

城市固体废物处理处置技术政策方法 01 案例分析

赵岩 司继涛 田保国 王洪涛^{*} 陆文静

清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; ^{*} 通讯作者, E-mail: htwang@tsinghua.edu.cn

摘要 以我国城市生活垃圾处理处置技术体系为案例, 通过经济性分析, 利用已建立的物质流与经济性综合评价最优化模型, 对不同情景进行了蒙特卡罗法数值模拟, 并进行了参数的灵敏度分析。结果表明, 在一般条件下, 家庭物质回收和二次物质回收后, 采用沼气发电和渗滤液回灌的卫生填埋对垃圾进行处置是模型建议采用的处理处置技术体系, 此时生活垃圾中的 C, H, O, N, S 5 种元素的最终流向主要为回收利用部分、填埋体部分和填埋气部分。在填埋费用昂贵条件下, 家庭物质回收和二次物质回收后, 对垃圾进行分选, 分别进行焚烧、堆肥和填埋的选择频率达到 70%, 是模型选择的经济性最优处理处置技术体系。灵敏度分析表明, 分选垃圾的沼气发电收益, 卫生填埋费用, 分选垃圾大型发电费用, 大型炉排炉费用, 卫生填埋发电收益等参数对技术政策选择影响最大。

关键词 城市生活垃圾; 物质流与经济性; 最优化模型; 蒙特卡罗法; 技术政策; 灵敏度分析

中图分类号 X705

Method of Technology Choosing of Municipal Solid Waste Treatment and Disposal 01 A Case Study

ZHAO Yan, SI Jitao, TIAN Baoguo, WANG Hongtao^{*}, LU Wenjing

Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084;

^{*} Corresponding Author, E-mail: htwang@tsinghua.edu.cn

Abstract Taking technology system of municipal solid waste (MSW) treatment and disposal in China as a case, Mento-Carlo numerical simulation and sensitivity analysis are studied in several typical scenarios by using the material flow and economy optimization model constructed previously. The simulation results show that, under the general condition, sanitary landfill with leachate re-circulation and power generation is supported by the model as the economically optimal technology, and the five main elements (C, H, O, N, S) will go to recycle, landfill and biogas. With the assumption of high landfill price, the pickup frequency of MSW separation at facilities as the optimal technology system is 70%. The result of sensitivity analysis shows that the power generation profit of biogas, the cost of sanitary landfill, large-scale power generation cost of separated MSW, and the cost of large-scale grate furnace are the most sensitive parameters for the decision making of technology.

Key words municipal solid waste (MSW); material flow and economy; optimization model; Mento-Carlo method; technology decision making; sensitivity analysis

为了向城市固体废物处理处置技术政策的制定提供科学的方法, 国内外一些学者开展了很多关于城市固体废物物流系统优化和管理模型的研究。王斌等^[1]从固废产生量预测、固废处置设施选址和固废收集系统的最优化方法三个方面介绍了城市固体

废物规划的主要研究思路、方法、典型模型及其应用情况, 王海燕^[2]以固体废物处理总成本最低为目标, 建立了城市固体废物物流系统设施选址、设施数量和物流流量优化的混合整数规划模型。Costi^[3]通过分析废物物流体系和解决约束优化问题建立了城市固

体废物决策模型, Kumar 等^[4]应用蒙特卡罗模拟方法对城市固体废物焚烧风险进行了灵敏度分析。也有其他学者从线性规划模型、投入产出模型、数值模拟等不同角度研究了固体废物管理和技术政策方法^[5-8]。然而,目前关于城市固体废物物流系统优化和技术政策方法的模型研究仍不够充分,一方面由于不同国家和地区城市固体废物特征差异导致很多研究难以推广,另一方面模型所涉及的参数比较复杂,数据获取困难而使其缺乏实用性。

