

城市社区生活垃圾减量化的集成技术研究

周传斌, 刘晶茹*, 王如松, 张艺山

(中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要:针对我国城市社区垃圾管理中分类收集程度不足、厨余垃圾高水分含量的问题,研究了社区人工分类混合垃圾、厨余垃圾简易机械压缩、压缩后厨余垃圾和渗滤液的资源化利用相结合的集成技术模式. 研究表明,生活垃圾的人工分拣效率为 36.8 kg/h,随分拣熟练程度提高而增加. 社区分拣出的厨余垃圾有机质含量高达 44.693%, 营养元素 N、P、K 的含量分别为 2.586%、0.649% 和 1.274%, C/N 为 17.427, 而重金属含量仅为从混合垃圾集中分选出的可堆肥原料的 0.07~0.82 倍. 厨余垃圾压缩脱水后含水率仍高达 78.7%, 影响后续堆肥效果. 采用生物稳定和稀释的渗滤液浇灌凤仙花具有一定的肥效, 植株干重是清水浇灌的 1.46~2.94 倍. 基于社区人工分拣的集成技术模式可减排垃圾产生量的 52.6%.

关键词:生活垃圾; 社区; 减量化; 集成技术; 人工分拣

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)11-2768-06

Integrating Technologies for Urban Communities' Municipal Solid Waste Minimization

ZHOU Chuan-bin, LIU Jing-ru, WANG Ru-song, ZHANG Yi-shan

(State Key Laboratory of Urban and Region Ecology, Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Municipal solid waste management of urban communities has difficulties of insufficient source separation and food waste's high moisture content, an integrating technology of manual separation, simple compression of food waste, reclaim of food waste and composting leachate was studied. Manual separating rate was 36.8 kg/h, and would increase when the worker became sophisticated. Community separated food waste had high organic matter content of 44.493%, nutrients N, P, K contents of 2.586%, 0.649% and 1.274%, C/N ratio of 17.427, but 0.07-0.82 times lower heavy metals contents compared to centralized separation of mixed municipal solid waste. Moisture content of food waste was still 78.7%, high enough to have negative impacts of composting processes. Composting leachate processing with biological stabilization and dilution showed a fertilizer efficiency, and dry weight of impatiens irrigated with composting leachate was 1.46-2.49 times of tap water irrigation. Integrating technology based on community's manual separation could decrease 52.6% municipal solid waste.

Key words: municipal solid waste; community; minimization; integrating technology; manual separation

我国许多城市面临着生活垃圾增量过快带来的市政管理难题.“十五”期间我国生活垃圾处理能力上升了 20%, 但由于垃圾增长速度快于设施建设速度, 无害化处理率反而从 61% 下降至 53%^[1]. 相对于通常所说的生活垃圾“减量化、资源化、无害化”管理而言, 减量化是首要任务, 也是缓解垃圾处置场土地紧缺难题的根本^[2, 3]. 生活垃圾减量化的涵义很多, 包括家庭、社区、转运及处理处置环节等全过程的多个环节, 涉及到生产、流通、消费、还原等多个过程^[4]. 社区尺度的生活垃圾管理是减量化目标实现的重要环节之一, 从源头社区开始即对生活垃圾进行分类和 μ 处理, 可避免垃圾混合、减少运输成本、降低后续处理处置难度和生产堆肥产品^[5-7].

社区生活垃圾减量的核心技术问题是 ϕ 垃圾的社区分类和原位处理. 研究表明, 纸张、纸板、塑料、金属、玻璃等废旧材料回收的减量率为 1% ~

9%^[8], 占垃圾成分 60% 以上的厨余垃圾的减量潜力则更大. 北京市已有 1 700 个居住小区开展了垃圾分类收集, 社区安装小型厨余垃圾处理装置 500 多台, 但由于意识、管理和技术等多方面的复杂原因, 实际减量效果非常有限^[9, 10]. 分拣后厨余垃圾有机物含量占其干物质的 95% 以上, 但因其含水率高达 85% ~ 90%^[11, 12], 远高于好氧堆肥适宜的 50% ~ 70%^[13], 后续运输和处理难度较大. 厨余垃圾在厨房破碎后进入下水管道, 可同生活污水或粪便混合厌氧处理, 具有一定的效果^[14], 但因其家庭投入成本高、社区设施配套要求高, 污水处理系统负荷增

收稿日期: 2009-12-13; 修订日期: 2010-04-01

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目 (2007BAC28B04); 国家自然科学基金项目 (70873122); 万通工艺基金项目 (VF09017)

作者简介: 周传斌 (1981 ~), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为生活垃圾管理及生态工程, E-mail: cbzhou@cees.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: liujingru@cees.ac.cn

加,在我国城市已建成社区的适应性也有限.因此有效分离社区厨余垃圾,降低其水分含量使其适宜于后续处理,是实现社区生活垃圾减量化和资源化的关键.针对我国城市社区垃圾管理分类收集程度不足、厨余垃圾高水分含量的问题,研究了社区人工分类混合垃圾、厨余垃圾简易机械压缩、压缩后厨余垃圾和渗滤液的资源化利用集成技术模式的可行性和工艺参数.

