

# 两种医疗废物应急协同处置技术的生命周期评价\*

赵宇轩<sup>1</sup>, 魏国侠<sup>2</sup>, 刘汉桥<sup>1</sup>, 赵海龙<sup>1,3</sup>, 李 通<sup>1</sup>, 龚永月<sup>1</sup>, 乔浩宇<sup>1</sup>

(1. 天津城建大学 能源与安全工程学院, 天津 300384; 2. 天津城建大学 理学院, 天津 300384;

3. 清华大学 环境学院, 北京 100084)

**【摘要】** 新冠疫情暴发导致医疗废物数量激增, 疫情严重地区的医疗废物产生量远超其已有处置能力, 其处置成为阻止疫情蔓延的关键环节。对医疗废物分别与危险废物和生活垃圾协同焚烧两种应急处置技术的特点、环境风险及技术适应性进行比较, 并通过生命周期评价方法量化比较两种技术的环境影响和关键因素。结果表明: 与生活垃圾协同焚烧技术由于发电而具有显著的环境效益; 与危险废物协同焚烧, 可有效避免二噁英类物质二次合成, 但该技术因能耗高而对环境影响大。对后者的情景优化表明能源回收效率提高 63.6%、节能减排指标降低了 21.9%。研究结果可为医疗废物应急管理和可持续发展提供参考。

**【关键词】** 医疗废物; 生命周期评价; 应急处置技术; 协同焚烧; 能量回收分析

中图分类号: X799.5; X327

文献标识码: A

文章编号: 1005-8206 (2022) 06-0058-06

DOI: 10.19841/j.cnki.hjwsgc.2022.06.010

## Life Cycle Assessment of Two Emergency Co-Disposal Technologies of Medical Waste

ZHAO Yuxuan<sup>1</sup>, WEI Guoxia<sup>2</sup>, LIU Hanqiao<sup>1</sup>, ZHAO Hailong<sup>1,3</sup>, LI Tong<sup>1</sup>, GONG Yongyue<sup>1</sup>, QIAO Haoyu<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Safety Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384; 2. School of Science, Tianjin

Chengjian University, Tianjin 300384; 3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084)

**【Abstract】** The COVID-19 epidemic has led to a surge of the amount of medical waste, and the generation amount of medical waste in severely affected areas far exceeded their existing disposal capacity. Disposal of medical waste become a key link to prevent epidemic spreading. The characteristics, environmental risks and technical adaptability of two medical waste emergency co-disposal technologies including co-incineration with hazardous waste and domestic waste respectively were compared. The environmental impacts and key factors of the two technologies were evaluated and compared via life cycle assessment. The results showed that co-incineration with domestic waste has significant environmental benefits due to power generation. While co-incineration with hazardous waste could effectively avoid the secondary synthesis of dioxins, but had a great impact on the environment due to high energy consumption. Scenario analysis of co-incineration with hazardous waste showed that the energy recovery efficiency increased by 63.6%, energy conservation and emission reduction targets reduced by 21.9%. The results of the study could provide recommendations for the emergency management and sustainable development of medical waste.

**【Key words】** medical waste; life cycle assessment; emergency disposal techniques; co-incineration; energy recovery analysis

## 1 引言

新型冠状病毒肺炎 (COVID-19) 是一种高度传染性的呼吸道传染病, 主要经呼吸道飞沫和接触传播<sup>[1]</sup>。COVID-19 病毒可以在材料表面存活长达 9 d<sup>[2]</sup>, 其传染风险比普通医疗废物更大。疫情期间, 医务人员和患者消耗了大量的个人防护用品 (如手套、面罩、护目镜和工作服等), 据估

计全球每月使用 1 290 亿个口罩和 650 亿只手套<sup>[3-4]</sup>。医疗服务需求的爆炸式增长和个人防护设备的大量消耗导致医疗废物产生量激增。疫情期间的医疗废物可分为涉疫生活垃圾和医院医疗废物两大类, 后者主要包括隔离点生活垃圾、方舱生活垃圾、定点医院垃圾和一般医院的医疗废物。2020 年 2 月 25 日, 疫情期间武汉市医疗废物产生量峰值超过 240 t/d<sup>[1,4]</sup>, 远超过其已有处置能力 (50.0 t/d)。2022 年 4 月上海医疗废物产生量随疫情蔓延急剧上升, 在 4 月 28 日超过 1 400