本文的前篇⁵城市固体废物处理处置技术政策方法Ⅱ. 模型研究^[9]以城市固体废物物流分析为基础,研究了我国生活垃圾处理处置技术体系,综合运用多种分析方法,建立了物质流与经济性综合评价最优化模型,并对模型的数值求解方法进行了介绍,为我国城市固体废物处理处置技术政策研究提供了简明实用的方法。本文以我国城市生活垃圾处理处置技术体系为案例,通过经济性分析,利用物质流与经济性综合评价最优化模型,对不同情景进行了蒙特卡罗法数值模拟,并进行了参数的灵敏度分析。案例分析的结论对我国城市固体废物管理和技术政策有一定的参考意义。

1 城市生活垃圾处理处置技术体系经济性分析

技术体系的经济性分析主要包括各处理处置或运输单元的费用(包括固定投资、运营费用和人工费用等)和物质或能量回收的收益,均折合为每吨垃圾相应的费用或收益。

111 可回收利用组分价值分析

生活垃圾中可回收利用的组分包括废塑料、废橡胶、废纸、废纸板、废布及纺织品、废皮革、食品垃圾、非铁金属、罐头盒、玻璃、铁金属等。不同的组分根据其成分、品质和回收难易程度不同,回收比例和回收价格各不相同,收集数据并汇总如表 1。

112 技术体系经济性汇总

通过对可回收利用组分、家庭源头分类、中转运输、焚烧处置、堆肥处理处置和填埋处置等全部技术单元的经济性进行分析,收集数据并汇总城市固体废物技术体系经济性如表 2 所示。

2 数值模拟情景设计

利用物质流与经济性综合评价最优化模型,对不同情景进行数值计算并得出结论。本文讨论如

表 1 生活垃圾可回收组分的回收比例和回收价值
Table 1 Recycle price and percentage of different compositions in municipal solid waste

成分	可回收质量占该物质在垃圾中总质量的百分比 P%	该物质质量占垃圾总质量的百分比 P%	回收价格 P(元/kg ⁻¹)	每吨垃圾中该物质的回收价值 P(元/t ⁻¹)
废塑料	20~ 40	3	2~ 6	12~ 72
废橡胶	50~ 80	0. 5	8~ 12	20~ 48
废纸	60~ 80	15	0. 6~ 1. 5	54~ 180
废纸板	80~ 90	4	0. 5~ 1. 2	16~ 43. 2
废布及纺织品	60~ 70	2	0. 2~ 0. 4	2. 4~ 5. 6
废皮革	60~ 70	0. 5	1. 0~ 1. 5	3~ 5. 25
非铁金属	50~ 60	1	10~ 20	50~ 120
罐头盒	95~ 100	1	8~ 12	57~ 120
玻璃	70~ 90	8	0. 2~ 0. 4	11. 2~ 28. 8
铁金属	90~ 95	2	1. 0~ 2. 0	18~ 38
合计				243. 6~ 660. 85

下几个情景条件:

一般条件:模型的边界条件为限定的城市生活垃圾处理处置方式,即处理处置技术体系中的所有单元,初始条件为各种处理处置方式单位费用的取值范围(表 2),各步骤物质流的质量百分比取值范围和元素百分含量的取值范围(表 1),但在垃圾产量低于 1215 吨/天时不允许采用焚烧处理。

填埋费用昂贵条件:基于一般条件的设定,假设填埋费用由于土地费用的上涨而上涨,卫生填埋、反应器填埋和准好氧填埋的费用分别达到 90~ 150, 135~ 193 和 75~ 95 元/吨,同时,每吨生活垃圾焚烧或堆肥产生的底渣和堆肥产物如果需要填埋,费用也大约上涨 10 元。

采用家庭源头分类条件:基于一般条件的设定,假设完全实现家庭源头分类的情景。

最后,以填埋费用昂贵的情景为例,进行了灵敏度分析,并讨论了城市规模对焚烧作为最优结果概率的影响。

3 数值模拟结果与讨论

311 一般条件下的数值计算结果

31111 经济性计算结果

在一般条件下,程序循环 10⁴ 次得到的经济性计算结果。其中,有沼气发电的填埋处理作为经济性最优的选择次数为 9984 次,频率几乎达到 100%,

表 2 生活垃圾处理处置技术体系经济性汇总表

Table 2 Economical analysis of municipal solid waste treatment and disposal technologies (元/吨垃圾)

