山东省垃圾焚烧电厂 PCDD/Fs 排放清单及其环境影响

汤 铃[1,2],郭 静[1],郭朋恒[3],李建晖[4],甘狄松[5],贾 敏[1],屈加豹[6],伯 鑫[5,7*] (1.北京航空航天大学经济管理学院,北京 100191；2.中国科学院大学经济管理学院,北京 100190；3.云南高科环境保护科技有限公司,云南 昆明 650032；4.北京化工大学化学工程学院,北京 100029；5.北京化工大学环境科学与工程系,北京 100029；6.生态环境部环境工程评估中心,北京 100012；7.北京化工大学北化中国工业碳中和研究院,北京 100029)

摘要：基于 2018 年现场实测数据,以山东省为典型案例研究,综合考虑现有生产技术、生产规模、炉型工艺及年垃圾焚烧量等因素,自下而上构建山东省垃圾焚烧发电厂 PCDD/Fs 排放清单,并采用空气质量模型 CALPUFF 定量评估现状及不同情景下垃圾焚烧 PCDD/Fs 排放及其环境影响.结果表明: PCDD/Fs 排放因子范围为 24.68~290.90ng TEQ/t,平均值为 75.11ng TEQ/t,年排放量为 1.07g TEQ,排放因子、排放量均低于已有研究.从炉型维度分析: 炉排炉排放因子低于循环流化床,表明其 PCDD/Fs 排放控制水平较好;从空间分布维度分析: 潍坊市,济宁市和淄博市的垃圾焚烧量最大,其排放量与大气模拟浓度也相对较高;从情景对比维度分析: 标准加严、垃圾焚烧率提高的未来情景更符合山东省垃圾焚烧电厂的未来发展规划要求,同时也可达到降低 PCDD/Fs 排放及其环境影响的目标;相比 2018 年基准情景,该情景下的年排放量以及年均浓度贡献将分别下降 22.73%,24.19%.

关键词：垃圾焚烧；PCDD/Fs 排放；排放清单；环境影响；排放因子

中图分类号：X705 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2023)02-0735-13

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20221009.007

PCDD/Fs emission inventory and environmental impact of municipal solid waste incineration plants in Shandong Province.

TANG Ling[1,2], GUO Jing[1], GUO Peng-heng[3], LI Jian-hui[4], GAN Di-song[5], JIA Min[1], QU Jia-bao[6], BO Xin[5,7*] (1.School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China；2.School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China；3.Yunnan Hi-Tech Environmental Protection Co., Ltd, Kunming 650032, China；4.College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China；5.Department of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China；6.Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China；7.BUCT Institute for Carbon-neutrality of Chinese Industries, Beijing 100029, China). *China Environmental Science*, 2023,43(2)：735~747

Abstract：Based on the field measured data in 2018, this study takes Shandong Province as a typical case study and comprehensively considers the production technology, production capacity, incinerator type and annual MSW incineration amount, to establish PCDD/Fs emission inventory of municipal solid waste (MSW) incineration power plants in Shandong Province using the bottom-up approach and introduce CALPUFF model to quantitatively evaluate environmental impacts caused by PCDD/Fs emissions under current and different scenarios. The results show that the range of PCDD/Fs emission factors was 24.68~290.90ng TEQ/t, with an average value of 75.11ng TEQ/t. The total emission was 1.07g TEQ in 2018. The estimated emission factors and total emissions were lower than existing studies. In terms of incinerator type, the emission factor of grate firing incinerators was lower than that of fluidized bed incinerators, indicating that it has a good control effect on PCDD/Fs emissions. In terms of spatial distribution, the largest MSW incineration amount was mainly concentrated in Weifang, Jining and Zibo city, and total emissions and atmospheric simulated concentrations were also relatively high. In terms of scenario comparison, the future scenario with stricter standards and improved MSW incineration rate was more in line with the requirements of the future development planning of the MSW incineration industry in Shandong Province, and can also achieve the goal of reducing the PCDD/Fs emissions and environmental impacts. Compared with the baseline scenario, the average annual concentration contribution in this scenario will be reduced by 22.73% and 24.19%, respectively.

Key words：municipal solid waste incineration；PCDD/Fs emissions；emission inventory；environmental impacts；emission factors

根据国家统计局最新数据显示,截至 2020 年,我国生活垃圾焚烧产量达到 2.35 亿 t,日处理垃圾达到 96.35 万 t[1].垃圾焚烧处理方式因其具有节约土地、快速减少垃圾体量以及实现能源再生等优点而被广泛推崇[2-4].焚烧垃圾会产生二噁英(PCDD/Fs), 二噁英具有毒性高、稳定性好、持续性久、难降解、

收稿日期：2022-07-18

基金项目：国家自然科学基金资助项目(72174125);中央高校基本科研业务费资助(buctrc202133)

* 责任作者, 教授, boxin@buct.edu.cn

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

易致癌等特点[5-9].已有研究表明,城市生活垃圾焚烧炉作为 PCDD/Fs 的主要排放源[10-11],大气中约 95%的 PCDD/Fs 来自城市生活垃圾的不完全燃烧[8].中国 2014 年修订了生活垃圾焚烧排放标准(GB18485-2014),进一步加严 PCDD/Fs 排放浓度限值到 0.1ng TEQ/Nm^3[12].山东省作为中国经济发达,人口众多的东部沿海省份,其 2020 年垃圾焚烧量达到 1476.73 万 t,位居全国第三位,垃圾焚烧企业数量位居全国第一位[1]. “十四五”规划将进一步提高垃圾焚烧处理率到 85%[13].因此,评估山东省垃圾焚烧电厂 PCDD/Fs 排放及其环境影响具有十分重要的现实意义.

当前国内外开展关于垃圾焚烧行业大气污染物的研究,主要集中在排放清单编制及其环境影响评估等方面[8,14-17].在清单编制方面,Tian 等[8]和 Zhou 等[15]采用文献调研的平均排放因子分别核算 2003~2010 年以及 2015 年中国垃圾焚烧行业二噁英排放水平;Fu 等[16]同样基于文献调研的排放因子核算了 2006~2017 年的全国二噁英排放总量;陈露露等[18]基于 2004 年公布的二噁英总量推测了 2016 年各省的排放水平;杨艳艳等[19]基于现场实测法评估了 2013 年珠三角垃圾焚烧二噁英排放水平.相关研究普遍采用的排放因子大多数来源于 2016 年之前的文献调研,难以反映新排放标准全面实施以及垃圾焚烧电厂管理水平大幅度提升所带来的减排影响.此外,清单建立也是基于多种假设和间接参数(如理论设计处理规模、理论去除效率等)所计算的平均排放因子,难以反映排放个体的异质性,排放量核算结果存在较大不确定性[20-23].在环境影响评估方面,Zhou 等[15]利用基于数值计算的高斯烟羽模型模拟 2015 年中国垃圾焚烧电厂二噁英排放的环境影响;王超[24]和李敏[25]分别采用 AERMOD、CALPUFF 模型模拟了危废焚烧厂 PCDD/Fs 排放的环境影响.相关垃圾焚烧电厂 PCDD/Fs 排放的大气扩散模拟研究相对较少,更别提探究新标准实施对生活垃圾焚烧电厂 PCDD/Fs 排放的环境影响.

为了突破已有研究采用固定、过时、平均排放因子的局限,本研究采用 2018 年现场实测数据,计算基于企业维度的排放因子,并结合企业实际垃圾焚烧量,自下而上建立了山东省 2018 年生活垃圾焚烧电厂 PCDD/Fs 排放清单,以此评估新标准实施的有效性;同时,将山东省未来垃圾焚烧行业的管理政策、发展规划纳入到未来情景的排放预测之中,并利用 CALPUFF 大气扩散模型分别评估了现状情景及未来情景下山东省垃圾焚烧电厂 PCDD/Fs 排放的环境影响.

