

引用格式:张智慧,王媛,柴立和,等.城市垃圾与污水污泥能源化处置方案对比:基于两种生命周期影响评价方法[J].资源科学, 2022, 44(4): 860-870. [Zhang Z H, Wang Y, Chai L H, et al. Comparison of energy-based disposal schemes for municipal solid waste and sewage sludge: Based on two life cycle assessment methods[J]. Resources Science, 2022, 44(4): 860-870.] DOI: 10.18402/resci.2022.04.17

城市垃圾与污水污泥能源化处置方案对比 ——基于两种生命周期影响评价方法

张智慧¹,王媛¹,柴立和¹,李丽萍¹,李姣²,朱荣杰¹

(1. 天津大学环境科学与工程学院,天津 300350;

2. 中国雄安集团生态建设投资有限公司,保定 071700)

摘要:城市生活垃圾和污水污泥是重要的城市固体废弃物,对环境质量和人体健康均造成重要影响。由于组成中可燃物比例高,对它们的能源化处置研究成为热点。本文系统应用了一种可持续的环境管理工具——生命周期评价软件 Simapro,采用 Impact 2002+和 ReCiPe Endpoint 2016 两种生命周期影响评价方法测算了垃圾和污水污泥单独焚烧的线性加和与垃圾、污水污泥混合焚烧两种处置方案的生命周期环境影响,揭示不同处置方案下的环境负荷,探究两种处置方案的优劣;同时,分析这两种生命周期影响评价方法的不确定性。研究结果表明:①城市生活垃圾和污水污泥的混合燃烧方案在化石能源消耗、气候变化和人体健康方面的有益影响均明显高于单独燃烧方案,混合燃烧方案不仅缓解能源压力,同时降低气候和健康压力;②对于本文方案,Impact 2002+方法的中间点影响类别和终点损害类别评价结果都比 ReCiPe Endpoint 2016 方法更能突出混合燃烧方案的环境影响优势,但 ReCiPe Endpoint 2016 方法的不确定性更小。上述结论可为垃圾和污水污泥能源化的全生命周期环境影响评价方法的选取提供参考和依据。

关键词:生命周期影响评价;城市生活垃圾;污水污泥;垃圾焚烧;能源化

DOI:10.18402/resci.2022.04.17

1 引言

人类社会的工业化进程和城市化的扩张,使人类开发利用自然资源的能力空前提高。能源消耗作为人类活动的重要结果,同时也是环境污染、土地占用、气候变化等一系列问题的重要根源,因此迫切需要寻找清洁、可持续的能源^[1-3]。城市生活垃圾和污水污泥的成分以可燃物和有机质为主,是“废物—能源转化”的重要贡献者,被看作亟待妥善处理的“放错位置的资源”^[3]。中国作为城镇化率和 GDP 增长率较高的发展中国家^[1],城市生活垃圾的

产生量迅速攀升:2014 年中国生活垃圾清运量 17860.2 万 t,2019 年增至 24206.2 万 t,5 年增幅达 35.53%;污水污泥积累量庞大,截至 2019 年底,中国有 5476 家城市污水处理厂投入运营,年污泥产量达到 3904 万 t(含水量 80%)^[4-6]。然而,中国现阶段城市生活垃圾的首要处理方法仍是卫生填埋,2018 年卫生填埋占比 52%;焚烧占比 45%^[1],远低于发达国家,如日本城市生活垃圾焚烧占比达 80%^[7-9]。对中国现阶段污水污泥处理而言,2019 年各种污水污泥处置方法的比例为:土地利用处置^①占比 29.3%,焚

收稿日期:2021-07-23,修订日期:2021-10-01

基金项目:国家自然科学基金项目(41871211);科技部政府间国际科技创新合作重点专项(2018YFE0106400);天津市生态环境治理科技重大专项(18ZXSZSF00120)。

作者简介:张智慧,女,山西临汾人,硕士生,研究方向为环境信息与管理。E-mail: m18235103760@163.com

通讯作者:王媛,女,天津人,教授,主要从事资源与环境管理研究。E-mail: wyuan@tju.edu.cn

① 土地利用处置方法是指利用污泥对农田、林地、草坪等土地进行土壤改良、绿化、育苗等。

2022年4月

烧占比26.7%,卫生填埋占比20.1%,建筑用材原料占比15.9%,其他占比8.0%^[7]。这表明,焚烧作为一种正在发展的能源化废物处置方法,在中国尚未被广泛推广使用。一方面,中国实现垃圾和污水污泥能源化存在较大难度;另一方面,中国的废弃物处理存在着巨大的资源可利用空间^[2]。

2003年,美国环境保护署提出焚烧是一种更绿色和可持续的废物处理方法^[10]。在发展中国家尤其是中国,焚烧也被认为是最常见的垃圾能源化回收方式^[8]。焚烧过程产生的电力和热量可以将废弃物的体积和质量分别浓缩至90%和70%左右^[11,12],有助于解决填埋过程中的占地问题^[13]。不过无论是城市生活垃圾还是污水污泥焚烧均面临含水量高、热值不够的问题^[5]。近年来,城市生活垃圾焚烧发电厂焚烧处理污水污泥过程中的协同作用被发现,可视为弥补干燥和热值问题的可选方案^[14],不少学者从共燃技术可行性^[15-18]和经济效益^[19,20]方面分析了二者共燃的优势,但对于混合燃烧带来的环境影响尚缺乏探索。

