固体废弃物类型对应的成分和数量不同. 由于我国幅员辽阔, 不同地区生活习惯的差异以及气候条件不同, 湿度与温度差别较大, 生活垃圾组分不一样. 因此很难确定一个统一的城市生活垃圾类型 i (湿重) 及数量. 对待我国大陆地区 31 个主要城市生活垃圾类型 i (湿重) 及其数量, 只能采用统一的综合参数来估算, 因此存在着不确定性^[11].

1.3.3 填埋源甲烷排放因子的确定

CH_4 排放量计算所需要的排放因子及参数包括 MCF (甲烷修正因子)、DOC (可降解有机碳数量, 以 C 计, Gg)、 DOC_f (分解的可降解有机碳比例)、 F (CH_4 在垃圾填埋气体中的比例)、 $t_{1/2}$ (垃圾半衰期)、 K (CH_4 产生率) 和 OX (氧化因子). 通过参考国家信息通报温室气体清单编制组废弃物处理温室气体清单研究成果^[29], 结合我国生活垃圾处理的实

际情况和垃圾成分的演变趋势确定相应取值, MCF 的取值根据中国历年垃圾填埋状况得到中国垃圾填埋处置场所的发展情况, 从 1967 ~ 2016 年期间划分为 5 个阶段. 1967 ~ 1978 年为第一阶段, 此阶段中国城市生活垃圾没有进行集中处理, 基本随意堆放; 1979 ~ 1990 年为第二阶段, 20 世纪 80 年代开始逐渐形成垃圾围城, 垃圾开始形成大的垃圾堆; 1991 ~ 2001 年为第三阶段, 1991 年建设了中国第一座垃圾填埋场, 垃圾开始集中填埋; 2002 ~ 2008 年为第四阶段, 垃圾填埋场数目不断地增多, 大量垃圾选择填埋处理; 2009 ~ 2016 年为第五阶段, 城市生活垃圾填埋开始有序地进行, 并且开始进行数据记载和统计. 符合中国实际的分阶段 MCF 值, 分别为 0.4、0.6、0.75、0.92 和 0.96, 城市生活垃圾成分在一定的时期内变化不会太大, 根据我国社会经济发展趋势分析, 将城市生活垃圾按物理成分也可分成 4 个阶段, 即 1967 ~ 1990 年为第一阶段, 1991 年为 2000 年为第二阶段, 2001 ~ 2012 年为第三阶段, 2013 ~ 2016 年为第四阶段, 根据垃圾成分, 利用 IPCC 提供的方法, 计算得出 DOC 分别为 0.095、0.149、0.151 和 0.142, DOC_r 为 0.55, F 取值在 0.4 ~ 0.6 之间, 本次计算取值为 0.5, $t_{1/2}$ 为 2.3, K 为 0.5, OX 为 0.1.

1.3.4 焚烧源甲烷排放因子的确定

废弃物焚烧产生的 CH_4 排放主要取决于焚烧过程的连续性、焚烧技术和管理方法. 连续焚烧包括无需每日启动和关闭的焚烧炉. 分批类和半连续类焚烧意为焚烧炉通常至少要每天启动和关闭一次. 操作中这些差异导致了排放因子的差异. 对于生活垃圾和工业废物的连续焚烧, 文献[17]推荐采用能源部门化石燃料焚烧的 CH_4 排放因子. 对于其他工业废物焚烧炉的 CH_4 排放因子, 按照废物类型而非技术来区分, 具体见表 3. 我国生活垃圾焚烧基本上是炉排炉技术, 该技术仅在设备启动时加煤、油等助燃物助燃, 燃烧过程中除设备故障或检修等情况, 焚烧炉不中断燃烧. 因此, 本次生活垃圾焚烧甲烷的产

生量统一使用连续焚烧自动加煤机的排放因子 $0.2 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$ 作为排放因子计算.

2 结果与分析

2.1 处理源城市分布特征

2016 年, 生活垃圾处理总量为 19 673.78 万 t, 无害化处理生活垃圾的几种方式中, 生活垃圾的填埋和焚烧处理量分别为 11 866.48 万 t 和 7 378.51 万 t, 分别占总量的 60% 和 38%. 同时, 生活垃圾焚烧和填埋处理的应用正在不断增长, 截止 2016 年, 全国建成运行的填埋处理厂近 657 座, 垃圾焚烧发电厂近 249 座, 分别分布在 29 个省、市和自治区. 如图 1 所示, 新疆、江西、内蒙古、陕西和甘肃等地区生活垃圾填埋厂的比例占总无害化处理厂的 90% 以上, 就连人口密度较大的湖南、湖北、山东和广东等地区的占比也在 60% 以上, 而浙江、福建、江苏、天津和上海等地区生活垃圾焚烧相对于其他城市相比发展较好, 占总无害化处理厂的 50% 以上(中国香港、澳门和台湾资料暂缺, 下同).

目前生活垃圾填埋处理仍然是我国主要处理方式, 但是我国人口密度大, 城市生活垃圾与土地资源矛盾尖锐, 垃圾焚烧处理迅速发展. 如长三角、珠三角和京津冀等发达城市, 急需增加垃圾焚烧处理来替代占用大量土地资源的填埋处理; 江浙沪一带重点城市其经济技术水平较高, 促进了垃圾焚烧处理的发展. 这与刘峰等^[30]的研究结果一致, 表明垃圾焚烧处理主要集中在东部 5 个省(浙江、广东、江苏、山东和福建)和 4 个直辖市(北京、上海、天津和重庆), 约占总量的 70%. 人口密度相对适中的部分发达省区, 如湖南和湖北等省市过于依赖垃圾填埋技术, 垃圾焚烧处理占比较小; 西藏、青海和新疆等欠发达地区, 人口密度较小, 对垃圾焚烧的应用需求不大, 因此焚烧技术发展相对落后. 这进一步说明了生活垃圾处理方式的选择与城市规模、城市人口以及经济发展水平息息相关.