1 研究方法

1.1 研究对象

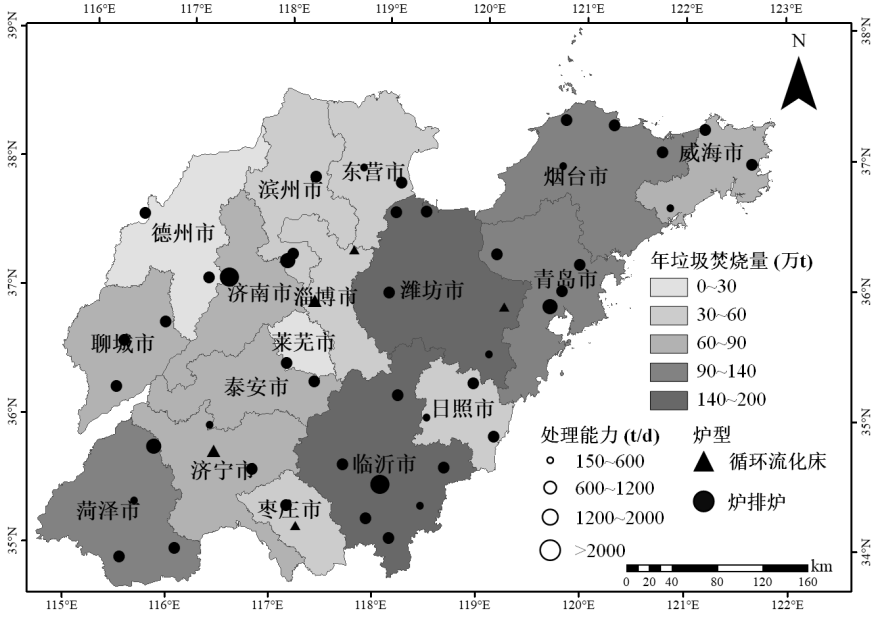


图 1 2018 年山东省垃圾焚烧厂空间分布

Fig.1 Spatial distribution of municipal solid waste incineration plants in Shandong Province in 2018

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

本研究基准年为 2018 年,山东省垃圾焚烧企业分布如图 1 所示.从企业分布来看,山东省垃圾焚烧企业数量为 50 家,居全国首位,主要分布在临沂市,潍坊市和烟台市,累计企业总数占到全省企业总数的 34%.从垃圾焚烧规模来看,600~1200t/d 的企业占比 70%;从炉型技术来看,炉排炉占比为 90%,其余为循环流化床;从活动水平来看,临沂市年垃圾焚烧量最高,其次是潍坊市,烟台市,青岛市,累计焚烧量占到全省年垃圾焚烧总量的 45%.

本研究所有企业位置信息来源排污许可、污染源连续自动监测系统(continuous emissions monitoring systems, CEMS)、环境影响评价报告与环境影响评价验收监测报告等.为确保企业位置信息的准确性,本研究采用百度地图坐标拾取技术,结合卫星遥感数据、谷歌地球(Google Earth)位置识别以及人工目视检验,对企业经纬度信息进行逐个校核.

1.2　清单编制方法

生活垃圾焚烧排放标准(GB18485−2014)规定焚烧炉烟气中 PCDD/Fs 浓度监测应每年至少监测 1 次,其最终浓度为连续 3 次监测值的算术平均值[12].根据环境影响评价竣工验收报告,监督性监测(执法监测)报告、企业自主监测报告中现场实测的烟气 PCDD/Fs 浓度均值(该值可反映企业全年的 PCDD/Fs 排放水平),并结合环境统计中燃料类型,以及《第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册》中各燃料类型理论烟气量,按照式(1)计算 PCDD/Fs 排放因子;结合环境统计中的实际垃圾焚烧量以及自行调研的活动水平数据,自下而上计算每个企业的 PCDD/Fs 年排放量,如公式(2).

$$\mathrm{EF}_i=\overline{C}_i\cdot V_i \tag{1}$$

$$E_i=\mathrm{AC}_i\cdot\mathrm{EF}_i \tag{2}$$

式中:E 为年排放量,g TEQ/a; EF 为排放因子,ng TEQ/t; i 为不同生活垃圾焚烧企业;$\overline{C}$ 为在采样周期内连续三次测定的算术平均值,ngTEQ/m^3,GB18485−2014 标准要求生活垃圾焚烧电厂运行企业对烟气中二噁英的监测应每年至少开展一次;V 为理论烟气量,Nm^3/t; AC 为环境统计活动水平或自行调研数据,万 t/a.

1.3　数据质控方法

本文结合传统统计学方法,并借鉴 Tang 等[20-22]和 Bo 等[23]数据质控方法,对所收集的数据进行质控分析,具体方法如下:

(1) 形成时间序列监测数据;对来源于竣工验收、监督性监测或执法监测以及企业委托第三方监测的同一焚烧炉 PCDD/Fs 浓度数据,按照实地采样监测时间,整理形成 PCDD/Fs 监测时间序列数据;

(2) 剔除疑似异常数据;根据统计学中平均值±2 倍标准差方法,剔除不在此范围内的 PCDD/Fs 浓度数据;

(3) 数据来源选用标准;优先使用监督性监测或执法监测数据的平均值作为清单核算的主要来源,其次采用企业竣工验收监测数据;在监督性监测或执法监测数据、竣工验收数据缺失时,采用企业委托第三方监测数据.

1.4　未来情景设置

结合生活垃圾焚烧行业“十四五”规划以及部分省市(如海南[26],深圳[27])发布的最新排放标准,以 2018 年为基准情景,组合设置三种情景.情景 1 保持 2018 年活动水平不变,并加严排放限值到全省平均;情景 2 保持现状排放水平不变,焚烧率提高到 85%;情景 3 排放限值加严到全省平均,焚烧率提高到 85%.

1.5　空气质量模型

CALPUFF 空气质量模型为三维非稳态拉格朗日扩散模式,可模拟从几十米到几百公里中等尺度范围[28-30].目前已广泛应用于研究城市乃至区域尺度上污染物的扩散规律[31-37].

本研究山东省 2018 年气象数据为中尺度数据大气模式 WRF 模拟提供的三维气象场数据;区域地形资料来自美国地质勘探局,地形数据精度为 90m,土地利用类型数据精度为 30m[38].本研究建模考虑各垃圾焚烧炉的经纬度及烟囱高度、出口温度、烟气流速、PCDD/Fs 年排放量等信息,网格分辨率 300m,东西向 100 个格点,南北向 100 个格点.本研究参考史梦雪等[39]采用 PM_{10} 污染物代替 PCDD/Fs 进行模拟.由于 PCDD/Fs 是一种持久性有机污染物,化学性质稳定[36],模拟暂不考虑 PCDD/Fs 的衰变与化学转化机制[36].

1.6　不确定性分析

本研究使用蒙特卡罗模拟方法来计算排放清单计算的不确定性.蒙特卡罗模拟方法是通过产生随机数,表征相关运算参数(例如,活动水平和排放因

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

子)的概率分布,并求解不同参数取值下对应的排放量,获取排放量的分布,从而确定其不确定性区间[40-42].目前,蒙特卡罗方法已成功被应用于火电行业、钢铁行业以及水泥行业排放量不确定性分析中[20-22].本研究参考 Tang 等[20]和 Bo 等[23]所提出的方法,引入蒙特卡罗模拟进行不确定性分析,验证排放清单的可靠性.首先,活动水平数据作为模型的重要输入,在不确定性分析中需要考虑.因此,假设单位特定生产的概率服从正态分布,变异系数(CV)为5%[21,43].其次,采用统一排放系数的焚烧炉技术、垃圾组分、运行条件和设备运行参数也会产生不确定性.为保证 PCDD/Fs 检测仪器的稳定性,环境空气和废气二噁英类的测定同位素稀释高分辨气相色谱-高分辨质谱法(HJ77.2-2008)标准规定仪器的稳定性应在±35%范围内[44].根据 PCDD/Fs 排放浓度和活动水平的各自分布生成随机值,进行 10,000 次模拟,以 2 倍标准差估计排放量的不确定性范围.

2 结果与讨论

2.1 垃圾处理现状

山东省生活垃圾的清运量从 2002 年的 835.90 万 t 迅速增加到 2020 年的 1,673.94 万 t,年增长率为 3.93%(图 2).从增长趋势来看,2005 年到 2014 年,增速放缓(年增长率为 0.02%),但从 2014 年以后呈现快速增长态势(9.74%),2019~2020 年呈略微下降,一方面可能是由于新冠疫情影响,导致消费减少,影响生活垃圾清运量.另一方面,可能是由于《关于进一步推进生活垃圾分类工作的实施意见》要求济南、青岛、泰安等重点城市在 2021 年末基本建成生活垃圾分类处理系统[45],加大了垃圾回收的力度,导致生活垃圾清运量减少.此外,垃圾无害化处理量增长趋势同清运量高度一致(r=0.97, P<0.01),从 2002 年的 665.18 万 t 迅速增加到 2020 年的 1,673.94 万 t,年增长率为 5.26%(图 2).相应地,垃圾无害化处理率从 2002 年 79.58%增长到 2020 年 100%,实现《“十三五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划》所规定的“到 2020 年底全国各省市垃圾无害化处理率达到 100%”目标要求[46].

