

规模养猪场粪便堆肥处理生命周期评价实例分析

罗一鸣^{1,2}, 张丽丽¹, 李国学^{2*}, 吴迪梅¹, 袁京², 张卓毅¹, 刘佳¹

(1.北京市畜牧业环境监测站,北京 102200;2.中国农业大学资源与环境学院,北京 100193)

摘要:以北京郊区某规模化养猪场现有堆肥系统为例,运用生命周期评价方法,以养猪场现行堆肥工艺为参比,以4种不同翻堆频率条件下的条垛式堆肥工艺作为备选方案,对该养猪场粪便不同堆肥处理情景的环境影响进行系统对比分析。结果表明,每处理1 t新鲜猪粪的化石能源损耗潜力为80.8~221.5 MJ;堆肥氨挥发排放对系统总酸化效应和富营养化效应贡献率均达96%以上;CO₂和N₂O等温室气体排放对总温室效应的贡献分别为58%~88%和8%~35%。能源投入和气体排放是猪粪堆肥生命周期环境影响的关键因素,实践中应注重使用清洁能源,并结合工艺特点采用氨挥发与温室气体减排技术,减少堆肥生产过程的环境污染。

关键词:堆肥,生命周期评价,环境影响,粪便,规模化猪场

中图分类号:X713 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2014)11-2254-06 **doi:**10.11654/jaes.2014.11.026

A Case Study on Life Cycle Assessment of Pig Manure Compost Production in a Pig Farm

LUO Yi-ming^{1,2}, ZHANG Li-li¹, LI Guo-xue^{2*}, WU Di-mei¹, YUAN Jing², ZHANG Zhuo-yi¹, LIU Jia¹

(1.Beijing Monitoring Station of Animal Husbandry Environment, Beijing 102200, China; 2.College of Resource and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: We evaluated the environmental burdens of one existing composting system and four alternative composting systems with different turning frequencies in Beijing area using life cycle assessment (LCA). The results showed that resources consumption and atmospheric emissions played important roles in the environmental impacts of pig manure composting process. For these five composting options, fossil energy of 80.8 to 221.5 MJ was needed to compost one ton of pig manure. During composting, ammonia emissions contributed more than 96% to the acidification potential (AP) and eutrophication potential (EP). Carbon dioxide and N₂O from the pig farms contributed to about 58% to 88% and 8% to 35% of the total global warming potential, respectively. Of the alternative options, the options with turning frequency of 1 to 2 times per week with diesel-powered turning machine should be recommended for pig manure composting because of the lower environmental impacts.

Keywords: composting; life cycle assessment; environmental impact; pig manure; intensive pig farming

随着我国城市化进程的加快,城市近郊畜禽养殖业分布普遍密集,由于这些地区人口稠密、农业耕地稀少,多数存在畜禽粪便养分负荷较大的问题。以北京市顺义区为例,2012年顺义区生猪出栏总数达93.4万头^[1],仅一类畜种即已高于李伟等^[2]根据该区县现有适宜施用畜禽粪便的耕地面积测算的畜禽养殖最大

承载量30.2万头。过量的畜禽粪便若不能合理输出和消纳将造成一系列的环境污染,而高温好氧堆肥是处理畜禽粪便有效途径之一,且相比厌氧沼气发酵等液相处理方式更便于实现养分输出,缓解养殖区周边农田环境压力^[3-4]。典型规模化养殖场如何进行粪便堆肥化工艺方案的合理选择,尽可能减少堆肥过程中的二次环境污染,提高资源化效率,需在生产实践中深入探索。

生命周期评价法(Life cycle assessment, LCA)作为一种评估产品在整个生命周期体系中的所有投入及产出对环境造成潜在影响的方法,近年来也逐渐被国内外学者应用于生活垃圾管理^[5-7]和农业废弃物管理研究^[8-10]。周道曦等^[11]对生活垃圾高温静态堆肥过程的

