

两种典型农村生活垃圾处理处置模式的生命周期评价*

陈友媛¹, 魏来¹, 孙萍¹, 夏训峰²

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东省海洋环境地质工程重点实验室, 山东 青岛 266100;

2. 中国环境科学研究院水环境系统工程研究室, 北京 100012)

摘要: 为评价国内现有农村生活垃圾处理处置模式的环境影响并为其改进和发展提供决策依据, 以山东农村地区两种典型的生活垃圾处理处置模式——集中转运处置模式(模式 1)和分类就地处理模式(模式 2)为评价对象, 从垃圾收集运输到最终处理处置进行生命周期评价。结果表明, 模式 2 的环境影响总负荷较模式 1 降低 36.55%, 其中最终处理处置环节影响最大, 运输过程影响小。对模式 1 的改进建议是, 增加填埋场排放的 CH₄ 的回收利用, 减少对全球变暖的影响。对模式 2 的改进建议是收集堆肥渗滤液及控制 H₂S 等恶臭气体的释放, 减少富营养化影响和恶臭气体对周围居民人体健康影响。

关键词: 生命周期评价; 农村生活垃圾; 集中填埋; 就地堆肥; 环境影响负荷

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2018)10-082-08

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20170215

引用格式: 陈友媛, 魏来, 孙萍, 等. 两种典型农村生活垃圾处理处置模式的生命周期评价[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(10): 82-89.

CHEN You-Yuan, WEI Lai, SUN Ping, et al. The comparative life cycle assessment study of two typical disposal modes of rural living waste[J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(10): 82-89.

中国农村生活垃圾产量逐年递增, 2015 年为 1.07 kg/d^[1]。在发展中国家, 填埋为生活垃圾的主要处置方式, 但垃圾填埋会产生大量渗滤液和填埋气。在发达国家, 生活垃圾处理以分类处理和物质回收的方式为主, 具有更好的环境效应和经济效益^[2]。然而, 生活垃圾处理处置的研究多集中于城市地区垃圾终端处理技术的定量评价^[3-4], 而对于农村生活垃圾的定性研究^[1,5], 鲜有农村生活垃圾处理处置对于环境污染的定量研究报道。

国际标准化组织(ISO)提出生命周期评价(LCA)方法, 可用于农村生活垃圾从收集到最终处置环节的多种潜在环境影响的综合评价。环境影响评价标准以固废系统和技术的环评价(EASEWASTE)模型中的环境影响类型为主^[6], 主要为全球变暖、富营养化、光化学臭氧合成和酸化, 少数研究涉及生态毒性、污染水资源、致癌物等影响类型^[7]。LCA 研究使用 1 t 垃圾作为评价功能单元^[8], 从生命周期角度, 对比不同垃圾处理方式^[9-10]、不同污染控制工艺^[11]、不同工艺参数^[12]等, 评价它们在环境、能源和经济等方面的影响。由于我国缺少较为完备的农村生活垃圾数据库, 且不同地

区的垃圾管理系统对当地条件依赖强烈, 限制了 LCA 结果的普遍适用^[13-14]。因此, 利用 LCA 方法首先对我国农村生活垃圾的处理处置模式进行环境影响评价, 可因地制宜为我国农村生活垃圾管理的改进和发展提供参考依据。

中国城镇化农村地区普遍实行生活垃圾“统一管理、集中清运、定点填埋”模式, 部分偏远、分散的农村地区实行垃圾分类收集、就地堆肥处理模式^[15]。本研究采用 LCA 方法对这两种典型农村生活垃圾处理处置模式进行环境影响评价, 找出两种模式的主要环境影响类型及其影响因子, 以期为中国农村生活垃圾处理处置模式的改进提供指导依据。

1 农村生活垃圾特性

本文以青岛黄岛区农村的生活垃圾为例进行评价研究。目前黄岛区农村生活垃圾通过混合收集, 经区域中转站统一运转到固体废弃物综合处理场。根据调研结果, 得到调查区 2015 年农村生活垃圾成分比例(见表 1)。

* 基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07103-007)资助

Supported by Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment(2015ZX07103-007)

收稿日期: 2017-05-04; 修订日期: 2017-06-19

作者简介: 陈友媛(1966-), 女, 博士, 副教授。E-mail: youyuan@ouc.edu.cn

表 1 青岛市黄岛区农村生活垃圾组成
Table 1 The composition of rural living waste in Huangdao district, Qingdao

类别 Category	厨余垃圾 Kitchen waste	不可回收垃圾 Non-recyclable waste	可回收垃圾 Recyclable waste					其他垃圾 Other waste
成分 Composition	饭菜等	砖瓦、灰土等	纸	塑料	织物	金属	玻璃	电池、药品等
比例 Proportion/%	54.0	26.0	4.0	12.0	2.0	1.0	0.4	0.6