1 材料与方法

1.1 工艺设计

采用的总体工艺流程如图 1 所示.通过调研发现,部分家庭外排的垃圾已经按照起居室/厨房的不同来源,大致可分为干垃圾/湿垃圾两类,但垃圾混合程度仍然较高.通过在社区配备 1 名保洁员,对垃圾进行进一步细化分选,并采用自制垃圾压缩-生物反应装置,对厨余垃圾进行进一步处理.

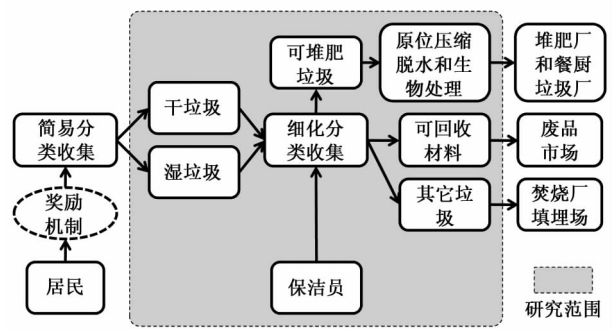


图 1 总体工艺流程示意
Fig. 1 Flow chart of the integrating technologies

设计 1 套用于生活垃圾压缩和生物处理的装置,如图 2 所示.生物处理装置的尺寸为 $600 \times 600 \times 600(\text{mm}^3)$,配备垃圾压缩装置 1 套、鼓风装置(空气压缩机)1 台.采用螺旋压杆人工压缩厨余垃圾,压缩过程和生物反应过程中产生的渗滤液先由纱网过滤,然后通过布有 $\phi 5\text{ mm}$ 孔眼的钢板下渗到装置底部 $600 \times 600 \times 170(\text{mm}^3)$ 的渗滤液收集箱中,通过 1 台增压污水泵抽出渗滤液.试验所用的生活垃圾取自北京市海淀区某居住小区,常住人口 865 人.小区无其它垃圾来源,周边餐馆垃圾自行管理,建筑垃圾和渣土清运单独管理,未与生活垃圾混合.小区周边有高校和研究所食堂,部分居民选择在食堂就餐.