处理处置方式			成本	毛收益	最终费用或收益*	
					收益	费用
无源头分类	家庭物质回收和二次物质回收		0	212.5~ 647.89	212.5~ 647.89	
	运往中转站运输费用		5~ 10	0		5~ 10
	中转压缩站		20~ 40	0		20~ 40
	分选中转站		80~ 110	12.96~ 31.1		48.9~ 97.04
	中转站压缩后运输费用		10~ 20	0		10~ 20
源头分类	家庭源头分类		80~ 150	243.6~ 660.85	93.6~ 510.85	
	中转站前运输费用		5~ 10	0		5~ 10
	中转压缩站		20~ 40	0		20~ 40
	中转站后运输费用		10~ 20	0		10~ 20
堆肥	自然通风式		29.2~ 43.2	0		29.2~ 43.2
	反应器式		46~ 67	0		46~ 67
	强制通风静态跺式		38.2~ 41	0		38.2~ 41
	堆肥产品	赠送	2~ 4.4	0		2~ 4.4
		填埋	8~ 17.6	0		8~ 17.6
	筛上物	焚烧	22.4~ 36	0		22.4~ 36
		填埋	11.2~ 24	0		11.2~ 24
	渗漏液处理		1~ 7.5	0		1~ 7.5
	无沼气发电		30~ 50	0		30~ 50
填埋	卫生填埋	沼气发电 200 t 以上	5~ 20	9~ 50	0~ 45	0~ 11
		沼气发电 200 t 以下	15~ 30	9~ 50	0~ 35	0~ 21
		无沼气发电	45~ 65	0		45~ 65
	反应器式	沼气发电 200 t 以上	5~ 30	15~ 75	0~ 60	0~ 15
		沼气发电 200 t 以下	20~ 40	15~ 75	0~ 55	0~ 25
		准好氧	55~ 80	0		55~ 80
	渗漏液处理		1~ 7.5	0		1~ 7.5
	渗漏液回灌		0.3~ 3.75	0		0.3~ 3.75
焚烧	炉排炉		大型(300 t 以上)	83~ 114	0	83~ 114
			中型(100~ 300 t)	104~ 140	0	104~ 140
			小型(12.5~ 100 t)	130~ 167	0	130~ 167
	底渣	混合垃圾	10~ 20	0		10~ 20
		分选垃圾	6~ 12	0		6~ 12
	飞灰	混合垃圾	12~ 20	0		12~ 20
		分选垃圾	9~ 15	0		9~ 15
	流化床		大型(300 t 以上)	67~ 98	0	67~ 98
			中型(100~ 300 t)	88~ 119	0	88~ 119
			小型(12.5~ 100 t)	109~ 140	0	109~ 140
	底渣	混合垃圾	15~ 24	0		15~ 24
		分选垃圾	10~ 18	0		10~ 18
	飞灰	混合垃圾	25~ 60	0		25~ 60
		分选垃圾	18~ 30	0		18~ 30
	焚烧发电	小型(12.5~ 100 t)	混合垃圾	130~ 150	75~ 155	0~ 25
			分选垃圾	120~ 140	95~ 175	0~ 55
		中型(100~ 300 t)	混合垃圾	100~ 120	75~ 155	0~ 55
			分选垃圾	90~ 110	95~ 175	0~ 85
	大型(300 t 以上)	混合垃圾	70~ 90	75~ 155	0~ 85	0~ 15
		分选垃圾	60~ 80	95~ 175	15~ 115	
	能量回收	小型(12.5~ 100 t)	混合垃圾	85~ 100	50~ 90	0~ 15
			分选垃圾	80~ 95	60~ 100	0~ 20
		中型(100~ 300 t)	混合垃圾	65~ 80	50~ 90	0~ 25
			分选垃圾	60~ 75	60~ 100	0~ 40
		大型(300 t 以上)	混合垃圾	45~ 60	50~ 90	0~ 45
			分选垃圾	40~ 55	60~ 100	5~ 60
		渗漏液处理	混合垃圾	2.5~ 7.5	0	2.5~ 7.5
			分选垃圾	1~ 5.5	0	1~ 5.5