2.2 污染物排放城市分布特征

根据 2016 年我国生活垃圾无害化处理的资料, 结合排放因子, 计算得到 2016 年中国大陆地区 31 个省市生活垃圾填埋和焚烧排放的各类污染物排放量(图 2). 我国大陆地区 2016 年生活垃圾焚烧排放气态污染物的 CH_4 、 SO_2 、 NO_x 、 NH_3 、 $VOCs$ 、 CO 、 TSP 、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 和 BC 总量分别是 25 389.10、6 419.30、70 923.84、221.36、435.33、3 025.19、221.36、221.36、2.21 和 2.86 t, 生活垃圾填埋处理的 CH_4 、 $VOCs$ 、 NH_3 、 TSP 、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 等气态污染物排放总量分别为 3 472 084.50、185 117.10、

表 3 废弃物焚烧的 CH_4 排放因子

Table 3 CH_4 emission factors for waste incineration

垃圾类型	焚烧/技术类型	文献[17]推荐的排放因子/ $\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$	
城市生活垃圾	连续焚烧	自动加煤机	0.2
		流化床	0
	半连续焚烧	自动加煤机	6
		流化床	188
	分批类焚烧	自动加煤机	60
		流化床	237
工业污泥	(半连续或间歇式焚烧)	9 700	
废油	(半连续或间歇式焚烧)	560	

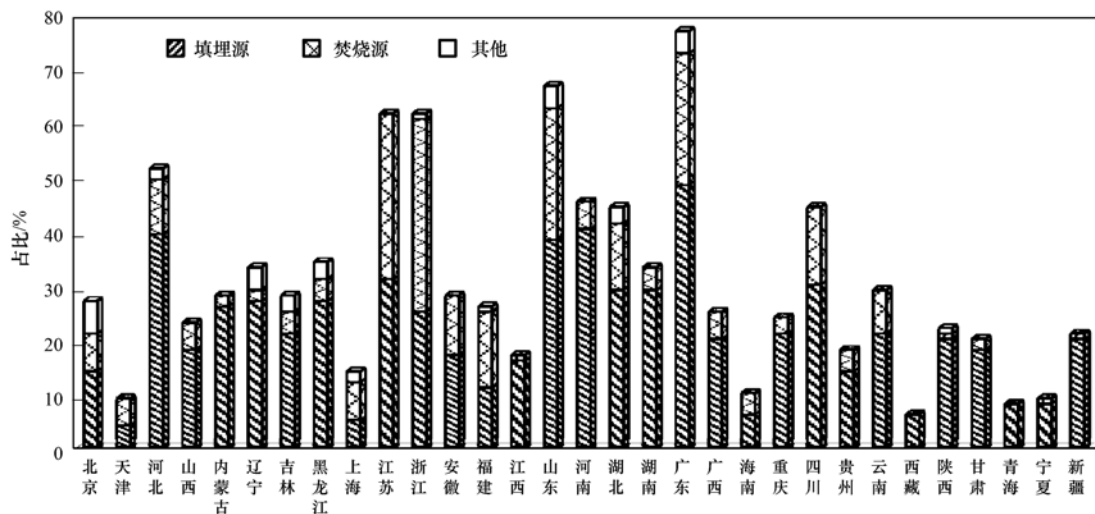


图 1 2016 年各类型生活垃圾处理厂占比

Fig. 1 Proportion of various types of domestic waste treatment plants in 2016

66.45、54.94、25.99 和 3.92 t。图 2 给出了我国 2016 年各地区 31 个省市生活垃圾无害化处理大气污染物的排放强度及差异。

城市尺度的空间分布,江苏、浙江、广东、山东、福建、湖北和四川等省份生活垃圾焚烧处理大气污染物排放量最高,其次为河北、安徽、上海、北京、云南和重庆等省区。这些地区都是一些人口密度大,生活垃圾产生量较大的地区。排放量较低的区域分别是甘肃、江西、陕西和新疆等地区。而填埋源大气污染物的排放量较大的是广东、辽宁、河南、山东、浙江和湖南等省份,其次是四川、陕西、北京、江苏、湖北和河北等地区,青海、宁夏、海南和西藏等地区排放量较低。

由于各个省市及地区所处的地理位置和气候条件不同,经济发展水平和人口密度存在的巨大差异以及生活垃圾产生量的不同,使得不同区域各类污染物排放的总量差异很大。我国城市生活垃圾产生量最高值的分布和特大城市的分布基本一致,京津冀附近的高值区非常明显。废弃物源大气污染物的排放量各排放源和各省排放量有很大的区别。由图 2 可以看出,填埋源排放量与人口分布基本一致,沿海和内陆人口大省,其排放量都比较多,而焚烧源主要是在经济发达的沿海和内陆地区排放量大。由于焚烧和填埋的处理量和处理水平大不相同,废弃物填埋源处理大气污染物 CH_4 和 VOCs 排放量大于焚烧源排放量,废弃物焚烧处理产生的 NH_3 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 TSP 的量远大于填埋产生量。从城市分布来看,主要和各处理源的处理量有关,焚烧处理较多的地方,产生的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 及 TSP 的排放量就越大。

2.3 污染物排放区域分布特征

从区域角度分析,区域生活垃圾填埋和焚烧排

放各类污染物排放量受生活垃圾处理情况决定,而生活垃圾处理情况受环境因素、区域特征及经济发展等多方面因素影响,从而中国城市生活垃圾各种处理方式的规模及效率在各区域呈现不同的特征。以填埋和焚烧处理生活垃圾产生的 CH_4 为例,对我国区域生活垃圾无害化处理产生的污染物排放特征进行分析说明,如图 3。

我国东部和中部地区经济发展水平相对较高,城市数量和人口较多,在我国填埋和焚烧处理大气污染物产量中占了举足轻重的地位。从区域分布情况来看,生活垃圾处理 CH_4 的整体排放量呈东高西低的趋势。如图 3 所示,华东地区的生活垃圾填埋及焚烧产生的 CH_4 排放量高于其他 6 个地区,西北地区的排放量最低。从经济和人口水平来看,华东地区、华北地区及华南地区经济发达,人口基数大,同时高 GDP 吸引使人口流动量增大,生活消耗产生大量生活垃圾,进而造成更多 CH_4 排放。就各区域焚烧源和填埋源 CH_4 排放量分布特征差异进行分析,发现焚烧源西南地区大于华中地区,而填埋源华中地区大于西南地区,这主要可能是由于西南地区的焚烧厂数量大于华中地区,而填埋场数量小于华中地区所导致的。