2 生命周期评价

山东农村地区具有两种典型的生活垃圾处理处置模式:适用于城乡结合地区的集中转运处置模式,和适用于偏远、分散农村地区的分类就地处理模式^[16]。利用生命周期评价(LCA)对这两种模式的物质和能源的输入、输出及相应环境排放物进行识别和量化,从而提出污染物排放少、环境影响小的垃圾处理模式。根据

ISO14040 标准,生命周期评价分 4 阶段:确定目标与边界,清单分析,影响评价和解释^[17]。

2.1 目标定义与边界确定

目标:以 1 t 农村生活垃圾为评价功能单元,研究从垃圾收集到最终处理处置过程的资源消耗与环境排放,为农村生活垃圾处理处置管理体系提供决策依据。

两种模式的系统边界如图 1。

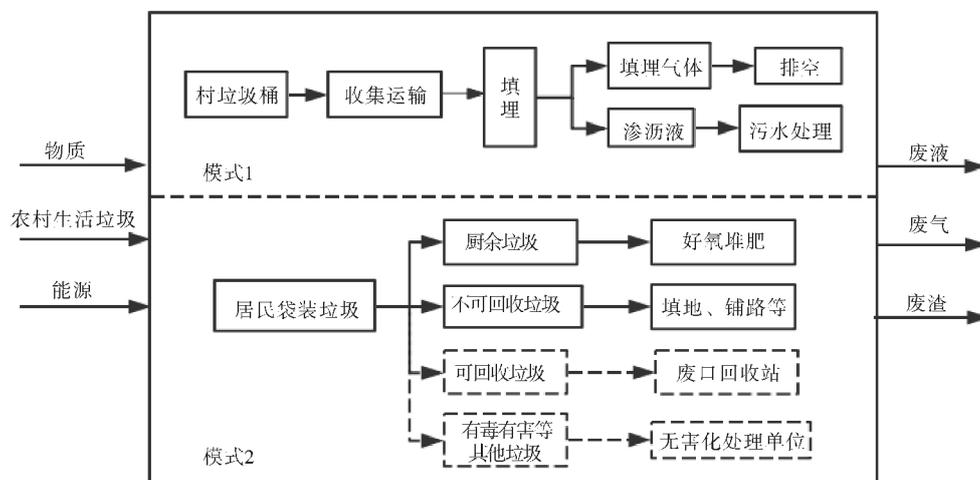


图 1 两种模式的系统边界

Fig. 1 The system boundary of the two modes

模式 1:集中转运处置模式。农村生活垃圾经村户投至村垃圾桶后,由车辆收集转运至区域填埋场,填埋覆盖率 100%。填埋场配有渗滤液收集处理设施,但无填埋气体收集控制与能量再生装置,故填埋气体可直接排入空气,渗滤液经处理达标后排放至自然水体中。

模式 2:分类就地处理模式。农村生活垃圾源头分类后,厨余等可降解垃圾在降解池进行高温好氧堆肥,砖瓦等不可回收垃圾运至低洼处填地或铺路,塑料、金属等可回收垃圾送往回收站,电池、药物等有害垃圾送至有资质单位进行无害化处理。该模式中可回收垃圾和有毒有害垃圾的处理过程不包括在评价范围内。

2.2 数据清单分析

生命周期评价清单(LCAD)数据来源于国内外文献、中国统计年鉴、调查区农村垃圾中转站等数据资料,污染物排放及能源消耗清单数据基于经验模型计算及数据整合估算结果。

2.2.1 模式 1 中填埋单元 填埋后产生的主要污染物为填埋气和垃圾渗滤液。填埋气主要包含 CH_4 、 CO_2 、 H_2S 等成分,其中, CH_4 的产生量采用政府间气候变化专门委员会(IPCC)推荐的公式(1)和(2)^[18],根据表 1 中垃圾各组分比例进行计算,用 DOC 来表示。其他气体组分的产生量按填埋气体主要组成的典型比

例值^[19](见表2)进行计算。1 t 农村生活垃圾填埋气排放量见表2。

$$DOC = 0.4A + 0.17B + 0.15C + 0.3D \quad (1)$$

式中:DOC为可降解有机碳含量(%);A为垃圾中纸类和织物所占比例(6.00%);B为庭院垃圾所占比例(0%);C为厨余垃圾所占比例(54.00%);D为竹木所占比例(0%)。通过计算,可降解有机碳含量DOC为10.50%。

$$CH_4 = SW \times 1000 \times \eta \times DOC \times r \times (16/12) \times 0.6 \quad (2)$$

