

毕 峰, 李相儒, 韩泽东, 等. 我国农村易腐垃圾机器成肥产品质量评价: 以杭州市为例[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(5): 1016–1022.

BI Feng, LI Xiang-ru, HAN Ze-dong, et al. Quality evaluation of mechanical composting products for putrescible wastes in rural areas in China: A case study in Hangzhou[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(5): 1016–1022.

我国农村易腐垃圾机器成肥产品质量评价 ——以杭州市为例

毕 峰¹, 李相儒¹, 韩泽东¹, 秦 勇¹, 徐 钢², 屠 翰², 吴伟祥^{1*}

(1. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 2. 杭州市人民政府农村能源办公室, 杭州 310020)

摘 要:对杭州市 6 个区(县、市)12 个实施农村生活垃圾分类与易腐垃圾机器成肥处理的乡镇站点肥料产品进行了系统的调查取样分析。结果显示:杭州市农村易腐垃圾机器成肥产品的理化性质中含水率、pH、电导率(EC)、有机质含量、总养分含量分别为 $29.9\% \pm 15.9\%$ 、 6.4 ± 0.9 、 $(7.14 \pm 2.28) \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 、 $74.9\% \pm 14.7\%$ 、 $6.16\% \pm 1.48\%$;重金属(As、Hg、Pb、Cr、Cd)含量除 1 个站点 Pb 超标外,其他均符合《有机肥料》(NY 525—2012)标准;腐熟度指标中胡敏酸/富里酸(HA/FA)、种子发芽率和种子发芽指数(GI)平均值分别为 0.95 ± 0.41 、 $36.1\% \pm 40.4\%$ 、 $17.8\% \pm 28.1\%$ 。研究表明,杭州市农村易腐垃圾机器成肥产品的理化指标除含水率外,其他指标均可满足《有机肥料》(NY 525—2012)的要求;然而,75%左右的机器成肥处理站点其肥料产品腐熟度根本无法满足有机肥料标准的基本要求。因此,现阶段我国农村易腐垃圾机器成肥设备工艺亟需升级改造,以确保其产品的腐熟度满足相关标准要求。

关键词:农村;易腐垃圾;机器成肥;质量评价

中图分类号:X705 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)05-1016-07 doi:10.11654/jaes.2018-0052

Quality evaluation of mechanical composting products for putrescible wastes in rural areas in China: A case study in Hangzhou

BI Feng¹, LI Xiang-ru¹, HAN Ze-dong¹, QIN Yong¹, XU Gang², TU Han², WU Wei-xiang^{1*}

(1. College of Environmental & Resource Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Rural Energy Office of Hangzhou, Hangzhou 310020, China)

Abstract: In this study, product qualities of 12 mechanical composting stations for rural putrescible waste treatment in 6 districts (counties or county-level cities) in Hangzhou were investigated. Results showed that pH, moisture content, electrical conductivity (EC), organic matter content, and total nutrient content of the mechanical composting products were 6.4 ± 0.9 , $29.9\% \pm 15.9\%$, $(7.14 \pm 2.28) \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, $74.9\% \pm 14.7\%$, and $6.16\% \pm 1.48\%$, respectively. The concentrations of As, Hg, Pb, Cr, and Cd in the mechanical composting products were all lower than the maximum values in the standards for "Organic Fertilizer" (NY 525—2012) with the exception of Pb for one station. The maturity indices of the ratio of humic acid to fulvic acid (HA/FA), seed germination rate, and Germination Index (GI) were 0.95 ± 0.41 , $36.1\% \pm 40.4\%$, and $(17.8 \pm 28.1)\%$, respectively. These results showed that nearly all the physicochemical properties of the mechanical composting products investigated met the relevant requirements shown in the standard of "Organic Fertilizer" (NY 525—2012), excluding moisture content. However, 75% of the composting products from the 12 stations did not meet the basic requirements of the maturity index for organic fertilizer. Therefore, currently, it is of great importance to update the technology for mechanical composting of rural putrescible waste to ensure that the maturity of its products meets the relevant standard requirements.

