

基于生命周期评价的城市生活垃圾焚烧过程环境影响研究*

李娟¹ 郑海涛¹ 李金香^{1#} 叶美瀛² 杨妍妍¹ 刘保献¹ 鹿海峰¹ 邹本东¹

(1.北京市生态环境监测中心,北京 100048;

2.中国环境科学研究院,国家环境保护危险废物鉴别与风险控制重点实验室,北京 100012)

摘要 焚烧已逐渐成为处置生活垃圾的主流方法。选取北方城市某典型生活垃圾焚烧厂为研究对象,采用生命周期评价(LCA),计算生活垃圾焚烧过程存在的环境影响潜值,分析主要贡献组分,为降低垃圾焚烧厂环境影响提供数据支撑。结果表明,城市生活垃圾在焚烧、发电、烟气净化阶段加权后的环境影响潜值分别为 3.49×10^{-12} 、 -3.79×10^{-12} 、 5.56×10^{-13} ,环境影响总负荷为 2.56×10^{-13} 。焚烧阶段的主要环境影响贡献类型为酸雨,主要贡献组分为塑料类垃圾(贡献率为 50%~95%);发电阶段主要环境影响抵消类型为酸雨;烟气净化阶段的主要环境影响贡献类型为富营养化。生活垃圾焚烧过程产生了一定的环境影响,但可通过加强塑料类垃圾的源头控制和有效利用、提高企业污染物净化效率以及加强氮氧化物排放标准等手段降低生活垃圾焚烧对环境的影响。

关键词 生活垃圾 焚烧 生命周期评价 环境影响潜力 阶段

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2022.09.015

Research on environmental impact of municipal domestic waste incineration process based on life cycle assessment LI Juan¹, ZHENG Haitao¹, LI Jinxiang¹, YE Meiyang², YANG Yanyan¹, LIU Baoxian¹, LU Haifeng¹, ZOU Bendong¹. (1. Beijing Municipal Ecological and Environmental Monitoring Center, Beijing 100048; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Hazardous Waste Identification and Risk Control, Chinese Research Academy of Environment Sciences, Beijing 100012)

Abstract: Incineration has gradually become the mainstream method of disposal of domestic waste. A typical domestic waste incineration plant in a northern city was selected as the research object. Life cycle assessment (LCA) was used to calculate the potential environmental impact potential value of the domestic waste incineration process, analyze the main contributing components, and provide data support for reducing the environmental impact of the waste incineration plant. The results showed that the weighted total environmental impact potential value after normalization at the incineration, power generation, and flue gas purification stages of domestic waste were 3.49×10^{-12} , -3.79×10^{-12} and 5.56×10^{-13} , respectively, and the total environmental impact was 2.56×10^{-13} . The main environmental contribution type at the incineration stage was acid rain and the main contributing component was plastics (contribution rate was 50%-95%). The main environmental offset type at the power generation stage was acid rain. The main environmental contribution type at the flue gas purification stage was eutrophication. The domestic waste incineration process had a certain environmental impact, but the impact of domestic waste incineration on the environment could be reduced by strengthening the source control and effective utilization of plastic waste, improving the efficiency of corporate pollutant purification, and strengthening nitrogen oxide emission standards.

Keywords: domestic waste; incineration; life cycle assessment; environmental impact potential; stage

随着城市人口的增长和经济的迅速发展,城市生活垃圾的产生量也日益增长。生活垃圾的集中处置给人们的正常生活带来巨大的困扰和威胁,其处置方式最优化和环境影响最小化已然成为城市发展必须面对的问题^[1]。根据国家统计年鉴,2019年全国城市生活垃圾清运量达 24 206.2 万 t^[2],相较于 2018 年同比增加了 6.2%,其中焚烧处置量占 50%

以上,焚烧已逐渐成为处置生活垃圾的主流方法^[3]。

如今,公众对环保问题越来越重视,对垃圾焚烧厂后期的监管也提出全面、及时、准确、透明等要求^[4]。目前,管理部门对垃圾焚烧厂的监测聚焦于末端废气项目的达标排放,尚未将整个焚烧阶段中物质消耗或能量投入部分纳入其环境影响范围之中,从而忽视了环境污染转移问题,缺乏整体环境影

第一作者:李娟,女,1990年生,博士,工程师,研究方向为环境监测与治理。# 通讯作者。

*国家重点研发计划项目(No.2017YFC0209903)。

响定量评估。垃圾焚烧过程中会从两方面对环境造成影响:(1)二次污染物的产生,包括废气、飞灰和炉渣;(2)外源物料和电力的输入又会对环境产生间接影响^[5-6]。在垃圾处理系统内部,环境影响可能会发生转移^[7-8]。以往的环境监管重点是放在工艺阶段烟气排放方面,缺少对整个处理过程各方面的监管,对整个系统生命周期阶段环境影响的全貌缺乏一定了解,环保监管呈现较分散的特点,包括管理对象和污染信息的分散。