式中:CH₄垃圾填埋场的甲烷排放量(kg);SW垃圾量

(评价功能单元,1 t);η垃圾填埋率(%),取1;DOC为10.50%;r垃圾中可降解有机碳的分解百分率(IPCC推荐值77%)。通过计算,CH₄排放量为64.68 kg/t。

垃圾渗滤液的产生量主要受垃圾组分、地域差异的影响,一般为垃圾量的0%~15%^[19],本文取10%,渗滤液密度为1.01 kg/L^[20],则1 t垃圾产生100.00 L渗滤液,由调研所得填埋场污水排放检测浓度估算出1t农村垃圾液体中污染物含量(见表2)。

模式2中砖瓦、灰土等不可回收组分进行填坑或修路,认为该部分对环境不产生气、液污染。

表2 模式1 填埋单元污染排放

Table 2 The pollution emissions in the unit of the landfill of Mode 1

气体成分 Gas element				液体成分 Liquid element			
成分 Element	气体占比 The gases proportion/%	典型值 Typical values/%	排放量 Emissions /kg · t ⁻¹	成分 Element	* 出水水质标准 Water quality standard/mg · L ⁻¹	检测结果 Test result /mg · L ⁻¹	排放量 Emissions /kg · t ⁻¹
CH ₄	45~60	55.0	64.68	COD	100.00	108.80	1.09E-02
CO ₂	40~60	41.9	49.27	汞	0.001	0.000 04	4.00E-09
N ₂	2.0~5.0	2.0	2.35	镉	0.01	0.050	5.00E-06
O ₂	0.1~1.0	0.5	0.59	铅	0.10	0.050	5.00E-06
H ₂ S	0.0~0.1	0.2	0.24	铬	0.10	0.021	2.10E-06
NH ₃	0.0~1.0	0.2	0.24	砷	0.10	0.000 1	1.00E-08
H ₂	0.0~0.2	0.1	0.12	氨氮	25.00	37.80	3.78E-03
CO	0.0~0.2	0.1	0.12	TN	40.00	84.70	8.47E-03
				TP	3.00	1.03	1.03E-04

注:*《生活垃圾填埋场控制标准》(GB16889—2008)。

Note: * is 《Standard for Pollution Control on the Landfill Site of Municipal Solid Waste》(GB16889—2008).

2.2.2 模式2中堆肥单元 模式2堆肥处理单元中,易腐的厨余垃圾进行高温好氧堆肥,释放出CO₂、NH₃等气体及渗滤液体。按照好氧堆肥过程固体降解规律,堆肥物质中2/3的C转化成CO₂,13.16%的N转化为NH₃,通过式(3)和(4)对CO₂和NH₃产量进行计算^[21]。

$$Q_{CO_2} = Q \times P_0 \times (P_C - P_{Cf}) \times 2/3 \times 44/12 \quad (3)$$

$$Q_{NH_3} = Q \times P_0 \times P_N \times 13.16\% \times 17/14 \quad (4)$$

式中:Q_{CO₂}为堆肥产生的CO₂量(计算为50.42kg);Q_{NH₃}为堆肥产生NH₃量(计算为0.39 kg);Q为混合垃圾量(评价功能单元为1 t,即1 000 kg);P₀为堆肥垃圾比例(54.00%);P_C、P_{Cf}和P_N分别代表堆肥垃圾C元素比例(%),固定碳比例(%)和N元素比例(%),分别为7.52%、3.70%和0.45%(见表3)^[22]。

表3 模式2 厨余垃圾元素比例

Table 3 The food component proportion of Model 2 /%

元素分析(湿基) Elemental analysis (Wet basis)				
C	H	O	N	S
7.52	0.99	6.21	0.45	0.05

好氧堆肥过程排放的气体中NH₃、NO_x、H₂S、SO₂的质量比为396.8:0.5:7.3:1^[21],据此计算各气体产生的理论值。堆肥渗滤液中TN、COD和TP排量参考Abduli等的研究数据^[10],主要重金属排量参考我国城市1 t厨余垃圾好氧堆肥研究结果^[22],液体污染排量参考值换算为本研究中1 t农村生活垃圾中54.00%的厨余垃圾,即参考值的0.54倍。堆肥单元的气、液污

染排放结果见表 4。

表 4 模式 2 堆肥过程产生的污染排放

Table 4 The pollution emissions in the process of the compost of Model 2 /kg · t⁻¹

气体成分 Gas element		液体成分 Liquid element	
成分 Element	排放量 Emissions	成分 Element	排放量 Emissions
CO ₂	5.04E+01	TN	8.75E-01
NH ₃	3.90E-01	COD	2.30E-03
NO _x	4.91E-04	TP	3.63E-03
H ₂ S	7.17E-03	汞	3.27E-07
SO ₂	9.83E-04	镉	4.73E-07
		铅	4.46E-05
		铬	8.86E-05
		铜	4.74E-06