注：* 最终费用或收益= 成本- 毛收益。如两者之差为正值，则是费用，如两者之差为负值，则是收益。

而其中具体技术选中的次数为：卫生填埋、发电、渗滤液处理 193 次，卫生填埋、发电、渗滤液回灌 6052 次，反应器填埋、发电、渗滤液处理 127 次，反应器填埋、发电、渗滤液回灌 3612 次。可见沼气发电渗滤液回灌的卫生填埋方式是主要的选择方式，其次为沼气发电渗滤液回灌的反应器填埋方式。各技术具体比例如图 1 所示。

模型的运算结果与我国目前的实际情况较为相符，除少数大城市和特大城市焚烧比例较高以外，填埋仍然是适合我国国情和发展现状的最经济有效的生活垃圾处理处置方式。

31112 元素流计算结果

物质元素流计算结果以作为经济性最优的选择频率最高的处理处置技术体系为例。根据模型数值计算结果，城市生活垃圾通过家庭回收，二次回收后，回收利用物质占垃圾总量的 241.24%~291.68%，

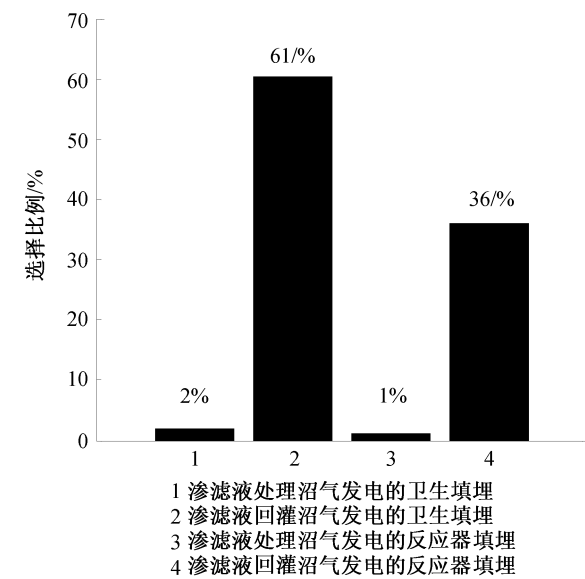


图 1 填埋处置具体技术选择比例图

Fig1 Proportion of specific landfill under general conditions

主要包括废塑料、废橡胶、废纸、碎玻璃、废金属、罐头盒和破布等固体废弃物。回收后剩余废物进入有沼气发电且渗滤液回灌的卫生填埋系统，分别进入填埋体、填埋气和渗滤液。渗滤液回灌前后各部分的物质和元素分布有一定变化，如表 3 所示。填埋体部分的最终元素含量分别为 C: 4418%，H: 517%，O: 3313%，N: 1194%，S: 0129%。

312 填埋费用昂贵条件下的数值计算结果

31211 经济性计算结果

在填埋费用昂贵条件下，利用程序对最优化模型进行数值计算，同样循环 10^4 次，结果表明家庭物质回收、二次物质回收后，对待处理垃圾进行分选，高热值物质进行焚烧、可降解物质进行堆肥和灰土瓦砾等进行填埋是首选的处理处置技术方案，其选择次数为 6966 次。其次为家庭物质回收、二次物质回收后对待处理垃圾全部进行堆肥处理，选择次数为 2817 次。各技术具体选择比例如图 2 所示。

可回收利用部分被回收利用后，待处置垃圾通过分选被分为 3 类：剩余废纸张，废塑料等高热值物，可降解物和灰土瓦砾等无机物。以上组分按分类分别进入焚烧、堆肥和填埋系统，其占垃圾总量的百分比如图 3 所示。