2.4 污染物排放时间分布特征

根据全国历年生活垃圾无害化处理的产量,结合排放因子,计算得到 2016 年中国大陆地区生活垃圾填埋和焚烧排放的各类污染物排放量变化趋势(图 4)。2010~2016 年,生活垃圾填埋源和焚烧源处理量呈上升趋势,因此各类大气污染物排放总量也表现为上升趋势。研究期间,生活垃圾焚烧源和填埋源处理排放的气态污染物总量分别增加了 69% 和 19%。由此可见,与 2010 年相比,2016 年我国生

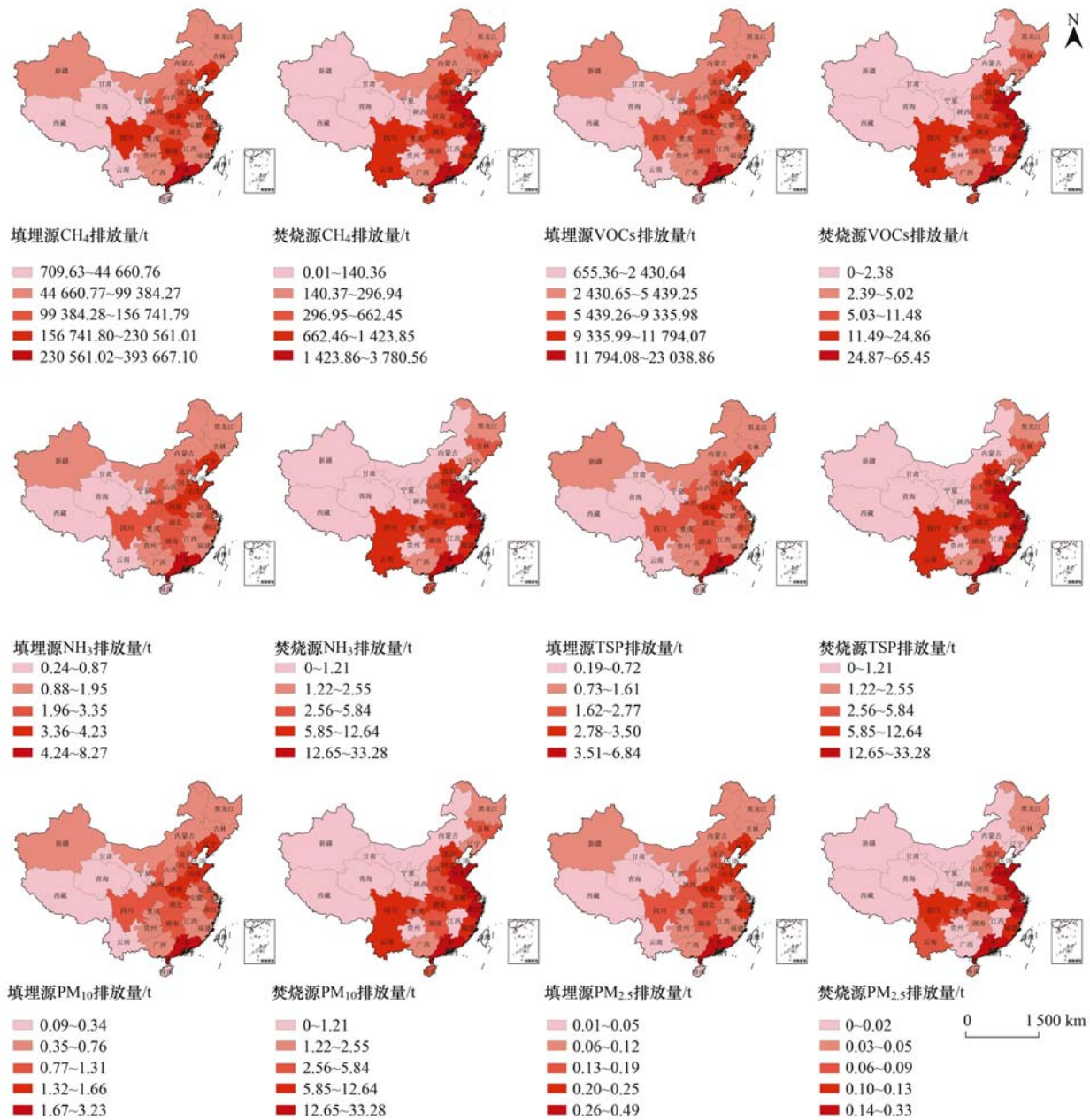


图2 各省市生活垃圾无害化大气污染物排放量

Fig. 2 Emissions of harmless air pollutants from domestic garbage in various provinces and cities

生活垃圾填埋处理量仍大于焚烧处理量,但生活垃圾焚烧处理量增加比例大于填埋处理量,表明我国城市生活垃圾处理还是以卫生填埋为主,但焚烧处理量与卫生填埋处理量之间的差距在逐步缩小,有望因其显著的减量化和余热可回收特点,逐渐成为国内外生活垃圾处置的重要方法^[31,32]。

2.5 排放源贡献率分析

图5展示了我国生活垃圾产生6种主要污染物的排放贡献率。生活垃圾填埋处理是我国 CH_4 和VOCs的主要排放源,分别占其总量的99%以上。这不仅与生活垃圾填埋处理量相关,还有填埋处理塑造的环境条件及污染物的产生机制有关,如在填埋

场的密闭条件下,有机物厌氧分解产生的填埋气中有45%~60%都是甲烷。同时填埋源也是 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要排放源,事实上,焚烧源 $\text{PM}_{2.5}$ 的产生量远大于填埋源产生量,可能是因为国内大部分垃圾焚烧厂为减少焚烧产生气体的二次污染,运用不同的除尘技术处理焚烧产生的大气污染物,而填埋处理厂对填埋气的主要处理方式是回收和焚烧,对 $\text{PM}_{2.5}$ 的除尘效果较差,因此填埋源也成为 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要贡献源。