2.2.3 交通运输单元 根据调查区 2015 年交通运输数据,全年共收集转运农村生活垃圾 3.14×10^5 t,垃圾收转率 100%,运输车辆安全行驶 604.8×10^6 km,则垃圾运输油耗为 8.079 L/t。垃圾运输过程消耗柴油,其排污系数^[24]及污染物排放量见表 5。

表 5 车辆运输阶段污染物排放

Table 5 The pollution emissions in the process of transportation

成分 Element	CH ₄	CO ₂	NO _x	CO	SO _x	HC(烃类)	N ₂ O
系数 Coefficient/g · km ⁻¹	0.007	183.298	0.804	1.000	0.233	0.096	0.007
模式 1 Model/kg · t ⁻¹	1.35E-04	3.53E+00	1.55E-02	1.92E-02	4.48E-03	1.85E-03	1.35E-04
模式 2 Mode2/kg · t ⁻¹	3.50E-05	9.17E-01	4.02E-03	5.00E-03	1.17E-03	4.80E-04	3.50E-05

标准化过程即对环境影响类型的相对大小提供一个可比较的标准,参考 LCA 模型 EASEWASTE 中 5 种环境影响类型的人均年当量潜值作为基准值^[7](见表 6),对各影响类型的环境影响潜值进行标准化处理。其含义相当于处理 1 t 农村生活垃圾的环境影响潜值相对于人均年当量潜值的大小。标准化结果等于环境影响潜值与基准值的比值。

加权评估确定各种环境影响类型的权重,对标准化后的环境影响潜值赋权重值,得到各类型的环境影响负荷,可反映评价单元的环境影响大小。权重值的选取采用专家打分法(特尔斐法),通过问卷调查,统计

模式 2 中由于只有 26.00% 的灰土砖瓦等不可回收垃圾需要运输至填坑、修路,按照与模式 1 运输相同距离来计算,认为模式 2 运输过程污染排放量对应为模式 1 的 26.0%,结果见表 5。

2.3 生命周期影响评价

垃圾处理处置过程产生的污染物具有一定的潜在环境影响,确定全球变暖、酸化、富营养化、光化学臭氧合成和生态毒性共 5 种环境影响类型,对两种农村生活垃圾处理模式进行评价。影响评价过程分为特征化、标准化和加权评估 3 个步骤。

特征化是对环境影响潜值计算的过程。同类污染物通过固定的当量系数转换为其参照物的环境影响潜力,根据荷兰 LCA 模型数据库 CML-IA 确定各污染物的生态毒性当量因子。全球变暖以 CO₂ 为参照物,CH₄、CO 和烃类对应于参照物 CO₂ 的当量因子分别为 25.2 和 3.300;环境酸化以 SO₂ 为参照物,H₂S、NH₃ 和 NO_x 对应于参照物 SO₂ 的当量因子分别为 1.88、1.88 和 0.7;富营养化以 NO₃⁻ 为参照物,TP、COD 和 TN 的当量因子分别为 3.06、2.3 和 3.42;光化学臭氧合成以 C₂H₄ 为参照物,CH₄、烃类和 CO 的当量因子分别为 0.006、0.003、0.027;生态毒性以 1,4-DCB(1,4-二氯苯)为参照物,重金属 Pb、Cu、Cr、Hg、Zn 和 Cd 的当量因子分别为 17.5、20.8、8.49、5.300、5.71 和 2.910。

得到 9 位相关专家针对每种环境影响类型的平均权重值(见表 6),从中看出,专家普遍对生态毒性给予了较高关注。

3 结果与讨论

3.1 两种模式的评价结果与分析

两种农村生活垃圾处理处置模式生命周期的影响评价结果如表 7 所示。对于 5 种环境影响类型总负荷,模式 1 为 5.28×10^{-2} ,模式 2 为 3.35×10^{-2} ,模式 2 的总环境影响负荷比模式 1 降低 36.55%。

表6 生命周期影响评价参数
Table 6 The parameters of LCA

影响类型 Impact category	全球变暖 Global warming	酸化 Acidification	富营养化 Eutrophication	光化学臭氧合成 Photochemical ozone formation	生态毒性 Ecological toxicity
基准值 Reference value	8.70E+03	7.40E+01	1.19E+01	2.50E+01	3.52E+05
基准值量纲 Dimension/a	kg CO ₂ eq.	kg SO ₂ eq.	kg NO ₃ ⁻ eq.	kg C ₂ H ₄ eq.	kg 1,4-DCB eq.
权重值 Weighting value	2.40E-01	2.40E-01	1.10E-01	1.10E-01	3.00E-01