1.2 人工分拣和厨余垃圾处理

培训 1 名保洁员在现有垃圾站进行生活垃圾人工分拣试验,人工分拣试验连续进行了 9 d,每日 2

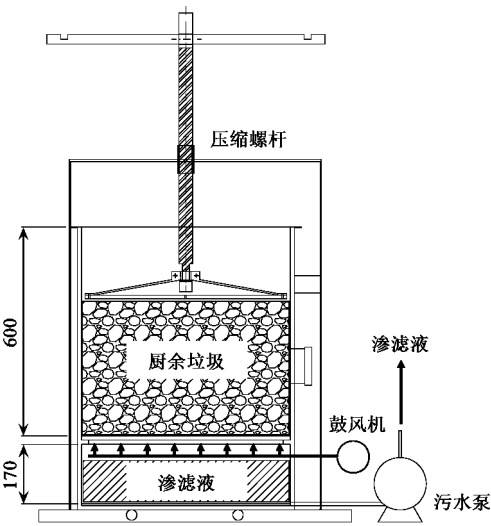


图 2 机械压缩-生物处理试验设备
Fig. 2 Squeezing and biological treating experimental device

次,分别为 09:00 ~ 11:00 时和 15:00 ~ 17:00 时,共 18 次.每次分拣居民排放的垃圾质量在 20 ~ 100 kg 左右.分别称量可回收材料、厨余垃圾和其它垃圾,并检查有无危险废物(灯管、电池),并记录每次分拣操作的开始和结束时间.将分拣出的厨余垃圾转移到图 2 所示的反应器中,旋紧压缩螺杆至螺杆无法下降,并在此压强下停留 30 min 以挤压脱除水分,利用污水泵导出渗滤液并称量.翻堆厨余垃圾使之膨松,并好氧通风 7 d.监测堆体温度变化.人工分拣出的厨余垃圾取样 2 次,每次取 2 样,75℃ 烘干 $24\text{ h} \pm 1\text{ h}$ 测量水分后,碾成粉状物过 100 目筛.使用 Elementar Vario EL III 元素分析仪测定其 C、N 含量,TK、TP 含量采用 GB 9836-1988 的方法测定.测定厨余垃圾中的 13 种重金属含量:银(Ag)、砷(As)、铍(Be)、镉(Cd)、铬(Cr)、铜(Cu)、镍(Ni)、铅(Pb)、锑(Sb)、硒(Se)、铊(Tl)、锌(Zn)、汞(Hg),取样品 5 g 溶解于 HF 和 H_2SO_4 溶液中,采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测定 13 种重金属含量.

1.3 渗滤液生物稳定和浇灌试验

压缩和好氧反应过程中产生渗滤液收集后,采用 3 种生物稳定方法处理:①添加菌剂稳定,在渗滤液中按 1:20 添加调配的 EM® 菌剂(棕色, pH 3.5,总活菌浓度为 10^8 CFU/mL),密封桶中静置 9 周(1 号样品);②长时间自然生物稳定,将渗滤液注入密封桶中静置 36 周(2 号样品);③短时间自然生物稳定,将渗滤液注入密封桶中静置 9 周(3 号

样品). 将这 3 种经生物稳定后的渗滤液按 3 种不同稀释浓度(A:原液;B:稀释 5 倍;C:稀释 10 倍)调配成 9 种液肥浇灌植物,分别是 1A、1B、1C、2A、2B、2C、3A、3B、3C. 同时选择营养液[营养成分:0.005% (N)、0.01% (P_2O_5)、0.02% (K_2O)]以及普通清水作对比试验,编号为 D 和 E,共 11 组. 选择凤仙(*Impatiens balsamina*)作为浇灌植物,每日浇灌 50 mL,18 d 后并分别测量各组根、叶、茎、花干重($75^{\circ}C, 24\ h \pm 1\ h$).

2 结果与分析

2.1 人工分拣

人工分拣试验连续进行了 9 d,共分拣混合生活垃圾 1118.7 kg,平均分拣效率(每 h 平均垃圾分拣量)为(36.8 ± 10.5) kg/h. 图 3 说明,人工分拣有一个逐步熟练的过程,第 3 d 分拣效率从 15.3 kg/h 上升到 36.0 kg/h,提高 1.35 倍;4~7 d 分拣效率逐步上升到 48.9 kg/h,提高 0.36 倍并趋于稳定. 分拣出的厨余垃圾和可回收垃圾比例占 44.3% 和 8.3%,分拣出的厨余垃圾比例低于北京市平均值 60%,这可能是因为小区居民习惯到周边食堂就餐,也可能是因为厨余垃圾同其它生活垃圾混合后有机成分及水分黏附在其它垃圾表面,不易使用人工分离. 试验分拣出的危险废物主要是电池和日光灯管,

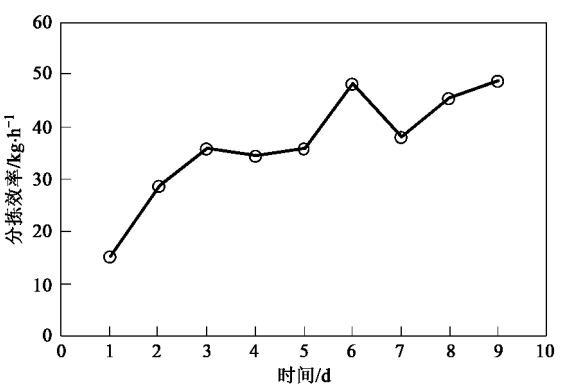


图 3 分拣效率变化曲线
Fig. 3 Manual separating rate changes

18 次试验中有 5 次共分拣出电池 11 个,有 3 次分拣出灯管 5 个.

2.2 社区分拣厨余垃圾的理化特性

2.2.1 有机质、营养元素和水分

社区分拣厨余垃圾的有机质、N、P、K 营养元素含量、C/N 及水分含量等理化特性测定结果如表 1 所示. 其有机质和营养元素含量符合《城镇垃圾农用控制标准》的要求,C/N 略低于理想值,但厨余垃圾同园艺垃圾(如干树叶,36.96~37.12)调配后可达到适宜好氧堆肥的值. 厨余垃圾水分含量高达 85.4%,降低水分是厨余垃圾好氧堆肥利用的必要环节.