生命周期评价(LCA)是一种全面的环境管理工具,将环境因子融入整个产品或工艺的设计、制造、消费、处置过程中,对整个过程的环境影响进行评价^[9]。垃圾焚烧过程的 LCA 是指垃圾焚烧的整个生命周期过程,包括从垃圾入炉焚烧、发电到最终烟气净化,对物质或能源输入、输出以及相应环境排放物进行识别和量化,评估物质、能源利用效率以及所排放废物的环境影响。国内外众多学者利用 LCA 方法开展垃圾处理的相关研究,如 ABDULI 等^[10]⁴⁹⁷采用 LCA 方法对德黑兰市垃圾管理决策的环境影响进行对比研究,发现配有气体控制措施的填埋处理优于无控制措施的堆肥+填埋方式;STASI-ULAITIENE 等^[11]利用 LCA 方法将等离子体废气处理技术与传统废气处理技术进行对比分析,结果表明,在脱硫脱硝方面,等离子体技术在酸雨、富营养化和人体毒性上的环境效益更优。王丽佳^[12]分别对采用炉排型焚烧炉和流化床焚烧炉的垃圾焚烧厂的整个生命周期进行评价,研究两种炉型垃圾焚烧整个生命周期的环境释放影响;梁镇江等^[13]¹³利用 LCA 法对焚烧发电和全组分资源化处理技术的主要大气污染物排放特征进行分析,为生活垃圾的合理化处理提供理论支持。

然而,国内外学者大多研究不同垃圾处理方式之间的环境影响差异,缺乏对同一种处理方式不同阶段的环境影响研究,尤其是对垃圾焚烧过程不同阶段的定量评估研究甚少,也未得出不同阶段的特征污染物和主要污染环节,不能为环境管理部门的监管提供有利的数据支撑。因此,本研究通过对北

方城市典型生活垃圾焚烧厂的调研,分析垃圾焚烧全过程中的工艺技术、污染物处理过程、资源消耗和污染物排放,采用 LCA 方法计算垃圾焚烧过程 3 个不同工艺阶段存在的环境影响,分析不同工艺阶段的特征污染物及主要污染环节,从而提出有效的控制措施,对切实降低环境影响及风险方面提供决策支持,为垃圾焚烧厂的监督监管提供指导。

1 研究对象与研究方法

1.1 研究对象

选取北方城市某典型生活垃圾焚烧厂为研究对象。该城市经济发达、生活质量高,属于高消费城市,产生的生活垃圾种类多。生活垃圾组分平均质量分数见表 1。厨余类垃圾平均占 32.5%,有机物含量比南方城市低,可见垃圾容重较小;无机物塑料类垃圾较多,平均占 33.8%,可见其垃圾热值较高,易于燃烧。此外,近年来,随着垃圾分类的逐步实施,进入垃圾焚烧厂的厨余类垃圾占比有所下降,且随季节变动较大。

该垃圾焚烧厂共有 3 条焚烧生产线,设计产能为 3×600 t/d,垃圾进厂贮存脱水后进行燃烧,炉内添加氨水进行脱氮;燃烧产生的炉渣外运进行综合利用,飞灰稳定固化处理后填埋。燃烧产生的高温烟气经过锅炉进行热交换,产生的蒸汽进入汽轮机进行发电,最后从锅炉出来的烟气进入烟气净化系统,经过处理达标后通过烟囱排放。烟气中主要污染因子为二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳、氯化氢、重金属和二噁英。

本研究评价的目标是通过 LCA 方法,对比该垃圾焚烧厂焚烧、发电和烟气净化 3 个阶段的环境负荷和整个过程的环境总负荷,分析城市生活垃圾焚烧不同阶段物质消耗、污染物排放对环境造成的影响,研究系统边界设定如图 1 所示。生活垃圾焚烧过程中,经焚烧产生的飞灰和炉渣直接运往危废处置单位和填埋场(或综合利用),进入新的使用循环,飞灰和炉渣的处理过程不包含在本系统之内。3 个阶段的烟气总量基本维持不变,为使其具有可比

表 1 生活垃圾组分平均质量分数
Table 1 The average mass fraction of domestic waste

项目	厨余类	塑料类	废纸类	玻璃类	金属类	木竹类	灰土类	纺织类	砖瓦陶瓷类	混合类	其他
春季	42.0	31.8	12.9	1.0	1.1	7.0	1.4	1.9	0	0	2.0
夏季	36.4	37.7	15.1	1.0	0	3.6	0.7	1.6	0	0	0.6
秋季	37.1	35.1	12.9	1.5	1.4	3.4	3.2	2.4	0.1	0	2.9
冬季	14.4	30.5	20.9	5.3	2.1	3.9	2.2	7.8	3.0	10.6	0
平均值	32.5	33.8	15.5	2.2	1.2	4.5	1.9	3.4	0.8	2.7	1.4