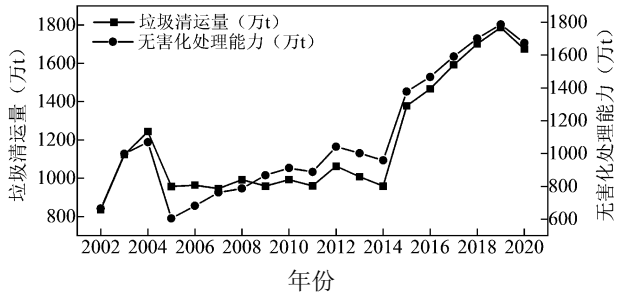


图 2 山东省生活垃圾产量增长趋势

Fig.2 Growth trend of municipal solid waste production in Shandong Province

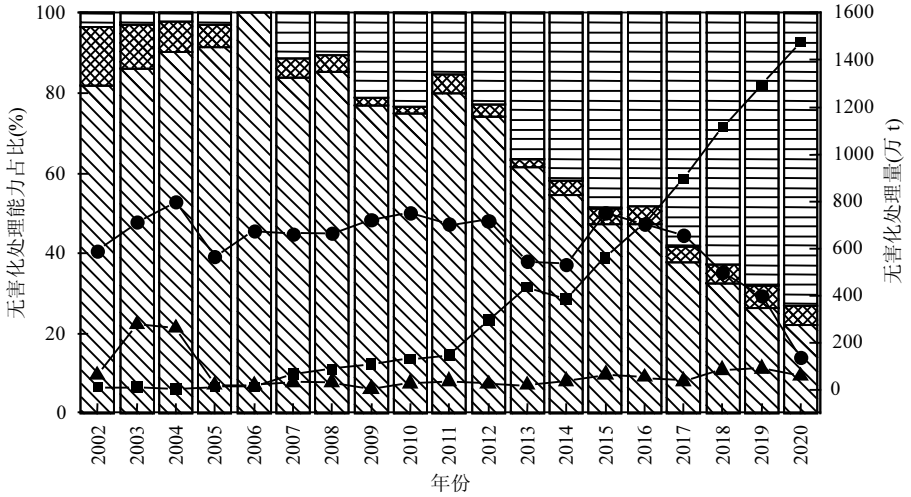


图 3 山东省无害化处理时空演变趋势(其中 2006 年部分数据缺失)

Fig.3 Spatial and temporal variation trend of waste harmless treatment in Shandong Province (Some data are missing for 2006)

垃圾无害化处理方式主要包括填埋,焚烧和堆肥[47-49].从无害化处理能力来看,日无害化处理量从 2002 年的 21241t 增加到 2020 年的 67636t,年增长率为 6.65%(图 3).其中,填埋,焚烧以及堆肥年增长率分

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

别为−0.85%,0.30%和 26.20%.特别地,2020 年垃圾焚烧无害化处理能力占比达到 73.11%,填埋处理能力达到 22.10%,堆肥处理能力仅达到 4.79%.从无害化处理总量来看,无害化处理量从 2002 年的 665.18 万 t 增加到 2020 年的 1673.94 万 t,年增长率为 5.26%(图 3).其中,焚烧总量增长速度最快,年增长率达到 30.90%,而填埋,堆肥处理量则有所下降,年增长率分别为−7.76%,−0.37%.从 2013 年开始,垃圾焚烧处理方式作为山东省主要的垃圾无害化处理方式,焚烧处理占比从 2013 年的 43.47%增长到 2020 年的 88.22%.其中,2018 年焚烧量占比达到 65.64%,已提前完成了《关于进一步加强城市生活垃圾焚烧处理工作的意见》所提到的“在 2020 年末山东省城市(含县城)生活垃圾焚烧处理率要达到 60%以上”目标要求[50].同时,该意见也要求全省新上城市生活垃圾处理项目,一律选择焚烧(发电)处理技术.垃圾焚烧处理方式是山东省未来垃圾无害化处理方式的主流技术选择.

2.2　排放因子分析

2018 年山东省垃圾焚烧 PCDD/Fs 排放因子为 24.68~290.90ng TEQ/t,5%~95% 分位数为 29.10~290.90ng TEQ/t,平均值为 75.11ng TEQ/t(图 4).从炉型技术分析,炉排炉排放因子为 51.13ng TEQ/t,低于循环流化床 82.42%,该研究结果与已有研究发现是一致的[16].

本研究基于实测浓度计算的 PCDD/Fs 排放因子与现有文献对比发现,其排放因子基本上低于现有研究结果,具体如表 1 所示.由于 2001~2014 年垃圾焚烧 PCDD/Fs 排放标准不断加严以及垃圾焚烧发电厂烟气净化技术规范政策的出台,目前山东省垃圾焚烧电厂烟气净化系统基本均已安装“脱酸(干法/半干法)+脱硝(SNCR/SCR)+活性炭喷射＋布袋除尘”等烟气净化设备,其中活性炭喷射以及布袋除尘去除二噁英效率高达 99%以上[55].其次,在垃圾焚烧炉运行工况方面,生态环境部加强了对焚烧炉温的监管,特别是《生活垃圾焚烧监控(监测)联网传输技术要求(施行)》、《生活垃圾焚烧发电厂自动监测数据应用管理规定》等政策规定的出台,这些规定明确提出严格控制焚烧炉炉膛内热电偶测量温度的 5 分钟均值达到 850℃以上,烟气停留时间 2s 以上.根据美国 EPA 相关研究结果显示,PCDD/Fs 在 850℃以上的高温下停留超过 2s 以上,即可分解 99.99%.因此,高效的烟气净化措施并结合对焚烧炉运行工况的实时监管,有利于垃圾焚烧电厂 PCDD/Fs 的稳定达标排放.

表 1　排放因子对比分析(ng TEQ/t)

Table 1　Comparative analysis of emission factors (ng TEQ/t)

来源	平均排放因子	平均排放因子	
	(炉排炉与循环流化床)	炉排炉	循环流化床
本研究	75.11	51.13	290.90
[8]	−	1,300	640
[15]	−	1,400	560
[16]	−	195	272
[14]	1,728	−	−
[51]	400	−	−
[42]	170	−	−
[53]	389.22	−	−
[54]	379.5	−	−

此外,垃圾焚烧发电企业间 PCDD/Fs 排放水平的异质性与垃圾焚烧技术、垃圾焚烧过程操作与控制等多种因素有关[56].首先,在焚烧技术方面,炉排炉和循环流化床是两种主要的焚烧技术.根据生活垃圾焚烧发电厂自动监测数据公开平台最新数据显示,绝大多数企业选择炉排炉技术.通常,炉排炉采用层状燃烧技术,该种技术可将不经分拣的垃圾直接通过进料斗进入倾斜向下的炉排(分为干燥区、燃烧区、燃尽区),经干燥区的垃圾含水率大幅减少,垃圾热值显著提高,有效提高焚烧炉温度到 850℃以上,再通过高效烟气净化措施(例如: 活性炭+布袋除尘),可保证烟气中 PCDD/Fs 的稳定达标排放.其次,焚烧操作过程与控制过程也会影响 PCDD/Fs 排放水平的差异,这些因素主要包括启停工况、炉膛内焚烧温度、烟气停留时间、烟气湍流强度、过量空气,一次风与二次风的分配、炉内添加剂(例如含硫煤或脱氯剂)以及活性炭+布袋除尘设备等[57-58].具体地,对于焚烧操作过程中的启停炉操作,启停炉阶段的炉温较低,燃尽效果相对较差,有利于 PCDD/Fs 生成;启停炉时的焚烧炉温将经历高低温间的转换,200~500℃温度区间是 PCDD/Fs 的最佳形成区.Guo 等发现在启停炉阶段,烟气中 PCDD/Fs 浓度达到最高,特别是启炉完成后的烟气 PCDD/Fs 浓度是正常工况下的近 3 倍[59].