表7 两种模式生命周期的影响评价结果
Table 7 The LCA results of two modes

影响类型 Impact category	全球变暖 Global warming	酸化 Acidification	富营养化 Eutrophication	光化学臭氧合成 Photochemical ozone formation	生态毒性 Ecological toxicity	环境影响负荷 Environmental impact load
模式1 Mode1	4.62E-02	3.03E-03	5.02E-04	1.72E-03	1.26E-03	5.28E-02
模式2 Mode2	1.46E-03	2.68E-03	2.77E-02	6.01E-07	1.61E-03	3.35E-02

模式1中,由于填埋气体未经处理直接排空,造成大量CO₂、CH₄等温室气体排放到环境中。由表7可知,全球变暖的环境影响负荷最大,为该模式主要环境影响类型。这同其他地区城市生活垃圾填埋处置的LCA研究结果^[25]一致。全球变暖的主导污染物是CH₄和CO₂,对比表2和表5可知,模式1中填埋单元为导致全球变暖的主要影响单元。其中,CH₄和CO₂分别占气体排放量的55.00%和41.89%,CH₄的影响因子是CO₂的25倍,故CH₄环境影响潜值较大。据估计,全球垃圾处置区每年产生的CH₄量约为总温室气体排放量的3%~4%^[26],故有效控制填埋产生的CH₄量对减缓环境影响具有重要意义。该模式中酸化、富营养化、光化学臭氧合成和生态毒性的环境影响负荷较小,与全球变暖相差2~3个数量级。

对于模式2,由表7可知,富营养化的环境影响负荷最大,由于无堆肥液体污染控制措施,富营养化成为最大环境影响类别,这与Vahidi等的研究结论一致^[27]。虽然模式1中填埋垃圾组分多于模式2,但垃圾填埋场配有水平防渗系统,并按照《生活垃圾填埋场控制标准》(GB16889—2008)对其进行处理,大大降低了污染物的外排。虽然在该模式中,堆肥释放的CO₂导致的全球变暖及H₂S、NH₃导致的酸化影响负荷较小,但H₂S、NH₃为恶臭气体的主要成分,对附近居民健康产生不利影响,同时NH₃的释放造成堆肥产品氮素损失^[28],故恶臭气体应予以减排控制。由于缺少具体数据统计,未将堆肥后续利用环节纳入评价范围,但由于农村地域所具有的农耕及农业生产的功能性,及

农村生活垃圾堆肥的现实应用情况,可将其作为有机肥来替代化肥^[12]、泥炭^[29]等改良土壤、增加作物营养。若采用农村生活垃圾堆肥生产的有机肥来替代化肥,其生命周期的能耗、全球变暖潜力、酸化潜力、富营养化潜力方面均大幅降低^[30]。

从生命周期角度分析可知,填埋单元和堆肥单元产生的环境影响负荷较大,而运输中转单元的环境影响负荷占总影响负荷的比例不足1%,这可能由于在堆肥和填埋单元使用理论模型计算污染物产生量,而使用实际统计数据计算运输过程污染排放量,导致两者结果差异悬殊,但该差异趋势与Abduli等^[10]的研究结果一致。因此,在农村生活垃圾管理决策中可适当降低垃圾运输过程对于整体环境影响的顾虑。

3.2 两种模式综合影响比较分析

垃圾分类就地处理模式可一定程度上实现农村生活垃圾资源化和减量化,然而堆肥处理具有一定劣势,如成本投入高、统一管理的难度增加等。故除了全球变暖、酸化等已评价的环境影响,还需对其他影响因素进行综合分析,为两种模式的对比提供更全面的参考依据。两种模式多因素影响的比较分析^[31]如表8所示。

通过表8中两种模式的对比可以看出,农村生活垃圾运用集中转运处置模式(模式1)的优势在于填埋技术经验丰富、对垃圾性质要求较低、填埋沼气可进行能源利用、臭气排放可控性较强、工程投资及运行成本均较低、且运行管理较容易;分类就地处理模式(模式2)的优势在于操作安全性较高、选址较易、资源回收利用性强、对地下水污染影响较小。

表 8 两种模式多因素影响比较
Table 8 Comparison of multi-factor influence of the 2 modes

	模式 1 Model1	模式 2 Mode2
适用范围 Application area	城乡结合、分布集中的农村	偏远、分布分散的农村
适用条件 Application condition	垃圾组分无严格要求	垃圾中可降解有机物含量大于 40%
产品 Production	有沼气回收可作发电等利用	视农作物品种和产品效益而定
资源利用 Resouce utilization	恢复土地或再生土地资源	用作农肥和回收部分物资
地表水污染 Surface water pollution	可采用防止污染的方法	采取措施后无影响
地下水污染 Groundwater pollution	可采取防渗措施	污染可能性小
大气污染 Air pollution	可用导气、覆盖等措施	有轻微气味
土壤污染 Soil pollution	填埋场区域	需控制堆肥的有害物质
管理水平 Management requirement	一般	较高
* 单位投资 Investment cost	1.0	>2.0~3.0
* 处理成本 Treatment cost	1.0	1.5

注: * 投资比例及处理成本比例, 均以模式 1 为 1.0 计。

Note: * is investment cost and processing cost are both calculated on the base of those of mode 1, set as 1.0.

