

周晓萃,徐琳瑜,杨志峰. 2012. 城市生活垃圾处理全过程的低碳模式优化研究[J]. 环境科学学报, 32(2):498-505

Zhou X C, Xu L Y, Yang Z F. 2012. Optimization of low-carbon municipal solid waste processing model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 32(2):498-505

城市生活垃圾处理全过程的低碳模式优化研究

周晓萃, 徐琳瑜*, 杨志峰

环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京师范大学环境学院, 北京 100875

收稿日期: 2011-03-19 修回日期: 2011-05-13 录用日期: 2011-05-16

摘要: 生活垃圾处理过程中的温室气体排放是重要的人为碳排放源. 本文提出一种基于城市生活垃圾处理全过程的低碳模式制定方法, 通过对不同垃圾末端处理工艺的资源与能源消耗, 温室气体排放潜值与资源化率的评价, 进行处理情景设计与分析, 识别出生活垃圾处理低碳发展的调控措施, 并结合约束条件下的定量优化, 得到生活垃圾低碳优化处理模式. 最后, 以北京市为案例点, 针对主要调控因子设计不同无害化处理比例的 3 种情景并开展以上 3 方面评价. 结果表明, 垃圾低碳优化处理的措施为降低填埋比例, 同时提高堆肥和焚烧比例; 垃圾低碳优化处理模式为填埋、焚烧与堆肥的利用比例是 23%:25%:52%.

关键词: 温室气体; 生活垃圾处理模式; 资源化率; 优化; 北京

文章编号: 0253-2468(2012)02-498-08

中图分类号: X32, X171

文献标识码: A

Optimization of low-carbon municipal solid waste processing model

ZHOU Xiaocui, XU Linyu*, YANG Zhifeng

State Key Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875

Received 19 March 2011;

received in revised form 13 May 2011;

accepted 16 May 2011

Abstract: Carbon emission from Municipal solid waste (MSW) treatment is one of the major anthropogenic sources to cause climate change. In this paper, we proposed an optimization method for MSW low-carbon mode in the overall processing of MSW through evaluation on resource and energy consumption, Green House Gas (GHG) emission potential and recovery rate of different scenarios. This method identified the main regulatory measures and quantitatively set low-carbon processing mode under certain constraints. The method was then applied to Beijing MSW treatment. We designed three scenarios and conducted evaluation on resource and energy consumption, GHG emission potential and recovery rate of the three scenarios. After evaluating resource and energy consumption, GHG emission potential and recovery rate of each scenario, low-carbon development strategies for MSW management were determined. The results showed that the most efficient strategy at present was to decrease landfill proportion, in parallel to increasing composting and incineration proportion. The optimized low-carbon processing mode was to set landfill proportion of 23%, incineration proportion of 25%, and composting proportion of 52%.

Keywords: green house gas; municipal solid waste processing mode; recovery rate; optimization; Beijing

1 引言 (Introduction)

人类活动引起的气候变化是当前国际社会普遍关注的重大全球性问题. 人类通过化石燃料燃烧、能源开采、工农业及畜牧业的生产活动, 以及垃圾处理和土地利用开发等向大气排放了大量的 CO₂ 和 CH₄ 等温室气体, 从而导致全球气温上升, 并使一系列环境、社会问题日益显现, 因此, 控制人为温室

气体排放已经成为亟待解决的问题. 生活垃圾在收集转运过程中也会导致能源消耗和 CO₂ 排放, 在处理过程中垃圾经过多种物理、化学和生物反应产生的各种气体中, CO₂、CH₄ 和 N₂O 等温室气体占了绝大部分. 根据 IPCC (2006) 估算, 来自垃圾系统的温室气体排放占全球温室气体排放总量的 5%. 因此, 对城市生活垃圾的低碳处理模式进行研究, 减少这一过程的 CO₂、CH₄ 等温室气体的排放, 无论是对于

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (No. 2007BAC28B03); 国家自然科学基金 (No. 40871262)

Supported by the National Key Technologies R&D Program (No. 2007BAC28B03) and the National Natural Science Foundation of China (No. 40871262)

作者简介: 周晓萃 (1985—), 女, E-mail: clairezhou@mail.bnu.edu.cn; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: xly@bnu.edu.cn

Biography: ZHOU Xiaocui (1985—), female, E-mail: clairezhou@mail.bnu.edu.cn; * **Corresponding author**, E-mail: xly@bnu.edu.cn