对于 NH_3 、TSP和 PM_{10} 等大气污染物来说,焚烧源的贡献率远大于填埋源,各占总量的77%、80%和89%。主要原因在于生活垃圾中各种成分在有氧及缺氧条件下分别发生完全燃烧和不完全燃

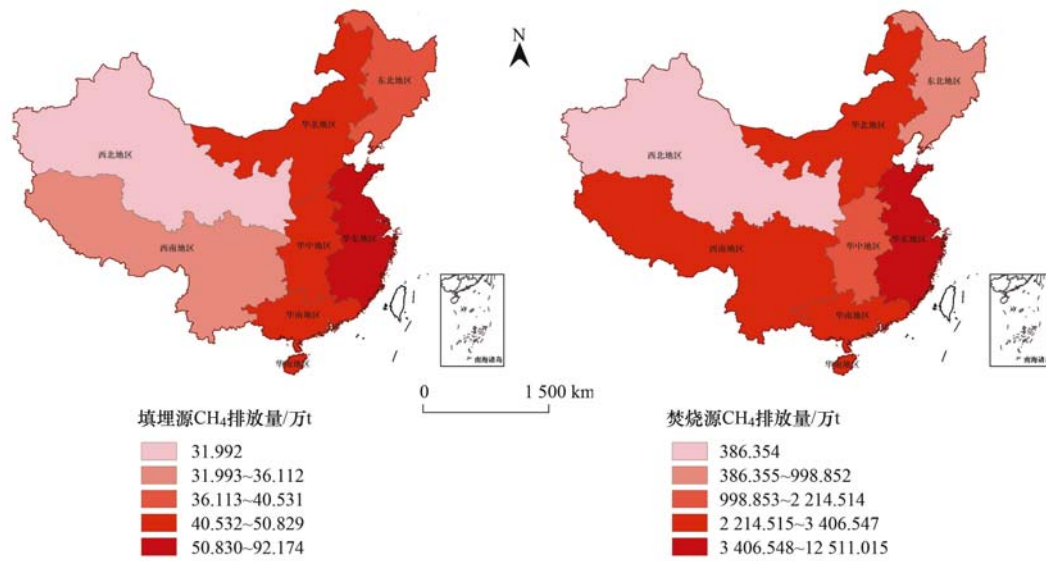


图3 各区域生活垃圾无害化大气污染物排放量

Fig. 3 Emissions of harmless air pollutants from domestic garbage in various regions

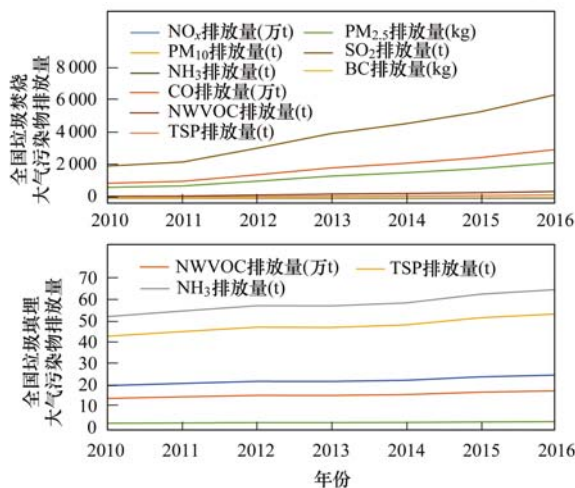


图4 2010~2016年全国生活垃圾无害化大气污染物排放量

Fig. 4 National air pollutant emissions from the harmless treatment of domestic garbage in 2010-2016

烧,颗粒物是垃圾焚烧过程中产生的微小无机颗粒物,除了燃烧空气卷起的微小不燃物和可燃物的灰分,在发生不完全燃烧时,未燃碳分和纸灰等也会成为颗粒物的一部分。

2.6 计算的不确定性分析

在建立大气污染物排放计算的过程中,由于存在的随机误差、监测数据误差、排放源信息缺失和计算参数的代表性不足,会使计算产生一定的不确定性.排放计算的不确定性分析对计算应用具有非常重要的意义,通过对计算不确定性进行定量研究,能够了解计算结果的可靠性,从而为建立相关排放控制措施提供依据,筛选出排放计算不确定性较大的排放源,在之后工作中有针对性地改进以提高整体计算的可信度。

排放的计算为各排放因子和活动水平成绩的总

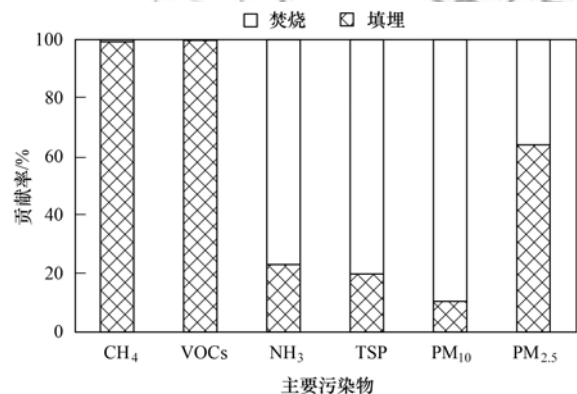


图5 2016年中国生活垃圾无害化处理排放贡献率

Fig. 5 Contribution rates of China's domestic garbage innocuous treatment in 2016

和,其不确定性主要来自2个方面^[33]:一是收集的排放源活动水平资料不准确或缺失;二是计算缺失本地化的排放因子,采用了国内其他成熟研究中的排放因子或者使用国外的排放因子替代,此次计算不确定性的定量评估采用IPCC的分析误差传递法来进行计算,根据计算输入信息各分项的不确定性范围值推算出最终计算结果的不确定值,并分为2类情况进行公式计算。

当不确定性量由加法合并时,总和的标准偏差为相加量的标准偏差的平方之和的平方根,其中标准偏差都以绝对项表示:

$$U_{total} = \frac{\sqrt{(U_1x_1)^2 + (U_2x_2)^2 + \dots + (U_nx_n)^2}}{x_1 + x_2 + \dots + x_n} \quad (6)$$

当不确定性量用乘法合并时,应用同一规则,但标准偏差都必须表示为适当平均值的分数:

$$U_{total} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2} \quad (7)$$

式中, U_{total} 为总不确定性; U_i 为各参数的不确定性值; x_i 为对于参数的具体数值.