3.3 环境影响保护措施

根据评价结果表 7 可知, 模式 2 的环境影响负荷小于模式 1。对模式 1 中填埋场排放的 CH_4 和 CO_2 进行回收利用可以减少全球变暖潜力, 是减缓环境负荷的关键。模式 2 的关键则是收集堆肥渗滤液, 并控制恶臭气体的排放。针对填埋气体回收和垃圾渗滤液收集提出建议如下:

(1) 针对调查区垃圾填埋场无填埋气体回收利用装置, 可通过在填埋场增加土壤上覆层的方法, 使大量的 CH_4 在土壤层中转化为 CO_2 ^[8]。土壤中大量存在甲烷氧化菌群, 可利用 CH_4 作为自身碳源, 将其转化成 CO_2 。研究表明, 土壤覆盖层中 CH_4 的氧化效率的平均值为 $(36 \pm 6)\%$ ^[32]。 CH_4 的全球变暖效率是 CO_2 的 20~32 倍, 富含有机质的土壤覆盖层可大幅减排 CH_4 , 降低填埋对全球变暖的贡献^[33]。或参考城市垃圾卫生填埋场^[34], 可在村镇条件允许的情况下, 通过在填埋场安装填埋气发电系统进行能量的回收利用。不仅可降低填埋气带来的全球变暖效应, 还可以提供清洁可再生资源, 缓解部分区域能源紧缺的问题。

(2) 通过在垃圾堆肥处安装衬底、硬化地面或添加堆肥渗滤液收集系统, 降低 COD 及氨氮的外排, 减少富营养化污染。通过在堆肥时投放菌糠、锯末、玉米秸秆等辅料, 降低 NH_3 、 H_2S 等恶臭气体的排放, 同时减少总氮、总硫的流失^[35]。

(3) 当厨余垃圾量接近农村生活垃圾总量的 50%, 可进行分类堆肥处理, 并考虑将肥料应用于农业领域。模式 1 转变为模式 2, 运输源头上减少了垃圾总量, 降低了垃圾运输成本, 缓解最终处置压力; 也可充分利用部

分农村所具有的农户畜牧养殖业独特优势, 通过家畜内化餐厨有机垃圾, 在收集环节源头上大量减少厨余垃圾的处理量。

4 结论

(1) 模式 1 的总环境影响负荷为 5.28×10^{-2} , 模式 2 为 3.35×10^{-2} , 所以从 5 种环境影响总负荷角度考虑, 模式 2 优于模式 1。5 种环境影响类型中, 模式 1 的主要环境影响是全球变暖, 模式 2 为富营养化。且两个模式垃圾处理处置单元的环境影响负荷较大, 收集运输单元较小。

(2) 建议通过在填埋场增加土壤覆盖层, 或安装填埋气回收发电系统, 降低甲烷的排放量以减小填埋气体造成的全球变暖效应, 通过在堆肥处安装渗滤液收集系统降低液体污染排放, 以减小堆肥液体造成的富营养化效应, 通过添加菌糠等辅料降低恶臭气体的排放。

参考文献:

- [1] Zeng C, Niu D, Zhao Y H. A comprehensive overview of rural solid waste management in China[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2015, 9(6): 949-961.
- [2] Yay A S E. Application of life cycle assessment (LCA) for municipal solid waste management: a case study of Sakarya[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 94: 284-293.
- [3] 王希超, 丁世刚, 吕艳菲. 基于全生命周期对垃圾焚烧技术的评价[J]. *能源与环境*, 2016(1): 76-78.
Wang X C, Ding S G, Lv Y F. Evaluation of waste incineration technology based on the full life cycle[J]. *Energy and Environment*, 2015, 94: 284-293.
- [4] 陈冰, 刘晶昊, 邝达. 生活垃圾综合处理模式生命周期评价[J].