\*基金项目: 天津市生态环境治理科技重大专项(18ZXSZSF00120)

收稿日期: 2022-06-23

t/d, 医疗废物总产生量约为处置能力极限的 3 倍。2022 年 7 月, 北京、仙桃、丹东、十堰等城市每 100 万人约产生 5 t 医疗废物<sup>[5]</sup>。在中国, 医疗废物必须通过集中处置设施进行处置, 但疫情期间医疗废物的数量往往超过已有处置能力<sup>[6-7]</sup>, 其处置成为防止疫情蔓延的关键环节。

为提高医疗废物应急处置能力, 2020 年我国发布《新型冠状病毒感染的肺炎疫情医疗废物应急处置管理与技术指南(试行)》, 疫情期间允许采用移动式处置设施(如移动式焚烧设备、移动式蒸汽灭菌舱设备), 以及与危险废物或生活垃圾协同焚烧等应急处置技术。大多数移动式处置设施规模较小, 处置能力不足 5 t/d, 2020 年 3 月 21 日, 武汉移动设施的总处置能力仅为 75.6 t/d, 而通过生活垃圾焚烧设施协同处置了 5 806.4 t<sup>[1]</sup>, 相较而言, 协同处置设施的处置能力大得多。2022 年上海通过生活垃圾焚烧设施协同应急处置医疗废物的能力超过 1 000 t/d。对于国内外疫情严重的地区, 在缺乏移动式处置设施或处置能力不足的情况下, 应优先考虑采用危险废物焚烧设施和生活垃圾焚烧设施进行医疗废物处置。

生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是评价产品、过程或者服务所产生环境影响的一种全面、科学、量化方法<sup>[8]</sup>。该评价贯穿产品、工艺或活动的整个生命周期, 包括原材料的获取和加工、生产、运输、使用和维护以及最终处置<sup>[9]</sup>。目前 LCA 已被国内外学者用于评估医疗废物焚烧及消毒杀菌等处置技术<sup>[10]</sup>。2015 年, Koo 等<sup>[11]</sup>比较了韩国医疗废物处置的 4 种技术(即焚烧、热回收焚烧、蒸汽灭菌和微波消毒), 结果显示热回收焚烧是最佳处置情景, 但只讨论了 4 个类别的指标, 即全球变暖、光化学氧化、酸化和人类毒性。2019 年, Ahmad 等<sup>[12]</sup>评估了巴基斯坦 4 种医疗废物管理做法(焚烧、填埋、热解和化学消毒)的环境影响, 结果显示焚烧对环境的影响最大, 化学消毒对环境的影响最小。

本研究首先比较分析医疗废物与危险废物或生活垃圾协同焚烧两种应急处置技术的特点、环境风险和技术适应性, 提出应急管理的措施建议; 然后构建两种应急协同处置技术的生命周期清单, 用 LCA 量化比较两种医疗废物应急协同处置技术的环境影响, 并进一步通过场景分析探究医疗废物与危险废物协同焚烧技术的能量回收和环境效益的改进潜力, 为疫情期间我国医疗废物应急处

置和管理提供重要参考。

## 2 材料与方法

### 2.1 医疗废物与危险废物协同焚烧

危险废物焚烧设施的运行和管理要求与医疗废物焚烧设施相似, 可以作为医疗废物处置的首选替代设施。危险废物焚烧设施的一般处置能力为 2~60 t/d<sup>[13]</sup>。危险废物焚烧系统如图 1 所示, 包括预处置、进料、焚烧、余热利用、烟气净化等辅助系统。桶装医疗废物和桶装危险废物由窑头提升机送至炉进料斗, 然后进入回转窑焚烧。非桶装医疗废物由周转箱包装, 通过提升机直接进入焚烧系统焚烧处理。非桶装危险废物经破碎机破碎后在料坑内混合搅拌, 由起重机送至炉进料斗。危险废物中含有多种有害成分, 因此混合废物配伍是关键环节, 要根据垃圾的成分和热值进行匹配, 保证窑炉的稳定运行, 同时避免有害成分集中焚烧, 并控制酸性污染物的含量。