由于分选后进入焚烧、堆肥和填埋系统的垃圾的组成相比普通垃圾变化较大，导致单位质量垃圾发电量、飞灰比例、底渣比例、堆肥产品比例、筛上物比例等指标都有所不同。因此用同样方法对分选后垃圾的处理处置技术进行模拟计算，选择经济性最优的技术方案。焚烧系统优选带发电的炉排炉工艺，堆肥系统优选产品赠送筛上物填埋的自通风式堆肥，填埋系统由于主要是无机物进行填埋，不适合采用准好氧或反应器填埋，也不能进行沼气发电，优选为渗滤液回灌的卫生填埋，如图 4 所示。

表 3 一般条件下最优解的物质和元素流
Table 3 C, H, O, N, S stream under general conditions

处理阶段	流向	占垃圾总量 的百分比	占垃圾中相应元素总量的百分比P%				
			C	H	O	N	S
家庭和二次物质回收	回收物质	241.2~291.7	181.9~231.1	191.0~231.3	191.9~241.3	71.5~91.2	101.7~131.0
	填埋体	511.4~581.8	641.8~741.1	451.6~521.1	391.2~441.8	631.9~731.1	621.1~711.1
渗滤液回灌前	渗滤液	71.3~111.0	01.2~01.3	151.2~221.9	191.7~291.8	01.4~01.6	11.3~21.0
	填埋气	71.3~111.0	71.1~101.7	91.1~131.7	111.3~171.1	161.1~241.3	141.7~221.2
渗滤液回灌后	填埋体	581.7~691.8	651.0~741.4	601.7~751.0	581.9~741.5	641.3~731.7	631.5~731.1
	填埋气	71.3~111.0	71.1~101.7	91.1~131.7	111.3~171.1	161.1~241.3	141.7~221.2

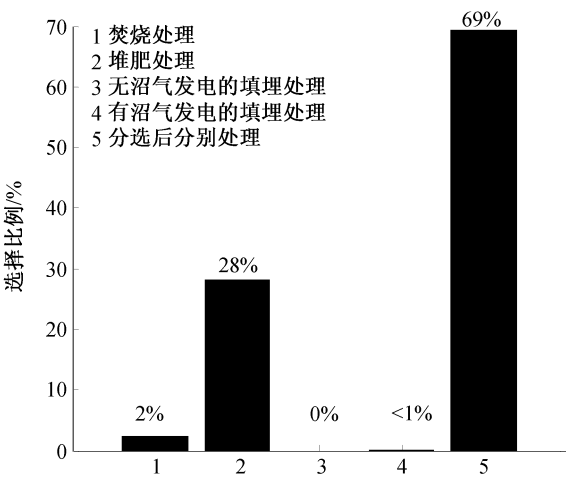


图 2 填埋费用昂贵条件下的处理处置技术选择比例
Fig 2 Proportion of treatment and disposal technologies with high landfill price

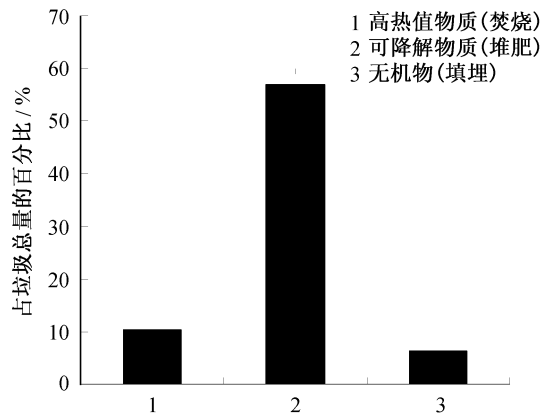
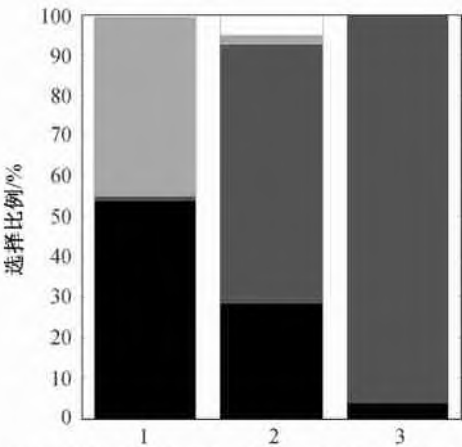