本计算研究所需的水平资料由于来源于统计数据, 不确定性值较小且基本一致, 各类污染物排放量的不确定性差异主要源于排放因子具体不确定值. 采用式(6)和(7)计算得到的计算不确定性结果见表4.

总体来看, 各污染物排放量的不确定性值相对较低. 其中, 填埋源和焚烧源的 CH_4 不确定性较低(13.98%和0.31%), 这主要是由于 CH_4 填埋源排放

量计算采用的排放因子是对国内填埋场甲烷的排放进行实测所得, 而焚烧源 CH_4 的排放因子来自 IPCC 指南中, 排放因子带来的不确定性较低; 而 VOCs、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 由于排放因子的行业差异较大, 导致其不确定性较高进而影响计算结果的不确定性. 前文也提到, 计算的不确定性主要来自基础数据和排放因子两方面, 建议今后的计算工作中, 选择精确、可信度高的数据来源, 提升基础数据质量并且建立具有区域代表性的排放因子数据库, 从而减小排放量的不确定性, 获得精准可靠的大气污染物排放量.

表4 计算不确定性分析

Table 4 Emission inventory uncertainty analysis

处理源	不确定性(M)/%									
	CH_4	VOCs	$PM_{2.5}$	PM_{10}	TSP	NH_3	CO	NO_x	SO_2	BC
填埋源	13.98	39.78	58.13	14.04	12.41	14.08	— ¹⁾	—	—	—
焚烧源	0.31	0.15	31.86	40.68	19.92	19.87	21.86	21.86	21.86	21.86
不确定性	13.87	39.68	36.44	38.89	16.15	15.63	21.86	21.86	21.86	21.86

1) “—”表示文章中没有相关排放量数据, 所以未进行不确定性估算

3 讨论

在全球气候加速变化的背景下, 城市大气污染物减排尤为重要. 中国城市大气污染物清单编制方面的统计数据基础薄弱, 计算标准不统一, 特别是生活垃圾无害化处理过程中产生的排放清单没有相关研究, 计算所需部分活动水平指标尚未纳入统计体系, 可比性较低. 为推动城市大气污染物清单编制的进程, 在开展适合中国现状的生活垃圾无害化处理清单研究时, 不仅要在理论和方法方面加强探索, 在实际操作过程中, 要及时发现问题、解决问题和总结经验, 进而促进我国生活垃圾无害化处理大气污染物减排. 首先, 要不断完善机制体制, 建立合适的管理体系. 其次, 为生活垃圾无害化处理排放清单建立特有的基础数据库, 再者, 应形成科学规范的操作指南, 最后, 加强信息公开以及公众对清单编制结果的监督和审核. 由于排放因子的行业差异较大, 导致其不确定性较高进而影响计算结果的不确定性. 建议今后的计算工作中, 选择精确和可信度高的数据来源, 提升基础数据质量并且建立具有区域代表性的排放因子数据库, 从而减小排放量的不确定性, 获得精准可靠的大气污染物排放量清单.

4 结论

(1) 中国城市生活垃圾各种处理方式的规模及效率在各区域呈现不同的特征. 长三角、珠三角和京津冀等发达城市, 垃圾焚烧处理相对于其他城市垃圾焚烧发展较好; 再者江浙沪一带重点城市焚烧处理源分布较多. 人口密度相对适中的部分发达省区

以及西藏、青海和新疆等欠发达地区, 焚烧技术发展相对落后.

(2) 2010年~2016年, 生活垃圾填埋源和焚烧源处理量呈上升趋势, 因此各类大气污染物排放总量也表现为上升趋势, 分别增加了69%和19%; 空间分布特征显示填埋源排放量与人口分布基本一致, 沿海和内陆人口大省, 其排放量都比较多, 而焚烧源主要是在经济发达的沿海和内陆地区排放量大; 废弃物源大气污染物的排放各排放源和各省排放量有很大的区别, 填埋源 CH_4 和 VOCs 的排放量高于焚烧源排放量, 焚烧源产生的 NH_3 、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 TSP 的量远大于填埋产生量.

(3) 生活垃圾填埋处理是我国 CH_4 和 VOCs 的主要排放贡献源, 分别占其总量的99%以上; 对于 NH_3 、TSP 和 PM_{10} 等大气污染物来说, 焚烧源的贡献率远大于填埋源, 各占总量的77%、80%和89%; $PM_{2.5}$ 的主要产量来源于生活垃圾的焚烧处理, 但排放的主要贡献源是生活垃圾的填埋处理.

参考文献:

- [1] 李辉. 城市垃圾: 现状与出路[J]. 生态经济, 2014, 30(4): 10-13.
- [2] 王亦楠. 我国大城市生活垃圾焚烧发电现状及发展研究[J]. 宏观经济研究, 2010, (11): 12-23.
- [3] 张倩, 徐海云. 生活垃圾焚烧处理技术现状及发展建议[J]. 环境工程, 2012, 30(2): 79-81, 89.
Zhang Q, Xu H Y. Status and development suggestion of incineration technology of domestic garbages[J]. Environmental Engineering, 2012, 30(2): 79-81, 89.
- [4] 韦保仁, 王俊, Kiyotaka T, 等. 苏州市生活垃圾两种处置方法的生命周期影响评价[J]. 环境工程学报, 2009, 3(8): 1517-1520.
Wei B R, Wang J, Kiyotaka T, et al. Life cycle impact