生态环境保护、低碳城市发展,还是对于生活垃圾处理技术本身的改进,均具有十分重要的意义。

国内外许多学者对废物管理中的温室气体排放问题进行了广泛研究,有些学者以不同垃圾成分处理过程中温室气体的减排为研究对象,如厨余、草木、金属、纸类等(Fritsche *et al.*, 2007; Marheineke *et al.*, 2000; Chen *et al.*, 2007; Amlinger *et al.*, 2008; Lou, 2008);有些学者则针对不同处理工艺(如回收、焚烧、填埋等工艺中温室气体减排)开展研究(赵磊等, 2010; Liamsanguan *et al.*, 2008; Batool *et al.*, 2009; Papageorgiou *et al.*, 2009; Lou *et al.*, 2009; Adrian *et al.*, 2008);有些学者对垃圾处理相关环节的碳排放,包括收集、运输、处理环节,进行评价和减排潜力分析,并提出系统优化措施(Bani *et al.*, 2010; Lombardi *et al.*, 2006; Paolo *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2008)。但由于各个地方发展水平、生活方式的差异,城市生活垃圾的组分和处理工艺不一样,导致这些研究成果很难被运用和推广(Zhao *et al.*, 2009)。由于各种垃圾处理工艺各具优势和局限性,每种工艺处理垃圾过程中的温室气体排放量、能源消耗与资源化效果各有差别,没有一种工艺能完全独立实现垃圾处理资源化、减量化、无害化的总目标,因此,垃圾的综合处理被认为是较合理、经济的方法。但目前有关垃圾综合处理低碳模式的优化研究还不多见。因此,文本将针对垃圾处理全过程,通过调整各处理工艺利用比例,探索垃圾综合处理的低碳模式。

生活垃圾作为城市代谢的一个组成部分,在其处理过程中,一方面通过卫生填埋、堆肥和焚烧等工艺将组分中的碳或氮转化成温室气体排放;另一方面由于处理厂自身运行会消耗资源和能源,造成另一部分温室气体排放。但垃圾处理工艺各不相同,有的可以对温室气体进行有效收集、处理,并进行资源化利用,作为替代燃料或替代原料,直接减少处理过程中的温室气体排放,同时还能减少煤炭、石油、天然气等一次能源的消耗。垃圾作为放错位置的资源,具有很大的回收利用价值,应在垃圾的无害化处理过程中考虑回收和利用,生产新的能源和资源(李萌等, 2004)。李纪月等(2010)研究认为,为促进低碳城市的发展,垃圾处理应该减少资源的消耗,增加资源的重复使用和循环再利用。聂永丰(2010)研究认为,低碳经济下,垃圾处理的技术路线应该是能源高效利用,采取合适的处理工艺

对垃圾产生的温室气体进行有效收集、处理和资源化利用。

综上所述,笔者认为垃圾低碳处理模式应该是资源、能源高效利用,处理过程中温室气体排放少,垃圾资源化率高的处理模式。同时,能够通过调控各种垃圾无害化处理工艺的利用比例,使整个垃圾综合处理系统的资源、能源得到高效利用,提高资源化率,并减少温室气体排放,从而对整个城市的低碳发展起到促进作用。因此,本文通过对垃圾处理全过程的资源、源能消耗量、温室气体排放量进行核算,结合资源化率分析及不同处理模式的设计与评价,找到垃圾处理模式低碳发展的优化路径,并进行约束条件下的定量优化,得出满足低碳处理要求的无害化处理工艺利用比例,以期为有效地进行城市垃圾低碳管理提供决策参考。

2 生活垃圾低碳处理模式优化方法(Method for municipal solid waste low-carbon processing optimization)

本文设计了城市生活垃圾低碳处理模式的优化程序,具体如图1所示。根据垃圾产生情况及收集与处理处置现状调查分析,对垃圾末端处理工艺——填埋、焚烧、堆肥的温室气体排放潜值进行评价,并对资源、能源的消耗进行核算,然后结合城市实际垃圾处理各工艺的利用情况,得到垃圾综合处理的温室气体排放潜值与资源、能源消耗量和资源化率。在此基础上,进行垃圾处理模式的设计与资源、能源消耗、温室气体排放、资源化率评价,找

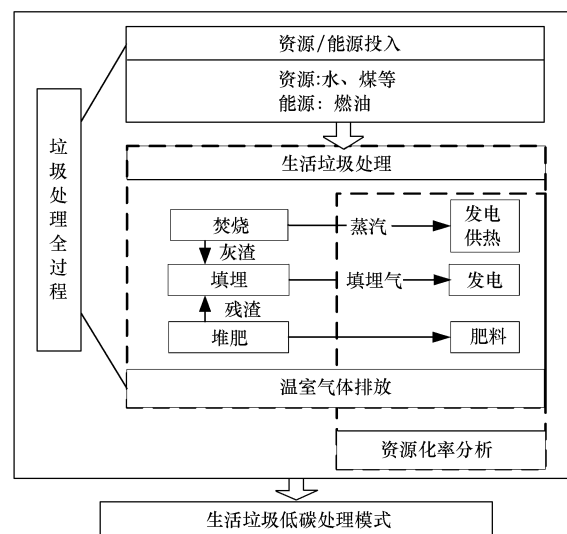


图1 城市生活垃圾处理全过程的低碳模式优化流程

Fig. 1 Optimization of municipal solid waste low-carbon processing

到减少温室气体排放的突破口. 最后进行约束条件下的优化, 研究满足垃圾处理过程中温室气体排放最少、资源化效果最好、资源和能源投入最少的处理模式.