图 3 分选后分别进入焚烧、堆肥和填埋系统的物质质量比
Fig 3 Mass ratio of incineration, composting and landfill after facility separation

31212 元素流计算结果

物质、元素流计算结果仍以作为经济性最优的选择频率最高的处理处置技术体系为例。城市生活垃圾通过家庭回收, 二次回收和分选中转站分选回收后, C, H, O, N, S 元素按一定比例被回收。进入焚烧系统的高热值物质元素流向为焚烧底渣、焚烧尾气和飞灰。进入堆肥系统的可降解物质元素流向为



1 分选后焚烧系统技术选择比例, 自下而上依次为: 焚烧发电的炉排炉工艺; 回收热能的炉排炉工艺; 焚烧发电的流化床工艺; 回收热能的流化床工艺。
2 分选后堆肥系统技术选择比例, 自下而上依次为: 筛上物焚烧的自通风堆肥; 筛上物填埋的自通风堆肥; 筛上物焚烧强制通风堆肥; 筛上物填埋强制通风堆肥。
3 分选后填埋系统技术选择比例, 自下而上依次为: 渗滤液处理卫生填埋; 渗滤液回灌卫生填埋。

图 4 分选后焚烧、堆肥、填埋系统处理处置技术选择比例
Fig 4 Proportion of specific incineration, composting and landfill technologies after facility separation

堆肥晒上物、堆肥产品和堆肥气体。进入填埋系统的无机物元素流向为填埋体、渗滤液和填埋气。在经济性最优的处理处置技术体系中, 焚烧底渣、堆肥晒上物通过填埋的方式进行最终处置。堆肥产品土地利用, 其中各元素转化为土壤成分。焚烧飞灰作为危险废物另外进行处理处置。C, H, O, N, S 元素的最终流向如表 4 所示。

313 采用家庭源头分类条件下的数值计算结果

根据生活垃圾处理处置技术体系图^[9], 理论上家庭源头分类的回收和分选效果与物质回收、设备分选的效果相同。因此, 采用家庭源头分类, 除经济性指标不同外, 最优处理处置技术的选择和最终的生活垃圾物质元素流向都与填埋费用高昂情况下采用分选时的情况相同。即进入焚烧系统、堆肥系统

表 4 填埋费用高昂条件下最优解的物质和元素流
Table 4 C, H, O, N, S stream with high landfill cost

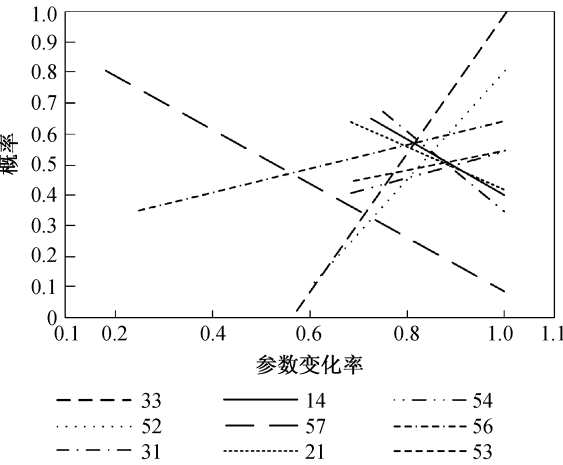
物质流向	占垃圾总量的百分比/%				
	C	H	O	N	S
回收	16128~ 21137	16163~ 21178	18145~ 23174	7100~ 8151	10104~ 12171
填埋体	2120~ 3163	0142~ 1151	1107~ 5150	5108~ 6150	2120~ 3163
气体	57138~ 66173	58161~ 67187	41188~ 60170	6717~ 87154	51143~ 61132
土壤	13125~ 15190	13130~ 15196	20103~ 31139	4136~ 20191	19178~ 27169
飞灰	0101~ 0106	0~ 0107	0118~ 0158	0~ 0101	1189~ 5116