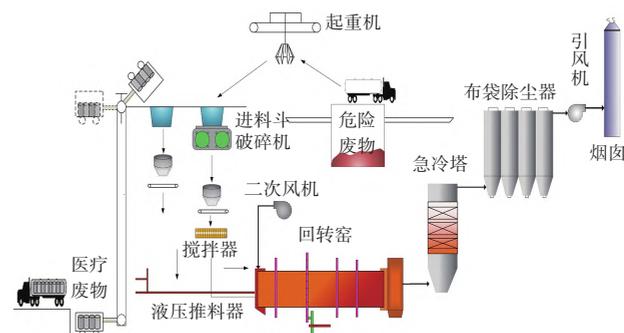


图 1 危险废物焚烧协同处置医疗废物工艺  
Figure 1 The co-disposal process of medical waste and hazardous waste incineration

### 2.2 医疗废物与生活垃圾协同焚烧

生活垃圾焚烧炉的温度应在 850 °C 以上, 垃圾在炉内的停留时间一般为 1.0~1.5 h, 可使新型冠状病毒完全失活<sup>[14]</sup>。因此, 适当控制掺烧比例, 垃圾焚烧设施处置涉疫医疗废物技术上是可行的, 并且可以通过发电回收能量。

生活垃圾焚烧设施已在国内外成功应用于医疗废物应急处置<sup>[15]</sup>。进行破碎毁形和消毒处理并满足消毒效果检验指标的感染性废物、病理性废物、损伤性废物可与生活垃圾一起处置。同时, 由于医疗废物中的高塑料含量, 可导致烟气中氯化氢和二噁英类的含量增加, 故医疗废物必须低于混合废物总质量的 5%<sup>[16]</sup>。我国单个垃圾焚烧厂的焚烧能力一般为 600~2 000 t/d, 按此计算, 医疗废物的协同处置能力通常为 30~100 t/d<sup>[17]</sup>。挪威奥斯陆市克拉梅特斯鲁(Klemetsrud)生活垃圾

焚烧厂利用机械炉排式焚烧炉处置感染性医疗废物，掺烧比也控制在5%以下<sup>[15]</sup>。

医疗废物与生活垃圾协同处置流程见图2，进料系统是关键，医疗废物和生活垃圾分别需要两套储存和进料系统。为控制传染风险，医疗废物应通过加强包装、改进投加工艺（如设立单独投加口）和减少在垃圾坑中的停留时间来降低医疗废物包装破损的概率<sup>[15]</sup>。同时，对垃圾坑严格实行“微负压”环境，确保即使包装破损也不会将感染性物质释放到环境中。此外，因生活垃圾焚烧炉无烟气急冷措施，无法避免二噁英类物质在180~550℃下二次合成，建议适当降低医疗废物比例或将烟气含氧量控制在6%~12%，以确保烟气中二噁英类物质排放浓度达到GB 18485—2014生活垃圾焚烧污染控制标准中的要求（≤0.1 ng/m<sup>3</sup>）。在焚烧飞灰方面，因高氯的医疗废物掺烧会导致飞灰中的氯含量增加，可能影响其后续处理。

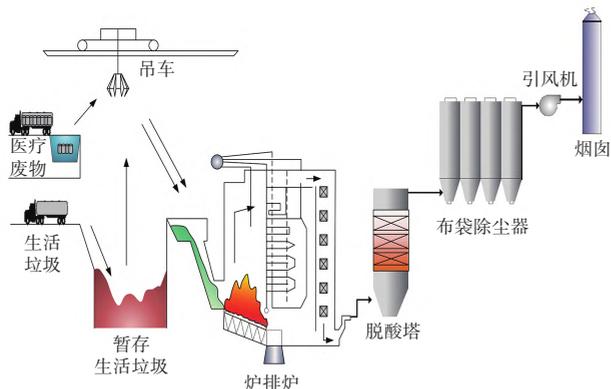


图2 生活垃圾焚烧协同处置医疗废物工艺  
Figure 2 The co-disposal process of medical waste and municipal solid waste incineration