作为一种可持续的环境管理工具——生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)被应用于垃圾和污水污泥的处理处置过程中,以量化处理过程中的环境影响,并提出优化和改进措施。主要方法有ILCD(International Reference Life Cycle Data System)、Impact 2002+(Impact Assessment of Chemical Toxics)、ReCiPe、Eco-indicator 99、CML基线(Centre of Environmental Science Baseline)等。Maria等^[21]通过生命周期评估方法Midpoint ILCD 2011+评估了意大利城市固体废物焚烧对环境对人类健康的影响,发现城市固体废物焚烧对资源消耗、全球变暖、淡水生态毒性、人类健康等产生了不同程度的有益影响。Sharma等^[22]基于生命周期影响评价,采用CML方法评估了印度孟买6种城市生活垃圾处置技术,结果表明焚烧技术可减少温室气体排放,但对人体毒性影响增加。Tarpani等^[23]采用Recipe方法评估了包括焚烧在内的5种污水污泥处置技术的环境影响,发现污水污泥焚烧过程如果达到高资源回收利用率,那么其对环境的重金属生态毒性是5种技术中最小的。Rosado等^[24]采用Impact 2002+和CML基线两种方法对巴西圣保罗州的建筑垃圾回收系统进行生命周期影响评价,其中CML基线突

出了钢铁回收与运输对“人体毒性”的负面影响,Impact 2002+强调了其对“可吸入无机物”与“全球变暖”两个类别的负面影响。

中国已在多个领域开展LCA相关的研究,涉及建筑^[25]、农业^[26]、能源^[27]、碳排放^[28]、资源^[29,30]等领域。同时,废物处理领域的LCA研究也得到了一定发展。相关学者将LCA模型运用于评估废弃物处理处置全生命周期中造成的环境影响,并提出优化和改进措施。1999年,徐成等^[31]率先采用LCA模型研究了四川广汉市城市生活垃圾管理系统,从数据收集、清单分析到影响评价进行了系统分析,并得出了综合处置方式优于单一处置方式的结论。Hong^[32]等使用LCA模型比较了填埋、焚烧、堆肥加填埋和堆肥加焚烧4种城市生活垃圾处理处置技术对环境的影响,得到了这些技术均将加剧全球变暖的结论,并强调了非致癌物造成的环境负担。对于曾经面临的本土化数据库匮乏、清单建设存在地域性差异等问题,诸多学者逐步建立和完善了重点工业、农业、废物处置、资源利用等方面的中国本土化数据库与应用模型^[33-35]。

由于只考虑单一的生命周期影响评价方法存在得出误导性结论的风险^[36],本文采用了两种损伤导向型生命周期影响评价方法,综合探讨了研究案例的环境影响。损伤导向型评价方法提出:将具体的环境影响类别继续延伸计算,归结到它们将影响的最终问题上。例如,将“致癌物毒性”“电离辐射”等中间点影响类别延伸计算,得到对“人体健康”这一终点损害类别的损害程度。这有利于同时比较中间点影响类别差异和终点损害类别差异,更有助于环境决策^[24]。Impact 2002+和ReCiPe Endpoint是被广泛使用并认可的损伤导向型评价方法。Impact 2002+在市政废物的处理方面应用更为广泛^[21,37],而对ReCiPe Endpoint方法的应用目前较多停留在2008版本^[38],2016版本ReCiPe Endpoint的运用较少^[27]。ReCiPe Endpoint 2016较ReCiPe Endpoint 2008而言,作出了一系列更新。本课题组前期对Impact 2002+和ReCiPe Endpoint 2016两种方法进行了初步的评估和比较^[39],但由于数据的局限,测算结果的准确性和分析的深度都有待提高。

综上所述,本文在既有研究基础上,使用Simapro软件中Impact 2002+方法和ReCiPe Endpoint

2016两种方法,针对相同垃圾和污水污泥成分组成和总量,对两种处置方案,即城市生活垃圾和污水污泥分别独立焚烧线性加和(处置方案1)和城市生活垃圾和污水污泥混合焚烧(处置方案2),进行了生命周期影响评价。由于混合后,会降低焚烧物含水率,从而节省能源和原料,从理论上分析混合焚烧的环境影响应该低于单独焚烧,但两种方案对人体健康,生态环境、资源能源等方面造成的影响,需要更为详细的环境生命周期评价研究,并且通过不同评价方法得到结果的定量对比和不确定性分析,评价两种方法在比较城市生活垃圾与污水污泥处理过程中的优劣。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文数据来自于中国山东省某城市垃圾处理厂的实际运行项目,该垃圾处理厂于2007年开始运行。两种处置方案中各焚烧炉基本情况和该市生活垃圾、污水污泥状况经过实际调研得到。

处置方案1:城市生活垃圾和污水污泥单独焚烧。经过预处理后的城市生活垃圾被直接送进垃圾焚烧炉;污水污泥经过干燥脱水,在含水率到40%以后进入污泥焚烧炉。以单独焚烧的评价结果线性加和为最终评价结果。

处置方案2:生活垃圾和污水污泥混合后投入混合焚烧炉进行焚烧。对混合焚烧进行结果评价。

两种处置方案在处置前都需要进行预处理,生活垃圾和污水污泥在燃烧前首先会经过预处理减小颗粒尺寸并去除大部分不可燃成分(金属),添加辅助燃料以保持焚烧的稳定性。不同之处在于,处置方案1投入34%的辅助燃料(煤炭),处置方案2投入20%的辅助燃料。垃圾和污水污泥中的水分和可燃物在焚烧过程中转化为烟气。烟气排放前使用氧化钙(CaO)来中和酸性气体,如SO₂、HCl等。不燃性成分成为炉渣或飞灰。燃烧过程产生的渗滤液储存在垃圾处理厂配备的渗滤池中。两个处置方案中具体物质的消耗和产出量如表1所

表1 两种处置方案的生命周期清单^[39]

Table 1 Life cycle inventory of the two treatment plans^[39]