收稿日期:2014-05-25

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD14B03, 2012BAD14B01);国家自然科学基金项目(41275161);现代农业产业技术体系北京市生猪产业创新团队建设项目(2014036240)

作者简介:罗一鸣(1984—),女,湖南衡东人,博士,研究方向为农业废弃物资源化与生命周期评价。E-mail:luoyiming@foxmail.com

*通信作者:李国学 E-mail:ligx@cau.edu.cn

环境影响进行了生命周期分析,并与垃圾焚烧典型工艺进行对比,为工艺决策提供依据;张颖等^[12]和籍春蕾等^[13]则运用生命周期评价法对规模化养牛场粪便可好氧和厌氧两种不同工艺进行环境影响对比。Praspongsa 等^[14]基于生命周期评价比较了养猪场废弃物的 12 种不同综合处理方式的环境影响,研究结果表明全球变暖潜势、水体富营养化和可吸入无机物是猪粪处理过程中最重要的环境影响因素。农业有机废弃物生化处理不同于一般工业产品生产体系,处理过程的污染物排放受原料种类和工艺条件的影响较大,针对好氧堆肥过程的生命周期系统分析尚处于起步阶段。Cadena 等^[15]的研究表明,堆肥过程的环境影响主要与现场堆肥工艺、能源投入和气体排放等因素相关,生命周期评价是可被用于分析堆肥环境影响和优选工艺的有效工具。

针对我国城市近郊区中小型规模化养殖场特点,系统分析典型养猪场粪便堆肥处理的环境影响对于促进规模化养殖场废弃物的科学管理具有重要现实意义。为此,本文以北京郊区某典型规模化养猪场堆肥设施为例,运用生命周期评价方法,对该养猪场现行堆肥处理过程的环境影响进行分析,并对对比评价不同工艺方案的环境影响,为典型养猪场粪便堆肥处理工艺优选提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 生命周期评价目标与范围

依照 ISO 14040—2006^[16]和 ISO 14044—2006^[17],采用生命周期评价法对比分析北京市郊区某养猪场粪便处理不同堆肥方案对电力、燃油等能源消耗,以及处理过程排放的污染物对环境造成的影响。研究的系统边界范围包括:堆肥原料和能源投入(不含运输);堆肥过程;堆肥产品输出和污染物排放。

1.2 功能单位

本研究选取的养猪场位于北京市郊区,2010 年出栏生猪总数 13 040 头,全年新鲜猪粪清出量约 4120 t。生命周期评价选取的功能单位为 1 t 新鲜猪粪。其他辅料投入、电力和燃料投入、产品输出、污染物排放均基于每处理 1 t 新鲜猪粪的对应值。

1.3 评估方法与标准

运算建模使用生命周期评价工具软件 Gabi 5(德国 PE-international)。环境影响评价选用 CML 2001(2010 年 11 月修订版)标准方法^[18,19]。该方法使用政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental panel on

climate change, IPCC)2007 年气候变化综合报告温室气体排放特征系数计算全球变暖潜势(Global warming potential, GWP)^[20]。本研究中评价涉及的主要环境影响类别如表 1 所示。

表 1 环境影响评价类别

Table 1 Category of environmental impacts(CML method)			
环境影响类别 Environmental impact	缩写 Abbreviation	单位 Unit	
非生物资源损耗(以化石能源计)	ADP-f	MJ	
酸化效应	AP	kg SO ₂ 当量	
富营养化效应	EP	kg 磷酸盐当量	
淡水水生生态毒性潜值	FAETP	kg DCB 当量	
全球变暖潜势(100 年)	GWP	kg CO ₂ 当量	
人体毒性潜值	HTP	kg DCB 当量	
臭氧层损耗潜值	OLDP	kg R11 当量	
光化学臭氧生成潜势	POCP	kg 乙烯当量	
陆生生态毒性潜值	TETP	kg DCB 当量	