### 3 结果与讨论

#### 3.1 医疗废物应急协同处置技术的LCA

##### 3.1.1 功能单位与系统边界

技术1为医疗废物在回转窑中与可燃危险废物协同处置，医疗废物和其他危险废物的比例分别为24%和76%。功能单位为处置1t医疗废物和3.17t危险废物。技术2为医疗废物在生活垃圾炉排焚烧炉中协同焚烧，医疗废物掺烧比占生活垃圾焚烧设施处理能力的5%。功能单位为处置1t医疗废物和19t生活垃圾。

由于技术1和技术2均为协同处置技术，无法直接单独进行医疗废物处置环境影响比较评价，故提出两个辅助技术，技术A为纯危险废物在回转窑中处置，技术B为纯生活垃圾在焚烧

炉中处置。将技术1、技术2处置情景分别减去技术A、技术B两个辅助情景，得到1A、2B的两个情景，功能单位均为处置1t医疗废物。两种应急协同处置情景的系统边界和物质流分析见图3。

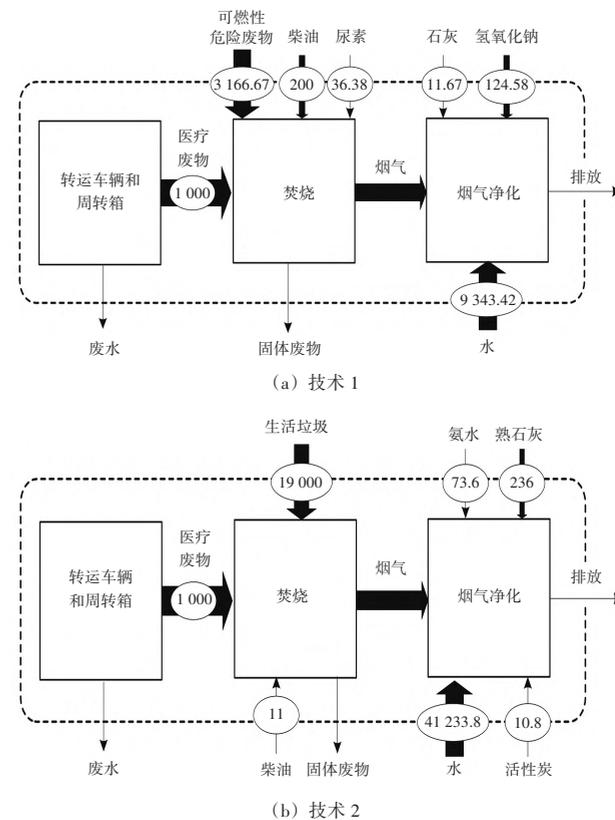


图3 两种应急处置技术的系统边界和物质流 (单位: kg)  
Figure 3 System boundary and material flow of two emergency disposal technologies (unit: kg)

##### 3.1.2 技术优化的情景分析

对于情景1A，蒸汽在冷却塔中被直接冷却，没有热能回收。为探索降低环境影响的潜力，提出优化情景1A：即情景1A中产生的所有蒸汽都进行回收，用于附近工厂建筑物、员工日常生活供暖及外部供暖。

##### 3.1.3 生命周期清单

生命周期清单如表1所示。技术1和技术2的实景数据分别来自《丽水市医疗废物处置中心二期危险废物综合焚烧扩建工程环境影响报告书》和《莆田市生活垃圾焚烧发电厂三期扩建项目竣工环境保护验收监测报告》。辅助技术A和辅助技术B的实景数据分别来自《江苏弘成环保科技有限公司80t/d危险废物焚烧处置扩建项目环境影响报告书》和《仙游县垃圾处理（焚烧发电）厂项目环境影响报告书》。背景数据来自eFootprint平台中CLCD数据库和Ecoinvent数据库<sup>[18]</sup>。