Keywords: rural area; putrescible waste; mechanical composting; quality assessment

收稿日期: 2018-01-09 录用日期: 2018-03-21

作者简介: 毕 峰(1994—),男,安徽蒙城人,硕士研究生,从事生活垃圾堆肥研究。E-mail: bifengxs@zju.edu.cn

* 通信作者: 吴伟祥 E-mail: weixiang@zju.edu.cn

基金项目: 杭州市农办项目(515401-C51701); 国家水体污染与治理重大专项(2014ZX07101-012)

Project supported: Program of Rural Energy Office of Hangzhou (515401-C51701); China National Critical Project for Science and Technology on Water Pollution and Control (2014ZX07101-012)

截至 2016 年末,中国村镇户籍总人口数已达 9.58 亿^[1],农村生活垃圾的年产生量达 2.8 亿 t^[2]。由于缺乏完善的垃圾清运与处理体系,垃圾大量堆积,严重影响了周围村民的居住环境质量和身心健康。为解决我国农村日益严峻的垃圾污染问题,住建部等部门先后出台了一系列文件^[3-4],要求在农村地区学习浙江省“金华金东模式”,推行垃圾源头分类减量。

所谓“金华金东模式”,就是将城市生活垃圾的“四分法”简化为“二分法”,即将农村生活垃圾分为易腐垃圾(剩饭剩菜、菜叶果皮、动物粪便、作物秸秆和枯枝落叶等)和其他垃圾(除前者以外的垃圾)两种,易腐垃圾进行堆肥化处理,其他垃圾进入焚烧厂或填埋场,以充分实现垃圾的减量化和资源化。在该模式中,易腐垃圾的堆肥化处理一直是其难点和重点,目前主要有机器成肥和太阳能辅助好氧堆肥^[5]两种实现方式。

机器成肥作为好氧堆肥处理的一种,是指将易腐垃圾送入机械堆肥反应器进行高温发酵,在较短时间内产出有机肥或其中间产物,实现易腐垃圾资源化和无害化的过程。相较太阳能辅助好氧堆肥,机器成肥搅拌混合充分、供氧充足,能够大幅缩短堆肥周期,而且设备高度集成化,操作便利,还能避免极端天气的影响,故而受到各界的广泛推崇,目前浙江省使用机器成肥的比例已经占到 28%以上^[6]。

考虑以上因素,国内为处理农村分出的易腐垃圾,一般以镇或村为单位配置小型机器成肥设备(设计处理量为 0.3~5 t)。但是,目前国家尚未出台机器成肥的相关标准,市场上机器成肥设备种类五花八门,仅杭州市使用的就有 10 余种,且工艺水平参差不齐,而产品多冠以有机肥之名,用于农田土壤改良或城市园林绿化。为全面科学评价各类机器成肥产品品质,防止残次产品危害土壤质量和农田生态环境,现阶段亟需实地抽样调查与分析。

杭州市是采用农村易腐垃圾机器成肥设备的典型代表。截止 2017 年,杭州市农村生活垃圾分类减量资源化工作已覆盖所有行政村,建有 149 个机器成肥站点。本文针对杭州市 6 个开展农村垃圾分类与易腐垃圾机器成肥的区(县、市)进行调研,对 12 个运行正常的乡镇机器成肥站点的堆肥产品进行质量抽样分析,以期全面了解农村易腐垃圾机器成肥产品质量现状及其存在的问题,为农村易腐垃圾机器成肥设备在全国范围内推广应用提供甄别依据。

1 材料与方法

1.1 调查取样点

本研究分析的肥料样品随机取自杭州市 6 个开展农村生活垃圾分类与易腐垃圾机器成肥处理的区(县、市)中的 12 个正常运行的乡镇机器成肥站点。抽样检测站点的分布见图 1。

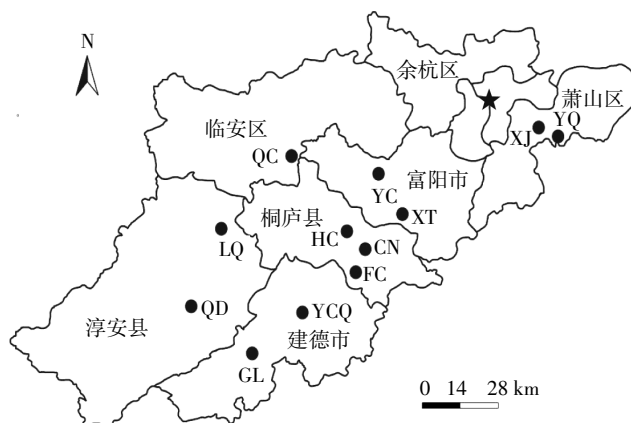


图 1 农村易腐垃圾机器成肥调查取样点分布

Figure 1 Distribution of sampling point of mechanical composting for rural putrescible wastes

1.2 机器成肥工艺

本次调研的村镇农村垃圾均采用“二分法”(即易腐垃圾与其他垃圾):易腐垃圾进入机器成肥站点,进行堆肥化处理;其他垃圾进行集中填埋或焚烧处理。

调研涉及的机器成肥工艺如表 1 所示。主体发酵工艺有全混合发酵和层递推流式好氧发酵两种。按照发酵周期长短可分为两大类:12~48 h(包括 12~24 h 和 24、48 h)快速成肥机器设备和 7 d 以上发酵周期(包括 7 d、10~15 d 和 15 d)的机器成肥设备。