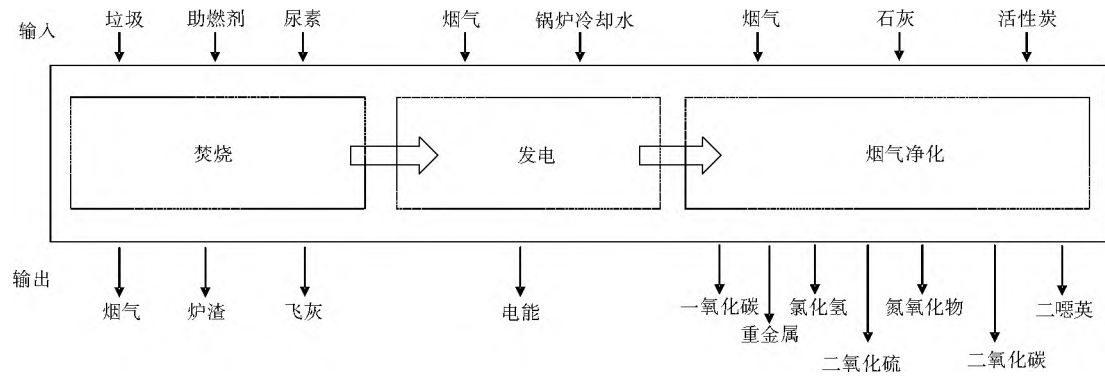


图1 生活垃圾焚烧过程LCA系统边界

Fig.1 Boundary of LCA system for the incineration process of domestic waste

性,视其烟气总量一致。

1.2 功能单位和设定条件

功能单位是用于度量焚烧过程整体系统和每个阶段系统功能的计量单位,实现系统输入与输出的归一化^[14]。2020年该垃圾焚烧厂所在城市人均生活垃圾产量约1.02 kg/d,生活垃圾总量约1 259.7 t/d,生活垃圾收集率可达100%。本研究选取功能单位为处理1 t垃圾的量。围绕此次研究内容,做以下设定:(1)焚烧过程中不考虑可回收物质的回用;(2)不考虑生活垃圾焚烧整个过程办公及生活类物质的输入和污染物排放;(3)仅考虑生活垃圾焚烧各阶段主要影响因素,未纳入考虑部分少量物质的消耗,对于厂内资源回用的影响可忽略不计。

1.3 研究方法

1.3.1 环境影响潜值归一化

一般而言,环境影响类型包括资源耗竭、温室效应、酸雨、富营养化、臭氧层破坏、人体毒性和生态毒性等。根据生活垃圾组分及生命周期清单(LCI)分析结果,本研究选取与之密切相关的5种环境影响类型(温室效应、臭氧层破坏、酸雨、富营养化和人体

毒性)进行分析。

由于每种污染物对环境都有其固有特征,且影响程度也各不相同,归一化可将每一个影响类型中的不同物质转化和汇总成为统一的单元,并将其对环境的影响贡献程度量化,数据归一化的目的是为各环境影响类型的相对大小提供一个可比较的标准。CML-IA是由荷兰莱顿大学环境科学研究院开发的一个包含LCA所需的特征化因子的数据库^{[10]493}。归一化系数采用CML-IA中2000年的参考值(见表2)。

第 j 种环境影响类型的归一化后的环境影响潜值(NEP_j)计算公式如下:

$$NEP_j = EP_j / (T \times ER_j) \quad (1)$$

式中: EP_j 为第 j 种环境影响类型的环境影响潜值(温室效应以二氧化碳当量计,臭氧层破坏以一氟三氯甲烷当量计,酸雨以二氧化硫当量计,富营养化以油的当量计,人体毒性以细颗粒物当量计),kg/a; T 为产品服务期,取值为100; ER_j 为第 j 种环境影响类型的归一化系数,kg/a。

1.3.2 环境影响潜值加权

对归一化后的数据赋予不同的权重,才能将不

表2 LCA参数

Table 2 The assessment parameters of LCA

影响类型	排放污染物	当量因子	归一化系数/(kg·a ⁻¹)	权重
温室效应	二氧化碳	1.00	4.23×10^{13}	0.83
	一氧化碳	2.00		
臭氧层破坏	一氧化碳	1.00	9.95×10^{10}	2.7
	氯化氢	2.70		
酸雨	二氧化硫	1.00	3.22×10^{11}	0.73
	氮氧化物	0.70		
富营养化	氮氧化物	1.20	1.35×10^{11}	0.59
	可吸入颗粒物	0.82		
人体毒性	细颗粒物	1.80	5.71×10^{13}	1.99
	镉	289.43		
	汞	6 008.16		
	铅	466.52		
	2,3,7,8-四氯二苯并对二噁英	1.93×10^9		