表 1 两种应急处置技术、辅助技术和两个情景的生命周期清单  
Table 1 Life cycle inventory of two emergency disposal technologies, assistive technologies and two scenarios

项目	技术 1	技术 2	技术 A	技术 B	情景 1A	情景 2B	
原料和能源消耗	电力消耗/kWh	662.58	1.29×10 <sup>3</sup>	627.66	1.51×10 <sup>3</sup>	34.92	-223.75
	发电量/kWh		9.00×10 <sup>3</sup>		8.45×10 <sup>3</sup>		543.56
	净发电量/kWh		7.71×10 <sup>3</sup>		6.94×10 <sup>3</sup>		767.31
	水/kg	9.34×10 <sup>3</sup>	4.12×10 <sup>4</sup>	4.11×10 <sup>3</sup>	4.12×10 <sup>4</sup>	5.23×10 <sup>3</sup>	32.30
	运输/(t·km)	45.38	203.40	36.26	194.75	9.12	8.65
	氢氧化钠/kg	124.58	1.00	126.07	0.08	-1.49	0.92
	活性炭/kg	5.00×10 <sup>-3</sup>	10.80	17.44	12.35	-17.44	-1.55
	盐酸/kg		0.80		8.36		-7.56
	次氯酸钠/kg			7.93×10 <sup>-3</sup>	5.21×10 <sup>-2</sup>	-7.93×10 <sup>-3</sup>	-0.05
	硫酸/kg			3.96	0.08	-3.96	-0.08
	尿素/kg	36.38		9.51		26.87	
	氨水/kg		73.60		49.21		24.39
	熟石灰/kg		236.00	280.61	319.96	-280.61	-83.96
	石灰/kg	11.67				11.67	
	天然气/m <sup>3</sup>			71.33		-71.33	
	水泥/kg				59.28		-59.28
	二氧化氯/kg	8.33×10 <sup>-2</sup>				8.33×10 <sup>-2</sup>	
	柴油/kg	200.00	11.00	2.63	15.58	197.37	-4.58
	二氧化硫/kg	7.50	2.20	3.9	4.94	3.60	-2.74
	氮氧化物/kg	7.88	7.20	5.86	18.43	2.02	-11.23
颗粒物/kg	1.13	9.76×10 <sup>-4</sup>	1.14	3.61	-0.01	-3.61	
氟化氢/kg	8.33×10 <sup>-2</sup>		6.34×10 <sup>-2</sup>	3.61	0.02		
氯化氢/kg	0.54		0.79		-0.25		
硫化氢/kg		5.38×10 <sup>-5</sup>	3.42×10 <sup>-3</sup>		-3.42×10 <sup>-3</sup>		
直接空气排放	一氧化碳/kg	3.00		2.73	0.27		
挥发性有机化合物/kg			0.35		-0.35		
氨/kg	0.33	4.04×10 <sup>-4</sup>	0.19		0.14		
汞/kg	1.95×10 <sup>-3</sup>		1.59×10 <sup>-3</sup>		3.60×10 <sup>-4</sup>		
镉/kg			1.98×10 <sup>-4</sup>		-1.98×10 <sup>-4</sup>		
铅/kg	0.02		1.19×10 <sup>-3</sup>		1.88×10 <sup>-2</sup>		
砷/kg	1.95×10 <sup>-3</sup>		3.96×10 <sup>-5</sup>		1.91×10 <sup>-3</sup>		
镍/kg			1.59×10 <sup>-4</sup>		-1.59×10 <sup>-4</sup>		
二噁英类/μg	3.63		1.74	12.54	1.89		
废水/t	7.46	2.60	0.94	5.13	6.52	-2.53	
废水	化学需氧量/mg	3.72×10 <sup>5</sup>		9.43×10 <sup>4</sup>	3.02×10 <sup>5</sup>	2.78×10 <sup>5</sup>	
	悬浮物/mg			5.65×10 <sup>4</sup>	1.01×10 <sup>5</sup>	-5.65×10 <sup>4</sup>	
	氨氮/mg	3.72×10 <sup>4</sup>		9.38×10 <sup>3</sup>	4.06×10 <sup>4</sup>	2.78×10 <sup>4</sup>	
	磷/mg			9.25×10 <sup>2</sup>		-925.00	
固体废物	卫生填埋/t	1.21	5.00	0.86	5.13	0.35	-0.13