对于整个焚烧控制过程而言,在垃圾焚烧前阶

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

段,需加入煤或者其他助燃剂,而煤中的硫元素对PCDD/Fs生成具有抑制作用,这是由于硫与金属、前驱物反应,降低金属催化活性以及PCDD/Fs生成概率[60].在焚烧过程中,垃圾炉膛温度、烟气停留时间是否控制在850℃以上以及烟气是否停留超过2s以上,将直接影响PCDD/Fs排放浓度水平[61];焚烧锅炉的炉体设计中一次风与二次风的分配比例,将会影响烟气的湍流度,进而影响PCDD/Fs生成速率[61];炉膛空气供给量可保证垃圾的完全燃烧,但是过多的O_2会促使HCl转化为Cl_2,催化PCDD/Fs的生成,一般适量的O_2质量分数控制在7%~9%[61].在燃烧后,烟气急冷技术的使用(如喷洒石灰乳)将会降低PCDD/Fs的生成.一般而言,经过燃烧后的高温PCDD/Fs烟气在低温区(250~450℃)可迅速再次合成,需通过烟气急冷技术将烟气温度迅速冷却至250℃以下,快速越过易产生PCDD/Fs的低温区,从而抑制PCDD/Fs再次合成[62].在烟气净化处理阶段,活性炭孔径大小、吸附能力、用量以及布袋除尘器的种类、材质也会影响烟气PCDD/Fs的去除效率[63].

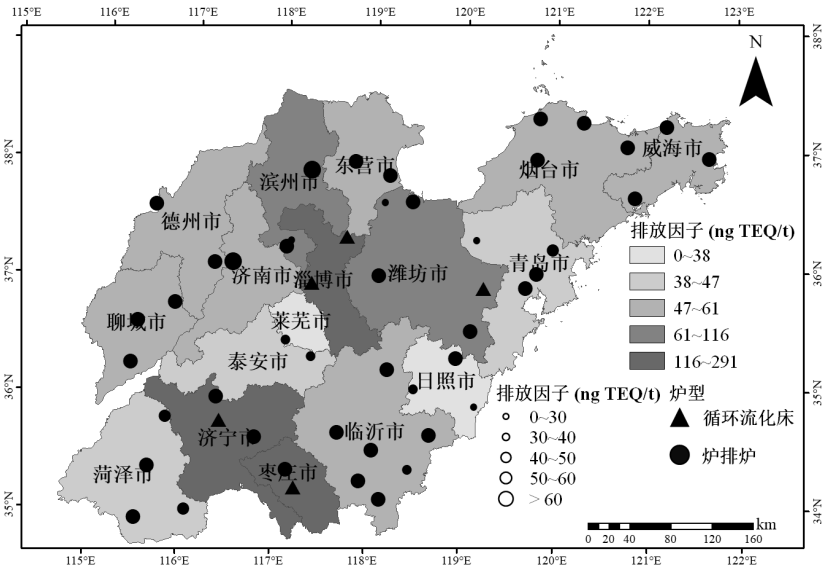


图4 山东省垃圾焚烧电厂PCDD/Fs排放因子

Fig.4 Emission factors of PCDD/Fs from municipal solid waste incineration plants in Shandong Province

2.3 排放量分析

2018年山东省生活垃圾焚烧PCDD/Fs排放量为1.07g TEQ,如图5所示.其中,PCDD/Fs排放量最大的区域是潍坊市,济宁市和淄博市,其总量分别为0.18、0.14和0.11g TEQ.PCDD/Fs排放量最小的区域是莱芜市,德州市和日照市,排放量均低于0.01g TEQ.PCDD/Fs空间分布特征与垃圾焚烧量(r=0.53, P<0.01)、排放因子(r=0.60, P<0.01)的分布密切相关,见式(2).此外,排放量与所在地区的人口数量呈显著正相关(r=0.52, P<0.01),表明区域人口数量与垃圾焚烧电厂污染物排放之间存在一定的内在关系.

本研究基于实测浓度核算的山东省生活垃圾焚烧PCDD/Fs年排放量低于已有采用固定、总体、平均排放因子的现有研究,如Zhou等[15],Fu等[16]分别核算2015,2017年山东省垃圾焚烧电厂PCDD/Fs排放量(8.2g TEQ、2.1g TEQ).然而,本研究核算的排放量略高于Tian等[8](2010年为0.8g TEQ),主要是由于2010~2018年垃圾焚烧量增长(约31%),但排放因子下降了54.55%~96.07%,表明对生活垃圾焚烧电厂持续不断的管控以及技术性进步、排放标准加严等因素可能是排放因子水平下降的主要原因.

2.4 不同情景排放分析

三种未来情景下,山东省生活垃圾焚烧PCDD/Fs排放量分别为0.64,1.38,0.83g TEQ,如图6所示.其中,情景1(图3a),情景3(图3c)较现状年排放分别下降40.19%,22.73%,而情景2(图3b)相较于现状排放量增长28.88%,主要是由于情景1治理措施升级导致排放因子下降(37.07%),情景2垃圾焚烧率提高导致活动水平上升(29.23%),情景3在排放因子的下降(37.07%)和活动水平的上升(29.23%)共同作用下

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

导致总排放量下降,该情景更符合山东省未来垃圾焚烧行业发展规划.山东省“十四五”规划提出到2025 年垃圾焚烧率将提高到 85%;垃圾焚烧量提高的同时,需进一步升级污染治理设施,加强运行工况的监管,方可达到 PCDD/Fs 减排的目标.从处理规模角度分析,更符合未来预期的情景 3,其处理规模>2000t/d 以及 150~600t/d 的垃圾焚烧厂 PCDD/Fs 排放量相比较于现状情景仅增长 15.39%,27.38%,可能是由于垃圾焚烧厂污染控制设备升级空间有限,减排潜力有限,垃圾焚烧量增长导致其排放增长.而600~1200t/d 以及 1200~2000t/d 的垃圾焚烧厂 PCDD/Fs 排放量较现状情景分别下降 51.72%,18.50%,尽管在垃圾焚烧量大幅提高的前提下,排放因子下降是其主要的驱动因素.从空间分布角度分析,淄博市、滨州市、济宁市、枣庄市和潍坊市的减排潜力较大,分别减少 PCDD/Fs 排放量 74.55%,64.52%,64.52%,60.81%和 41.28%.因此,为进一步控制垃圾焚烧电厂 PCDD/Fs 排放水平,减排措施应根据不同区域、不同处理规模企业的排放现状差异进行分类、有针对性的实施,同时应进一步促进垃圾焚烧污染治理设施的改造升级和污染减排重点的战略调整.

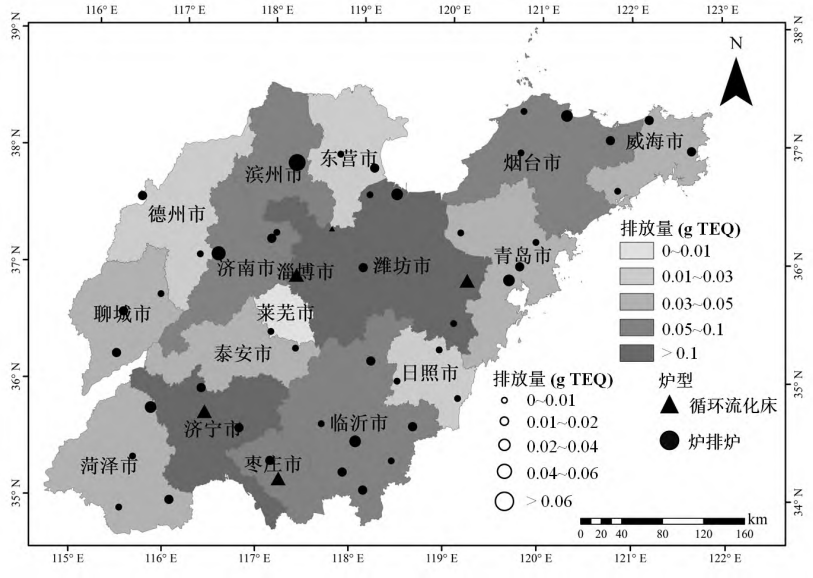
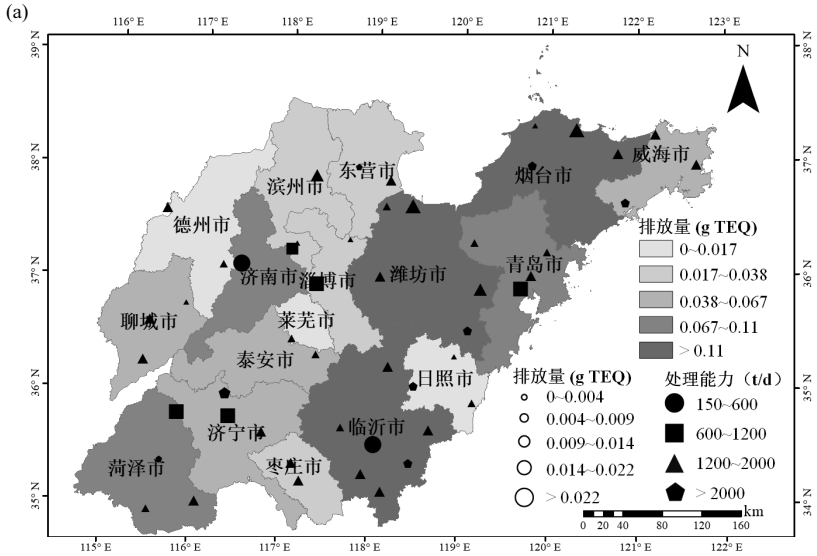