2.1 垃圾处理全过程中温室气体排放潜值核算方法

在确定研究系统的基础上, 对垃圾处理过程中的资源、能源消耗, 产生的温室气体类型、排放量及排放环节进行分析, 得到资源、能源投入和温室气体排放清单, 并以 CO_2 为参照物将温室气体进行特征化处理, 最后叠加为 1 个总指标得到温室气体排放潜值, 计算过程见式(1). 同时, 结合垃圾不同处理工艺的利用比例, 单位垃圾综合处理的温室气体排放潜值由式(2)进行计算.

$$\text{EI} = \sum_{i=1}^n \text{EI}_i = \sum_{i=1}^n (Q_i \cdot \text{EF}_i) \quad (1)$$

$$\text{EIT} = \sum_{k=1}^n (P_k \cdot \text{EI}_k) \quad (2)$$

式中, EI 为处理工艺单位垃圾温室气体排放对自然温室效应增强的贡献, 即温室气体排放潜值 ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$, 以每 t 垃圾产生的 CO_2 当量计); EI_i 为第 i 种物质对自然温室效应增强的贡献 ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$); Q_i 为第 i 种物质的排放量 ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$); EF_i 为第 i 种物质对自然温室效应增强的特征化当量因子; EIT 为单位垃圾综合处理的温室气体排放潜值 ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$); P_k 为由第 k 种垃圾处理工艺处理的垃圾量占末端总处理量的比例, $P_k = \frac{Q_k}{Q_{\text{末端}}}$, 其中, Q_k 为垃圾由第 k 种处理工艺处理的量 (t), $Q_{\text{末端}}$ 为垃圾末端处理量 (t); EI_k 为第 k 种垃圾处理工艺单位垃圾的温室气体排放潜值 ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$, 以每 t 垃圾产生的 CO_2 当量计).

2.2 资源、能源消耗核算方法

由资源、能源投入清单分析可得到垃圾处理过程中各种工艺对资源和能源的消耗情况, 利用式(3)可计算求得总的单位垃圾处理的资源、能源投

入量.

$$T = \sum_{k=1}^n (P_k \cdot T_k) \quad (3)$$

式中, T 为资源、能源的投入量 ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$, 以每 t 垃圾需要的标煤计); T_k 为第 k 种处理工艺的资源、能源投入量 ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$).

2.3 垃圾处理资源化率计算方法

资源化率是指生活垃圾处理过程中实现资源化的垃圾比例, 在填埋处理中, 可收集填埋气进行发电, 垃圾焚烧处理亦可发电供热, 垃圾堆肥可生产堆肥产品, 因此, 垃圾处理的资源化率可由式(4)得出.

$$E_{\text{资}} = \sum_{k=1}^n (P_k \cdot E_k) \quad K = 1, 2, \dots, n; \quad (4)$$

式中, $E_{\text{资}}$ 为生活垃圾资源化率; E_k 为第 k 种处理工艺的资源化率, 其中, $E_{\text{填埋}}$ 为每吨垃圾实际发电量与理论发电量的比值; $E_{\text{焚烧}}$ 为垃圾焚烧转化成热能和电能的效率; $E_{\text{堆肥}}$ 为堆肥资源化率为堆肥产品量与总堆肥量的比值.

3 北京市生活垃圾处理低碳模式优化 (Case study: low-carbon treatment models for Beijing municipal solid waste processing)

3.1 垃圾处理全过程的温室气体排放潜值与能源、资源消耗核算

北京市垃圾产量大、增长快, 根据北京市市容管理委员会统计资料显示, 2008 年, 北京市生活垃圾产生量为 672 万 t, 比 2007 年增长 53 万 t, 日产生活垃圾 18411 t, 年增长率接近 8%. 从垃圾成分看, 北京的城市生活垃圾以易腐有机物、纸张、渣砾、灰土和塑料为主, 约占 98%, 其中, 易腐有机物达到 67.6% 左右, 低位发热量 $4627 \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; 城市生活垃圾分类收集率为 54%, 无害化处置率达到 100%; 处理方式主要以填埋为主, 填埋、堆肥、焚烧 3 种处理方式的比例分别为: 93%、4%、3%.