### 3.2 能量回收分析

情景 1A 及其优化情景 1A 的能量平衡和能量回收效率分析结果见图 4。情景 1A 的焚烧炉出口烟气温度约为 1 100 °C。优化情景 1A 余热锅炉进

行余热回收后, 产生 4 720 kg 水蒸气 (1.6 MPa, 204 °C), 其出口烟气温度变为 550 °C。因为烟气必须进行急冷以防在 180 ~ 550 °C 下产生二噁英类物质, 因此该温度范围内的热量不能进行余热利

用。情景 1A 余热回收后，其能源回收效率提高了 63.6%。

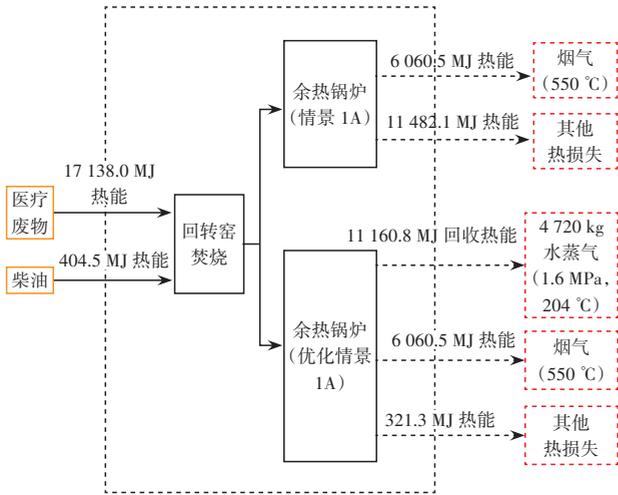


图 4 情景 1A 和优化情景 1A 的能量平衡分析

Figure 4 Energy balance analysis on scenarios 1A and the optimized scenarios 1A

### 3.3 特征化分析

选择了 19 个影响类别进行特征化分析，情景 1A 和情景 2B 的特征化结果见表 2。

表 2 情景 1A 和情景 2B 的特征化结果

Table 2 Characterization results of scenarios 1A and 2B

影响类别	情景 1A	情景 2B
初级能源消耗 (PED) /MJ	$2.63 \times 10^4$	$-2.34 \times 10^3$
非生物资源消耗潜值 (ADP) /kg	0.16	$1.34 \times 10^{-3}$
气候变化 (GWP) /kg	$1.35 \times 10^3$	$-2.24 \times 10^2$
臭氧层消耗 (ODP) /kg	$5.64 \times 10^{-5}$	$-7.40 \times 10^{-7}$
酸化 (AP) /kg	12.30	-17.80
可吸入无机物 (RI) /kg	1.71	-2.60
光化学臭氧合成 (POFP) /kg	4.47	-0.31
富营养化潜值 (EP) /kg	0.72	-1.63
生态毒性 (ET) /CTUe	-9.85	26.20
人体毒性-致癌 (HT-cancer) /CTUh	$5.72 \times 10^{-6}$	$-4.00 \times 10^{-7}$
人体毒性-非致癌 (HT-non cancer) /CTUh	$5.88 \times 10^{-4}$	$8.23 \times 10^{-7}$
电离辐射-人体健康 (IRP) /kg	-4.71	-12.70
土地利用 (LU) /m <sup>2</sup>	-13.50	-3.44
二氧化碳 (CO <sub>2</sub> ) /kg	$9.60 \times 10^2$	$-2.09 \times 10^2$
工业用水量 (IWU) /kg	$5.42 \times 10^2$	$-8.02 \times 10^2$
化学需氧量 (COD) /kg	0.35	-0.38
氨氮 (NH <sub>3</sub> -N) /kg	$2.58 \times 10^{-2}$	$-4.15 \times 10^{-2}$
二氧化硫 (SO <sub>2</sub> ) /kg	8.52	-3.33
氮氧化物 (NO <sub>x</sub> ) /kg	5.23	-12.30