图 5　山东省垃圾焚烧电厂 PCDD/Fs 排放量

Fig.5　PCDD/Fs emissions from municipal solid waste incineration plants in Shandong Province



(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

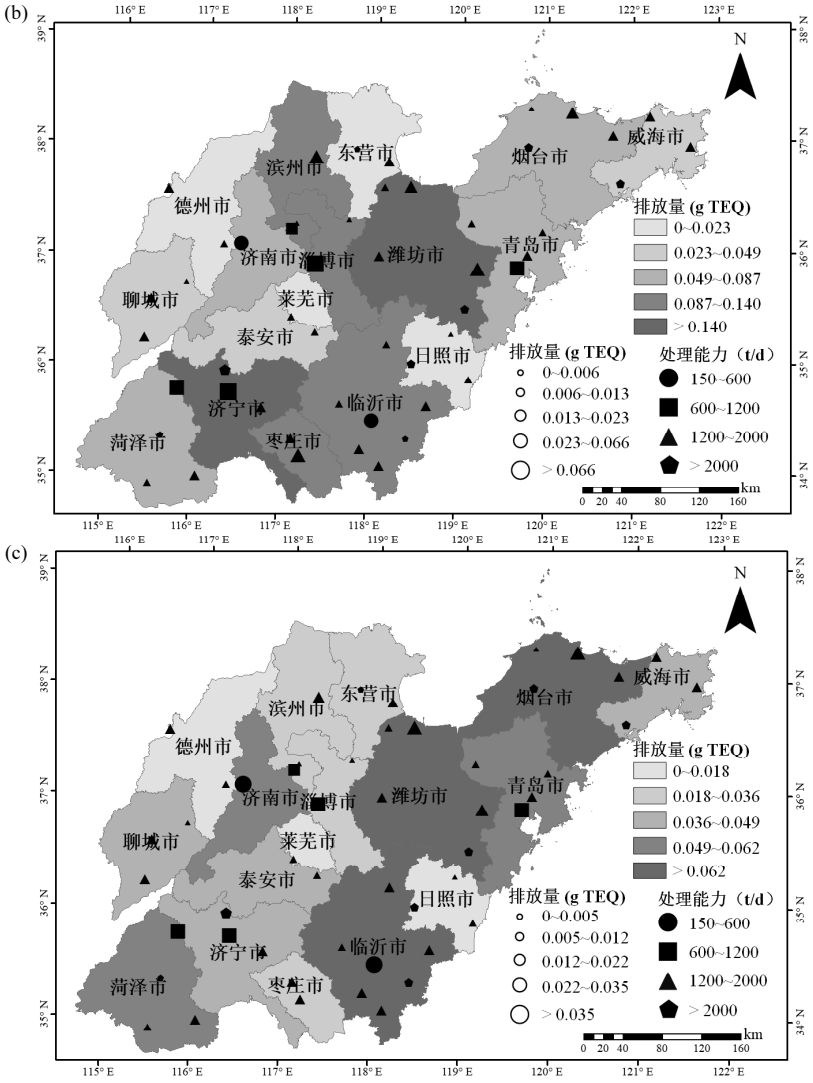


图 6 不同情景下的 PCDD/Fs 排放量

Fig.6 PCDD/Fs emissions under different scenarios

g TEQ; 注: 情景 1(a);情景 2(b);情景 3(c)

2.5 环境影响评估

图 7 为现状情景以及未来情景下山东省垃圾焚烧电厂 PCDD/Fs 排放年均浓度贡献分布情况.总体上,现状情景下垃圾焚烧电厂大气污染物排放年均浓度贡献与 2018 年排放清单分布(图 7a)较为一致,高值浓度主要集中在潍坊市、临沂市、济宁市、滨州市和淄博市.

与现状情景相比(年均浓度 1.05×10^{-11}ng TEQ/m^3),情景 1(图 7b)对各市年均浓度呈总体下降趋势,其年均浓度 6.49×10^{-12}ng TEQ/m^3,年均贡献下降 38.19%;情景 2(图 7c)对各市年均贡献浓度比例总体呈上升趋势,其年均浓度 1.31×10^{-11}ng TEQ/m^3,年均贡献上升 24.76%;情景 3(图 7d)对各市年均贡献比例平均值总体呈下降趋势,其年均浓度 7.96×10^{-12}ng TEQ/m^3,年均贡献下降 24.19%,表明了尽管未来垃圾焚烧量提高,但可通过升级污染控制设备、加强垃圾焚烧排放监管等措施来进一步降低垃圾焚烧电厂大气污染排放的环境影响.

表 2 为各情景下 PCDD/Fs 排放对各城市的浓度贡献.现状情景下,垃圾焚烧企业对各城市的年均浓度贡献比例为 1.35%.与 2018 年现状情景相比,情景 1 平均污染贡献有所下降(38.01%),说明排放标准加严,污染控制设备升级,垃圾焚烧电厂大气污染控制力度加强,污染物排放水平下降;情景 2 平均污染贡献上升(24.70%),说明在保持 2018 年排放现状的前提下,提高垃圾焚烧率将导致活动水平、排放量的升高;情景

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3 年均贡献占比下降(24.03%),说明在标准加严、垃圾焚烧率提高的情景下,未来年均排放贡献下降,可能是由于污染控制设备升级导致的排放因子下降抵消了垃圾焚烧率提高所导致的排放总量升高.