同影响类型的环境影响潜值进行比较。目前对权重的确定方法有很多,包括目标距离法^[15-16]、模糊逻辑法、专家打分法、层次分析和相对重要性标度法^[17]等。本研究采取比较客观的目标距离法,即某种环境效应的严重性表现为当前水平与目标水平之间的距离,即权重由1990年第 j 种环境影响类型的环境影响潜值(EP_{j1990} , kg/a)和2000年第 j 种环境影响类型的环境影响潜值(EP_{j2000} , kg/a)的比值确定。权重反映了1990年的归一化基准要削减多少才能达到2000年的削减目标,权重愈大,说明削减愈快。权重等于1表明2000年的排放目标将保持在1990年的水平;小于1说明2000年的削减目标是降低排放的增长速度,并不降低排放的总量;大于1说明2000年的排放总量将低于1990年。经过加权的各种环境影响潜值具有了可比性,可相加综合成一个简单的指标,称为环境影响总负荷(EIL , 见式(2))。

$$EIL = \sum EP_{j1990} / EP_{j2000} \times NEP_j \quad (2)$$

1.4 分析软件和方法

利用SimaPro软件进行LCA模拟计算,环境影响评价采用CML-IA。将具有同一种环境影响效应的污染物利用当量因子计算整合转化为特征污染物,再利用归一化系数和权重进行归一化和加权评估,从而能直观比较焚烧过程不同阶段的环境影响水平。

2 结果与讨论

2.1 LCI 数据分析

LCI分析是指对前一阶段所确定的系统边界内

的所有过程的资源能源消耗和环境排放物进行量化和合理性分析,并制定清单表,即输入、输出表。数据收集是LCI分析的核心部分,本研究数据来源主要为垃圾处理单位实际测得或提供的数据、监管部门提供的监测报告及文献中的研究数据。对收集到的所有处理设施的清单数据进行汇总,并折算成功能单位。按照处理1 t垃圾量计算,该垃圾焚烧厂焚烧阶段需要消耗尿素0.45 kg(助燃剂只在启停炉时使用且用量很少,因此在本研究中可忽略不计),产生烟气体积1 500 m³、炉渣18 kg、飞灰2.7 kg;发电阶段物耗因子是焚烧阶段产生的烟气1 500 m³、锅炉冷却水消耗量0.78 t,无污染排放物;烟气净化阶段,物耗因子为从发电阶段产生的烟气1 422 m³、石灰消耗量8.0 t、活性炭消耗量0.5 kg,二氧化碳、氮氧化物、二氧化硫、一氧化碳、氯化氢、重金属、二噁英排放量分别为24.0、157.5、5.63、3.56、1.9、2.76 × 10⁻⁴、1.13 × 10⁻¹⁵ kg。

2.2 不同阶段环境影响潜值

生活垃圾焚烧3个阶段的环境影响潜值如表3所示。该厂生活垃圾焚烧阶段的环境影响潜值受垃圾组分影响,且不同垃圾组分对相同环境影响类型造成的危害程度也有所差异;发电阶段系统输入是烟气污染物,但系统输出为电能,产生的环境影响潜值是负值,这与其产生的经济效益是一致的结果;烟气净化阶段的环境影响潜值为正值,且不同污染物的净化过程和排放对环境的影响作用不同。

2.3 不同阶段环境影响潜值归一化

生活垃圾焚烧阶段的环境影响潜值归一化结果如表4所示。焚烧阶段的温室效应、臭氧层破坏、酸

表3 生活垃圾焚烧不同阶段的环境影响潜值

Table 3 Environmental impact potential value at different stages of domestic waste incineration