与情景 2B 相比，情景 1A 消耗大量柴油，因为与危险废物协同焚烧需要消耗柴油作为燃料。

柴油对大多数类别都有重大影响，因此情景 1A 对环境的影响较高，其中，非生物资源消耗潜值高，且焚烧过程中产生酸性气体，酸化值较高，另外直接排放、电力、氢氧化钠和柴油是该情景中光化学臭氧合成的主要贡献者。情景 2B 是与生活垃圾协同焚烧，由于发电而具有显著的环境效益。

### 3.4 归一化分析和节能减排 (ECER) 指标值评估

情景 1A、情景 2B 及优化情景 1A 的归一化结果见图 5。情景 1A、情景 2B 的 ECER 结果分别为  $4.02 \times 10^{-9}$  和  $-2.60 \times 10^{-9}$ 。情景 1A 的环境影响远高于情景 2B，其中，情景 1A 的氮氧化物值比情景 2B 高，直接排放、电力对氮氧化物有显著影响；情景 2B 中医疗废物焚烧发电对二氧化硫和二氧化碳有显著的正面影响。

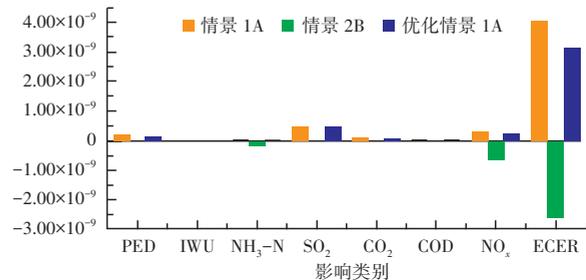


图 5 情景 1A、情景 2B 及优化情景 1A 中所有类别的归一化结果

Figure 5 Normalized results of all the categories in scenarios 1A, 2B and optimized scenarios 1A

由于优化情景 1A 中的能量回收，优化情景 1A 对初级能源消耗和二氧化碳的影响比情景 1A 低，氨氮的值没有明显变化。优化情景 1A 的 ECER 指标比情景 1A 低 21.9%，优化后环境效益更好。

## 4 结论

1) 选择危险废物焚烧设施进行医疗废物处置，因其急冷装置可以有效避免二噁英类物质二次合成。然而，在我国目前的实践中，危废焚烧设施不足以应对疫情期间的大量医疗废物，可通过原料配伍来提高医疗废物进料比及应急处置能力。与生活垃圾协同焚烧虽具有巨大的应急医疗废物处置潜力，但因没有急冷装置，仅适用于短期应急处置。

2) 两种医疗废物协同处置技术的 LCA 结果表明，与生活垃圾协同焚烧的环境影响比与危险废物协同焚烧小，且前者非生物资源消耗潜值、酸化、光化学臭氧合成、生态毒性、工业用水量、化学需氧量及氨氮都较低，这是由于其高燃油消耗和缺乏能量回收。后者对烟气余热能量回收优