1.4 堆肥设施现状

该养猪场现有堆肥设施采用槽式堆肥工艺,堆肥原料为猪粪和玉米秸秆,年处理物料总量约 5000 t。场内机械包括:自走式槽式翻堆机一台,工作功率 30 kW,处理能力 220 m³·h⁻¹;液压铲车一台,铲斗容积 1.5 m³,工作油耗 10 L·h⁻¹;秸秆粉碎机一台,工作功率 7.5 kW,处理能力 60 m³·h⁻¹。堆肥作业区均为水泥硬化地面,顶棚防雨。

1.5 方案设计

以养猪场现行堆肥工艺为方案 1,周期 42 d,翻堆频率每周 2 次。另以 4 种不同翻堆频率(每周 2 次、每周 1 次、每两周 1 次和不翻堆)条件下的条垛式堆肥工艺作为不同处理方案,即备选方案 2、3、4、5,堆肥周期不变。备选方案 2 至方案 5 的翻堆机械参数参照巴库斯(BACKHUS)14.28 CN 条垛式翻堆机参数(处理能力 250 m³·h⁻¹,工作油耗 10 L·h⁻¹),其他所需铲车与粉碎机等机械参数与现行工艺方案 1 相同。

1.6 数据监测

现行堆肥处理过程(方案 1)的物料平衡和气体排放采用现场监测数据,于 2011 年 5 月至 10 月进行气体和堆肥样品采集。备选方案 2 至方案 5 堆肥处理过程的物料平衡和气体排放采用发酵仓中试获取的试验数据,单个发酵仓尺寸为 1.0 m×0.8 m×1.5 m(长×宽×高),体积为 1.2 m³,模拟条垛中部氧气最为缺乏的部分。现行工艺(方案 1)与各备选工艺(方案 2 至方案 5)条件下的温室气体和 NH₃ 均采用静态箱法采集气体样本^[21-22],平均每 1~2 d 测定 1 次,每个监测日

分三个时段各采集三个平行样品,每次采样时长为 30 min,取采样时间内的浓度平均值作为当日单位时间排放通量。 CH_4 和 N_2O 用安装有火焰电离检测器(FID)和电子捕获检测器(ECD)的气相色谱(北分瑞利 SP-3420A)测定。 NH_3 样本经大气采样器用 2%的硼酸吸收,标准浓度的稀硫酸滴定。 CO_2 采用便携式气体检测仪(Geotech GA2000)直接测定。堆肥样品依照农业行业标准《NY 525—2012 有机肥料》中标准方法测定堆肥起始和结束样品含水率、总氮(TN)和总有机碳(TOC)。

2 结果与分析

2.1 生命周期评价清单分析

清单分析使用的试验所得主要气体损失率结果如表 2 所示。其中方案 1 损失率为 3 个堆肥周期监测平均值;方案 2 至方案 5 损失率为夏季和冬季 2 次中试试验监测平均值。结合物料平衡与设施能耗分析,经过生命周期评价清单数据计算,5 种方案的输入和输出清单如表 3 所示。输入清单中各方案能源消耗量

表 2 不同堆肥工艺方案的碳、氮损失(%)
Table 2 Carbon and nitrogen losses during composting(%)

项目	方案 1 Option 1	方案 2 Option 2	方案 3 Option 3	方案 4 Option 4	方案 5 Option 5
TOC	100	100	100	100	100
TOC 损失 TOC loss	64.2	63.7	63.6	63.4	53.9
CO_2 -C 损失 CO_2 -C loss	48.0	47.6	47.7	47.5	39.7
CH_4 -C 损失 CH_4 -C loss	0.20	0.11	0.14	0.25	0.49
TN	100	100	100	100	100
TN 损失 TN loss	49.8	36.0	32.2	30.0	18.2
NH_3 -N 损失 NH_3 -N loss	40.4	39.4	29.5	27.9	12.8
N_2O -N 损失 N_2O -N loss	0.76	0.83	0.81	1.05	3.93