- assessment on two disposal methods of municipal solid wastes in Suzhou [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, **3**(8): 1517-1520.
- [5] 曾灿, 俞永浩, 包薇红. 宁波市废弃物处理温室气体排放特征研究[J]. 环境污染与防治, 2016, **38**(8): 48-54.
Zeng C, Yu Y H, Bao W H. Greenhouse gases emission characteristic of municipal waste management in Ningbo City[J]. Environmental Pollution and Control, 2016, **38**(8): 48-54.
- [6] 余国泰. 中国城市生活垃圾中甲烷排放清单编制的初步研究[J]. 环境科学进展, 1997, (S1): 41-49.
Yu G T. Chinese city primary research list of methane emissions from man-made waste[J]. Advances in Environmental Science, 1997, (S1): 41-49.
- [7] Wang Y, Cheng K, Wu W D, *et al.* Atmospheric emissions of typical toxic heavy metals from open burning of municipal solid waste in China[J]. Atmospheric Environment, 2017, **152**: 6-15.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴[M]. 北京: 中国计划出版社, 2010-2016.
- [9] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [10] 田贺忠, 郝吉明, 陆永琪. 中国氮氧化物排放清单及分布特征[J]. 中国环境科学, 2001, **21**(6): 493-497.
Tian H Z, Hao J M, Lu Y Q. Inventories and distribution characteristics of NO_x emissions in China [J]. China Environmental Science, 2001, **21**(6): 493-497.
- [11] Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, *et al.* An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, **108**(21), doi: 10.1029/2002JD003093.
- [12] Streets D G, Waldhoff S T. Present and future emissions of air pollutants in China: SO₂, NO_x, and CO [J]. Atmospheric Environment, 2000, **34**(3): 363-374.
- [13] Klimont Z, Cofala J, Schöpp W, *et al.* Projections of SO₂, NO_x, NH₃ and VOC emissions in East Asia up to 2030 [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2001, **130**(1-4): 193-198.
- [14] 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.
- [15] 张会君, 卢徐胜. 控制 PM_{2.5} 的除尘技术概述[J]. 中国环保产业, 2012, (3): 29-33.
Zhang H J, Lu X S. Explication on controlling PM_{2.5} precipitation technology [J]. China Environmental Protection Industry, 2012, (3): 29-33.
- [16] 郭浩, 纪德钰, 苗书一, 等. 工业烟尘废气中 PM_{2.5} 的除尘技术概述[J]. 环境与可持续发展, 2014, **39**(3): 174-176.
Guo H, Ji D Y, Miao S Y, *et al.* Overview on precipitation technology of PM_{2.5} in industry smoke [J]. Environment and Sustainable Development, 2014, **39**(3): 174-176.
- [17] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[M]. Kanagawa, Japan: IPCC National Greenhouse Gas Inventory Programme, 2006.
- [18] Zhao Y, Wang S X, Nielsen C P, *et al.* Establishment of a database of emission factors for atmospheric pollutants from Chinese coal-fired power plants[J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(12): 1515-1523.
- [19] Pulles T, Visschedijk A. Emission estimation methods for particulates: the CEPMEIP emission factor database [A]. Proceedings of the 11th International Emission Inventory Conference-" Emission Inventories-Partnering for the Future" [C]. Atlanta, GA: EPA, 2002.
- [20] Baggott S L, Lelland A, Passant N P, *et al.* Review of carbon emission factors in the UK greenhouse gas inventory [R]. Department for Environment, Food and Rural Affairs, 2004.
- [21] 唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 等. 长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1623-1632.
Tang X B, Huang C, Lou S R, *et al.* Emission factors and PM chemical composition study of biomass burning in the Yangtze River Delta region[J]. Environmental Science, 2014, **35**(5): 1623-1632.
- [22] 齐丽, 任玥, 刘爱民, 等. 北京市某垃圾焚烧厂周边大气二噁英污染特征及暴露风险[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1317-1326.
Qi L, Ren Y, Liu A M, *et al.* Pollution characteristics of PCDD/Fs in ambient air and exposure risk assessment around a municipal solid waste incinerator in Beijing[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1317-1326.
- [23] 羌宁, 王红玉, 赵爱华, 等. 生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 513-519.
Qiang N, Wang H Y, Zhao A H, *et al.* Emission rate of municipal solid waste from landfill working area [J]. Environmental Science, 2014, **35**(2): 513-519.
- [24] Artiñano B, Gómez-Moreno F J, Díaz E, *et al.* Outdoor and indoor particle characterization from a large and uncontrolled combustion of a tire landfill [J]. Science of the Total Environment, 2017, **593-594**: 543-551.
- [25] 莫华, 朱法华, 王圣, 等. 湿式电除尘器在燃煤电厂的应用及其对 PM_{2.5} 的减排作用[J]. 中国电力, 2013, **46**(11): 62-65.
Mo H, Zhu F H, Wang S, *et al.* Application of WESP in coal-fired power plants and its effect on emission reduction of PM_{2.5} [J]. Electric Power, 2013, **46**(11): 62-65.
- [26] 江得厚, 郝党强, 王勤. 燃煤电厂袋式除尘器发展趋势及其运行寿命的影响因素[J]. 中国电力, 2008, **41**(5): 86-91.
Jiang D H, Hao D Q, Wang Q. Development trend of bag filter in coal-fired power plants and influencing factors on the service life[J]. Electric Power, 2008, **41**(5): 86-91.
- [27] 王丽丽, 王丽萍, 张秀琨, 等. 电袋复合式除尘器的工业化应用研究[J]. 电力环境保护, 2008, **24**(5): 1-4.
Wang L L, Wang L P, Zhang X K, *et al.* Study on electro-bag compound dust removing technology in industrialization application[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2008, **24**(5): 1-4.
- [28] 黄炜, 林宏, 郑奎照, 等. 电-袋复合式除尘技术及应用[J]. 中国环保产业, 2006, (4): 40-42.
Huang W, Lin H, Zheng K Z, *et al.* Electrical & baghouse composite precipitation technology and its application[J]. China Environmental Protection Industry, 2006, (4): 40-42.
- [29] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. 中国温室气体清单研究[M]. 北京: 中国环境出版社, 2014. 324-406.
- [30] 刘峰, 张益. 我国生活垃圾焚烧行业发展现状与趋势[J]. 环境卫生工程, 2012, **20**(2): 7-8.
- [31] Liu F, Zhang Y. Development status and trend of domestic waste incineration industry in China [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2012, **20**(2): 7-8.
- [31] 钟山, 高慧, 张漓衫, 等. 平原典型垃圾焚烧厂周边土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 生态环境学报, 2014, **23**

(1): 164-169.