表 1 北京市垃圾成分

Table 1 Beijing municipal solid waste composition

纸张	塑料	织物	玻璃	金属	厨余	草木	灰土
11.1%	12.7%	2.46%	1.76%	0.27%	63.4%	1.74%	6.57%

注: 数据源于北京市市容管理委员会网站 (http://www.bjmac.gov.cn/pub/guanwei/1/14/14_6/200901/t20090109_12654.html).

3.1.1 目标和范围的确定 本文的研究范围从垃圾进入处理站开始到无害化处理结束, 包括预处理、垃圾处理、二次污染控制等过程 (各工艺边界详

见图 2), 收集转运过程不包含在内. 垃圾处理过程中, 经分选的可回收物直接运往废物回收站, 其回收再利用过程不包含在本系统之内, 不能资源化的

废物属于本系统研究对象. 本研究的目标是核算城市生活垃圾末端处理工艺(填埋、焚烧、堆肥)的能源、资源消耗与温室气体排放潜值, 对不同工艺的

能耗、温室气体排放水平进行评价和比较. 本研究的功能单位为处理 1t 垃圾的量.

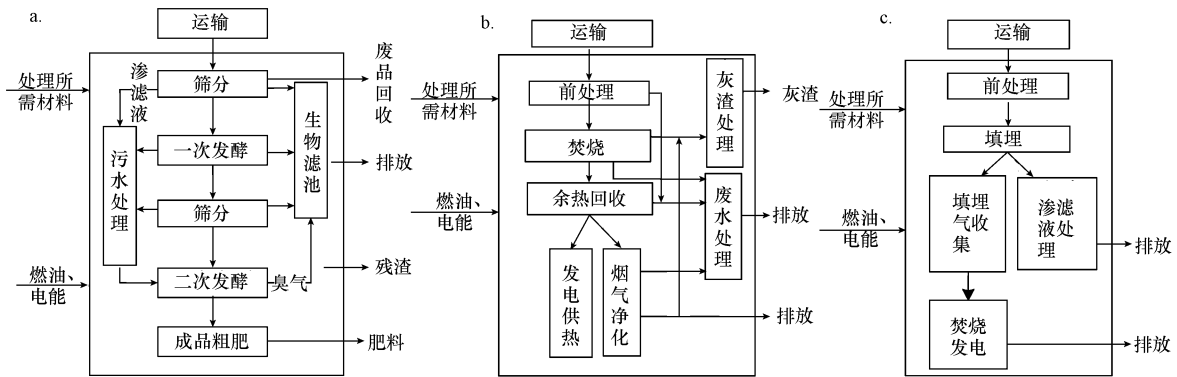


图 2 各处理工艺边界(a. 堆肥工艺, b. 焚烧工艺, c. 填埋工艺)

Fig. 2 System boundary of each treatment technique(a. composting system, b. incineration system, c. landfill system)

3.1.2 资源、能源投入和温室气体排放清单分析
 本文选取北京较典型的垃圾填埋、堆肥、焚烧处理厂作为案例点. 堆肥处理各环节产生的废气经负压系统收集, 通过生物滤池除臭后达标排放. 焚烧处理烟气采用 NID 系统处理, 活性炭吸附二噁英, 臭气采用植物除臭剂除臭, 利用余热供热发电. 填埋

处理对填埋气进行收集, 部分焚烧发电, 部分焚烧处理达标排放. 通过现场调查识别各处理工艺的温室气体的排放特征, 识别各处理工艺温室气体的主要排放环节, 具体见表 2. 结合相关监测数据和文献资料可得到北京市生活垃圾在 3 种处理工艺下的资源、能源投入和温室气体排放清单, 具体见表 3.

表 2 各处理工艺温室气体主要排放环节

Table 2 Major sources of green house gas emission of in treatment process

处理工艺	温室气体主要来源分析
焚烧	①焚烧过程中添加辅助化石燃料(如点火用油、辅助燃油等)燃烧产生的 CO ₂ ; ②垃圾化石碳燃烧产生的 CO ₂ , 不完全燃烧产生的 CO; ③焚烧过程产生的 N ₂ O; ④焚烧厂贮坑中垃圾产生渗滤液在厌氧发酵过程中产生的 CH ₄ .
填埋	①垃圾中有机物降解产生的 CH ₄ ; ②填埋场渗滤液调节池中渗滤液排放的 CH ₄ 和 N ₂ O; ③垃圾填埋作业过程中的电力消耗和作业机械的化石燃料消耗造成的 CO ₂ 与 CO 排放.
堆肥	好氧堆肥过程中产生的温室气体主要是 CO ₂ , 但堆体内易形成局部厌氧环境, 从而产生少量的 CH ₄ 和 N ₂ O.