阶段	组分	环境影响潜值/(kg · a ⁻¹)				
		温室效应	臭氧层破坏	酸雨	富营养化	人体毒性
焚烧	厨余类	1.59	7.10 × 10 ⁻⁷	0.97	1.43 × 10 ⁻⁴	0.04
	塑料类	203.81	8.17 × 10 ⁻⁵	145.17	0.11	8.41
	废纸类	4.27	1.95 × 10 ⁻⁶	2.37	5.15 × 10 ⁻⁴	0.13
	木竹类	0.47	1.96 × 10 ⁻⁷	0.27	2.82 × 10 ⁻⁴	0.02
	灰土类	2.70	6.35 × 10 ⁻⁷	2.25	6.44 × 10 ⁻⁴	0.17
	尿素	1.53	5.66 × 10 ⁻⁷	1.07	2.71 × 10 ⁻⁴	0.03
发电	产生的电能	-91.67	-2.69 × 10 ⁻⁴	-166.09	-0.04	-8.41
烟气净化	二氧化碳	42.36	1.60 × 10 ⁻⁶	1.58 × 10 ⁻²	8.20 × 10 ⁻³	1.90 × 10 ⁻³
	氮氧化物	21.23	8.18 × 10 ⁻⁶	0.08	6.79	0.04
	二氧化硫	0.81	5.34 × 10 ⁻⁷	0.10	0.90	0.03
	氯化氢	7.31	1.08 × 10 ⁻⁴	0.05	2.35	0.02
	一氧化碳	4.05	8.39 × 10 ⁻⁵	1.39 × 10 ⁻²	7.30 × 10 ⁻³	0.93
	重金属	2.82	1.60 × 10 ⁻⁶	7.71 × 10 ⁻²	8.10 × 10 ⁻³	25.55
	二噁英	1.40	8.00 × 10 ⁻⁶	8.30 × 10 ⁻³	0.08	230.47

表4 生活垃圾焚烧阶段的环境影响潜值归一化结果

Table 4 Standardization results of environmental impact potential value at different stages of domestic waste incineration

阶段	项目	温室效应	臭氧层破坏	酸雨	富营养化	人体毒性
焚烧	厨余类	3.77×10^{-16}	7.14×10^{-20}	3.01×10^{-14}	1.06×10^{-17}	6.85×10^{-18}
	塑料类	4.82×10^{-14}	8.21×10^{-18}	4.51×10^{-12}	7.81×10^{-15}	1.47×10^{-15}
	废纸类	1.01×10^{-15}	1.96×10^{-19}	7.35×10^{-14}	3.82×10^{-17}	2.31×10^{-17}
	木竹类	1.11×10^{-16}	1.97×10^{-20}	8.24×10^{-15}	2.09×10^{-17}	4.12×10^{-18}
	灰土类	6.39×10^{-16}	6.38×10^{-20}	6.99×10^{-14}	4.77×10^{-17}	2.91×10^{-17}
	尿素	3.62×10^{-16}	5.69×10^{-20}	3.33×10^{-14}	2.01×10^{-17}	5.65×10^{-18}
	合计	5.07×10^{-14}	8.62×10^{-18}	4.72×10^{-12}	7.95×10^{-15}	1.54×10^{-15}
发电	产生的电能	-2.17×10^{-14}	-2.71×10^{-17}	-5.16×10^{-12}	-2.95×10^{-15}	-1.47×10^{-15}
烟气净化	二氧化碳	1.00×10^{-14}	1.61×10^{-19}	4.92×10^{-16}	6.07×10^{-16}	3.36×10^{-19}
	氮氧化物	5.02×10^{-15}	8.22×10^{-19}	2.59×10^{-15}	5.03×10^{-13}	6.62×10^{-18}
	二氧化硫	1.92×10^{-16}	5.36×10^{-20}	3.23×10^{-15}	6.65×10^{-14}	5.34×10^{-18}
	氯化氢	1.72×10^{-15}	1.09×10^{-17}	1.40×10^{-15}	1.74×10^{-13}	2.97×10^{-18}
	一氧化碳	9.58×10^{-16}	8.43×10^{-18}	4.31×10^{-16}	5.40×10^{-16}	1.63×10^{-16}
	重金属	6.66×10^{-16}	1.61×10^{-19}	2.39×10^{-15}	6.00×10^{-16}	4.47×10^{-15}
	二噁英	3.30×10^{-16}	8.04×10^{-19}	2.58×10^{-16}	5.62×10^{-15}	4.03×10^{-14}
	合计	1.89×10^{-14}	2.13×10^{-17}	1.08×10^{-14}	7.51×10^{-13}	4.50×10^{-14}

雨、富营养化、人体毒性的环境影响潜值分别为 5.07×10^{-14} 、 8.62×10^{-18} 、 4.72×10^{-12} 、 7.95×10^{-15} 、 1.54×10^{-15} ，焚烧阶段的环境影响潜值为正值，主要影响类型为酸雨。在不同环境影响类型中，塑料类组分的环境影响潜值较大，且是其他垃圾组分的10~1 000倍。这是因为塑料中含氯组分较高，多为聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯和聚苯乙烯树脂等，经过焚烧易产生有毒有害物质，含氯气体也是后期污染物形成的前躯体，所以其对环境的影响较大^[18]。发电阶段环境影响潜值均为负值，这是因为发电阶段对环境产生了抵消作用，主要抵消类型为酸雨。烟气净化阶段的温室效应、臭氧层破坏、酸雨、富营养化、人体毒性的环境影响潜值分别为 1.89×10^{-14} 、 2.13×10^{-17} 、 1.08×10^{-14} 、 7.51×10^{-13} 、 4.50×10^{-14} ，烟气净化阶段的环境影响潜值为正值，主要影响类型为富营养化。总体而言，生活垃圾焚烧发电产生的5种环境影响类型，按照影响程度高低排列依次是酸雨、富营养化、温室效应、人体毒性和臭氧层破坏。