1.3 取样方法

在垃圾资源化处理站设备出料堆放处,堆体分上、中、下 3 个高度进行多点采样至 5~10 kg 左右,将其十字四等分,然后随机舍弃对角中的两份,余下的部分重复进行前述铺平并将其四等分,舍弃一半,直至堆肥量为 1 kg 左右,装入采样袋中,带回实验室进行分析。

1.4 测定指标与方法

(1)含水率、pH、有机质含量、总养分(氮+五氧化二磷+氧化钾)、重金属(As、Hg、Pb、Cr、Cd)含量均参照《有机肥料》(NY 525—2012)标准方法测定。

(2)电导率(EC):将堆肥样品按 1:10[m(g):V

表 1 机器成肥工艺一览表
Table 1 Mechanical composting process list

站点	主发酵方式	主发酵温度/℃	供氧方式	发酵周期	设备品牌
HC	全混合发酵	65~75	末端负压引风	7 d	浙江 A
CN	全混合发酵	65~75	末端负压引风	7 d	浙江 A
FC	全混合发酵	65~75	末端负压引风	7 d	浙江 A
XJ	全混合发酵	85~90	无强制通风	24 h	深圳 A
YQ	全混合发酵	85~90	无强制通风	24 h	深圳 A
YC	全混合发酵	75~80	无强制通风	24 h	浙江 B
XT	全混合发酵	70~80	无强制通风	48 h	浙江 C
QC	全混合发酵	85~90	无强制通风	24 h	深圳 A
YCQ	全混合发酵	80~90	无强制通风	15 d	江苏 A
GL	层递推流式发酵	55~60	强制通风曝气	10~15 d	浙江 D
LQ	全混合发酵	50~65	无强制通风	7 d	山东 A
QD	全混合发酵	75~85	无强制通风	12~24 h	北京 A

(mL)]浸提过滤后用电导率仪(HACH sension7)测定^[7]。

(3)胡敏酸、富里酸(HA、FA):腐殖质组成采用焦磷酸钠提取-重铬酸钾法^[8]测定。

(4)种子发芽率和发芽指数(GI):参考文献[9]方法。称取新鲜物料试样(干基质量 20 g 左右)于 500 mL 具密封塞的聚乙烯瓶中。按照固液比 1:10[m(g)/V(mL)],以干重计]加入一定量的去离子水,在转速 180 r·min⁻¹ 的摇床中室温下浸提 2 h,离心过滤。在微生物培养皿内垫一张滤纸,均匀放入 10 粒萝卜种子,用移液枪移取浸出液 5 mL,浸润滤纸,盖上培养皿盖,在 25 ℃黑暗的培养箱中培养 48 h,测定发芽率和根长。每个样品做 3 个重复,以去离子水作为空白对照。GI 的计算公式如下:

$$GI = \frac{G_L L_L}{G_C L_C} \times 100\%$$

式中:GI 为种子发芽指数;G_L 和 G_C 分别为处理和对照组的平均种子发芽率;L_L 和 L_C 分别为处理和对照组的平均根长。

1.5 评价指标限值

本研究涉及的农村易腐垃圾机器成肥产品主要评价指标及其限值如表 2 所示。

2 结果与讨论

2.1 机器成肥产品的理化性质

2.1.1 含水率

从图 2a 可见,机器成肥产品的含水率在 5.6%~54.2%,50%左右的样品含水率未达到《有机肥料》(NY 525—2012)要求(含水率≤30%),其中站点 XJ 和 YQ 产品的含水率高达 50%以上。垃圾堆肥过程中微生物分解有机质的最佳含水率为 50%~55%^[13],根据王瑜堂等^[14]的调查结果,农村生活垃圾的含水率为 53.68%,十分适合微生物的生长。但是,由于农村生活垃圾经分类后获得的易腐垃圾其含水率会显著提高,一般在 80%左右^[15]。如果堆肥处理过程不正常或产生的水汽不能从封闭的机器腔体中及时引出,产品的含水率必然较高。

2.1.2 pH 与 EC

农村易腐垃圾机器成肥产品的 pH 值如图 2b 所示,范围在 4.7~8.0 之间,平均值为 6.4,除 QD 站点(pH=4.7)外,其他站点成肥产品的 pH 均符合《有机肥料》(NY 525—2012)的要求,但是总体偏酸性。大量研究表明,腐熟的堆肥一般呈弱碱性^[16]。尽管堆肥产

表 2 评价指标限值一览表
Table 2 List of limit values for indicators covered by the evaluation