依照设备处理总量和单位处理量的额定工作能耗计算所得。输出清单中堆肥气体排放仅考虑 4 种列入监测范围的气体,因此环境影响评价中不包括其他少量有机臭气等排放可能造成的环境影响。此外,各方案堆肥混合原料鲜基含水率约为 65%,现场堆肥过程和中试试验中未收集到渗滤液,故本研究未将渗滤液列入输出清单。

2.2 环境影响评价

生命周期评价的环境影响评价是对数据清单分析中所涉及的资源耗竭以及污染物排放对环境所造成的压力进行定性和定量评价的过程^⑥。本研究使用 Gabi 5 软件对不同方案堆肥系统进行建模,各方案主要模块组成如图 1 所示。因处理的废弃物来自于设施所在农场,运算中未考虑原料运输环节造成的资源消耗。模型中电力和柴油投入量仅为堆肥设施场地内产生的能源消耗。电力和柴油从生产到使用环节的整个生命周期所造成的资源消耗和相应的环境污染均纳入模型运算项目中。5 种处理方案的主要环境影响潜值计算结果如表 4 所示。

由表 4 可以看出,除臭氧层损耗潜值(OLDP)外,方案 2、方案 3 和方案 4 的各项环境影响潜值均不同程度地低于方案 1;除全球变暖潜势(GWP)外,方案 5 的环境影响也比方案 1 较低。因本研究仅考虑了堆

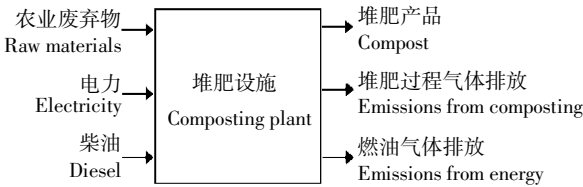


图 1 堆肥设施生命周期评价模型
Figure 1 LCA modules of composting process

表 3 不同堆肥工艺方案生命周期清单
Table 3 Life cycle inventory of composting modules

输入-输出 Input-Output		方案 1 Option 1	方案 2 Option 2	方案 3 Option 3	方案 4 Option 4	方案 5 Option 5
输入 Input	堆肥原料 Raw materials					
	猪粪 Pig manure/t	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	玉米秸秆 Corn stalks/t	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
	能源 Energy					
输出 Output	电 Electricity/kWh	4.39	0.60	0.60	0.60	0.60
	柴油 Diesel/L	1.39	2.50	1.95	1.67	1.39
	堆肥产品 Compost product/t	0.305	0.309	0.308	0.310	0.354
	气体挥发 Emissions					
	CO_2 /kg	296	293	294	293	244
	CH_4 /kg	0.448	0.224	0.314	0.560	1.098
	NH_3 /kg	4.00	3.90	2.92	2.76	1.27
	N_2O /kg	0.097	0.106	0.104	0.135	0.504

肥过程的 CO_2 、 CH_4 、 NH_3 和 N_2O 排放,各方案的环境影响评价结果中,与有机气体和氮氧化物排放密切相关的人体毒性潜值(HTP)、生态毒性潜值(FAETP、TETP)及臭氧层相关环境影响(OLDP、POCP)均主要来自电力和柴油的能源消耗,堆肥过程中上述环境影响可能被低估。因此,仅分析以下几项主要环境影响因素。

2.2.1 化石能源消耗

各方案化石能源消耗的差别主要在于方案 1 采用了电力槽式翻堆机,其他方案使用柴油动力的条垛式翻堆机。由表 4 化石能源消耗对比结果可以看出,除通过减少翻堆频率降低能源消耗外,在同等翻堆频率条件下,方案 2 与方案 1 相比可节省约 42% 的非可再生资源消耗。这主要是由于我国北方地区目前使用的电能仍以火力发电为主,需要消耗大量的煤炭资源。如图 2a 所示,本研究方案 1 处理 1 t 猪粪造成的化石能源消耗中,煤消耗约为 157 MJ,占该方案能源消耗总量的 70.9%,其余为原油和天然气消耗;方案 2 原油消耗约为 100 MJ,占该方案能源消耗总量的 78.6%,其余为煤和天然气消耗。由此可见,在基本相同的处理能力条件下,以火力发电电能为动力的化石能源消耗略高于使用柴油动力造成的化石能源消耗。因此,在不受资源总量限制的前提下,小型堆肥厂适合选用柴油动力及其他非火电电能以减缓对化石能源的消耗。但今后随着我国火电技术的提升和能源结构的调整,燃油动力相比电力的环境优势将可能不再明显。