2.4 环境影响潜值加权和环境影响总负荷

生活垃圾焚烧烟气净化阶段的环境影响潜值加权结果如表5所示。生活垃圾焚烧、发电、烟气净化阶段加权后的环境影响潜值分别为 3.49×10^{-12} 、 -3.79×10^{-12} 、 5.56×10^{-13} ，环境影响总负荷为 2.56×10^{-13} 。可见，垃圾焚烧发电过程产生了一定的环境影响，且其环境影响总负荷小于梁镇江等^{[13]12}的研究结果(5.00×10^{-13})，这可能与该城市实行生活垃圾分类管理条例和严格的焚烧工艺条件

有关。

表5 生活垃圾烟气净化阶段的环境影响潜值加权结果

Table 5 The weighted results of environmental impact potential value at the stage of flue gas purification

项目	焚烧阶段	发电阶段	烟气净化阶段
温室效应	4.21×10^{-14}	-1.79×10^{-14}	1.57×10^{-14}
臭氧层破坏	2.33×10^{-17}	-7.31×10^{-17}	5.76×10^{-17}
酸雨	3.45×10^{-12}	-3.76×10^{-12}	7.89×10^{-15}
富营养化	4.69×10^{-15}	-1.74×10^{-15}	4.43×10^{-13}
人体毒性	3.07×10^{-15}	-2.93×10^{-15}	8.96×10^{-14}
合计	3.49×10^{-12}	-3.79×10^{-12}	5.56×10^{-13}

2.5 不同阶段环境影响评价结果分析

生活垃圾焚烧过程3个阶段加权后的环境影响潜值排序为焚烧阶段>烟气净化阶段>发电阶段。焚烧阶段的主要环境影响潜力为酸雨，酸雨贡献率超过90%，入炉生活垃圾可燃组分中塑料类和厨余类垃圾焚烧产生的二氧化硫和二氧化碳排放量最大，因此增加厨余类垃圾分流量并提高可回收塑料的回收率可进一步实现垃圾焚烧厂酸雨气体减排效益。发电阶段的主要环境抵消潜力为酸雨，这是因为火电厂主要是煤作为燃料进行发电，煤燃烧释放出大量的二氧化硫、二氧化氮和总悬浮颗粒物，其中二氧化硫是火电厂排放的主要污染物，它也是重要的大气污染物，二氧化硫是形成酸雨的重要组分，氮氧化物也是火电厂的重要污染物，同时是形成酸雨的重要组分之一，正因为垃圾焚烧产生大量的电能，才会减少燃烧煤发电过程的间接环境影响。烟气净化阶段的主要环境影响潜力为富营养化，贡献率达90%以上，且富营养化的环境影响潜值远高于其他两个阶段。相关研究表明，富营养化与厨余类垃圾

组分有关^[19],厨余类垃圾含氮量较高,在焚烧阶段产生高浓度的氮氧化物,虽然通过净化系统将氮氧化物浓度降低,但排出的烟气中依然存在氮氧化物。

综上可知,生活垃圾在焚烧过程中解决了垃圾环境问题,可降低末端环境影响,虽然增加了其前端的能源资源消耗造成的环境影响,但整个系统既对环境有一定的影响,也有减弱作用,在一定程度上也可实现环境问题的转移。

2.6 主要组分贡献率

进入垃圾焚烧厂的生活垃圾组分不同,对环境影响的贡献率也不同。从图2可以看出,环境影响贡献最大的垃圾组分为塑料类(贡献率为50%~95%),其次为废纸类(贡献率为3%~38%),而其余的垃圾组分贡献率则较低。城市生活垃圾主要有厨余类垃圾、废纸、塑料等,塑料在城市生活中的作用越来越大,虽然近年国家发布了限塑令,但我国塑料类垃圾在城市生活垃圾组成中占比仍较大^[20]。该城市塑料类垃圾平均占33.8%(见表1),而塑料类垃圾中含有毒有害组分较高,对环境影响最大。此外,城市生活垃圾的高含水率,致使垃圾在焚烧炉里燃烧不充分而产生有毒物质,其高水分尤其会导致塑料类垃圾燃烧不充分,释放出更多有害物质,对环境造成较大影响。