Zhong S, Gao H, Zhang L S, *et al.* Spatial distribution and pollution evaluation of heavy metal in soils surrounding a typical municipal solid waste incineration plant [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(1): 164-169.

- [32] 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 等. 上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 5262-5271.
Guo Y H, Sun X C, Zhang B J, *et al.* Pollution characteristics,

source analysis and potential ecological risk assessment of heavy metals in soils surrounding a municipal solid waste incineration plant in Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 5262-5271.

- [33] 薛亦峰, 闫静, 宋光武, 等. 大气污染物排放清单的建立及不确定性[J]. *城市环境与城市生态*, 2012, **25**(2): 31-33.
Xue Y F, Yan J, Song G W, *et al.* Establishment of an air pollutant emission inventory and uncertainty analysis[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2012, **25**(2): 31-33.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjxx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论.重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

会议文集:作者.论文名[A].见(In):编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

学位论文:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

报告:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjxx@cees.ac.cn;网址:www.hjxx.ac.cn

CONTENTS

Industrial Emission Characteristics and Control Countermeasures of VOCs in Chinese Rapid Economic Development Areas	MENG Bo-wen, LI Yong-bo, MENG Jing, <i>et al.</i>	(1023)
VOCs Emission Inventory and Variation Characteristics of Artificial Sources in Hubei Province in the Yangtze River Economic Belt	DAI Ling-wen, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1039)
Sources and Distribution Characteristics of HCBd in Rapid Economic Development Areas	TAO Yu-ming, MENG Jing, LI Qian-qian, <i>et al.</i>	(1053)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil of China (2000-2020): Temporal and Spatial Distribution, Influencing Factors	MA Yan, CHENG Lu, RUAN Zi-yuan, <i>et al.</i>	(1065)
Relationships Between Microplastic and Surrounding Soil in an E-Waste Zone of China	CHAI Bing-wen, YIN Hua, WEI Qiang, <i>et al.</i>	(1073)
Analysis of the Spatial Distribution of Heavy Metals in Soil from a Coking Plant and Its Driving Factors	GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, ZENG Wei-bin, <i>et al.</i>	(1081)
Source Apportionment and Spatial Distribution Simulation of Heavy Metals in a Typical Petrochemical Industrial City	SUN Xue-fei, ZHANG Li-xia, DONG Yu-long, <i>et al.</i>	(1093)
Heavy Metal Contents of Soil and Surface Dust and Its Ecological Risk Analysis in a Multifunctional Industrial Park	ZENG Wei-bin, GU Gao-quan, WAN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1105)
Geochemical Patterns and Source Analysis of Soil Heavy Metals in an Iron and Manganese Ore Area of Longyan City	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi, <i>et al.</i>	(1114)
Application Case of Accurate Site Investigation with Life-Cycle Conceptual Site Model Development	LI Pei-zhong, WU Nai-jin, WANG Hai-jian, <i>et al.</i>	(1123)
Levels and Risk Assessment of Short and Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soil from Paper Mill Area	ZHANG Pei-xuan, GAO Li-rong, SONG Shi-jie, <i>et al.</i>	(1131)
Characterization and Health Risks of PCDD/Fs, PCBs, and PCNs in the Soil Around a Typical Secondary Copper Smelter	HU Ji-cheng, WU Jing, XU Chen-yang, <i>et al.</i>	(1141)
Effect of Citric Acid and Phosphorus Coexistence on Cadmium Adsorption by Soil	SONG Zi-teng, ZUO Ji-chao, HU Hong-qing, <i>et al.</i>	(1152)
Uptake and Accumulation of Cadmium and Zinc by Two Energy Grasses; A Field Experiment	ZHENG Rui-lun, SHI Dong, LIU Wen-ju, <i>et al.</i>	(1158)
Bioaccumulation and Translocation Characteristics of Heavy Metals in a Soil-Maize System in Reclaimed Land and Surrounding Areas of Typical Vanadium-Titanium Magnetite Tailings	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, SUN Xiao-ming, <i>et al.</i>	(1166)
Cd Accumulation Characteristics in Different Populations of <i>Hytololephium spectabile</i> Under Salt Stress	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i>	(1177)
Effect of Water Regimes on Pb and Cd Immobilization by Biochar in Contaminated Paddy Soil	TANG Jia-qing, ZHANG Xu, HUANG Guo-yong, <i>et al.</i>	(1185)
Effects of Chitosan-modified Biochar on Formation of Methylmercury in Paddy Soils and Its Accumulation in Rice	YANG Xue-ling, WANG Ming-xing, XU Guo-min, <i>et al.</i>	(1191)
Effects of Chromium Pollution on Soil Bacterial Community Structure and Assembly Processes	YU Hao, AN Yi-jun, JIN De-cai, <i>et al.</i>	(1197)
Analysis of Changes and Factors Influencing Air Pollutants in the Beijing-Tianjin-Hebei Region During the COVID-19 Pandemic	ZHAO Xue, SHEN Nan-chi, LI Ling-jun, <i>et al.</i>	(1205)
Impact of Pollutant Emission Reduction on Air Quality During the COVID-19 Pandemic Control in Early 2020 Based on RAMS-CMAQ	LIU Hou-feng, XU Wei, WEI Min, <i>et al.</i>	(1215)
Light-absorbing Properties and Sources of PM _{2.5} Organic Components at a Suburban Site in Northern Nanjing	SHANG Yue, YU Huan, MAO Yu-hao, <i>et al.</i>	(1228)
Pollution Characteristics and Chromophore Types of Brown Carbon in Xi'an	CHEN Qian, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i>	(1236)
Source and Health Risk Assessment of PM _{2.5} -Bound Metallic Elements in Road Dust in Zibo City	GUO Qing-yuan, BAI Wen-yu, ZHAO Xue-yun, <i>et al.</i>	(1245)
Health Benefit Assessment of PM _{2.5} Pollution Control in Beijing	DU Pei, WANG Jian-zhou, <i>et al.</i>	(1255)