表 3 垃圾处理资源、能源投入和温室气体排放清单

Table 3 Resource input and GHG emission of three waste treatment techniques

处理工艺	资源消耗			温室气体排放/(kg·t ⁻¹)			
	燃油 /(kg·t ⁻¹)	电力 /(kWh·t ⁻¹)	淡水 /(kg·t ⁻¹)	CO ₂	CO	CH ₄	N ₂ O
填埋	2.30 × 10 ⁻¹	1.26	4.02 × 10 ⁻²	55.20	4.00 × 10 ⁻¹	5.66	4.44 × 10 ⁻²
堆肥	3.87 × 10 ⁻³	89.30	7.56 × 10 ⁻²	1.41 × 10 ⁻¹	1.53 × 10 ⁻²	1.53 × 10 ⁻²	4.29 × 10 ⁻²
焚烧	0	7.94 × 10 ²	1.69	1.69 × 10 ²	3.88 × 10 ⁻¹	0	1.27 × 10 ⁻¹

注: 数据源于文献(纪丹凤, 2010; 黄江丽等, 2004).

3.1.3 温室气体排放潜值计算 以 CO₂ 为参照物, 根据各类温室气体与 CO₂ 之间的当量关系, 计算出每种处理工艺环境影响潜值, 结果见表 4. 由表 4 可知, 填埋、堆肥、焚烧 3 种垃圾末端处理工艺的温室气体排放潜值核算结果中, 填埋最大, 焚烧接近

填埋, 堆肥的影响最小. 填埋主要产生大量 CH₄, 在焚烧处理工艺中 CH₄ 燃烧转化成了 CO₂, 而 CH₄ 产生的温室效应相当于 CO₂ 的 25 倍, 因此, 填埋的单位温室气体排放潜值大于焚烧. 对于堆肥处理工艺, 本文所选择的案例堆肥厂主要对堆肥气体进行

了有效的收集,同时用生物滤池过滤将堆肥气中的 气体有效去除,降低了其对环境的影响.

表 4 3 种处理工艺的温室气体排放潜值

Table 4 Green house gas emission of three treatment techniques

影响类型	温室气体	CO ₂ 当量	环境影响潜值/(kg·t ⁻¹)		
			填埋	堆肥	焚烧
全球变暖	CO ₂	1	55.20	1.41 × 10 ⁻¹	1.69 × 10 ²
	CO	2	8.00 × 10 ⁻¹	3.06 × 10 ⁻²	7.76 × 10 ⁻¹
	CH ₄	25	1.41 × 10 ²	3.82 × 10 ⁻¹	0
	N ₂ O	320	14.00	15.00	40.60
	合计		2.11 × 10 ²	15.60	2.10 × 10 ²

注:环境影响潜值均以 CO₂ 当量计,其数据源于文献(徐李娜,2009).

3.1.4 能源、资源消耗核算 由清单分析得到各种 的能源、资源消耗最少,堆肥处理次之,焚烧处理 工艺对资源和能源消耗情况,并统一折算成标煤消 最大. 耗量,结果见表 5. 由表 5 可知,单位垃圾填埋处理

表 5 3 种处理工艺的资源、能源投入情况

Table 5 Resource and energy consumption of three treatment techniques

处理工艺	燃油投入		电力投入		合计 /(kg·t ⁻¹)
	燃油 /(kg·t ⁻¹)	折合标煤 /(kg·t ⁻¹)	电力 /(kWh·t ⁻¹)	折合标煤 /(kg·t ⁻¹)	
填埋	2.30 × 10 ⁻¹	3.38 × 10 ⁻¹	1.26	2.17 × 10 ⁻¹	5.55 × 10 ⁻¹
堆肥	3.87 × 10 ⁻³	5.69 × 10 ⁻³	89.30	15.40	15.40
焚烧	0	0	7.94 × 10 ²	1.36 × 10 ²	1.36 × 10 ²

注:根据《综合能耗计算通则》(GB/T2589—2008)将电力和燃油消耗统一转化为相应的标煤消耗量.

3.2 资源化率核算

垃圾焚烧可以供热发电,当前我国自主设计的 供热锅炉热效率可以达到 65%,热电联产可以达到 50%,而单纯发电的热效率只能达到 23%. 根据北京市的实际情况,大部分垃圾焚烧厂是热电联供, 其资源化率 $E_{\text{焚烧}}$ 取值为 40%. 对于垃圾填埋处理, 填埋气体的开发利用是垃圾填埋处置过程中唯一 可测量的资源化指标,填埋气体通过收集发电实现 资源化,其资源化率可视为实际发电量与理论发电 量的比值. 北京生活垃圾低位热值为 4627 kJ·kg⁻¹, 理论可发电 1284 kWh·t⁻¹, 本研究案例点垃圾填埋 场生活垃圾焚烧处理实际可发电量为 20 kWh·t⁻¹, 可得垃圾填埋资源化率 $E_{\text{填埋}}$ 为 2%. 垃圾堆肥处理 的资源化率可看作是堆肥率,通常情况下,垃圾堆 肥产品的产率约为 30%~50%,但北京垃圾堆肥产 品营销不理想,其资源化率 $E_{\text{堆肥}}$ 取为 30%.