表 1 源头分拣厨余垃圾理化特性

Table 1 Characteristics of source manual separated food waste

项目	有机质(以 C 计) /%	TN(以 N 计) /%	TP(以 P_2O_5 计) /%	TK(以 K_2O 计) /%	C/N	水分 /%
厨余垃圾	44.693	2.586	0.649	1.274	17.427	85.4
适宜堆肥农用的值	$\geq 10^{[15]}$	$\geq 0.5^{[15]}$	$\geq 0.3^{[15]}$	$\geq 1.0^{[16]}$	20~25 ^[11]	50~70 ^[13]

2.2.2 重金属含量

人工分拣出的厨余垃圾重金属含量分别为 As: (0.98 ± 0.24) $mg \cdot kg^{-1}$, Cd: (0.15 ± 0.05) $mg \cdot kg^{-1}$, Cr: (1.18 ± 0.49) $mg \cdot kg^{-1}$, Cu: (11.80 ± 1.75) $mg \cdot kg^{-1}$, Pb: (1.71 ± 0.37) $mg \cdot kg^{-1}$, Zn: (34.87 ± 5.67) $mg \cdot kg^{-1}$, Hg: (0.08 ± 0.06) $mg \cdot kg^{-1}$. 测试的重金属含量均低于《城镇垃圾农用控制标准》的 As: 30 $mg \cdot kg^{-1}$, Cd: 3 $mg \cdot kg^{-1}$, Cr: 300 $mg \cdot kg^{-1}$, Pb: 100 $mg \cdot kg^{-1}$, Hg: 5 $mg \cdot kg^{-1}$ ^[15]. 对比北京南宫堆肥厂机械分选出的 15~60 mm 厨余垃圾堆肥原料^[16],社区分拣的厨余垃圾重金属含量仅为 0.07~0.82 倍(见图 4).

2.3 厨余垃圾机械压缩脱水和生物处理

本研究的压缩装置的力学平衡符合下式:

$$(F_l + F_r) \cdot 2\pi R_l = F \cdot \tan\alpha \cdot 2\pi R_2$$

式中, F_l 和 F_r 分别为左右手的力,在人的肘部弯曲角度为 150° 时,左手平推的力为 133 N,右手平拉的力为 249 N^[17]; R_l 为转盘半径,为 0.37 m; R_2 为螺杆半径,为 0.023 m; α 为矩形螺纹的角度,为 10° ; F 为施加在底部方形平板(面积为 $0.58\ m^2$)上的力. 由此计算得到施加在垃圾层上的压强为 10.36 MPa.

试验的厨余垃圾水分为 85.4%,在 10.36 MPa 压强下持续压缩垃圾堆体约 30 min,流出的渗滤液质量占厨余垃圾质量的 28.0%,压缩脱水后的厨余垃圾水分含量仍高达 78.7%. 对其进行好氧堆肥,堆体温度的变化如图 5 所示. 反应 1 d 后堆体温度

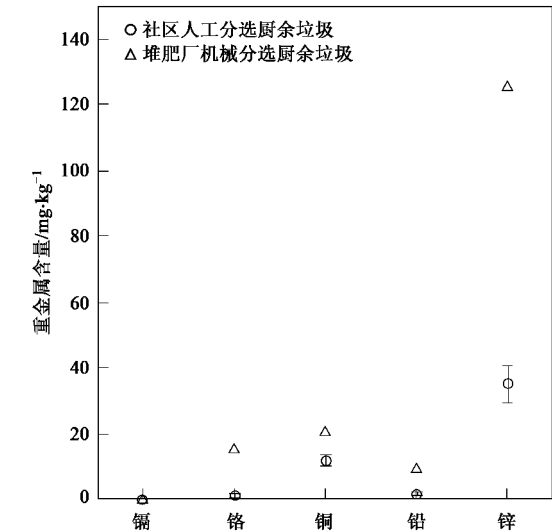


图 4 不同来源厨余垃圾重金属含量对比

Fig. 4 Heavy metal contents of food wastes from different sources

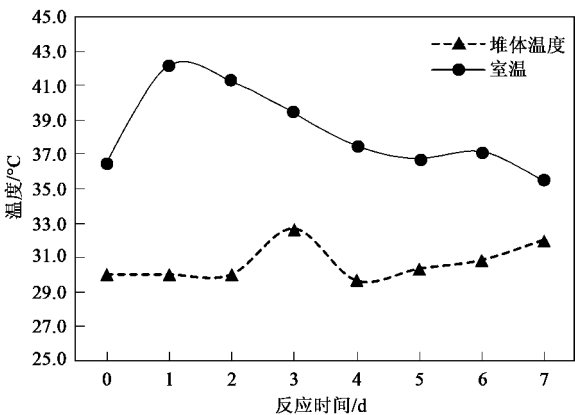


图 5 厨余垃圾堆肥的堆体温度变化

Fig. 5 Temperature of the composting food waste

上升至42.2℃,然后逐步下降,至7 d 温度降至和室温接近.反应过程中厨余垃圾水分含量始终维持在75%以上,水分过高可能是堆体温度难以持续上升的原因.