项目	理化性质指标					重金属指标/mg·kg ⁻¹					腐熟度指标	
	含水率	pH	有机质	总养分	EC	As	Hg	Pb	Cd	Cr	HA/FA	GI
限值	30%	5.5~8.5	45%	5.0%	4 mS·cm ⁻¹	15	2	50	3	150	1.6	50%
出处	《有机肥料》(NY 525—2012)				[10]	《有机肥料》(NY 525—2012)					[11]	[12]

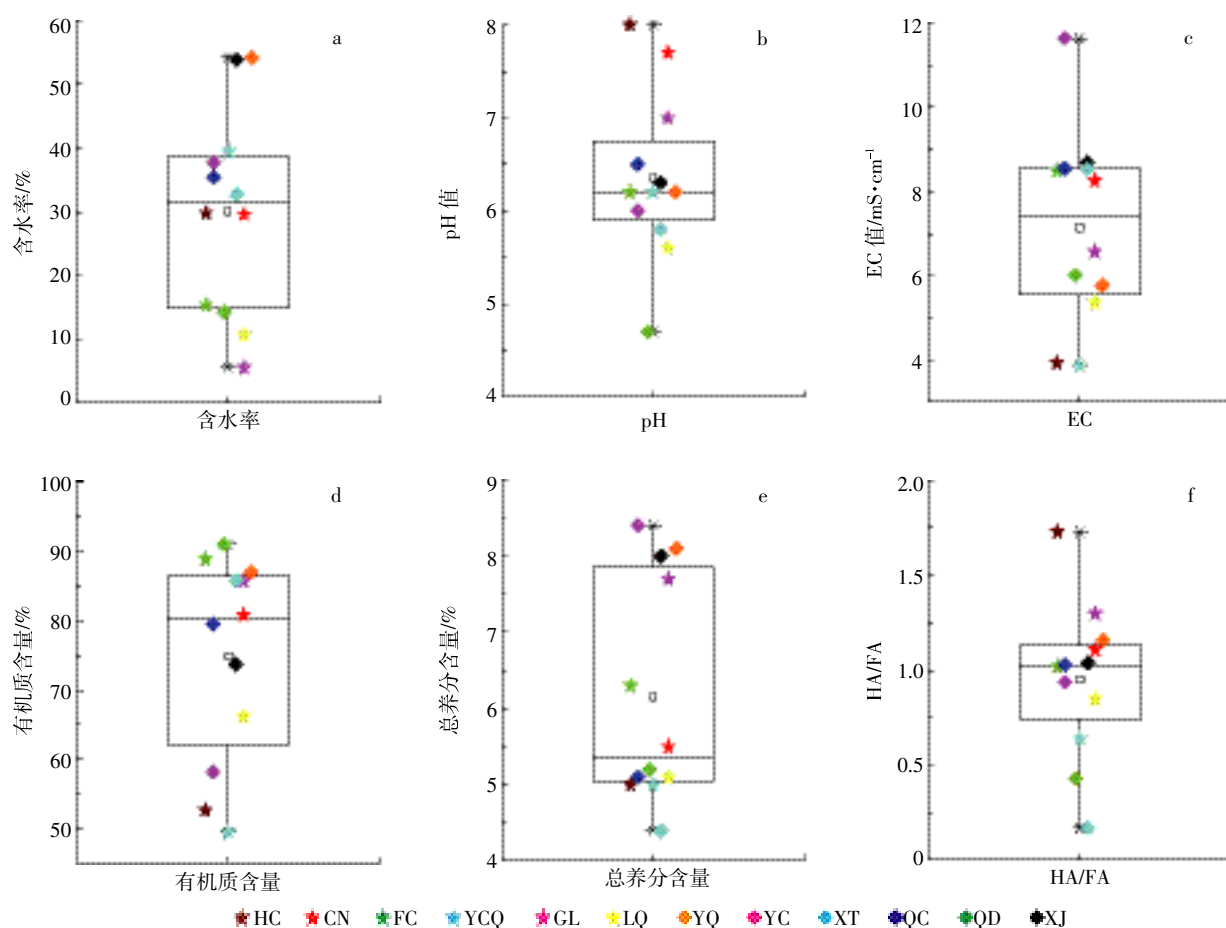
品的 pH 与原料成分有一定的关联,但是堆肥产品总体偏酸性在一定程度上反映出机器成肥产品可能并未充分腐熟。此外,相关研究表明,当堆肥初期局部供氧不足时,厌氧发酵产生的有机酸以及大量的 CO_2 会使得 pH 处于较低的水平^[17]。由表 1 可见,60%左右的站点其机器成肥设备没有强制通风曝气供氧装置,因此极易导致堆肥物料内部局部缺氧或厌氧,其堆肥产品的 pH 平均值仅为 5.9,远低于具有强制通风供氧系统(包括强制通风曝气和末端负压引风)设备产品的 pH 值 7.2($P<0.01$)。由此可见,要防止堆肥物料局部厌氧酸化并提升堆肥产品腐熟度,机器成肥设备有必要配置强制通风供氧系统。