物质类别	物质	单位	处置方案1	处置方案2
能源输入	煤炭	t	2.63E-01	5.50E-02
	柴油	kg	6.46E-02	0.00E+00
燃烧原材料	生活垃圾	kg	7.69E-01	7.69E-01
	污水污泥	kg	2.31E-01	2.31E-01
化学物质原材料	CaO	kg	7.15E+00	7.00E+00
直接气体排放	CO	kg	5.25E-01	3.00E-01
	CO ₂	kg	4.50E+02	2.62E+02
	SO ₂	kg	6.75E-01	5.40E-02
	NO _x	kg	5.77E-01	3.60E-01
	HCl	kg	8.78E-03	1.40E-02
	Hg	kg	5.55E-08	6.00E-08
	As	kg	2.35E-04	1.30E-05
	Pb	kg	7.17E-05	1.35E-05
	Cr	kg	8.69E-05	8.40E-06
	Ni	kg	7.58E-06	6.00E-06
	二噁英	kg	8.60E-10	2.13E-09
	飞灰	kg	1.48E+02	1.09E+02
直接固体排放	炉渣	kg	1.35E+02	9.40E+01
直接液体排放	渗滤液	kg	4.85E+01	1.12E+02
能源输出	电力	kWh	9.84E+01	9.03E+01
	热量	MJ	1.61E+03	1.81E+03

注:此表为处理1 kg城市生活垃圾/污水污泥的输入输出量。

示。生活垃圾的组分及比例见表2。

2.2 研究方法

2.2.1 LCA 边界确定

LCA 是对某一种产品从原材料的开采收集直至最终的处理处置整个生命周期系统(包括:开采、加工、生产、运输、销售、使用、回收及最终处理处置)所产生的环境影响进行评价。

完整的LCA模型构建首先需要确定研究的边界范围,边界范围一般存在摇篮到坟墓、摇篮到摇篮、摇篮到大门、大门到大门4种;然后收集生命周期每个单元的过程数据,包括原材料、能源的输入,产品、副产品、联产品的生产,和气体、液体、固体的排放等,由此形成生命周期清单;接下来通过选择的评价方法进行中间点影响类别和终点影响类别的研究;再进行标准化、归一化和不确定性分析,进而完成影响评价;最后对结果进行解释。

图1展示了两个处置方案的主要流程(如箭头所

示)和边界(如虚线框所示)。处置方案从污水污泥和生活垃圾预处理开始,到产电产热结束,仅包括一个过程单元,不包括进厂前的垃圾收集、运输过程。

2.2.2 Impact 2002+ 方法和 ReCiPe Endpoint 2016 方法

Simapro 软件由荷兰大学环境科学中心开发,是现阶段常用的生命周期影响评价软件。Impact 2002+和 ReCiPe Endpoint 2016 两种生命周期影响评价方法被纳入 Simapro 软件。

(1)Impact 2002+方法

Impact 2002+方法由瑞士联邦理工学院开发。该方法的生命周期清单分析结果包含13个中间点(Midpoint)影响类别,分别对4个终点(Endpoint)损害类别造成影响(表3)。终点损害类别的影响结果计算方法为:

$$IL_j^E = \sum_{i=1}^n IL_i^M \times IP_i^M$$

(1)

	可燃组分及比例/wt%					不可燃组分 wt%	热值/(kJ/kg)
	餐厨	费纸	塑料(橡胶)	纺织品	木材	沙土	
组分质量比	50.80	8.11	11.20	3.20	1.21	25.48	6308

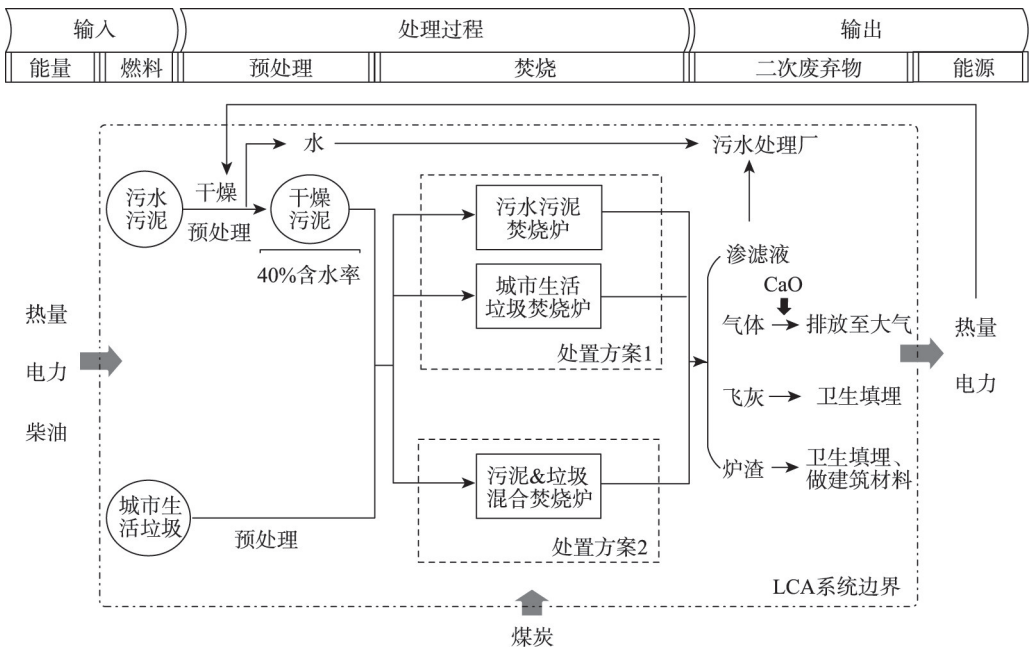


图1 两处置方案主要流程图

Figure 1 Flow charts of two treatment plans

表3 Impact 2002+方法影响类别分类情况
Table 3 Classification of impact categories in Impact 2002+