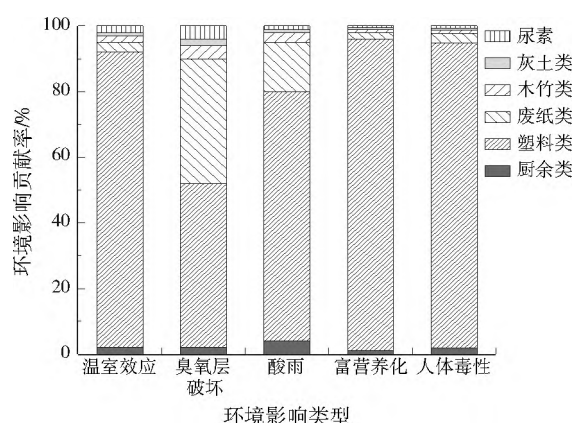


图2 生活垃圾焚烧阶段环境影响的贡献
Fig.2 Contributions to environmental impact at domestic waste incineration

由图3可以看出,烟气净化阶段,二氧化碳和氮氧化物对温室效应影响较大,酸雨方面二氧化硫影响较大,氯化氢和一氧化碳对臭氧层破坏较大,氮氧化物对富营养化影响最大,对人体毒性贡献较大的是重金属和二噁英。不同环境影响效应贡献的主要污染因子也不同,但氮氧化物影响的环境因素较多,其主要环境贡献与垃圾组分中较高的含氮量有关,在焚烧阶段产生高浓度的氮氧化物,虽然通过净化

系统将绝大部分氮氧化物浓度降低,但每吨生活垃圾在净化末端的氮氧化物排放总量依然较高。

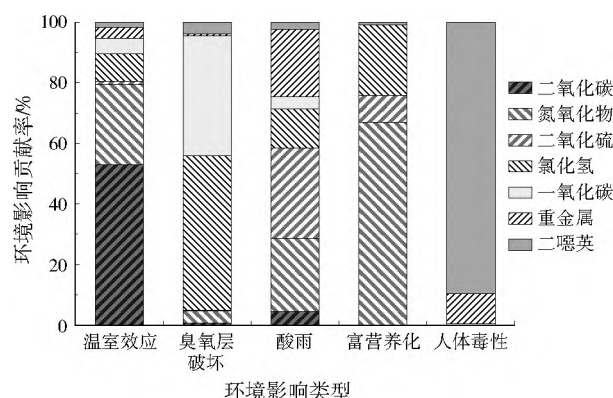


图3 生活垃圾烟气净化阶段环境影响的贡献
Fig.3 Contributions to environmental impact at domestic waste flue gas purification

由图4可见,在温室效应方面,焚烧、发电、烟气净化阶段的贡献率分别为56%、-24%和21%,焚烧阶段贡献最大,这是因为焚烧阶段产生的污染物种类最多,富含引起温室效应的二氧化碳和一氧化碳等物质;在臭氧层破坏方面,焚烧、发电、烟气净化阶段的贡献率分别为15%、-48%和37%;在酸雨方面,主要贡献阶段为焚烧;在富营养化和人体毒性方面,主要贡献阶段则为烟气净化,烟气净化阶段消耗大量化学试剂,并排出氮氧化物,因此易造成富营养化的结果,此外烟气净化阶段虽产生较低浓度的重金属和二噁英,但其毒性远高于其他污染物,对人体毒性作用最大。因此,垃圾焚烧厂可通过提高烟气净化效率来对焚烧中产生的污染气体进行有效去除,降低其对环境和人体健康的危害影响;同时,管理部门可加强对氮氧化物、重金属和二噁英的排放标准,通过控制排放总量来降低对环境和人体健康的危害。

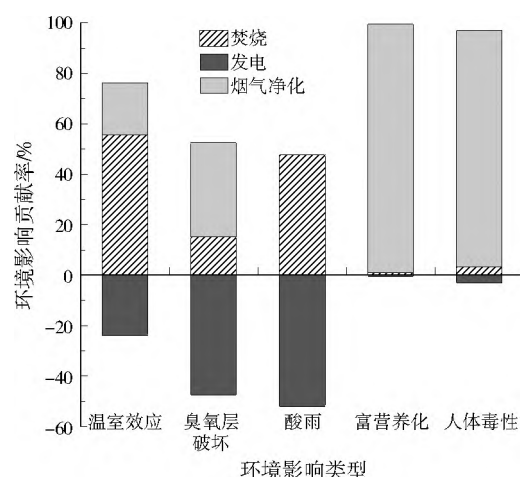


图4 生活垃圾焚烧不同阶段环境影响的贡献
Fig.4 Contributions to the environmental impact at different stages of domestic incineration