2.2.2 酸化效应

本研究中堆肥过程产生的氨气排放对酸化效应

的贡献较大(图 2b),占各方案酸化效应总量的 96%~99%,与 Lopez-Ridaura 等^[8]和 Martínez-Blanco 等^[23]的研究结果相似。方案 2 至方案 5 以氨挥发形式产生的氮素损失随着翻堆频率的降低逐渐减少,因此酸化效应降低。在不影响堆肥腐熟效果的条件下,适当降低翻堆频率有利于减少堆肥过程的氨挥发损失和酸化效应。方案 2 与现状方案 1 相比,约有 0.22 kg SO_2 当量源自电能生产过程中产生的 SO_2 ,占方案 1 酸化效应总量的 3.4%。堆肥生产工艺中的能源消耗排放的氮氧化物、氯化氢等对堆肥过程造成的酸化效应影响较小。尽可能减少堆肥过程氨挥发的直接排放是降低堆肥生产酸化效应的关键。

2.2.3 富营养化效应

各堆肥工艺方案处理 1 t 猪粪的富营养化潜值总体较低,为 0.6~1.4 kg 磷酸盐当量。如图 2c 所示,富营养化效应影响因素中,堆肥氨挥发的贡献较大,占到各方案富营养化效应的 96% 以上。其余为氧化亚氮及能源生产过程产生的磷酸盐排放等。由于本研究堆肥过程未收集到渗滤液,富营养化效应中不包含堆肥过程渗滤液因素的贡献。而 Prapasongsa 等^[14]的研究表明,畜禽粪便处理过程渗滤液及厌氧发酵废液的产生和排放将造成富营养化效应成倍增加。实际生产中养殖场畜禽粪便处理过程产生的渗滤液问题不容忽视,当堆肥过程中有渗滤液产生时,总体富营养化效应将可能显著增大。针对渗滤液及厌氧发酵废液氮磷养分高、处理工艺复杂以及农田利用受承载力限制等问题,应在技术选择和工艺设计方面考虑从源头控制渗滤液的产生,并增强氮磷养分资源化利用,以减少畜禽粪便处理造成的富营养化效应。

2.2.4 温室效应

各方案不同温室气体排放量换算为 CO_2 当量结果如图 2d 所示。可以看出 CO_2 和 N_2O 对畜禽粪便堆肥处理过程的全球变暖潜势(100 年)贡献较大,其中 CO_2 占总温室效应的 58%~88%, N_2O 排放占总温室效应的 8%~35%,其余主要为 CH_4 (2%~7%)。 CO_2 作为有机物好氧堆肥生物降解反应的主产物,其在堆肥过程中的减排较难实现。但是,降低堆肥过程的总温室效应可通过减少其他温室气体排放量来实现,例如采用 N_2O 和 CH_4 减排技术(N_2O 和 CH_4 的 100 年温室效应分别是等质量 CO_2 的 298 倍和 25 倍^[20])。在同等翻堆频率条件下,方案 2 的总温室效应相比方案 1 降低约 6%。方案 5 不翻堆条件下,堆体有机物降解速率降低,从而使 CO_2 排放量降低,但 N_2O 和 CH_4 排放量明

表 4 环境影响评价结果

Table 4 Environmental impacts of pig manure composing

环境影响类别 Environment impact	方案 1 Option 1	方案 2 Option 2	方案 3 Option 3	方案 4 Option 4	方案 5 Option 5
ADP-f	221.5	127.5	104.4	92.6	80.8
AP	6.66	6.29	4.72	4.46	2.07
EP	1.44	1.40	1.06	1.01	0.59
FAETP	6.31	0.99	0.96	0.95	0.93
GWP	355	334	336	350	425
HTP	8.64	1.84	1.67	1.61	1.42
OLDP	5.74E-07	9.69E-07	7.57E-07	6.49E-07	5.41E-07
POCP	0.015	0.005	0.005	0.006	0.009
TETP	0.036	0.011	0.010	0.009	0.008

注:运算结果基于处理 1 t 新鲜猪粪(计量单位见表 1)。

Note: All values are based on 1 ton of raw pig manure (Units as in Table 1).