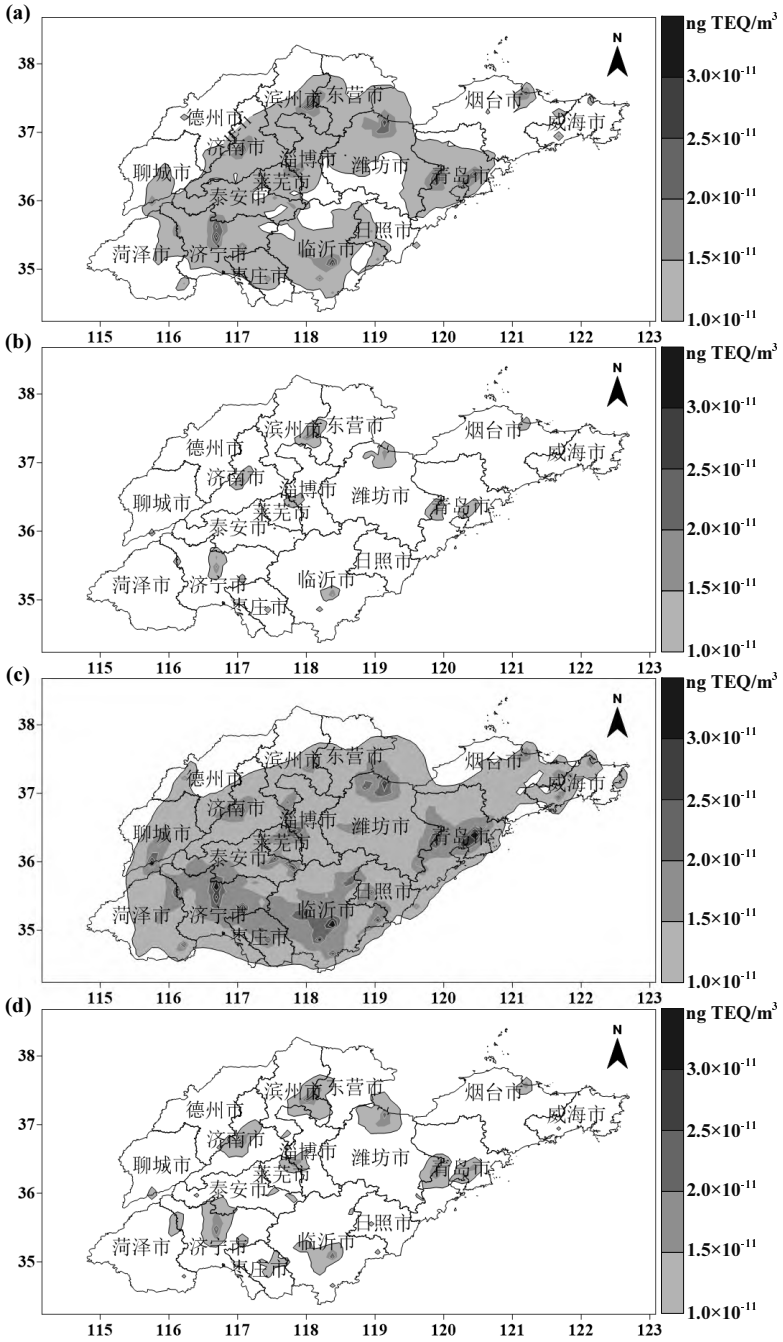


图 7　不同情景下的 PCDD/Fs 大气浓度

Fig.7　Atmospheric concentrations of PCDD/Fs under different scenarios

2018 年现状情景(a),情景 1(b);情景 2(c);情景 3(d)

2.6　不确定性分析

本文通过采用蒙特卡罗方法对现场实测 PCDD/Fs 浓度,依照各自的概率分布,随机生成数值,并进行 10,000 次模拟,本研究核算的山东省垃圾焚烧电厂 PCDD/Fs 排放清单结果是相对稳定的,其 2 倍标准差不确定性范围为±7.6%,低于已有排放清单的不确定性范围±24%[8].结果表明基于企业实测、自下而上的清单核算方法,大幅降低了生活垃圾焚烧 PCDD/Fs 排放清单的不确定性.

此外,本清单排放量核算的不确定性也有可能

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

来源于垃圾类型[64]、焚烧技术[65]、焚烧工况[66]、运行条件[67]、烟气净化处理规范[68]以及焚烧设施操作管理[69]等微观异质因素,但由于数据的可获得性,难以开展相关分析.未来将继续丰富此类微观基础数据,扩展 PCDD/Fs 排放基础数据库,并开展垃圾焚烧发电企业 PCDD/Fs 排放水平影响因素研究.

表 2 垃圾焚烧厂 PCDD/Fs 排放对各城市的浓度贡献(ng TEQ/m^3)

Table 2 Concentration contribution of dioxins emissions from incinerators to cities (ng TEQ/m^3)

城市	对各城市的浓度贡献			
	现状情景	情景 1	情景 2	情景 3
滨州市	2.21×10^{-11}	1.53×10^{-11}	1.67×10^{-11}	1.88×10^{-11}
德州市	8.84×10^{-12}	5.20×10^{-12}	1.28×10^{-11}	6.38×10^{-12}
东营市	1.18×10^{-11}	7.49×10^{-12}	1.36×10^{-11}	9.18×10^{-12}
菏泽市	7.27×10^{-12}	4.34×10^{-12}	1.02×10^{-11}	5.32×10^{-12}
济南市	1.15×10^{-11}	7.34×10^{-12}	1.28×10^{-11}	8.99×10^{-12}
济宁市	1.97×10^{-11}	1.26×10^{-11}	2.19×10^{-11}	1.55×10^{-11}
莱芜市	9.66×10^{-12}	5.83×10^{-12}	1.31×10^{-11}	7.15×10^{-12}
聊城市	1.05×10^{-11}	6.21×10^{-12}	1.50×10^{-11}	7.62×10^{-12}
临沂市	1.15×10^{-11}	6.80×10^{-12}	1.63×10^{-11}	8.33×10^{-12}
青岛市	7.72×10^{-12}	4.62×10^{-12}	1.07×10^{-11}	5.66×10^{-12}
日照市	7.38×10^{-12}	4.35×10^{-12}	1.06×10^{-11}	5.34×10^{-12}
泰安市	9.97×10^{-12}	6.14×10^{-12}	1.27×10^{-11}	7.52×10^{-12}
威海市	6.50×10^{-12}	3.70×10^{-12}	1.03×10^{-11}	4.53×10^{-12}
潍坊市	9.70×10^{-12}	6.01×10^{-12}	1.21×10^{-11}	7.37×10^{-12}
烟台市	7.87×10^{-12}	4.70×10^{-12}	1.09×10^{-11}	5.76×10^{-12}
枣庄市	1.08×10^{-11}	6.47×10^{-12}	1.51×10^{-11}	7.92×10^{-12}
淄博市	1.09×10^{-11}	6.85×10^{-12}	1.28×10^{-11}	8.39×10^{-12}

从空间维度分析,现状情景下山东省垃圾焚烧电厂污染浓度贡献影响最高的城市是滨海市,济宁市和东营市,年均贡献占比分别达到 2.85%,2.54%和 1.52%,年均贡献最小的城市是威海市,菏泽市和日照市,年均贡献占比分别为 0.84%,0.95%和 0.94%.不同情景下,年均贡献最高的城市是滨州市,济宁市,临沂市和东营市,年均浓度贡献最小的城市依旧是威海市,菏泽市和日照市.

3 结论

3.1 2018 年山东省生活垃圾焚烧电厂排放 PCDD/Fs 排放因子为 24.68~290.90ng TEQ/t,5%~95%分位数为 29.10~290.90ng TEQ/t,平均值为 75.11ng TEQ/t,低于现有研究,表明近年来山东省垃圾焚烧电厂大气污染控制效果显著.

3.2 基于现场实测浓度核算的年排放量为 1.07g TEQ,远低于已有研究.排放分布在空间上具有异质性,高排放量区域主要集中在潍坊市,济宁市和淄博市,其总量分别为 0.18、0.14 和 0.11g TEQ,占全省总排放的 68.22%,因此建议下一步重点管控,优化产业布局,加大搬迁或改造升级力度.

3.3 2018 年山东省垃圾焚烧电厂 PCDD/Fs 排放影响区域主要集中在潍坊市、临沂市、济宁市、滨州市和淄博市,主要由于垃圾焚烧企业较为集中,PCDD/Fs 排放量相对较大.情景 3(标准加严、垃圾焚烧率提高)更符合山东省垃圾焚烧电厂未来发展规划要求,同时也可达到降低垃圾焚烧电厂 PCDD/Fs 排放及其环境影响的目标,其年排放量、年均浓度将分别下降 22.73%,24.19%.

参考文献:

[1] 中华人民共和国国家统计局,年度数据库-生活垃圾清运量 [EB/OL]. https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01.
National Bureau of Statistics of China. Annual database – Municipal solid waste amount [EB/OL]. https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01.

[2] Wienchol P, Szlęk A, Ditaranto M. Waste-to-energy technology integrated with carbon capture-challenges and opportunities [J]. Energy, 2020,198:117352.

[3] Guo Y, Glad T, Zhong Z, et al. Environmental life-cycle assessment of municipal solid waste incineration stocks in Chinese industrial parks [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018,139:387-395.

[4] Chen H, Li J, Li T, et al. Performance assessment of a novel medical-waste-to-energy design based on plasma gasification and integrated with a municipal solid waste incineration plant [J]. Energy, 2022,245:123156.

[5] Nzihou A, Themelis N J, Kemiha M, et al. Dioxin emissions from municipal solid waste incinerators (MSWIs) in France [J]. Waste Management, 2012,32(12):2273-2277.

[6] Tang H, Cui K, Xing J, et al. Part I: PM2.5and Polychlorinated Dibenzo-*p*-dioxins and Dibenzofurans (PCDD/Fs) in the Ambient Air of Southern China [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2017, 17(6):1550-1569.

[7] 周志广,田洪海,李 楠,等.小型焚烧设施烟气中二噁英类的排放和控制 [J]. 环境污染与防治, 2007,(3):76-78.
Zhou Z G, Tian H H, L N, et al. Emission and control of PCDD/Fs in flue gas from small-scale incinerators [J]. Environmental Pollution and Prevention, 2007,(3):76-78.