终点损害类别		中间点影响类别		
名称	单位	名称	影响因子	单位
人体健康	DALY ^(a)	致癌物毒性(C)	2.80E-06	kg C ₂ H ₃ Cl eq
		非致癌物毒性(NC)	2.80E-06	kg C ₂ H ₃ Cl eq
		可呼吸无机物(RI)	7.00E-04	kg PM2.5 eq
		电离辐射(IR)	2.10E-10	Bq C-14 eq
		臭氧层消耗(OLD)	1.05E-03	kg CFC-11 eq
		可呼吸有机物(RO)	2.13E-06	kg C ₂ H ₄ eq
		水生生态毒性(AET)	5.02E-05	kg TEG water
生态质量	PDF·m ² ·yr ^(b)	陆地生态毒性(TET)	7.91E-03	kg TEG soil
		陆地酸化/富营养化(TA/N)	1.04	kg TEG SO ₂ eq
		土地占用(LO)	1.09	m ² org. arable
		全球变暖潜势(GWP)	1	kg CO ₂ eq
气候变化	kg CO ₂ eq ^(c)	不可再生能源(NRE)	1	MJ primary
资源消耗	MJ primary ^(d)	矿物提取(ME)	1	MJ primary

注:(a)DALY (Disability Adjusted Life Years): 伤残/疾病调整寿命年;一个DALY表示“健康”生命的一年。衡量当前健康状况与理想健康状况之间的差距的一种衡量标准,即所有人能够没有疾病或负担,正值表示当前寿命的减少值,负值表示当前寿命的增加值。(b)PDF·m²·yr (Potentially Decrease Fraction): 每年每平米生物种群的潜在减少值;它代表单位年份某一特定区域内某一物种的损失数量,正值表示损失值,负值表示增加值。(c)kg CO₂ eq (kg CO₂ equivalent): 千克CO₂当量;它代表活动过程中产生的CO₂质量,正值代表活动过程产生的CO₂质量,负值表示活动过程中避免排放的CO₂质量。(d)MJ primary: 资源开采额外需要消耗的能源;资源开采需要消耗一定的能源,正值表示开采单位资源需要额外消耗的能量,负值表示由于产生环境正效应而避免消耗的能源。

式中: IL_j^E 表示 Impact 2002+方法终点损害类别 j 的影响结果; IL_i^M 表示 Impact 2002+方法中间点影响类别 i 的影响结果; IP_i^M 表示 i 的影响因子; n 表示对终点损害类别 j 造成影响的中间点影响类别数量。

为便于比较,对终点损害影响结果进行标准化:

$$IL_j^{EN} = IL_j^E \times IN_j \times IW_j \tag{2}$$

式中: IL_j^{EN} 是标准化后的终点损害类别 j 的损害结果; IN_j 和 IW_j 为终点损害类别 j 的标准化因子和权重因子。

(2)ReCiPe Endpoint 2016 评价方法

ReCiPe Endpoint 2016 共有 17 个中间点影响类别,它包含了 Impact 2002+中的影响类别,又新增了部分影响类别。中间点影响类别和终点损害类别的对应关系见表 4。

与 Impact 2002+评价方法不同的是,ReCiPe Endpoint 2016 方法中的所有中间点影响类别的影响因子均为 1,在计算终点损害类别 j 影响结果时只需将其包括的中间点影响类别权重相加即可,即:

$$RL_j^E = \sum_{i=1}^n RL_i^M \tag{3}$$

式中: RL_j^E 表示 ReCiPe Endpoint 2016 方法的终点损害类别 j 的影响结果; RL_i^M 为 ReCiPe Endpoint 2016 方法的中间点影响类别 i 的影响结果。对终点损害影响结果进行标准化:

$$RL_j^{EN} = RL_j^E \times RN_j \times RW_j \tag{4}$$

式中: RL_j^{EN} 是标准化后的终点损害类别 j 的影响结果; RN_j 和 RW_j 为终点损害类别 j 的标准化因子和权重因子。

3 结果与分析

3.1 两种处置方案的中间点影响类别比较

表 5 显示两个处置方案对 Impact 2002+方法 13 个中间点影响类别的影响结果。总体来说,处置方案 2 优于处置方案 1。处置方案 1(垃圾和污水污泥的分别焚烧)中,只有两项指标的影响值为负(陆地酸化/富营养化(TA/N)和水体酸化(AA)),表明处置方案 1 仅对土壤和水体酸化的恢复存在积极作用。

2022年4月

表4 ReCiPe Endpoint 2016方法影响类别分类情况

Table 4 Classification of impact categories in ReCiPe Endpoint 2016

终点损害类别		中间点影响类别		
名称	单位	名称	影响因子	单位
人体健康	DALY	气候变化对人体健康的影响(CCHH)	1	DALY
		臭氧层消耗(OD)	1	DALY
		人体毒性(HT)	1	DALY
		光化学氧化形成(POF)	1	DALY
		可吸入颗粒物(PMF)	1	DALY
		电离辐射(IR)	1	DALY
		气候变化对生态质量的影响(CCE)	1	species·yr
生态质量	species·yr ^(a)	陆地酸性(TA)	1	species·yr
		淡水富营养化(FE)	1	species·yr
		陆地生态毒性(TE)	1	species·yr
		淡水生态毒性(TET)	1	species·yr
		海水生态毒性(ME)	1	species·yr
		农业土地利用(ALO)	1	species·yr
		城市土地利用(ULO)	1	species·yr
资源消耗	\$ ^(b)	自然土地转换(NLT)	1	species·yr
		矿物提取(MD)	1	\$
		燃料消耗(FD)	1	\$