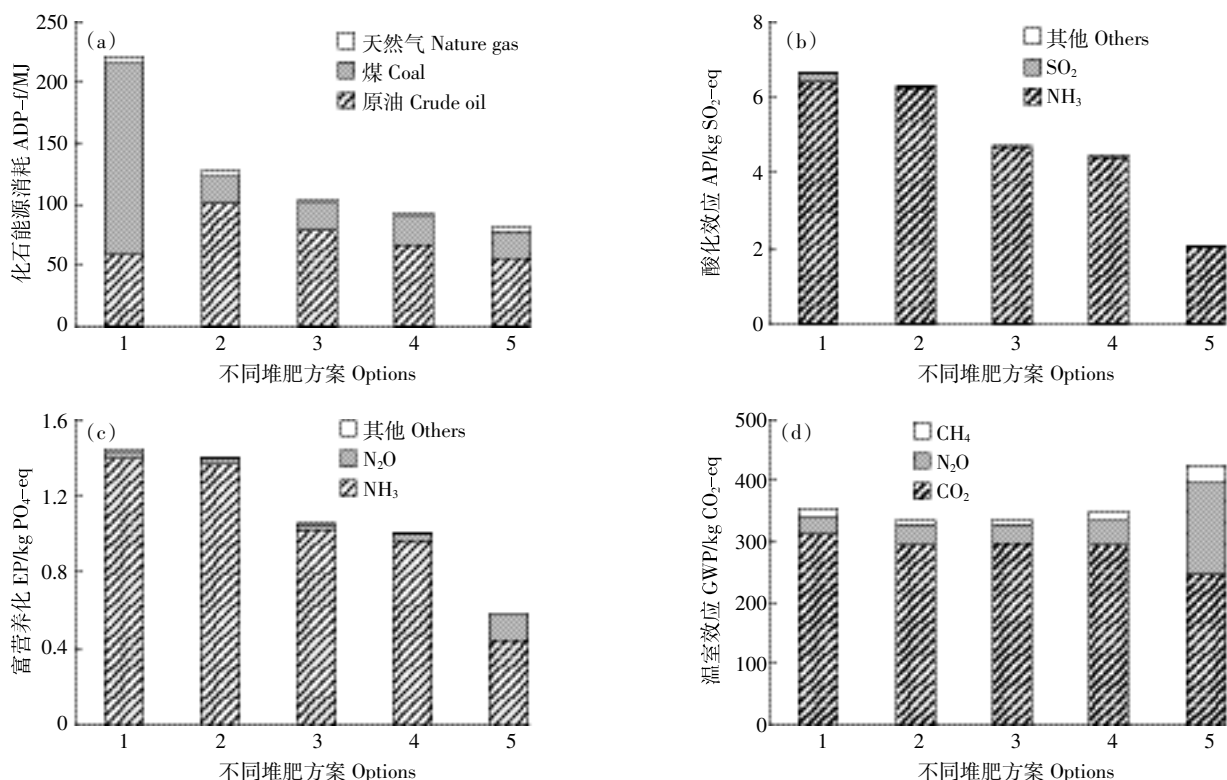


图2 主要环境影响因素组成

Figure 2 Major environmental impacts of pig manure composting

显升高,总温室效应高于其他4个方案。总体来看,方案2和方案3采用简便条垛式堆肥工艺,每周翻堆1~2次的总温室效应相对较低,且方案2与方案3的总温室效应相差不大。

3 讨论

在本研究条件下重点讨论的生命周期评价环境影响类别中,温室效应、酸化效应和化石能源消耗方面的环境影响问题相对较为突出。在畜禽粪便堆肥处理实践中,可通过温室气体和氨气减排技术、废气收集处理工艺减少堆肥设施污染气体排放,降低温室效应和酸化效应等环境影响。此外,清洁能源的使用和设备工艺的合理选择也有利于减少堆肥生产对非可再生资源的消耗和对环境的污染。从本研究中不同工艺实例对比结果来看,采用相对灵活的条垛式堆肥工艺并未造成堆肥生产过程环境影响负荷的增加。相反,若仅从环境影响角度考虑,使用柴油动力的翻堆机在减少化石能源消耗、降低对人体和生态的毒性等方面均更具优势,这主要与火力发电环境影响负荷较大有关。另一方面,不同的翻堆频率对堆肥过程能源消耗和气体排放均有影响。在本研究的处理规模下,以猪粪和玉米秸秆为原料的条垛式堆肥的较适宜翻