本次调研 12 个站点机器成肥产品的 EC 值如图 2c 所示,平均为 $7.14 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$,最低的为 YCQ, $3.93 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$,最高的为 YC, $11.63 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。而研究表明,

已腐熟的堆肥 EC 值一般小于 $3 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ ^[18],故机器成肥产品的 EC 值总体相对偏高。究其原因:一方面机器成肥的发酵周期较短,堆肥初期产生的大量的小分子有机酸、磷酸盐等积累^[19],使得肥料 EC 值偏高;另一方面,现阶段杭州市农村地区普遍缺乏餐厨垃圾处理设施,对于集镇餐馆、农家乐等产生的餐厨垃圾通常优先被运往机器成肥站点进行处理,餐厨垃圾中的盐分最终浓缩在肥料中,使得 EC 值含量增加。在所有站点中,仅有 HC 和 YCQ 站点堆肥产品的 EC 值低于植物正常生长 EC 值限值 $4 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ ^[10],肥料施用农田后可能会不利于农作物的生长,因此不推荐作为有机肥直接施用到农田。

2.1.3 有机质与总养分的含量

机器成肥过程中有机物在微生物的作用下分解为 CO_2 、水、腐殖质,有机质含量的变化可以反映出微



图中“—”表示最大和最小值; □表示平均值; 星形表示 7 d 以上长发酵周期机器成肥产品; 菱形表示 12~48 h 短发酵周期机器成肥产品
“—” means the maximum and minimum value; □ means the average value; star means the mechanical composting products over a long fermentation period of 7 d or more; diamond means the mechanical composting product of the short fermentation period from 12 to 48 h

图 2 农村易腐垃圾机器成肥产品的物理化学性质

Figure 2 The physicochemical properties of mechanical composting products in rural areas

生物的代谢以及养分的转化和释放情况,是反映堆肥质量和进程的重要指标^[11]。《有机肥料》(NY525—2012)中要求堆肥产品有机质含量 $\geq 45\%$ 。本次调研各站点机器成肥产品的有机质含量(图2d)均大于45%,平均值为74.9%,其中12~48 h短发酵周期机器成肥产品有机质含量平均值高达79.2%,总体平均值为70.6%。导致部分站点机器成肥产品有机质含量较高的原因可能有两个方面:(1)部分机器成肥设备实际为烘干机。由表1可见,12~48 h短发酵周期机器成肥设备的主体发酵温度均在70℃以上,甚至达到90℃,而适合微生物发酵的温度为55~60℃,70℃以上微生物已经死亡或进入休眠状态^[20],此时机器成肥设备本质上为一烘箱,仅仅起到蒸发水分、浓缩有机质的作用,物料根本未经过任何微生物好氧发酵。(2)部分机器成肥设备运行过程添加高有机质辅料。为克服易腐垃圾含水率较高问题,部分站点(如QD、XT)堆肥过程中加入了有机质含量较高的腐料,如玉米秸秆(有机质含量94.2%)、木屑(有机质含量约84%)等^[17,21],导致出料有机质含量高于正常发酵物料。

氮、磷、钾是植物生长所需要的大量元素,也是评价有机肥料肥力的重要因素。虽然机器成肥过程中,营养元素通过 NH_3 、 N_2O 等气体逸散与堆肥渗滤液排出等形式损失,但是有机质降解及水分蒸发引起的浓缩效应,会导致成肥物料氮、磷、钾的含量相对增加^[22]。由图2e可见,各站点机器成肥产品总养分含量平均值为6.16%,除XT站点外,其他站点机器成肥产品的氮、磷、钾含量均 $>5\%$,满足《有机肥料》(NY 525—2012)标准的要求。

2.2 机器成肥产品中的重金属

根据王瑜堂等^[23]2017年关于村镇生活垃圾中重金属含量及其土地利用中的环境风险分析,我国村镇生活垃圾中的重金属污染情况不容乐观,具有强生态危害,此外生活垃圾堆肥过程中的重金属含量会随着总干物质重量下降而升高^[24],会加剧土地利用过程中的生态风险。而基于“二分法”的机器成肥处理,产品中各重金属的污染指数^[25][实测值与《有机肥料》(NY 525—2012)中标准限值的比值]分布如图3所示。机器成肥产品中的重金属含量普遍较低,As、Pb、Cd、Cr的平均污染指数分别为0.11、0.49、0.34、0.49, Hg的平均污染指数小于0.05,除FC站点Pb含量超标外,其余均能满足《有机肥料》(NY 525—2012)标准要求。因此,农村生活垃圾“二分法”分类系统可以有