和填埋系统的生活垃圾组分经济性最优的处理处置技术选择如图 4 所示,C, H, O,N, S 元素的最终流向如表 4 所示。

4 灵敏度分析

本研究以在填埋费用昂贵的条件下模拟结果为例, 计算了各技术单元(共 67 个单元)费用对分选被选为最优组合的概率的灵敏度。根据参数的灵敏度大小, 对各技术单元对系统状态变量的影响大小进行排序。其中影响最大的 9 个技术单元的灵敏度参数变化率如图 5 所示。

由计算和图 5 所示, 分选垃圾的沼气发电收益是影响系统状态和技术选择的最大正相关因素, 灵敏度参数达到了 212806。这说明沼气发电电价越高, 分选被选择的比例就会越高。其次是卫生填埋费用, 灵敏度参数达到了 117746。分选垃圾大型发电费用、大型炉排炉费用、卫生填埋发电收益和大型流化床费用是影响系统状态和技术选择的 4 个最大负相关因素。准好氧填埋费用、卫生填埋大型发电费用和反应器填埋费用是另外 3 个影响较大的正相关因素。因此, 如果采用分选后分别对生活垃圾各部分进行焚烧、堆肥和填埋处理处置, 以上 9 个因素是需要重点考虑的调整因素。有效的对以上 9 个因素进行调整, 会有助于实现整个生活垃圾处理处置系统的经济性最优。



图中代码 33, 52, 31, 14, 57, 21, 54, 56 和 53 依次代表分选垃圾的沼气发电收益、卫生填埋费用、分选垃圾大型发电费用、大型炉排炉费用、卫生填埋发电收益、大型流化床费用、准好氧填埋费用、卫生填埋大型发电费用和反应器填埋费用

图 5 灵敏度参数示意图

Fig.5 Curve of sensitivity coefficient

5 城市规模对焚烧处理作为经济性最优方案概率的影响

由于不同处理规模的焚烧炉(炉排炉和流化床)的建设成本和运行成本有很大不同, 将其折合为处理每吨垃圾所需的费用(包括固定费用和流动费用), 小规模焚烧炉要比大规模焚烧炉更加昂贵(表 2)。因此, 根据不同城市规模、不同垃圾产生量, 模型对焚烧处理的支持比例有很大不同, 如图 6 所示。模型分析的结果表明, 在大城市和特大城市中, 垃圾处理量较大, 更适宜建设大规模焚烧炉; 而在中小城市中, 垃圾产量较小, 建设大规模焚烧炉比较浪费, 而建设小规模焚烧炉则又费用昂贵, 因此, 模型支持焚烧系统作为经济最优的处理方式比例就很低。

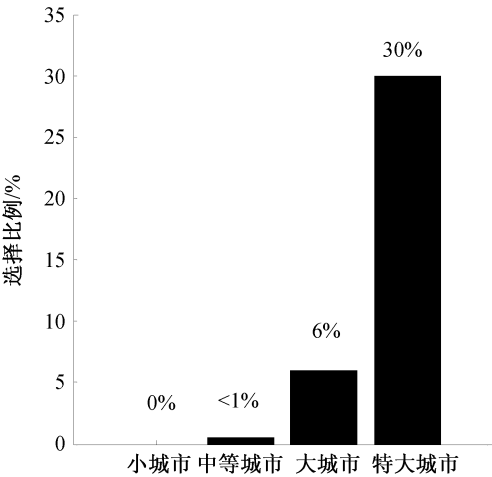


图 6 焚烧处理在不同城市规模中作为经济最优处理方式的比例

Fig.6 The pickup proportion of incineration with varied city scale

6 结论

1) 通过建立技术指标体系, 对各种生活垃圾处理处置体系各技术单元进行经济性分析, 通过模型运算, 对处理处置关键技术进行识别和经济性评价; 在实现生活垃圾资源化、无害化处理的前提下, 选择出各种条件下经济性最优的技术和技术集成, 并以经济性最优的处理处置技术体系为例, 对生活垃圾中的 C, H, O, N, S 5 种元素的最终流向进行计算。