[8] Tian H, Gao J, Lu L, et al. Temporal trends and spatial variation characteristics of hazardous air pollutant emission inventory from municipal solid waste incineration in China [J]. Environmental Science & Technology, 2012,46(18):10364-10371.

[9] 李英华,杨朝旭,伯 鑫,等.生活垃圾焚烧厂周边土壤中 PCDD/Fs 及重金属含量 [J]. 中国环境科学, 2020,40(2):726-735.
Li Y H, Yang Z X, Bo X, et al. PCDD/Fs levels and heavy metal

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

characteristics in soils surrounding typical municipal waste incineration plants in the Chengdu area [J]. China Environmental Science, 2020,40(2):726−735.

[10] Liu H, Kong S, Liu Y, et al. Pollution control technologies of dioxins in municipal solid waste incinerator [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012,16:661−668.

[11] Viel J F, Floret N, Deconinck E, et al. Increased risk of non−Hodgkin lymphoma and serum organochlorine concentrations among neighbors of a municipal solid waste incinerator [J]. Environment International, 2011,37(2):449−453.

[12] GB 18485−2014　生活垃圾焚烧污染控制标准 [S]. 北京:中国环境科学出版社, 2014.
GB 18485−2014　Standard for pollution control on the municipal solid waste incineration [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014.

[13] 山东省住房和城乡建设厅.山东省住房和城乡建设事业发展第十四个五年规划 (2021−2025 年) [EB/OL]. http://zjt.shandong.gov.cn/art/2021/6/18/art_102847_10293970.html.
Housing and Urban−Rural Development of Shandong Province. The 14th Five−Year Plan for Housing and Urban−Rural Development of Shandong Province (2021−2025) [EB/OL]. http://zjt.shandong.gov.cn/art/2021/6/18/art_102847_10293970.html.

[14] Ni Y, Zhang H, Fan S, et al. Emissions of PCDD/Fs from municipal solid waste incinerators in China [J]. Chemosphere, 2009,75(9):1153−1158.

[15] Zhou Q, Yang J, Liu M, et al. Toxicological risk by inhalation exposure of air pollution emitted from China's municipal solid waste incineration [J]. Environmental Science & Technology, 2018,52(20): 11490−11499.

[16] Fu Z, Lin S, Tian H, et al. A comprehensive emission inventory of hazardous air pollutants from municipal solid waste incineration in China [J]. Science of the Total Environment, 2022,826:154212.

[17] Zhang B, Meng F, Shi C, et al. Modeling the atmospheric transport and deposition of polychlorinated dibenzo−*p*−dioxins and dibenzofurans in North America [J]. Atmospheric Environment, 2009,43(13):2204−2212.

[18] 陈露露,黄　韬,陈凯杰,等.我国 PCDD/Fs 网格化大气排放清单 [J]. 环境科学, 2020,41(2):510−519.
Chen L L, Huang T, Chen K J, et al. Gridded atmospheric emission inventory of PCDD /Fs in China [J]. Environmental Science, 2015, 2020,41(2):510−519.

[19] 杨艳艳,韩静磊,青　宪,等.珠江三角洲典型行业排放废气中 PCDD/Fs 污染水平 [J]. 中国环境科学, 2013,33(S1):186−190.
Yang Y Y, Han J L, Qing X, et al. PCDD/Fs pollutions in exhaust gases from typical industries of the Pearl River Delta [J]. China Environmental Science, 2013,33(S1):186−190.

[20] Tang L, Qu J, Mi Z, et al. Substantial emission reductions from Chinese power plants after the introduction of ultra−low emissions standards [J]. Nature Energy, 2019,4(11):929−938.

[21] Tang L, Xue X, Jia M, et al. Iron and steel industry emissions and contribution to the air quality in China [J]. Atmospheric Environment, 2020,237:117668.

[22] 汤　铃,薛晓达,伯　鑫,等.中国水泥排放清单及分布特征 [J]. 环境科学, 2020,41(11):4776−4785.
Tang L, Xue X D, Bo X, et al. Contribution of emissions from cement to air quality in China [J]. Environmental Science, 2020,41(11):4776−4785.

[23] Bo X, Jia M, Xue X, et al. Effect of strengthened standards on Chinese ironmaking and steelmaking emissions [J]. Nature Sustainability, 2021,4(9):811−820.

[24] 李　敏.危险废弃物焚烧厂周边介质二噁英分布特性及环境影响模拟研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2018.
Li M. Simulation research on distribution and environmental impact of PCDD/Fs from hazardous waste incinerators [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.

[25] 王　超.危险废物焚烧厂二恶英排放扩散沉降模拟方法的研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2018.
Wang C. Study on modeling method of the PCDD/Fs dispersion and deposition emitted from a hazardous waste incineration plant [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.

[26] DB 46/484−2019　生活垃圾焚烧污染控制标准 [S]. 海南省市场监督管理局, 2019.
DB 46/484−2019　Standard for pollution control on the municipal solid waste incineration [S]. Hainan Market Supervision Administration, 2019.

[27] SZDB/Z 233−2017　生活垃圾处理设施运营规范 [S]. 深圳市市场监督管理局, 2017.
SZDB/Z 233−2017　Operational standards for municipal solid waste treatment facilities [S]. Shenzhen Administration for Market Regulation, 2017.

[28] Chen Y, Meng Y, Cao H. Simulation of Spatial Distributions of Atmospheric Heavy Metals in Xinzhuang and Assessment of Their Health Risks [C]//7th Annual Meeting of Risk Analysis Council of China Association for Disaster Prevention (RAC−2016). Atlantis Press, 2016:464−469.

[29] 伯　鑫.CALPUFF 模型技术方法与应用 [M]. 北京:中国环境出版社, 2016:23−35.
Bo X. CALPUFF model technology method and application [M]. Bejing: China Environmental Science Press, 2016:23−35.

[30] 伯　鑫,杨朝旭,贾瑜玲,等.西南典型区域焚烧厂排放二噁英类污染物环境影响研究 [M]. 北京:中国环境出版社, 2020:35−50.
Bo X, Yang Z X, Jia Y L, et al. Study on environmental impact of dioxin−like pollutants emitted from typical incineration plants in Southwest China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2020:35−50.

[31] 阚　慧,伯　鑫,屈加豹,等.2015 年海南省火电行业大气环境影响研究 [J]. 中国环境科学, 2019,39(1):428−439.
Kan H, Bo X, Qu J B, et al. Air quality impacts of power plant emissions in Hainan Province, 2015 [J]. China Environmental Science, 2019,39(1):428−439.

[32] 伯　鑫,王　刚,温　柔,等.京津冀地区火电企业的大气污染影响 [J]. 中国环境科学, 2015,35(2):364−373.
Bo X, Wang G, Wen R, et al. Air pollution effect of the thermal power plants in Beijing−Tianjin−Hebei region [J]. China Environmental Science, 2015,35(2):364−373.

[33] 伯　鑫,吴忠祥,王　刚,等. CALPUFF 模式的标准化应用技术研究

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[J]. 环境科学与技术, 2014,37(S2):530−534.75.
Bo X, Wu Z X, Wang G, et al. Study on the standardized application of CALPUFF Model [J]. Environmental Science and Technology, 2014, 37(S2):530−534.75.

[34] 伯 鑫,丁 峰,徐 鹤,等.大气扩散 CALPUFF 模型技术综述 [J]. 环境监测管理与技术, 2009,21(3):9−13,47.
Bo X, Ding F, Xu H, et al. Review of atmospheric diffusion spersion model CALPUFF technology [J]. Environmental Monitoring Management and Technology, 2009,21(3):9−13,47.

[35] 崔建升,雷团团,伯 鑫,等.海南省大气污染源排放清单及环境影响研究 [J]. 环境污染与防治, 2020,42(6):651−659,665.
Cui J S, Lei T T, Bo X, et al. Studies on air pollutant emission inventory and environmental impact in Hainan Province [J]. Environmental Pollution and Prevention, 2020,42(6):651−659,665.

[36] 田 飞,伯 鑫,薛晓达,等.基于复杂地形−气象场的二噁英污染物沉降研究 [J]. 中国环境科学, 2019,39(4):1678−1686.
Tian F, Bo X, Xue X D, et al. Study on settlement of dioxin pollutants under complex terrain−weather conditions [J]. China Environmental Science, 2019,39(4):1678−1686.