注:(a)species·yr (species·year):每年物种群的潜在减少值;(b)\$ (dollar):活动过程中损失的经济价值。

表5 Impact 2002+方法中间点影响类别结果

Table 5 Midpoint impact results analyzed by Impact 2002+

中间点影响类别	处置方案1	处置方案2
致癌物毒性(C)/kg C ₂ H ₃ Cl eq	2.80E-03	-2.75E-04
非致癌物毒性(NC)/kg C ₂ H ₃ Cl eq	1.52E-02	8.25E-04
可呼吸无机物(RI)/kg PM _{2.5} eq	3.40E-05	-5.17E-04
电离辐射(IR)/Bq C-14 eq	1.78E+00	-1.04E-01
臭氧层消耗(OLD)/kg CFC-11 eq	4.14E-08	8.71E-09
可呼吸有机物(RO)/kg C ₂ H ₄ eq	2.00E-06	-1.92E-04
水生生态毒性(AET)/kg TEG water	2.12E+01	3.08E+00
陆地生态毒性(TET)/kg TEG soil	1.65E+01	3.36E+00
陆地酸化/富营养化(TA/N)/kg SO ₂ eq	-4.60E-03	-2.09E-02
土地占用(LO)/m ² org. arable	9.50E-03	-4.17E-03
水体酸化(AA)/kg SO ₂ eq	-6.90E-04	-3.50E-03
水体富营养化(AE)/kg PO ₄ P-lim	4.77E-04	1.15E-04
全球变暖潜势(GWP)/kg CO ₂ eq	2.17E-01	-1.44E+00
不可再生能源(NRE)/MJ primary	2.10E+00	-1.80E+01
矿物提取(ME)/MJ surplus	1.35E-02	-1.38E-03

注:正值代表对环境有损害;负值代表对环境有益。下同。

处置方案2中,10类中间点影响显示负值,即对环境有益,其他5类显示对环境有损害,说明处置方

案2对环境的益处显著大于造成的环境负担。且对比处置方案1而言,处置方案2的环境益处多了8项,显示出显著优势。造成这个现象的主要原因是:处置方案1需要柴油、煤炭等不可再生能源的大量投入,而处置方案2采用的混合燃烧方式弥补了污水污泥干燥和热值问题,实现了电力和热量有效利用,减少了不可再生能源的使用,从而减少了烟粉尘和温室气体等的排放。

但ReCiPe Endpoint 2016方法(表6)显示,两个处置方案均存在6个中间点类别影响值为正数,两种方案差异不明显。这可能与ReCiPe Endpoint 2016方法采用的特征化因子和评价年限等有关。因此,需要进行终点损害类别分析。

3.2 两种处置方案终点损害类别比较

图2展示的是Impact 2002+方法4个终点损害类别(人类健康、生态质量、气候变化和资源消耗)和ReCiPe Endpoint 2016方法3个终点损害类别(人类健康、生态质量和资源消耗)的标准化损害结果(由于终点损害类别结果的单位不同,为便于比较,将两种方法的损害结果进行标准化)。

表6 ReCiPe Endpoint 2016方法中间点影响类别影响结果

Table 6 Midpoint impact results analyzed by ReCiPe Endpoint 2016

中间点影响类别	处置方案1	处置方案2
气候变化对人体健康的影响(CCHH)/DALY	4.76E-07	-2.07E-06
臭氧层消耗(OD)/DALY	-1.09E-12	5.19E-12
人体毒性(HT)/DALY	-6.04E-10	3.94E-09
光化学氧化形成(POF)/DALY	-1.79E-10	-1.58E-10
可吸入颗粒物(PMF)/DALY	7.75E-08	-2.42E-07
电离辐射(IR)/DALY	-6.66E-11	-4.16E-11
气候变化对生态质量的影响(CCE)/species·yr	3.17E-09	-1.38E-08
陆地酸性(TA)/species·yr	1.40E-12	-4.20E-12
淡水富营养化(FE)/species·yr	-8.20E-13	1.31E-12
陆地生态毒性(TE)/species·yr	-7.37E-12	-4.90E-12
淡水生态毒性(FET)/species·yr	-7.41E-13	-2.83E-13
海水生态毒性(ME)/species·yr	7.86E-14	-1.89E-14
农业土地利用(ALO)/species·yr	-1.32E-10	-9.15E-11
城市土地利用(ULO)/species·yr	-8.10E-12	5.80E-11
自然土地转换(NLT)/species·yr	-1.93E-11	8.63E-12
矿物提取(MD)/\$	-3.64E-04	1.44E-04
燃料消耗(FD)/\$	8.16E-03	-2.13E-02

由图2a可知,Impact 2002+方法4个损害类别的标准化结果存在差异。总体来说,处置方案2环境影响潜值以负数为主,显示了生活垃圾和污水污泥混合燃烧对环境显著的有益影响。最为显著的是气候变化方面,生命周期清单(表2)显示处置方案2中CO₂的直接气体排放量是处置方案1的50%,表明其对温室气体的产生有明显的削减作用。其次是资源消耗和人体健康。生态质量作为处置方案2唯一造成环境负担的终点损害类别,其环境影响潜值并不显著(3.29E-05 mpt),同时处置方案1对生态质量造成的负担高达处置方案2的304倍(0.01001 mpt)。这表明,作为辅助燃料的煤炭的燃

烧是垃圾和污泥环境负担的主要来源,混合处理的处置方案中热量作为能源被有效利用,减少了化石能源消耗,从而减少温室气体和烟粉尘排放;上述有益环境影响,能够部分抵消处置废弃物对人体健康、气候变化、资源消耗造成的环境负担,同时能够减轻处理处置过程对生态质量造成的压力。

ReCiPe Endpoint 2016方法的标准化结果(图2b)表示处置方案2的3个终点损害类别结果均显示负值,而处置方案1均显示正值。处置方案2影响结果(绝对值)是处置方案1的4.18倍(人体健康)、4.63倍(生态质量)、2.71倍(资源消耗)。ReCiPe Endpoint 2016方法在终点损害评价中体现出处置方案2对环境积极显著的有益作用,比中间点影响类别的评价结果更加清晰。除处置方案2自身存在的环境优势外,ReCiPe Endpiont 2016方法终点损害类别对方案优势的凸显可以归因于计算过程中的标准化因子和权重因子的积极作用。