2) 在一般条件下, 家庭物质回收和二次物质回收后, 采用沼气发电、渗滤液回灌的卫生填埋对待处理垃圾进行处置作为经济性最优的选择频率达到

61%, 是建议采用的处理处置技术体系; 在这种情况下, 生活垃圾中的 C, H, O, N, S 5 种元素的最终流向主要为回收利用部分、填埋体部分和填埋气部分。

3) 在填埋费用昂贵条件下, 家庭物质回收、二次物质回收后, 对垃圾进行分选, 高热值物质进行焚烧, 可降解物质进行堆肥和灰土瓦砾等进行填埋的选择频率达到 70%, 是模型选择的经济性最优处理处置技术体系; 在这种情况下, 生活垃圾中的 C, H, O, N, S 5 种元素的最终流向主要为回收利用部分、填埋体部分、进入大气部分、土壤部分和焚烧飞灰部分。如果采用家庭源头分类, 除经济性指标不同外, 最优处理处置技术的选择和最终的生活垃圾物质元素流向都同填埋费用高昂情况下采用分选时的情况。

4) 灵敏度分析结果表明, 对技术政策选择影响最大的 9 个技术单元依次为分选垃圾的沼气发电收益、卫生填埋费用、分选垃圾大型发电费用、大型炉排炉费用、卫生填埋发电收益、大型流化床费用、准好氧填埋费用、卫生填埋大型发电费用和反应器填埋费用。

5) 不同城市规模、不同垃圾产生量, 模型对焚烧处理的支持比例有很大不同。在垃圾产生量大的大城市和特大城市, 模型计算结果对焚烧处理的支持比例较高, 说明更适宜建设大规模焚烧炉; 而对中小城市, 对焚烧处理的支持比例很低, 建设大规模焚烧设备就比较浪费。

参考文献

[1] 王斌, 邢可霞, 郭怀成. 城市固体废物规划方法研究述评. 重庆环境科学, 2003, 25(10) : 83-86

[2] 王海燕. 循环经济理论下的城市固体废物物流系统优化模型. 物流技术, 2005, 10: 287-289

[3] Costi P. An environmentally sustainable decision model for urban solid waste management. Waste Management, 2004, 24(3) : 277-295

[4] Kumar A, Sud A, Mantripragada K. Dynamic sensitivity analysis of the probit dose-response model used in the risk assessment of a municipal solid waste incinerator IP Proceedings of the 1998 91st Annual Meeting & Exposition of the Air & Waste Management Association. San Diego, 1998

[5] Chang S, Nishat S. Integrated solid waste management for the City of Greensboro, NC: A linear programming model. Journal of Solid Waste Technology and Management, 2005, 31(4) : 169-186

[6] 曾光明, 袁兴中, 张盼月, 等. 固体废物管理行业的环境投入产出模型及其应用. 中国环境科学, 1999, 19(3) : 253-256

[7] D. Antonio G, Fabbicino M, Pirozzi F. Decisional model for integrated management of municipal solid waste) A case study. Journal of Solid Waste Technology and Management, 2002, 28(1) : 28-43

[8] Jain A, Kaur H, Khanna S. Computer model for municipal solid waste treatment in developing countries. Environmental Science and Technology, 2005, 39(10) : 3732-3735

[9] 赵岩, 司继涛, 田保国, 等. 城市固体废物处理处置技术政策方法 N 1 模型研究. 北京大学学报(自然科学版), 2007, 43(6) : 834-838