效确保分类后的易腐垃圾成肥产品重金属含量达标。尽管如此,FC站点机器成肥产品重金属Pb含量超标,表明农村生活垃圾“二分法”分类系统还需特别关注有毒有害垃圾,以避免其进入易腐垃圾桶。

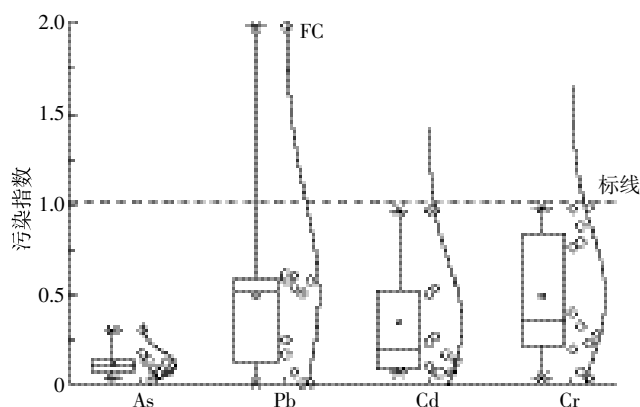
2.3 机器成肥产品的腐熟度指标

2.3.1 HA/FA

机器成肥过程中腐殖化指数HA/FA可以反映堆肥的腐殖化程度,HA/FA增加并趋向稳定是堆肥趋向腐熟的标志^[26]。有学者指出当HA/FA >1.6 ,就可以认为堆肥已经腐熟^[11]。12个机器成肥站点堆肥产品的HA/FA分布如图2f所示,HA/FA的平均值为 $0.95 < 1.6$,总体并未达到腐熟要求,只有HC站点HA/FA=1.73 >1.6 ,肥料腐熟。此外12~48 h短发酵周期的机器成肥产品HA/FA均值(0.80)小于7 d以上长发酵周期的机器成肥产品的HA/FA值1.11($P < 0.05$),由此可见,易腐垃圾的堆肥腐熟化过程需要较长的时间,12~48 h短发酵周期的机器成肥工艺根本无法满足《生活垃圾堆肥处理技术规范》(CJJ 52—2014)中设计主发酵时间不宜小于5 d的要求。

2.3.2 种子发芽率和GI

与国外发达国家相比,我国堆肥产品的质量标准的除了卫生学标准(蛔虫卵死亡率和粪大肠菌群数),仅从含水率、pH、养分、重金属含量等片面评价堆肥产品的肥效,缺乏比较全面和科学的堆肥腐熟评价指标,肥料施用后对作物的安全性也无法得到保障^[27]。

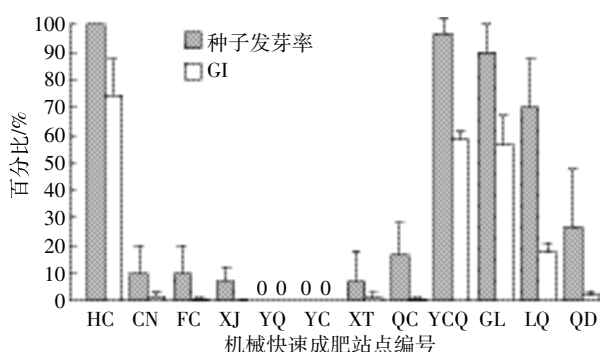


机器成肥产品中 Hg 的污染指数均小于 0.05, 未在图中标出; 图中 “—” 表示最大和最小值; “x” 表示 1%、99% 样品阈值; “□” 表示平均值
The pollution index of Hg in mechanical composting products are less than 0.05, which is not marked in the figure; “—” means the maximum and minimum value; “x” means the threshold of 1% and 99% samples; “□” means the average value

图3 农村易腐垃圾机器成肥产品重金属的污染指数

Figure 3 Pollution index of heavy metals in mechanical composting products for rural putrescible wastes

因此,本研究选取普遍认可的种子发芽率和GI来反映机器成肥产品的腐熟度和植物毒性^[28]。图4为各机器成肥站点肥料产品的种子发芽率和GI。由图4可见,各站点的肥料产品种子发芽率平均值为36.1%,GI平均值仅为17.8%,均表现出一定的植物毒性,YQ和YC站点堆肥产品的种子发芽率和GI甚至为0。研究表明,当 $GI \geq 50\%$ 时,堆肥基本达到腐熟^[12],因此,所有站点中仅有HC、YCQ和GL的堆肥产品基本达到腐熟要求,结合表1中各站点机器成肥工艺,可以发现HC、YCQ和GL的发酵周期均在7d以上。相反,采用12~48h短发酵周期的机器成肥产品GI极低,均值仅为0.7%。综合机器成肥产品腐殖化指数、种子发芽率和GI,可以发现12~48h机器成肥设备生产的产品腐熟度完全不合格,这种产品施用于农田不仅会严重影响土壤质量、阻碍植物正常生长,而且具有严重的二次污染风险。