总体来说,无论用哪种方法进行评价,得到的终点损害类别最终结果均显示:处置方案2对环境有正面影响,处置方案1对环境有负面影响。

3.3 不确定性分析

环境机制和评价模型的不同会引起评价结果的不确定性,环境关系模型呈现的环境机制局限于理论层面,真实的环境机制复杂且庞大,并因为时期和地点的不同而发生变化。因此,这些环境机制具有一定程度的不完全性和不确定性^[39]。因此,本文进行了不确定性分析。两种方法中两个处置方案的不确定性分析结果如图3。

由图3a和3b可以看出,Impact 2002+方法下,

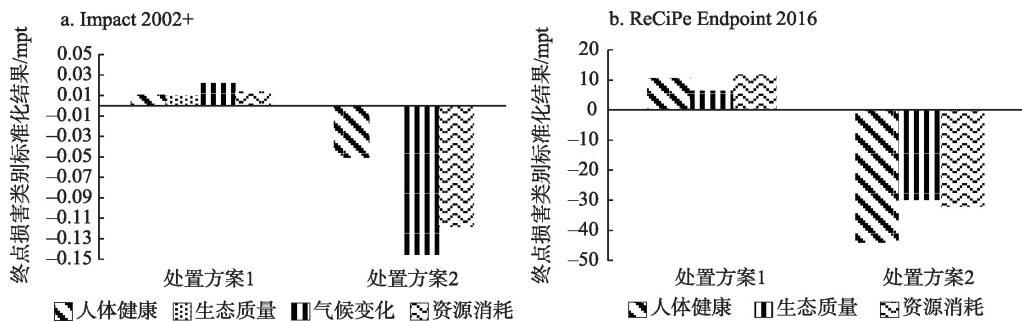


图2 Impact 2002+(a)和ReCiPe Endpoint 2016(b)方法终点损害类别标准化结果对比

Figure 2 Comparison of normalized endpoint damage categories analyzed by Impact 2002+ (a) and ReCiPe Endpoint 2016 (b)

2022年4月

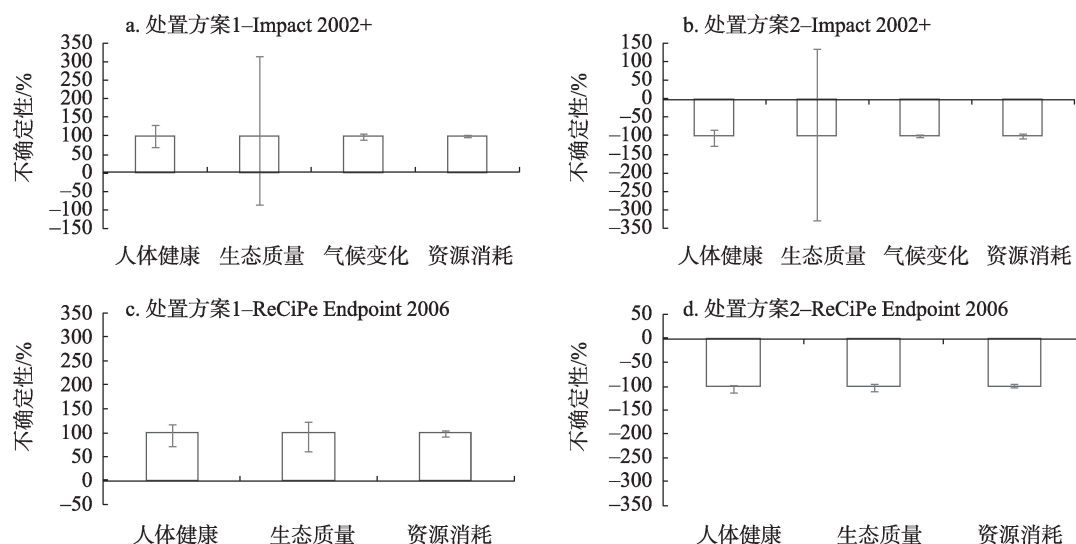


图3 两种处置方案不确定性分析结果对比

Figure 3 Uncertainty assessment results for the two treatment plans analyzed by Impact 2002+ and ReCiPe Endpoint 2016

两个处置方案的生态质量损害类别的不确定性是最大的,均达到正负180%以上,不确定性跨度高达400%以上。说明这种评价方法对生态质量的评价准确性低;其次是对人体健康的影响,不确定性范围在正负50%之间;而气候变化和资源消耗两个终点损害类别更小,在正负12%以内。通过这种生命周期评价方法可以对气候和资源的影响进行较为准确的评价。

图3c和3d分别是ReCiPe Endpoint 2016方法下处置方案1和处置方案2的终点损害类别不确定性分析结果。整体来看处置方案1的不确定性范围整体比处置方案2要大:不确定性最大的是处置方案1的生态质量,不确定性范围在 $(-37.63\%, +23.77\%)$ 之间,其次是处置方案1的人体健康,其不确定性范围在 $(-28.61\%, +18.25\%)$ 之间,而处置方案2不确定性最大的类别是人体健康,但也只有 $(-11.70\%, +3.76\%)$ 。

从两个方法的对比来看,ReCiPe Endpoint 2016方法比Impact 2002+方法的不确定性波动范围小,尤其是在生态质量和人体健康两个方面。对于生态质量这一类别,Impact 2002+方法的不确定性波动跨度在400%以上,ReCiPe Endpoint 2016方法的波动跨度在60%以内。综上,Impact 2002+方法产生的不确定性更高。

4 结论

本文应用生命周期评价软件Simapro中的两种LCA方法——Impact 2002+方法和ReCiPe Endpoint 2016方法,对城市生活垃圾和污水污泥能源化技术处置方案——即单独燃烧和混合燃烧,进行了环境影响终点损害类别的评价,并分析了两种评价方法的不确定性。研究结论如下:

(1)城市生活垃圾和污水污泥混合燃烧被证明是一种可被推广的环境友好型废物处置方式。两种LCA方法的重点损害类别评价结果都显示生活垃圾和污水污泥混合燃烧是比单独燃烧环境负担更少的处置方式。混合燃烧减少了燃料含水率,提高了热值,这种燃烧过程的协同作用使得耗煤量较两者单独燃烧时有了显著降低。耗煤量的减少意味着既节约了化石能源,又减少了使用化石能源对环境造成的负担。

(2)在LCA方法运用和选择方面,应根据实际方案的需求确定。Impact 2002+方法和ReCiPe Endpoint 2016方法设置的中间点影响类别不同,而不同类别的标准化因子、权重因子等均不同,造成终点损害类别标准化评估结果数值存在差异。就本文两个方案而言,Impact 2002+方法比ReCiPe Endpoint 2016方法更突出地展示出了混合燃烧优于单独燃烧;同时,应注意Impact 2002+方法在评估

生态质量指标的影响方面不确定性较高。

参考文献(References):

- [1] Ding Y, Zhao J, Liu J W, et al. A review of China's municipal solid waste (MSW) and comparison with international regions: Management and technologies in treatment and resource utilization[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126144.
- [2] Nanda S and F Berruti. A technical review of bioenergy and resource recovery from municipal solid waste[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.123970.
- [3] Rasheed T, Anwar M T, Ahmad N, et al. Valorization and emerging perspective of biomass-based waste-to-energy technologies and their socio-environmental impact: A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112257.
- [4] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2015[EB/OL]. (2016-01-01) [2021-10-18]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2015/indexch.htm>. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Statistical Yearbook 2015*[EB/OL]. (2016-01-01) [2021-10-18]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2015/indexch.htm>.]
- [5] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2017[EB/OL]. (2018-01-01) [2021-10-18]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2017/indexch.htm>. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Statistical Yearbook 2017*[EB/OL]. (2018-01-01) [2021-10-18]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2017/indexch.htm>.]
- [6] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2020[EB/OL]. (2021-01-01) [2021-10-18]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2020/indexch.htm>. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Statistical Yearbook 2020*[EB/OL]. (2021-01-01) [2021-10-18]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2020/indexch.htm>.]
- [7] Liu H, Wang Y C, Zhao S L, et al. Review on the current status of the co-combustion technology of organic solid waste (OSW) and coal in China[J]. *Energy & Fuels*, 2020, DOI: 10.1021/acs.energy-fuels.0c02177.
- [8] Lee D J, Lu J S, Chang J S. Pyrolysis synergy of municipal solid waste (MSW): A review[J]. *Bioresource Technology*, 2020, DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123912.
- [9] Katakojwala R, Kopperi H, Kumar S, et al. Hydrothermal liquefaction of biogenic municipal solid waste under reduced H₂ atmosphere in biorefinery format[J]. *Bioresource Technology*, 2020, DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123369.
- [10] Khandelwal H, Dhar H, Thalla A K, et al. Application of life cycle assessment in municipal solid waste management: A worldwide critical review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 209: 630-654.
- [11] Mukherjee C, Denney J, Mbonimpa EG, et al. A review on municipal solid waste-to-energy trends in the USA[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2020, DOI: 10.1016/j.rser.2019.109512.
- [12] Malav L C, Yadav K K, Gupta N, et al. A review on municipal solid waste as a renewable source for waste-to-energy project in India: Current practices, challenges, and future opportunities[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123227.
- [13] Istrate I, Galvez-Martos J, Dufour J. The impact of incineration phase-out on municipal solid waste landfilling and life cycle environmental performance: Case study of Madrid, Spain[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142537.
- [14] Zhong R G, Wang C, Zhang Z T, et al. PCDD/F levels and phase distributions in a full-scale municipal solid waste incinerator with co-incinerating sewage sludge[J]. *Waste Management*, 2020, 106: 110-119.
- [15] Chen L, Liao Y F, Ma X Q. Heavy metals volatilization characteristics and risk evaluation of co-combusted municipal solid wastes and sewage sludge without and with calcium-based sorbents[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.109370.
- [16] Chen L M, Liao Y F, Ma X Q, et al. Heavy metals chemical speciation and environmental risk of bottom slag during co-combustion of municipal solid waste and sewage sludge[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121318.
- [17] Chen L M, Liao Y F, Ma X Q, et al. Effect of co-combusted sludge in waste incinerator on heavy metals chemical speciation and environmental risk of horizontal flue ash[J]. *Waste Management*, 2020, 102: 645-654.
- [18] Zhang S, Wang F, Mei Z Y, et al. Status and development of sludge incineration in China[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2021, 12: 3541-3574.
- [19] Chen L M, Liao Y F, Ma X Q. Economic analysis on sewage sludge drying and its co-combustion in municipal solid waste power plant [J]. *Waste Management*, 2021, 121: 11-22.
- [20] Tan P, Ma L, Xia J, et al. Co-firing sludge in a pulverized coal-fired utility boiler: Combustion characteristics and economic impacts[J]. *Energy*, 2017, 119: 392-399.
- [21] Maria F D, Mastrantonio M, Uccelli R. The life cycle approach for assessing the impact of municipal solid waste incineration on the environment and on human health[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.145785.