- 环境工程, 2011, 29(1): 102-106.
- Chen B, Liu J H, Di D. Life cycle assessment of comprehensive treatment of domestic wastes [J]. Environmental Engineering, 2011, 29(1): 102-106.
- [5] 何品晶, 章骅, 吕凡, 等. 村镇生活垃圾处理模式及技术路线探讨 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 409-414.
- He P J, Zhang H, Lv F, et al. Pattern classification of methods and feasible technology route for household waste management in village and towns [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(3): 409-414.
- [6] Manfredi S, Christensen T H. Environmental assessment of solid waste landfilling technologies by means of LCA-modeling [J]. Waste Management, 2009, 29(1): 32-43.
- [7] Christensen T H, Bhandar G, Lindvall H, et al. Experience with the use of LCA-modelling (EASEWASTE) in waste management [J]. Waste Management & Research the Journal of the International Solid Wastes & Public Cleansing Association Iswa, 2007, 25(3): 257-62.
- [8] Damgaard A, Manfredi S, Merrild H, et al. LCA and economic evaluation of landfill leachate and gas technologies [J]. Waste Management, 2011, 31(7): 1532-1541.
- [9] Bohme M H, Le H A. Sustainable technology for using bio-waste in rural and urban regions in South- and South-East-Asia [J]. Procedia Cirp, 2016, 40: 547-550.
- [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(1-4): 487-498.
- [11] Damgaard A, Manfredi S, Merrild H, et al. LCA and economic evaluation of landfill leachate and gas technologies [J]. Waste Management, 2011, 31(7): 1532-1541.
- [12] Mihai F C, Ingrao C. Assessment of biowaste losses through un-sound waste management practices in rural areas and the role of home composting [J]. Mpra Paper, 2016, 107(10): 1-8.
- [13] Gentil E C, Damgaard A, Hauschild M, et al. Models for waste life cycle assessment: review of technical assumptions [J]. Waste Management, 2010, 30(12): 2636-2648.
- [14] Laurent A, Bakas I, Clavreul J, et al. Review of LCA studies of solid waste management systems—part I: lessons learned and perspectives [J]. Waste Management, 2014, 34(3): 573-588.
- [15] 鞠昌华, 朱琳, 朱洪标, 等. 我国农村生活垃圾处置存在的问题及对策 [J]. 安全与环境工程, 2015, 22(4): 99-103.
- Ju C H, Zhu L, Zhu H B, etc. Problems and countermeasures for the disposal of rural domestic wastes in China [J]. Safety and Environmental Engineering, 2015, 22(4): 99-103.
- [16] 车纯滨. 山东省农村保护现状调查与对策研究 [M]. 济南: 山东省环境保护厅, 2012.
- Che C B. The Investigation and Countermeasures of Rural Protection in Shandong Province [M]. Jinan: Shandong Environmental Protection Agency, 2012.
- [17] International Organization for Standardization 14040: 2006. Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework [S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 2006.
- [18] Lubetsky J, Steiner A B, Lanza R. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [R]. Washington: International Institute for Standardization, 2006.
- [19] 陈艾伦, 陈婵, 陶夏秋, 等. 长沙市生活垃圾卫生填埋生命周期评价 [J]. 环境科学与技术, 2013, 36(12): 390-395.
- Chen A L, Chen C, Tao X Q, et al. Life cycle assessment of sanitary landfill of domestic garbage in Changsha [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(12): 390-395.
- [20] 黄涛, 刘辉, 张西华. 温度对垃圾渗滤液污染特性影响试验研究 [J]. 水处理技术, 2010, 36(3): 70-73.
- Huang T, Liu H, Zhang X H. Experimental study on pollution character of landfill leachate [J]. Technology of Water Treatment, 2010, 36(3): 70-73.
- [21] 柴晓利, 张华, 赵由才. 固体废物堆肥原理与技术 [C]. 北京: 化学工业出版社环境科学与工程出版中心, 2005.
- Chai X L, Zhang H, Zhao Y C. Principles and Techniques of Solid Waste Composting [C]. Beijing: Chemical Industry Press Center for Environmental Science and Engineering, 2005.
- [22] 曲旭朝. 青岛市生活垃圾处理系统生命周期评价研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2011.
- Qu X Z. Study on Life Cycle Assessment of Urban Solid Waste Processing System in Qingdao [D]. Qingdao: Technological University, 2011.
- [23] 杜欣, 陈婷, 李欢, 等. 2种典型餐厨垃圾资源化处理工艺的环境影响分析 [J]. 环境工程学报, 2010, 4(1): 189-194.
- Du X, Chen T, Li H, et al. Environmental impact analysis of two typical restaurant garbage regeneration technologies [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(1): 189-194.
- [24] 胡志远, 谭丕强, 楼狄明, 等. 柴油及其替代燃料生命周期排放评价 [J]. 内燃机工程, 2007, 28(3): 81-84.
- Hu Z Y, Tan P Q, Lou D M, et al. Life cycle emission assessment of diesel and its alternative fuels [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2007, 28(3): 81-84.
- [25] 刘意立, 刘建国, 蔡博峰. 生命周期评价方法在生活垃圾填埋中的应用与问题分析 [J]. 环境工程, 2016, 34(2): 19-22.
- Liu Y L, Liu J G, Cai B F. Application and discussion of life cycle assessment method in municipal solid waste landfill [J]. Environmental Engineering, 2016, 34(2): 19-22.
- [26] Koroneos C J, Nanaki E A. Integrated solid waste management and energy production—a life cycle assessment approach: the case study of the city of Thessaloniki [J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 27(7): 141-150.
- [27] Vahidi H, Nematollahi H, Padash A, et al. Comparison of rural solid waste management in two central provinces of Iran [J]. Environmental Energy and Economics International Research, 2016, 1(3): 209-220.
- [28] 熊骏生, 魏姣姣, 陆倩, 等. 垃圾堆肥过程恶臭污染及其控制技术进展 [J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2015, 14(4): 405-411.
- Xiong J S, Wei J J, Lu Q, et al. Odor pollution from waste composting and its control technology: A review [J]. Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition), 2015, 14(4): 405-411.
- [29] Saer A, Lansing S, Davitt N H, et al. Life cycle assessment of a food waste composting system: environmental impact hotspots [J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 52(4): 234-244.