3 结 论

(1) 城市生活垃圾在焚烧、发电、烟气净化阶段加权后的环境影响潜值分别为 3.49×10^{-12} 、 -3.79×10^{-12} 和 5.56×10^{-13} , 环境影响总负荷为 2.56×10^{-13} , 整个焚烧过程对环境产生了一定的影响。

(2) 生活垃圾不同组分对环境产生的影响贡献率也不同。焚烧阶段环境影响贡献最大的垃圾组分为塑料类(贡献率为 50%~95%); 烟气净化阶段二氧化碳和氮氧化物对温室效应影响较大, 酸雨方面二氧化硫影响较大, 氯化氢和一氧化碳对臭氧层破坏较大, 氮氧化物对富营养化影响最大, 对人体毒性贡献较大的是重金属和二噁英。不同环境影响效应贡献的主要污染阶段不同, 但可通过控制主要关键因素如加强塑料类垃圾分类作用、提高企业污染物净化效率以及加强氮氧化物排放标准等手段降低生活垃圾焚烧不同阶段对环境的影响。

参考文献:

- [1] YANG X, LIN X P, WANG Y J, et al. Environmental analysis on co-processing of domestic waste in cement kiln[J]. Materials Science Forum, 2020, 993: 1527-1533.
- [2] 国家统计局. 2019 年中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [3] JENNY POPE A B, ALAN BOND B C, JEAN HUGO D E, et al. Reconceptualising sustainability assessment [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2017, 62(6): 205-215.
- [4] 刘楠. 城市生活垃圾焚烧处理项目邻避效应规避研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2018.
- [5] ZHAO Y C. Municipal solid waste incineration process and generation of bottom ash and fly ash[M]. Shanghai: Butterworth-Heinemann, 2017.
- [6] 房科靖, 熊祖鸿, 鲁敏, 等. 基于 LCA 垃圾焚烧发电厂经济性分析的系统动力学模型[J]. 新能源进展, 2017(5): 365-370.
- [7] LIANG S, XU M, SUH S, et al. Unintended environmental consequences and co-benefits of economic restructuring[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(22): 12894-12902.
- [8] HUNT R I, BORCHARDT M A, RICHARDS K D, et al. Assessment of sewer source contamination of drinking water wells using tracers and human enteric viruses[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(20): 7956-7963.
- [9] MIHAI F C, INGRAO C. Assessment of biowaste losses through unsound waste management practices in rural areas and the role of home composting[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 172: 1631-1638.
- [10] ABDULI M A, NAGHIB A, YONESI M, et al. Life cycle assessment (LCA) of solid waste management strategies in Tehran: landfill and composting plus landfill[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2011, 178(1/2/3/4).
- [11] STASIULAITIENE I, MARTUZEVICIUS D, ABROMAITIS V, et al. Comparative life cycle assessment of plasma-based and traditional exhaust gas treatment technologies [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 1804-1812.
- [12] 王丽佳. 基于生命周期评价的生活垃圾焚烧技术比较[J]. 环境保护与循环经济, 2018, 38(2): 16-19.
- [13] 梁镇江, 袁剑刚, 张伟, 等. 2 种生活垃圾资源化处理技术的环境影响分析——基于生命周期评价法[J]. 环境卫生工程, 2019, 27(2).
- [14] PAU F, ANTONI F. Using specification and description language for life cycle assesment in buildings[J]. Sustainability, 2017, 9(6): 1004.
- [15] YANG J X, NIELSEN P H. Chinese life cycle impact assessment factors[J]. Journal of Environmental Sciences, 2001, 13(2): 205-209.
- [16] LIU J, MA X. The analysis on energy and environmental impacts of microalgae-based fuel methanol in China[J]. Energy Policy, 2009, 37(4): 1479-1488.
- [17] 周奇, 黄启飞, 王琪, 等. 废皮革水泥窑共处置生命周期评价[J]. 环境科学研究, 2009, 22(4): 506-510.
- [18] DAI S, ZHENG Y, ZHAO Y, et al. Dechlorination and conversion mechanism of trichlorobenzene as a model compound of chlorine-containing wastes by different base-catalyzed combinations[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(10): 9480-9489.
- [19] LIJO L, MALAMIS S, GONZALEZ G S, et al. Technical and environmental evaluation of an integrated scheme for the co-treatment of wastewater and domestic organic waste in small communities[J]. Water Research, 2016, 109(2): 173-185.
- [20] 王桂琴, 张红玉, 王典, 等. 北京市城区生活垃圾组成及特性分析[J]. 环境工程, 2018, 36(4): 132-136.

编辑: 黄 苇 (收稿日期: 2021-08-05)