[37] 孙博飞,伯 鑫,张尚宣,等.钢厂烧结机烟气排放对土壤二噁英浓度的影响 [J]. 中国环境科学, 2017,37(11):4222−4229.
Sun B F, Bo X, Zhang S X, et al. Effect of exhaust gas from sintering machines on the concentration of dioxin in soil around a steel plant [J]. China Environmental Science, 2017,37(11):4222−4229.

[38] 王成鑫,楚英豪,阮建辉,等.AERMOD 模型地表参数更新对模拟效果影响 [J]. 中国环境科学, 2022,42(5):2070−2077.
Wang C X, Chu Y H, Ruan J H, et al. Research on the influence of AERMOD model surface parameter update on simulation effect [J]. China Environmental Science, 2022,42(5):2070−2077.

[39] 史梦雪,伯 鑫,田 飞,等.基于不同空气质量模型的二噁英沉降效果研究 [J]. 中国环境科学, 2020,40(1):24−30.
Shi M X, Bo X, Tian F, et al. Study on deposition effects of dioxins based on different air quality models [J]. China Environmental Science, 2020,40(1):24−30.

[40] 赵金平,钟英立,徐小静,等.南方地区典型生物质燃烧锅炉二噁英排放污染特征 [J]. 中国环境科学, 2017,37(9):3473−3480.
Zhao J P, Zhong Y L, Xu X J, et al. Research on pollution characteristic of dioxin emitted from typical biomass combustion boiler in southern region [J]. China Environmental Science, 2017, 37(9):3473−3480.

[41] 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.

[42] 杨 益,姬亚芹,高玉宗,等.西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征 [J]. 环境科学, 2022,43(4):1844−1852.
Yang Y, Ji Y P, Gao Y Z, et al. Agricultural ammonia emission inventory and its distribution in Xining city [J]. Environmental Science, 2022,43(4):1844−1852.

[43] 张 凯,于周锁,高 宏,等.兰州盆地人为源大气污染物网格化排放清单及其空间分布特征 [J]. 环境科学学报, 2017,37(4):1227−1242.
Zhang K, Yu Z S, Gao H, et al. Gridded emission inventories and spatial distribution characteristics of anthropogenic atmospheric pollutants in Lanzhou valley [J]. Journal of Environmental Sciences, 2017,37(4):1227−1242.

[44] HJ 77.2−2008 环境空气和废气二英类的测定同位素稀释高分辨气相色谱−高分辨质谱法 [S].
HJ 77.2−2008 Ambient air and flue gas determination of polychlorinated dibenzo−*p*−dioxins (PCDDs) and polychlorinated dibenzofurans (PCDFs) Isotope dilution HRGC−HRMS [S].

[45] 山东省住房和城乡建设厅.印发《关于进一步推进生活垃圾分类工作的实施意见》的通知 [EB/OL]. http://zjt.shandong.gov.cn/art/2021/7/15/art_103756_10301860.html.
Housing and Urban−Rural Development of Shandong Province. Notice of the implementation opinions on further promoting the work of municipal solid waste classification [EB/OL]. http://zjt.shandong.gov.cn/art/2021/7/15/art_103756_10301860.html.

[46] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.“十三五”全国城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划 [EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjjzxgh/201706/t20170615_1196798.html?code=&state=123.
National Development and Reform Commission. The 13th Five−Year Plan for national construction of harmless treatment facilities for municipal solid waste [EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzzlgh/gjjzxgh/201706/t20170615_1196798.html?code=&state=123.

[47] Li Y, Zhao X, Li Y, et al. Waste incineration industry and development policies in China [J]. Waste Management, 2015,46:234−241.

[48] Tian H, Gao J, Hao J, et al. Atmospheric pollution problems and control proposals associated with solid waste management in China: a review [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013,252:142−154.

[49] Xin−Gang Z, Gui−Wu J, Ang L, et al. Technology, cost, a performance of waste−to−energy incineration industry in China [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016,55:115−130.

[50] 山东省住房和城乡建设厅.关于进一步加强城市生活垃圾焚烧处理工作的意见的通知 [EB/OL]. http://zjt.shandong.gov.cn/art/2017/2/3/art_102847_7789833.html.
Housing and Urban−Rural Development of Shandong Province. Notice on opinions on further strengthening the incineration of municipal solid waste [EB/OL]. http://zjt.shandong.gov.cn/art/2017/2/3/art_102847_7789833.html.

[51] Hong J, Chen Y, Wang M, et al. Intensification of municipal solid waste disposal in China [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017,69:168−176.

[52] Zhu F, Li X, Lu J W, et al. Emission characteristics of PCDD/Fs in stack gas from municipal solid waste incineration plants in Northern China [J]. Chemosphere, 2018,200:23−29.

[53] Yan J H, Chen T, Li X D, et al. Evaluation of PCDD/Fs emission from fluidized bed incinerators co−firing MSW with coal in China [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006,135(1−3):47−51.

[54] Jin Y, Liu H, Li X, et al. Health risk assessment of PCDD/F emissions from municipal solid waste incinerators (MSWIs) in China [J]. Environmental Technology, 2012,33(22):2539−2545.

[55] Wang Y H, Lin C, Chang−Chien G P. Characteristics of PCDD/Fs in a particles filtration device with activated carbon injection [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2009,9(3):317−322.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[56] 雷　鸣,海　景,程　江,等.小型生活垃圾热处理炉二恶英和重金属的排放特征 [J]. 中国环境科学, 2017,37(10):3836-3844.
Lei M, Hai J, Cheng J, et al. Emission characteristics of dioxins and heavy metals from small-scale thermal treatment furnaces for disposing domestic solid waste [J]. China Environmental Science, 2017,37(10):3836-3844.

[57] Peng Y, Lu S, Li X, et al. Formation, measurement, and control of dioxins from the incineration of municipal solid wastes: recent advances and perspectives [J]. Energy & Fuels, 2020,34(11):13247-13267.

[58] Yang L, Liu G, Shen J, et al. Environmental characteristics and formations of polybrominated dibenzo-*p*-dioxins and dibenzofurans [J]. Environment International, 2021,152:106450.

[59] Guo C J, Wang M S, Lin S L, et al. Emissions of PCDD/Fs and PCBs during the cold start-up of municipal solid waste incinerators [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2014,14(6):1593-1604.

[60] Shen H M, Wang Y F, Chyang C S, et al. Effects of sulfur and calcium compounds on dioxin reduction in a fluidized bed combustor [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2019,19(5):1079-1094.

[61] Li X, Ma Y, Zhang M, et al. Study on the relationship between waste classification, combustion condition and dioxin emission from waste incineration [J]. Waste Disposal & Sustainable Energy, 2019,1(2): 91-98.

[62] Liu H, Kong S, Liu Y, et al. Pollution control technologies of dioxins in municipal solid waste incinerator [J]. Procedia Environmental Sciences, 2012,16:661-668.

[63] Zhan M X, Liu Y W, Ye W W, et al. Modification of activated carbon using urea to enhance the adsorption of dioxins [J]. Environmental Research, 2022,204:112035.

[64] Li X, Ma Y, Zhang M, et al. Study on the relationship between waste classification, combustion condition and dioxin emission from waste incineration [J]. Waste Disposal & Sustainable Energy, 2019,1(2): 91-98.

[65] Lu S Y, Du Y, Yan J H, et al. Dioxins and their fingerprint in size-classified fly ash fractions from municipal solid waste incinerators in China—Mechanical grate and fluidized bed units [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2012,62(6):717-724.

[66] Ma C, Li B, Chen D, et al. An investigation of an oxygen-enriched combustion of municipal solid waste on flue gas emission and combustion performance at a 8MWth waste-to-energy plant [J]. Waste Management, 2019,96:47-56.

[67] Guo C J, Wang M S, Lin S L, et al. Emissions of PCDD/Fs and PCBs during the cold start-up of municipal solid waste incinerators [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2014,14(6):1593-1604.

[68] Zhan M X, Liu Y W, Ye W W, et al. Modification of activated carbon using urea to enhance the adsorption of dioxins [J]. Environmental Research, 2022,204:112035.

[69] Zhou H, Meng A, Long Y, et al. A review of dioxin-related substances during municipal solid waste incineration [J]. Waste Management, 2015,36:106-118.

作者简介： 汤　铃(1983-),女,广西桂林人,教授,博士,主要研究领域为能源经济与管理.发表论文 80 余篇.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net