焚烧由于利用了热能,并将一部分热能转变为 电能,能源得到回收利用,资源化率高. 由于垃圾堆 肥产品销路不畅通,因此,资源没有得到利用,资源 化程度次于焚烧,但两者远远好于填埋. 由于我国 目前缺乏经济激励和政策强制力推动等原因,致使

填埋产生的填埋气利用还不大,绝大部分都释放到 环境中,回收利用率低.

3.3 生活垃圾综合处理低碳模式设计及评价

针对北京市生活垃圾无害化处理工艺的利用 情况,运用 3 种处理工艺的资源、能源消耗、温室气 体排放潜值与资源化率核算结果,根据式(2)、(3)、 (4)计算得到北京市目前单位生活垃圾处理的资 源、能源投入为 5.13 kg·t⁻¹ (以每 t 垃圾投入的标煤 计),温室气体排放为 203.15 kg·t⁻¹ (以 CO₂ 当量 计),资源化率为 4.3%.

不同垃圾处理工艺的资源/能源投入、温室气 体排放与资源化效果不同,因此,每种工艺的利用 比例将直接影响综合处理在投入、排放与资源化方 面的水平. 基于此,本文假设垃圾处理工艺技术不 变,设定 3 种调控因素:填埋比例($P_{\text{填埋}}$)、堆肥比例 ($P_{\text{堆肥}}$)、焚烧比例($P_{\text{焚烧}}$), $P_{\text{堆肥}}$ 和 $P_{\text{焚烧}}$ 都伴随 $P_{\text{填埋}}$ 的变化而变化, $P_{\text{填埋}} + P_{\text{焚烧}} + P_{\text{堆肥}} = 1$. 基于北京 的现实情况和客观需求,土地资源日益稀缺和宝贵, 填埋比例过高,达到了 93%,因此,本文以降低填埋 为主要方向进行优化,分别制定 3 种处理情景(表 6). 并根据式(2)、(3)对 3 种情景进行评价,以期找

到各个因素的变化对现状的影响程度,制定相应的优化措施,评价结果见表 6.

表 6 3 种模式下温室气体排放、能源消耗、资源化率变化

Table 6 Changes of resource and energy consumption, GHG emission, recovery rate in three treatment techniques

处理情景	能源/资源投入 ^a /(kg·t ⁻¹)	温室气体排放潜值 变化 ^b /(kg·t ⁻¹)	资源化率变化	减排量 ^c /(kg·kg ⁻¹)
I 填埋比例下降 1%, 焚烧比例上调 1%, 其他指标与现状保持不变	1.35	-0.01	0.38%	0.0074
II 填埋比例下降 1%, 堆肥比例上调 1%, 其他指标与现状保持不变	0.13	-1.95	0.28%	15.2100
III 填埋比例下调 2%, 堆肥比例上调 1%, 焚烧比例上调 1%	1.24	-1.96	0.66%	1.3200

注:a. 以处理每 t 垃圾投入的标煤计;b. 以 CO₂ 当量计;c. 减排量表示增加单位能源、资源(以标煤计)投入条件下温室气体(以 CO₂ 当量计)的减排量;正值表示增加,负值表示减少.

从上述各种情景下温室气体排放、能源消耗、资源化率变化情况分析可以看出,将填埋比例下调,同时提高其他处理工艺比例,都会带来能源、资源投入的增加,但处理系统的温室气体排放量会减少,同时资源化率会增加.从增加单位能源、资源投入的温室气体减排量来看,增加堆肥比例(II)最有效,但资源化率最差.只有同时提高堆肥和焚烧比例(III),降低填埋比例,才能在资源化率方面最优,在增加单位能源/资源投入的温室气体减排效果比(I)好,综合比较,该项调控方案最优.

4 约束条件下的垃圾低碳处理模式优化 (Municipal solid waste low-carbon processing optimization under constraints)

由上述评价可得,目前北京垃圾处理低碳优化的路径应该是减少填埋比例,增大堆肥和焚烧比例.但考虑到生活垃圾各成分含量和性质具有很大差别,各种处理工艺也有相应的适用条件和局限性,不能将一种处理工艺利用比例无限升高或降低.因此,本文将研究在约束条件下的低碳处理模式优化方案,得到具体的无害化处理工艺利用比例.设定垃圾低碳处理优化目标为:垃圾处理过程中温室气体排放最少,资源化效果最好,资源、能源投入最少.对无害化处理比例进行调控,找到满足该目标的处理模式.