2022年4月

- [22] Sharma B K, Chandel M K. Life cycle assessment of potential municipal solid waste management strategies for Mumbai, India[J]. *Waste Management & Research*, 2017, 35(1): 79–91.
- [23] Tarpani R R Z, Alfonsin C, Hospido A, et al. Life cycle environmental impacts of sewage sludge treatment methods for resource recovery considering ecotoxicity of heavy metals and pharmaceutical and personal care products[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109643.
- [24] Rosado L P, Vitale P, Penteado C S G, et al. Life cycle assessment of construction and demolition waste management in a large area of Sao Paulo State, Brazil[J]. *Waste Management*, 2019, 85: 477–489.
- [25] 张元林, 张上, 李金惠, 等. 中国钢结构建筑的物质流分析[J]. *资源科学*, 2021, 43(3): 546–555. [Zhang Y L, Zhang S, Li J H, et al. Measuring material flow performance of China's steel structure building[J]. *Resources Science*, 2021, 43(3): 546–555.]
- [26] 丁佳莹, 董黎明, 刘岩峰, 等. 生命周期评价在玉米种植及深加工产品中的应用[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(11): 5405–5415. [Ding J Y, Dong L M, Liu Y F, et al. Application of life cycle assessment in maize planting and deep processing products[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(11): 5405–5415.]
- [27] 向宁, 王礼茂, 屈秋实, 等. 基于生命周期评估的海、陆风电系统排放对比[J]. *资源科学*, 2021, 43(4): 745–755. [Xiang N, Wang L M, Qu Q S, et al. Comparison of emissions from offshore and on-shore wind power systems based on life cycle assessment[J]. *Resources Science*, 2021, 43(4): 745–755.]
- [28] 耿爱欣, 潘文琦, 杨红强. 中国林木生物质能源替代煤炭的减排效益评估[J]. *资源科学*, 2020, 42(3): 536–547. [Geng A X, Pan W Q, Yang H Q. Quantifying the mitigating effects and benefits from substituting wood biomass for coal in energy production in China[J]. *Resources Science*, 2020, 42(3): 536–547.]
- [29] 邸敬涵, 温宗国. 资源产品贸易的环境影响及隐含环境流分析: 以铜资源为例[J]. *资源科学*, 2021, 43(3): 612–625. [Di J H, Wen Z G. Environmental impacts and embodied environmental flows of the international trade of resource products: A case study of copper[J]. *Resources Science*, 2021, 43(3): 612–625.]
- [30] 栾晓玉, 刘巍, 崔兆杰, 等. 基于物质流分析的中国塑料资源代谢研究[J]. *资源科学*, 2020, 42(2): 372–382. [Luan X Y, Liu W, Cui Z J, et al. Plastic resources metabolism in China based on material flow analysis[J]. *Resources Science*, 2020, 42(2): 372–382.]
- [31] 徐成, 杨建新, 王如松. 广汉市生活垃圾生命周期评价[J]. *环境科学学报*, 1999, (6): 631–635. [Xu C, Yang J X, Wang R S. Life cycle assessment of municipal solid waste in Guanghan City[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, (6): 631–635.]
- [32] Hong J L, Li X Z, Cui Z J. Life cycle assessment of four municipal solid waste management scenarios in China[J]. *Waste Management*, 2010, 30(11): 2362–2369.
- [33] 翟一杰, 张天祚, 申晓旭, 等. 生命周期评价方法研究进展[J]. *资源科学*, 2021, 43(3): 446–455. [Zhai Y J, Zhang T Z, Shen X X, et al. Development of life cycle assessment method[J]. *Resources Science*, 2021, 43(3): 446–455.]
- [34] 高颖, 梅诗意. 中国木结构建筑全生命周期碳排放数据库建设探析[J]. *建筑技术*, 2020, 51(3): 260–263. [Gao Y, Mei S Y. Exploration for carbon discharge database construction of timber building in full life cycle[J]. *Architecture Technology*, 2020, 51(3): 260–263.]
- [35] 刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 等. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(10): 2136–2144. [Liu X L, Wang H T, Chen J, et al. Method and basic model for development of Chinese reference life cycle database[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(10): 2136–2144.]
- [36] Zhang J T, Qin Q D, Li G M, et al. Sustainable municipal waste management strategies through life cycle assessment method: A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112238.
- [37] Yuan Y Q, Li T, Zhai Q. Life cycle impact assessment of garbage-classification based municipal solid waste management systems: A comparative case study in China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, DOI: 10.3390/ijerph17155310.
- [38] Sydow M, Chrzanowski L, Hauschild M Z, et al. Influence of metal speciation on soil ecotoxicity impacts in life cycle assessment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110611.
- [39] 李姣. 基于生命周期评价方法的固体废弃物能源化环境影响分析[D]. 天津: 天津大学, 2018. [Li J. Environmental Impact Analysis of Solid Waste Energy Conversion Based on Life Cycle Assessment Method[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.]

Comparison of energy-based disposal schemes for municipal solid waste and sewage sludge: Based on two life cycle assessment methods

ZHANG Zhihui¹, WANG Yuan¹, CHAI Lihe¹, LI Liping¹, LI Jiao², ZHU Rongjie¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Ecological Construction Investment Corporation of China Xiong'an Group, Baoding 071700, China)

Abstract: Municipal solid waste (MSW) and sewage sludge (SS) are important solid wastes of cities, which cause severe impacts on both environmental quality and human health. Due to the high proportion of combustible materials in their composition, research on their energy-based disposal has become a hot topic. In this study, a sustainable environmental management tool—life cycle assessment software Simapro was applied. The Impact 2002+ and ReCiPe Endpoint 2016 methods were used to calculate the life cycle environmental impacts of simple summation and mixed incineration of MSW and SS. The advantages and disadvantages of the two treatment scenarios were explored. At the same time, the uncertainties of these two life cycle impact assessment methods for assessing municipal solid waste and sludge treatment were compared. The results show that: (1) The combined MSW and SS combustion scenario has higher beneficial effects on resource consumption and human health than the individual combustion solution; (2) For this scenario, both the midpoint impact category and the endpoint damage category evaluation results of the Impact 2002+ method are stronger than the ReCiPe Endpoint 2016 method in highlighting the combined combustion scheme, but the uncertainty of the latter is smaller. These conclusions provide a basis for the selection of the whole life cycle environmental impact evaluation methods for MSW and SS.

Key words: life cycle impact assessment; municipal solid waste; sewage sludge; waste incineration; energy-based disposal