化情景表明, 不仅能源回收效率提高了 63.6%, 而且节能减排指标降低了 21.9%。

### 参考文献:

- [1] YANG L, YU X, WU X L, et al. Emergency response to the explosive growth of health care wastes during COVID-19 pandemic in Wuhan, China [J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2021, 164: 105074.
- [2] KAMPF G, TODT D, PFAENDER S, et al. Persistence of coronaviruses on inanimate surfaces and their inactivation with biocidal agents [J]. *Journal of Hospital Infection*, 2020, 104: 246-251.
- [3] PRATA J C, SILVA A L P, WALKER T R, et al. COVID-19 pandemic repercussions on the use and management of plastics [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(13): 7760-7765.
- [4] CHEN C, CHEN J A, FANG R, et al. What medical waste management system may cope with COVID-19 pandemic: Lessons from Wuhan [J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2021, 170: 105600.
- [5] 张维. 核酸检测常态化考验我国医废处置能力 [N]. *法治日报*, 2022-07-08(005).  
ZHANG W. Normalization of nucleic acid detection tests medical waste disposal capacity of China [N]. *Legal Daily*, 2022-07-08(005).
- [6] KLEMEŠ J J, FAN Y V, TAN R R, et al. Minimising the present and future plastic waste, energy and environmental footprints related to COVID-19 [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2020, 127: 109883.
- [7] PURNOMO C W, KURNIAWAN W, AZIZ M. Technological review on thermochemical conversion of COVID-19-related medical wastes [J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2021, 167: 105429.
- [8] 赵咄. 城市生活垃圾焚烧发电生命周期评价研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.  
ZHAO D. The life cycle assessment of waste incineration power generation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016.
- [9] 徐常青. 我国下水污泥处置生命周期环境与经济集成评价 [D]. 济南: 山东大学, 2015.  
XU C Q. Life-cycle environmental and economic assessment of sewage sludge treatment in China [D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [10] AUNG T S, LUAN S J, XU Q Y. Application of multi-criteria-decision approach for the analysis of medical waste management systems in Myanmar [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 222: 733-745.
- [11] KOO J K, JEONG S. Sustainability and shared smart and mutual - green growth (SSaM-GG) in Korean medical waste management [J]. *Waste Management & Research*, 2015, 33(5): 410-418.
- [12] AHMAD R, LIU G, SANTAGATA R, et al. LCA of hospital solid waste treatment alternatives in a developing country: The case of district Swat, Pakistan [J]. *Sustainability*, 2019, 11: 350113.
- [13] ZHAO H L, LIU H Q, WEI G X, et al. A review on emergency disposal and management of medical waste during the COVID-19 pandemic in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 810: 152302.
- [14] 周奇, 徐亚, 王菲, 等. 生活垃圾焚烧设施应急处置医疗废物现状与风险防控 [J]. *环境卫生工程*, 2020, 28(2): 23-26, 29.  
ZHOU Q, XU Y, WANG F, et al. Current situation and risk prevention and control of emergency process of medical waste by MSW incineration facility [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2020, 28(2): 23-26, 29.
- [15] 生态环境部固体废物与化学品司. 核心问题七问答: 生活垃圾焚烧设施应急处置肺炎疫情医疗废物工作相关问题及解答 [EB/OL]. 2020. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1658198752435332785&wfr=spider&for=pc>.  
Department of Solid Waste and Chemistry, Ministry of Ecology and Environment. Seven questions and answers core: Related problems and solutions of medical waste emergency disposal of pneumonia epidemic in municipal solid waste incineration facilities [EB/OL]. 2020. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1658198752435332785&wfr=spider&for=pc>.
- [16] 王炜岚. 生活垃圾焚烧炉混烧医疗废物的利与弊: 以上海御桥生活垃圾焚烧发电厂为例 [J]. *环境卫生工程*, 2013, 21(2): 18-20, 24.  
WANG W L. Advantage and disadvantage of waste incinerator burning domestic waste with medical waste: Taking Shanghai Yuqiao domestic waste incineration plant as an example [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2013, 21(2): 18-20, 24.
- [17] 杨建楠. 生活垃圾焚烧发电项目垃圾焚烧炉的选型 [J]. *电力勘测设计*, 2017(4): 71-75.  
YANG J N. Type selection of the garbage incinerator for project generating electricity through refuse household garbage [J]. *Electric Power Survey & Design*, 2017(4): 71-75.
- [18] JIAO J L, LI J J, BAI Y. Uncertainty analysis in the life cycle assessment of cassava ethanol in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 206: 438-451.

第一作者: 赵宇轩 (1998—), 硕士, 研究方向为固体废物处理及再利用。E-mail: zhaoyux123@163.com。  
通信作者: 刘汉桥 (1973—), 教授, 主要从事固体废物处理与资源化利用研究。E-mail: lhqlkx@126.com。