由于生活垃圾在焚烧后有约 10% 的残渣量,堆肥处理有约 30% 的残渣量(周菲,2010),因此,填埋处理至少得保证上述两者处理方式的残渣处理量(式(5)).同时,从垃圾各成分含量和属性考虑,适合堆肥处理的厨余垃圾占到 63.4%(表 1),经过回

收利用(如当作饲料)后需要的堆肥处理能力约为 52%,因此,垃圾堆肥处理比例应在这个处理负荷以内(式(6)).

$$EIT = \sum_{k=1}^n (P_k \cdot EI_k) \quad (2)$$

$$T = \sum_{k=1}^n (P_k \cdot T_k) \quad (3)$$

$$E_{资} = \sum_{k=1}^n (P_k \cdot E_k) \quad (4)$$

$$EIT_{min}; T_{min}; E_{资max};$$

$$\sum_{k=1}^n P_k = 1, P_k > 0$$

$$P_{填埋} \geq 0.3 \cdot P_{堆肥} + 0.1 \cdot P_{焚烧} \quad (5)$$

$$P_{堆肥} \leq 0.52 \quad (6)$$

将表 6 的数据代入式(2)、(3)、(4),经过 Matlab 编程可求得在上述约束条件下,资源、能源投入小、资源化率最高、温室气体排放少的无害化处理比例,最终确定填埋、焚烧与堆肥的比例为:23%:25%:52%.此时资源、能源投入为 41.10 kg·t⁻¹(以标煤计),温室气体排放量为 109.14 kg·t⁻¹(以 CO₂ 当量计),资源化率为 26.1%.据北京市环卫政府工作报告(《关于生活垃圾处理工作进展情况的报告》,http://www.bjrd.gov.cn/zt/sjchy/hywj/201007/t20100730_57056.html),2015 年北京市生活垃圾分类收集率指定为 70%,焚烧\生化\填埋处理比例为 4:3:3,将优化模式与北京市 2015 年垃圾规划处理进行对比,可得 2015 年规划模式在资源、能源投入、温室气体排放、资源化效果 3 方面都次于优化模式(表 7).因此,建议 2015 规划模式可按照该研究结果进行调整.

表 7 生活垃圾低碳优化处理模式与规划模式对比

Table 7 Comparison between low-carbon optimization model and planning model

垃圾处理模式	能源/资源投入 /($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$)	温室气体排放量 /($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$)	资源化率
优化模式	41.10	109.14	26.1%
2015 规划模式	58.59	151.98	25.6%

5 结论(Conclusions)

1) 本文针对垃圾综合处理, 提出低碳处理模式的优化方法, 并以北京市为例对垃圾处理全过程的资源、能源消耗与温室气体排放做了统计和核算, 结合资源化率, 得到垃圾处理低碳优化措施为降低填埋比例, 同时提高堆肥和焚烧比例. 在相关约束条件下, 计算得到资源、能源投入小, 资源化率最高, 温室气体排放少的无害化处理比例, 填埋、焚烧与堆肥比例为: 23%:25%:52%. 与北京市 2015 年垃圾处理规划进行相比, 优化模式在资源、能源投入、温室气体排放、资源化效果 3 方面都好于规划模式, 建议 2015 规划模式可按照该研究结果进行调整.

2) 随着经济和技术的发展, 环境保护要求的提高, 一些城市的生活垃圾处理由单一处理模式转为综合处理模式是发展趋势, 本文提出的低碳处理模式与评价方法对其有较大的适宜性, 不仅能够核算垃圾处理过程中资源、能源的投入与温室气体排放量, 也可兼顾资源化带来的温室气体减排协同效应, 找到城市垃圾处理发展的低碳策略.

3) 本文假定处理工艺的技术保持不变, 但从各处理工艺的温室气体排放潜值分析结果可发现, 要减少温室气体排放和提高资源化率, 堆肥处理要对堆肥气体有效处理, 焚烧过程充分利用热能供热发电, 填埋过程要收集提纯填埋气并回收能源, 减少 CH_4 排放. 如若考虑对单个处理工艺技术层面上的优化, 则需分析资源化的垃圾相对于原生垃圾的温室气体减排量, 具体有待开展后续的研究.

责任作者简介: 徐琳瑜 (1976—) 女, 副教授, 主要研究领域为城市生态过程, 环境规划、评价与管理. 出版专著 2 部, 教育部精品教材 1 部 (“十一五” 国家级教材计划), 发表学术论文 20 余篇. E-mail: xly@bnu.edu.cn.