- [30] 籍春蕾, 丁美, 王彬鑫, 等. 基于生命周期分析方法的化肥与有机肥对比评价[J]. 土壤通报, 2012, 43(2): 413-417.
Ji C L, Ding M, Wang B X, et al. Comparative evaluation of chemical and organic fertilizer on the base of life cycle analysis methods[J]. Chinese Journal of Solid Science, 2012, 43(2): 413-417.
- [31] 新疆市政建筑设计研究院有限公司. 福海新区生活垃圾处理工程可行性研究报告[R]. 新疆: 新疆市政建筑设计研究院有限公司, 2010.
Xinjiang Municipal Design and Research Institute Co., LTD. Report on the Feasibility Study of Living Waste Disposal in Fuzhou [R]. Xinjiang: Xinjiang Municipal Design and Research Institute Co., LTD, 2010.
- [32] Cao Y, Staszewska E. Role of landfill cover in reducing methane emission[J]. Archives of Environmental Protection, 2013, 39(3): 115-126.
- [33] Abushammala M F M, Basri N E A, Elfithri R. Assessment of methane emission and oxidation at Air Hitam Landfill site cover soil in wet tropical climate[J]. Environmental Monitoring & Assessment, 2013, 185(12): 9967-9978.
- [34] Bueno G, Latasa I, Lozano P J. Comparative LCA of two approaches with different emphasis on energy or material recovery for a municipal solid waste management system in Gipuzkoa[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 51: 449-459.
- [35] 李赞, 袁京, 李国学, 等. 辅料添加对厨余垃圾快速堆肥腐熟度和臭气排放的影响[J]. 中国环境科学, 2017, 37(3): 1031-1039.
Li Y, Yuan J, Li G X, et al. Use of additive to control odors and promote maturity of municipal kitchen waste during aerobic composting[J]. China Environmental Science, 2017, 37(3): 1031-1039.

The Comparative Life Cycle Assessment Study of Two Typical Disposal Modes of Rural Living Waste

CHEN You-Yuan¹, WEI Lai¹, SUN Ping¹, XIA Xun-Feng²

(1. Key Laboratory of Marine Environmental Science and Ecology, Ministry of Education Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Environment and Geological Engineering, College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Laboratory of Water Environmental Systems Engineering, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China).

Abstract: For evaluating the environment impact of domestic existing disposal modes of rural living waste and offering the decision-making basis for the improvement and development of them, this study compares two typical domestic centralized waste treatment modes in the rural areas in the eastern part of the Shandong - unified collecting, transporting and landfill (Mode 1), and a combining mode of classification in situ and centralized treatment (Mode 2) to assess. The life cycle of the waste is divided into parts of collection, transportation, compression and final disposal and treatment, whose life cycle assessment of environmental emission is carried on in the study. Results show that through classification in situ compost processing, environmental impact load of Mode 2 can be 36.55% lower than Mode 1, and the greatest effect exists in the final disposal and treatment unit, but the waste transportation accounts for a small proportion of the overall environmental pollution. The advice for Mode 1 is to recycle the landfill methane and carbon dioxide emissions, to reduce global warming potential is the key to ease the environmental load, and the advice for Mode 2 is to collect the composting leachate and control the orders emissions, to decrease the impact of eutrophication and the affect of people's health nearby.

Key words: life cycle assessment; rural living waste; centralized landfill; on-site compost; environment impact load

责任编辑 庞 旻