Seasonal Characteristics of Air Pollutant Sources and Transport Pathways in Xining City	LIU Na, YU Ye, MA Xue-qian, <i>et al.</i>	(1268)
Concentrations and Patterns of Atmospheric Particulate Nitrogen and Phosphorus During Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	YUAN Gang, QI Jian-hua, DING Xue, <i>et al.</i>	(1280)
Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Using Mobile Monitoring Around the Industrial Parks in the Yangtze River Delta Region of China	WANG Hong-li, GAO Ya-qin, JING Sheng-ao, <i>et al.</i>	(1298)
Characteristics and Cause Analysis of Heavy Air Pollution in a Mountainous City During Winter	LIU Zhuo-cheng, NIU Yue-yuan, WU Jing, <i>et al.</i>	(1306)
Gridded Emission Inventories of Major Criteria Air Pollutants and Source Contributions in Lan-Bai Metropolitan Area, Northwest China	WANG Wen-peng, WANG Zhan-xiang, LI Ji-xiang, <i>et al.</i>	(1315)
VOCs Removal and Emission Monitoring of Beijing Bulk Gasoline Terminals in 2012-2019	HUA Lan-ying, CUI Tong, LI Jin-xiang, <i>et al.</i>	(1328)
Emission Inventory of Air pollutants for the Harmless Treatment of Municipal Solid Waste	MA Zhan-yun, JIANG Yu-cong, REN Jia-xue, <i>et al.</i>	(1333)
Response of Bacteriophage-polysylls to Hypoxic Conditions in the Surface Sediments of the Yangtze Estuary and Its Adjacent Areas	YIN Mei-ling, DUAN Li-qin, SONG Jin-ming, <i>et al.</i>	(1343)
Human Health Risk Assessment of Phenol in Poyang Lake Basin	XU Qian-yun, AI Shun-hao, GAO Xiang-yun, <i>et al.</i>	(1354)
Spatial-Temporal Variation of Water Environment Quality and Pollution Source Analysis in Hengshui Lake	LIU Wei-wei, GUO Zi-liang, WANG Da-an, <i>et al.</i>	(1361)
Composition and Distribution Characteristics of Microplastics in Danjiangkou Reservoir and Its Tributaries	PAN Xiong, LIN Li, ZHANG Sheng, <i>et al.</i>	(1372)
Temporal and Spatial Evolution of Storm Runoff and Water Quality Assessment in Jinpen Reservoir	HUANG Cheng, HUANG Ting-lin, LI Yang, <i>et al.</i>	(1380)
Influence of Storm Runoff on the Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in a Drinking Water Reservoir During the Flood Season	LI Cheng-yao, HUANG Ting-lin, WEN Cheng-cheng, <i>et al.</i>	(1391)
Distribution Characteristics of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Bearing Pollutants in the Ancient Town Rivers of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, CHEN Tan, <i>et al.</i>	(1403)
Chemical Characteristics and Causes of Groups Water in Niangziguan Spring	TANG Chun-lei, ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, <i>et al.</i>	(1416)
Adsorption Behavior of Phosphate by CaO ₂ Remolded Sediment	XU Chu-tian, LI Da-peng, WANG Zi-liang, <i>et al.</i>	(1424)
Nitrogen and Phosphorus Removal in Surface Flow Constructed Wetland Planted with <i>Myriophyllum elatinooides</i> Treating Swine Wastewater in Subtropical Central China	WANG Li-sha, LI Xi, LI Yu-yuan, <i>et al.</i>	(1433)
Accelerated Degradation of Aqueous Recalcitrant Iodinated Contrasting Media Using a UV/SO ₃ ²⁻ Advanced Reduction Process	LIU Zi-qi, QIU Fu-guo, LAI Man-ting, <i>et al.</i>	(1443)
Degradation of Dye Rhodamine B by Solar Thermally Activated Persulfate	MA Meng, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i>	(1451)
One-step Preparation of Lanthanum-Magnesium Ferrite and Its Phosphate Adsorption Capacity in Aqueous Solutions	BAI Run-ying, SONG Bo-wen, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(1461)
Pollutant Removal Efficiency of Different Units Along a Mature Landfill Leachate Treatment Process in a Membrane Biological Reactor-Nanofiltration Combined Facility	SHAO Li-ming, DENG Ying-tao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i>	(1469)
Biological Conversion Mechanism of Sulfate Reduction Ammonium Oxidation in ANAMMOX Consortia	BI Zhen, DONG Shi-yu, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(1477)
Microbial Community Structure of Waste Water Treatment Plants in Different Seasons	HE Yun, LI Kui-xiao, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(1488)
Organ-Specific Accumulation and Toxicokinetics of Ephedrine in Adult Zebrafish (<i>Danio rerio</i>)	YIN Xing-xing, GUO Chang-sheng, DENG Yang-hui, <i>et al.</i>	(1496)
Characteristics and Evaluation of Soil Rare Earth Element Pollution in the Bayan Obo Mining Region of Inner Mongolia	WANG Zhe, ZHAO Ying-chen, LUO Yi-fei, <i>et al.</i>	(1503)
Factors Affecting the Translocation and Accumulation of Cadmium in a Soil-Crop System in a Typical Karst Area of Guangxi Province, China	MA Hong-hong, PENG Min, GUO Fei, <i>et al.</i>	(1514)
Effects of Superparamagnetic Nanomaterials on Soil Microorganisms and Enzymes in Cadmium-Contaminated Paddy Fields	FANG Dan-dan, ZHANG Li-zhi, WANG Qiang, <i>et al.</i>	(1523)
Effects of Water Management and Silicon Application on Iron Plaque Formation and Uptake of Arsenic and Cadmium by Rice	CHEN Jia, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i>	(1535)
Biological Effect of Tetracycline Antibiotics on a Soil-Lettuce System and Its Migration Degradation Characteristics	WANG Wei-zhong, CHI Sun-lin, XU Wei-hong, <i>et al.</i>	(1545)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from the Ridges and Furrows of a Vegetable Field	XIONG Wei-xia, JIANG Chang-sheng, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1559)
Effects of Biochar and Straw on Soil N ₂ O Emission from a Wheat Maize Rotation System	TANG Zhan-ming, LIU Xing-ren, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i>	(1569)
Overview on Habitat Monitoring Methods Under Watershed Ecological Space Management	YIN Kun, LIU Hai-jiang, WANG Guang, <i>et al.</i>	(1581)