参考文献 (References):

Amlinger F, Peyr S, Cuhls C. 2008. Greenhouse gas emissions from composting and mechanical biological treatment [J]. *Waste Management and Research*, 26:47-60

- Adrian K M, Mostafa A W, Rodrigo D. 2008. Modelling greenhouse gas emissions for municipal solid waste management strategies in Ottawa, Ontario, Canada [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 52: 1241-1251
- Bani S M, Yerushalmi L, Haghia F. 2010. Estimation of greenhouse gas generation in wastewater treatment plants-Model development and application [J]. *Chemosphere*, 78:1085-1092
- Batool S A, Chuadhry M N. 2009. The impact of municipal solid waste treatment methods on greenhouse gas emissions in Lahore Pakistan [J]. *Waste Management*, 29:63-69
- Chen T C, Lin C F. 2008. Greenhouse gases emissions from waste management practices using life cycle inventory model [J]. *Hazardous Materials*, 155: 23-31
- 黄江丽, 王泽, 王伟. 2004. 用生命周期评价北京市城市垃圾处理工艺 [J]. *能源环境保护*, 18(4):59-62
- Huang J L, Wang Z, Wang W. 2004. Research on life cycle assessment to the disposal techniques Beijing city municipal solid waste [J]. *Energy Environmental Protection*, 18(4):59-62 (in Chinese)
- 纪丹凤. 2010. 城市生活垃圾处理处置的生命周期与环境经济评价 [D]. 北京: 北京化工大学
- Ji D F. 2010. Life cycle assessment and environmental economic estimate of municipal solid waste disposal [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology (in Chinese)
- 李纪月, 徐德力. 2010. 打造低碳城市的路径选择-垃圾处理与生态平衡 [J]. *消费导刊*, 8:222-223
- Li J Y, Xu D L. 2010. Approach to low-carbon city [J]. *Consume guide*, 8:222-223 (in Chinese)
- 李萌, 杨志峰. 2004. 循环经济原则在城区固体废物处置规划中的应用 [J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 40(5):697-702
- Li M, Yang Z F. 2004. An Application of circular economy principles to solid waste disposition planning [J]. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science)*, 40(5):697-702 (in Chinese)
- Liamsangan G, Gheewala S H. 2008. The holistic impact of integrated solid waste management on greenhouse gas emissions in Phuket [J]. *Journal of Clean Prod*, 16(17):1865-1871
- Lombardi L, Carnevale E, Corti A. 2006. Greenhouse effect reduction and energy recovery from waste landfill [J]. *Energy*, 31:3208-3219
- Lou X F. 2008. A mathematical estimation of the impact of landfilling, composting and anaerobic digestion on greenhouse gas emissions-the total emissions accountability mode [D]. Honours Thesis: Murdoch University
- Lou X F, Nair J, Nair Jaya. 2009. The impact of landfilling and composting on greenhouse gas emissions — A review [J]. *Bioresource Technology*, 100:3792-3798

- 聂永丰. 2010. 低碳经济下的垃圾处理 [J]. 中国建设信息, 13:11-13
- Nie Y F. 2010. Municipal solid waste management in low-carbon economy [J]. Information of China Construction, 13:11-13 (in Chinese)
- Paolo S Calabrò. 2009. Green house gases emission from municipal waste management: The role of separate collection [J]. Waste Management, 29:2178-2187
- Papageorgiou A, Barton J R, Karagiannidis A. 2009. Assessment of the greenhouse effect impact of technologies used for energy recovery from municipal waste: A case for England [J]. Environmental Management, 90: 2999-3012
- 徐李娜. 2009. 武汉市生活垃圾处理系统生命周期评价[D]. 武汉: 武汉理工大学
- Xu L N. 2009. The life cycle assessment of Wuhan municipal waste [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology (in Chinese)
- 赵磊, 陈德珍, 刘光宇, 等. 2010. 垃圾热化学转化利用过程中碳排放的两种计算方法[J]. 环境科学学报, 30(8):1638-1646
- Zhao L, Chen D Z, Liu G Y, *et al.* 2010. Two calculation methods for greenhouse gas emissions from municipal solid waste thermo-chemical conversion and utilization processes [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 30(8):1638-1646 (in Chinese)
- Zhao W, Voet E V, Zhang Y F, *et al.* 2009. Life cycle assessment of municipal solid waste management with regard to greenhouse gas emissions: Case study of Tianjin, China [J]. Science of the Total Environment, 407:1517-1526
- 周菲. 2010. 杭州城市生活垃圾处理体系综合评价方法研究[D]. 长沙: 中南大学
- Zhou F. 2010. Comprehensive evaluation method for Hangzhou municipal solid waste disposal system [D]. Changsha: Central South University (in Chinese)