堆频率为每周1~2次。其中每周翻堆1次的堆肥工艺方案在保持相对较低的温室效应的同时,在化石能源损耗、酸化效应和富营养化等方面的环境影响相对较低。实际生产中,根据农村堆肥设施特点和对堆肥周期长短的实际需求合理设计堆肥翻堆频率等工艺条件,对于有效降低堆肥生产环节的环境影响具有现实意义。

此外,本研究分析的备选堆肥工艺方案通过发酵仓试验完成,模拟条垛堆肥中氧气最缺乏的中部区域,与养猪场实际堆肥生产状况相比,在气体监测与采样条件控制等方面仍存在一定差异。今后的研究中,有必要更深入地分析实践生产中丰富的堆肥工艺案例与现场运行数据,进一步为生产工艺优化提供依据。

4 结论

(1)能源投入和堆肥过程中的气体排放与养猪场粪便堆肥处理的环境影响关系密切。若使用柴油动力替代部分火力发电生产的电能,可使总化石能源损耗潜值降低42%以上,进而降低能源使用造成的环境影响。

(2)在不影响堆肥腐熟效果的条件下,适当减少

翻堆频率有利于降低堆肥过程中氨挥发造成的酸化效应和富营养化效应。本研究条件下, N_2O 和 CH_4 排放对堆肥系统总温室效应的贡献率可达 35% 和 7%。

(3) 以猪粪和玉米秸秆为原料的条垛式堆肥的适宜翻堆频率为每周 1~2 次。实践生产中应充分考虑堆肥设施条件、原料类别和堆肥周期时间限制等, 合理调整堆肥工艺参数, 最大限度地降低环境影响。

参考文献:

- [1] 北京市顺义区统计局统计信息网. 2010 年顺义区统计数据[EB/OL]. [2014-05-07]. <http://www.sy.bjstats.gov.cn/level3.jsp?id=8408>.
- [2] 李 帷, 李艳霞, 林春野, 等. 北京市畜禽粪便土地利用适宜性分析[J]. 环境科学学报, 2009, 29(4): 882-889.
LI Wei, LI Yan-xia, LIN Chun-ye, et al. Analysis of land suitability for manure application in Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(4): 882-889.
- [3] Bayo J, Gómez-López M D, Faz A, et al. Environmental assessment of pig slurry management after local characterization and normalization[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 32: 227-235.
- [4] Schuchardt F, Jiang T, Li G, et al. Pig manure systems in Germany and China and the impact on nutrient flow[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2011, A1: 858-865.
- [5] 陈 冰, 刘晶昊, 邸 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 Bing, LIU Jing-hao, DI Da. Life cycle assessment of comprehensive treatment of domestic wastes[J]. *Environmental Engineering*, 2011, 29(1): 102-106.
- [6] 纪丹凤, 夏训峰, 刘 骏, 等. 北京市生活垃圾处理的环境影响评价[J]. 环境工程学报, 2011, 5(9): 2101-2107.
JI Dan-feng, XIA Xun-feng, LIU Jun, et al. Environmental impact assessment of municipal solid waste disposal in Beijing[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(9): 2101-2107.
- [7] 高晓龙, 李瑞卿. 城市固体废弃物处理方式的生命周期评价: 以北京市为例[J]. 环境卫生工程, 2013, 21(6): 23-26.
GAO Xiao-long, LI Rui-qing. Life cycle assessment of municipal solid waste treatment: Taking Beijing as an example[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2013, 21(6): 23-26.
- [8] Lopez-Ridaura S, van der Werf H, Paillat J M, et al. Environmental evaluation of transfer and treatment of excess pig slurry by life cycle assessment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(2): 1296-1304.
- [9] Stichnothe H, Schuchardt F. Comparison of different treatment options for palm oil production waste on a life cycle basis[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2010, 15(9): 907-915.
- [10] 王效琴, 梁东丽, 王旭东, 等. 运用生命周期评价方法评估奶牛养殖系统温室气体排放量[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 179-184.
WANG Xiao-qin, LIANG Dong-li, WANG Xu-dong, et al. Estimation of greenhouse gas emissions from dairy farming systems based on LCA[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(13): 179-184.
- [11] 周道曦, 马晓茜, 梁增英. 广州市生活垃圾高温有氧静态堆肥的生命周期分析[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(5): 83-87.
ZHOU Dao-xi, MA Xiao-qian, LIANG Zeng-ying. Life cycle analysis of high-temperature aerobic static composting of municipal solid waste in Guangzhou[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2012, 34(5): 83-87.
- [12] 张 颖, 夏训峰, 李中和, 等. 规模化养牛场粪便处理生命周期评价[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(7): 1423-1427.
ZHANG Ying, XIA Xun-feng, LI Zhong-he, et al. Life cycle assessment of manure treatment in scaled cattle farms[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(7): 1423-1427.
- [13] 籍春蕾, 丁 美, 王春梅, 等. 基于 LCA 方法的模糊综合评价模型在粪便处理中的应用[J]. 中国沼气, 2012, 30(3): 8-13.
JI Chun-lei, DING Mei, WANG Chun-mei, et al. Comprehensive analysis for manure treatment based on method of life cycle assessment combined with fuzzy mathematics[J]. *China Biogas*, 2012, 30(3): 8-13.
- [14] Prapasongsa T, Christensen P, Schmidt J H, et al. LCA of comprehensive pig manure management incorporating integrated technology systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2010, 18(14): 1413-1422.
- [15] Cadena E, Colón J, Artola A, et al. Environmental impact of two aerobic composting technologies using life cycle assessment[J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2009, 14(5): 401-410.
- [16] International Standards Organization, ISO 14040—2006 Environmental management: Life cycle assessment: Principles and framework[S]. Geneva: ISO, 2006.
- [17] International Standards Organization, ISO 14044—2006 Environmental management: Life cycle assessment: Requirements and guidelines [S]. Geneva: ISO, 2006.
- [18] Rigamonti L, Grosso M, Giugliano M. Life cycle assessment for optimizing the level of separated collection in integrated MSW management systems[J]. *Waste Management*, 2009, 29(2): 934-944.
- [19] Rehl T, Müller J. Life cycle assessment of biogas digestate processing technologies[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011, 56(1): 92-104.
- [20] IPCC Fourth Assessment Report. Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis[EB/OL]. [2014-05-18]. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html.
- [21] Wolter M, Prayitno S, Schuchardt F. Greenhouse gas emission during storage of pig manure on a pilot scale[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95(3): 235-244.
- [22] Hao X Y, Chang C, Larney F J. Carbon, nitrogen balances and greenhouse gas emission during cattle feedlot manure composting[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(1): 37-44.
- [23] Martínez-Blanco J, Colón J, Gabarrell X, et al. The use of lifecycle assessment for the comparison of biowaste composting at home and full scale[J]. *Waste Management*, 2010, 30(6): 983-994.