对照组种子发芽率为100%,GI=100%;数值是平均值与3次重复的标准差

The seed germination rate and GI of control group were both 100%; Values are given as mean $\pm$ SD from triplicate determinations

图4 各站点机器成肥产品种子发芽率和GI

Figure 4 Seed germination rate and GI of mechanical composting product in each station

3 结论

(1)农村易腐垃圾机器成肥产品,除含水率外,pH(除QD)、有机质含量、总养分含量(除XT)等指标均能满足《有机肥料》(NY 525—2012)的要求。

(2)农村生活垃圾“二分法”可有效确保分类产生的易腐垃圾机器成肥产品重金属含量达标。

(3)12~48h机器快速成肥设备生产的产品基本未经过任何微生物好氧堆肥发酵,产品腐熟度极低,不适合农田利用。尽管部分7d以上发酵周期的农村易腐垃圾机器成肥设备生产的肥料产品腐熟度指标

可以基本满足相关标准要求,但是其工艺有待改进,以提升其生产产品的腐熟度指标,满足农用需求。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2016年城乡建设统计公报[J]. 城乡建设, 2017(17):38-43.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Statistical communique on urban and rural construction in 2016[J]. *Urban and Rural Development*, 2017(17):38-43.
- [2] 国家环境保护总局. 全国农村环境污染防治规划纲要(2007—2020)[R]. 2007:2-4.
State Environmental Protection Administration. National plan for prevention and control of rural environmental pollution(2007—2020)[R]. 2007:2-4.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 关于推广金华市农村生活垃圾分类及减量化资源化利用经验的通知[EB/OL]. [2017-12-22]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201612/t20161228_230118.html.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Notice on promotion of the experience of classifying, reducing and reusing of rural domestic waste in Jinhua City[EB/OL]. [2017-12-22]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201612/t20161228_230118.html.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 关于改善贫困村人居环境条件的指导意见[EB/OL]. [2017-12-23]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201608/t20160808_228445.html.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Guidance on improving health conditions in human settlements in poor villages[EB/OL]. [2017-12-23]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201608/t20160808_228445.html.
- [5] 王英. 新型农村生活垃圾耦合太阳能好氧堆肥处理技术研究[D]. 长春:吉林大学, 2011:15-19.
WANG Ying. Research on a new aerobic composting of rural living garbage integrated with solar technology[D]. Changchun: Jilin University, 2011:15-19.
- [6] 梁国瑞,孔朝阳. “绿色革命”遍及城乡[N]. 浙江日报, 2016-12-23(1版).
LIANG Guo-rui, KONG Chao-yang. "The Green Revolution" spread throughout the urban and rural areas[N]. *Zhejiang Daily*, 2016-12-23 (1st Edition).
- [7] 王成. 堆肥过程 N_2O 减排控制与木质纤维素降解微生物学机理研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014:19-20.
WANG Cheng. Nitrous oxide mitigation and lignocellulose degradation in mature composting[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014:19-20.
- [8] 文启孝. 土壤有机质研究法[M]. 北京:农业出版社, 1984:136-148.
WEN Qi-xiao. Soil organic matter on it research methods[M]. Beijing: Agriculture Press, 1984:136-148.
- [9] 屠巧萍. 生物质炭添加对猪粪堆肥腐殖化的影响及机理研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014:17-18.
TU Qiao-ping. Effect of biochar on humification of pig manure composting[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014:17-18.

- [10] Lin C. A negative-pressure aeration system for composting food wastes[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(16): 7651-7656.
- [11] Domeizel M, Khalil A, Prudent P. UV spectroscopy: A tool for monitoring humification and for proposing an index of the maturity of compost[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 94(2): 177-184.
- [12] 王定美, 武丹, 李季, 等. 猪粪及其堆肥不同水浸提比对种子发芽特性指标的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 579-584.
WANG Ding-mei, WU Dan, LI Ji, et al. Effect of water extraction ratio of pig manure and its compost on seed germinative indicators[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3): 579-584.
- [13] 何品品. 固体废物处理与资源化技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 149-150.
HE Pin-jing. Solid waste treatment and recycling technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011: 149-150.
- [14] 王瑜堂, 岳波, 吴小卉, 等. 中国村镇生活垃圾的养分与重金属含量特征及其农用潜力分析[J]. 环境工程, 2017, 35(7): 136-140.
WANG Yu-tang, YUE Bo, WU Xiao-hui, et al. Nutrient and heavy metal content characteristics of rural living solid waste in China and agricultural utilization feasibility[J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(7): 136-140.
- [15] 张玉成, 朱建林, 李兵. 太阳能-生物反应器处理厨余垃圾的研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(1): 588-590.
ZHANG Yu-cheng, ZHU Jian-lin, LI Bing. The research of solar energy-bioreactor for kitchen waste disposal[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(1): 588-590.
- [16] 李艳霞, 王敏健, 王菊思. 有机固体废弃物堆肥的腐熟度参数及指标[J]. 环境科学, 1999, 20(2): 98-103.
LI Yan-xia, WANG Min-jian, WANG Ju-si. The maturity indexes and standards of organic solid waste composting[J]. *Environmental Science*, 1999, 20(2): 98-103.
- [17] 邵森, 杨淑英, 张增强, 等. 不同处理对高含水率奶牛粪便好氧堆肥的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5): 982-989.
SHAO Miao, YANG Shu-ying, ZHANG Zeng-qiang, et al. Effect of different treatment on composting of high water content dairy manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5): 982-989.
- [18] 崔东宇, 何小松, 祝超伟, 等. 生活垃圾堆肥浸提液组成及其演化规律[J]. 环境工程学报, 2014, 8(12): 5424-5430.
CUI Dong-yu, HE Xiao-song, ZHU Chao-wei, et al. Composition and transformation of composting leachates from municipal solid wastes[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(12): 5424-5430.
- [19] 蔡传钰. 农村生活垃圾分类与资源化处理技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 50-51.
CAI Chuan-yu. Study on applicable technology for rural solid waste classification and recycling[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 50-51.
- [20] 曾光明, 黄国和, 袁兴中, 等. 堆肥环境生物与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 19-22.
- ZENG Guang-ming, HUANG Guo-he, YUAN Xing-zhong, et al. Environmental biology and control of composting[M]. Beijing: Science Press, 2006: 19-22.
- [21] 李宇庆, 陈玲, 赵建夫, 等. 城市污水厂污泥快速高效堆肥技术研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 380-383.
LI Yu-qing, CHEN Ling, ZHAO Jian-fu, et al. Rapid and high-efficiency composting sewage sludge[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2): 380-383.
- [22] 赵建荣, 高德才, 汪建飞, 等. 不同 C/N 下鸡粪麦秸高温堆肥腐熟过程研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(5): 1014-1020.
ZHAO Jian-rong, GAO De-cai, WANG Jian-fei, et al. The high-rate composting of chicken manure and wheat straw in different C/N[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(5): 1014-1020.
- [23] 王瑜堂, 张军, 岳波, 等. 村镇生活垃圾重金属含量及其土地利用中的环境风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(8): 1634-1639.
WANG Yu-tang, ZHANG Jun, YUE Bo, et al. Heavy metal content of the rural solid waste and its land utilization environmental risk analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(8): 1634-1639.
- [24] 解开治, 徐培智, 张仁陟, 等. 一种腐熟促进剂配合微生物腐熟剂对鲜牛粪堆肥的效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 1142-1146.
XIE Kai-zhi, XU Pei-zhi, ZHANG Ren-zhi, et al. Effects of one chemical composting promoter and microorganism composting preparations on fresh cow dung compost[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3): 1142-1146.
- [25] 闫湘, 王旭, 李秀英, 等. 水溶肥料重金属含量与安全评价[J]. 土壤通报, 2015, 46(5): 1264-1271.
YAN Xiang, WANG Xu, LI Xiu-ying, et al. Content and safety evaluation of heavy metals in water-soluble fertilizers in China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(5): 1264-1271.
- [26] Ramdani N, Hamou A, Lousdad A, et al. Physicochemical characterization of sewage sludge and green waste for agricultural utilization[J]. *Environmental Technology*, 2015, 36(12): 1594-1604.
- [27] 钱晓雍, 沈根祥, 黄丽华, 等. 畜禽粪便堆肥腐熟度评价指标体系研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3): 549-554.
QIAN Xiao-yong, SHEN Gen-xiang, HUANG Li-hua, et al. An index system for evaluating the maturity of animal manure composting[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3): 549-554.
- [28] 秦莉, 沈玉君, 李国学, 等. 不同 C/N 比对堆肥腐熟度和含氮气体排放变化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2668-2673.
QIN Li, SHEN Yu-jun, LI Guo-xue, et al. The impact of composting with different C/N on maturity variation and emission of gas concluding N[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2668-2673.