2.4 渗滤液浇灌利用

采用生物稳定和稀释的渗滤液浇灌凤仙花,18 d 后各组凤仙花的根、茎、叶、花干重如图 6 所示.图 6 中 1B 和 1C 的平均茎干重分别为 (0.7249 ± 0.1913) g 和 (0.5138 ± 0.0373) g,高于 D 的 (0.4721 ± 0.0333) g;2B、2C、3B、3C 的茎干重范围为0.3315 ~ 0.4381 g,远高于 E 的 (0.1875 ± 0.0203) g,说明采用稀释液浇灌可明显促进植物茎的生长.同茎干重相似,1B 和 1C 的平均叶干重相对较高,为 (0.6089 ± 0.0693) g 和 (0.5498 ± 0.0879) g,高于 D 的 (0.5146 ± 0.0500) g;2B、

2C、3B、3C 的茎干重范围为0.2997 ~ 0.4822 g,高于 E 的 (0.2354 ± 0.0244) g.1B、1C、2C、3C、D 的花干重为0.1631 ~ 0.1948 g,高于 E 的 (0.0979 ± 0.0214) g.从植株的总干重生物量看,1B 和 1C 分别为 (1.5320 ± 0.1883) g 和 (1.2461 ± 0.1938) g,高于 D 的 (1.1498 ± 0.0620) g.采用稀释 5 ~ 10 倍的渗滤液浇灌凤仙花,其植株干重是清水浇灌的 1.46 ~ 2.94 倍.

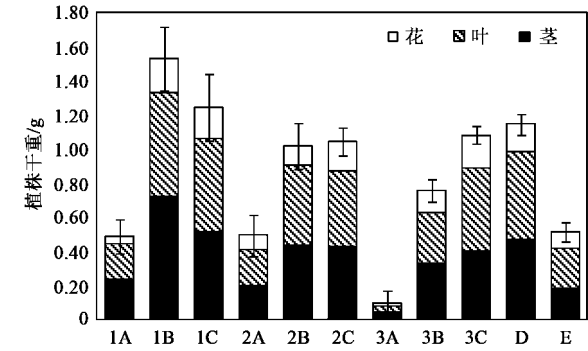


图 6 不同渗滤液浇灌后凤仙的干重

Fig. 6 Dry weight of different groups of irrigated impatiens

2.5 + 减量效果

考虑到厨余垃圾和可回收材料的源头分离,社区生活垃圾+ 减量比例达到 52.6% (见图 7).其中,8.3% 的垃圾通过资源回收渠道再生利用,12.4% 的水分通过压缩移除后可作为制液态肥的原料,31.9% 的厨余垃圾作为生物资源利用的原料.占总重量 44.3% 的厨余垃圾的源头分离和利用是社区垃圾减量的关键环节.

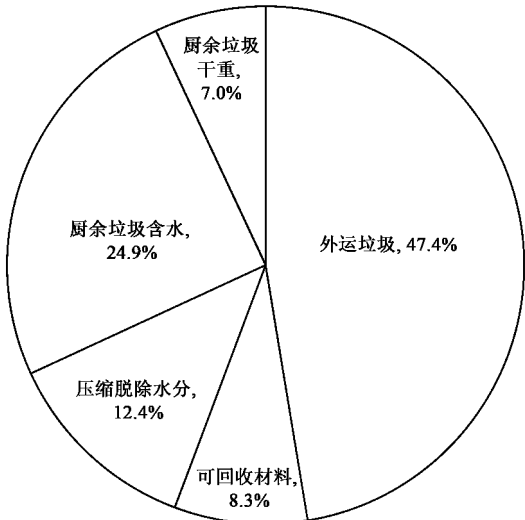


图 7 社区垃圾减量的总体比率

Fig. 7 Minimizing ratio of municipal solid waste

3 讨论

人工分拣作业效率受操作人员的年龄、性别、工作状态、责任心以及垃圾成分、气候条件等复杂因素的影响,较难精确地确定.邵立明等^[18]研究了农村生活垃圾人工分拣过程,认为分拣效率和可堆肥垃圾的有效分拣率有关,符合

$$T = 0.0509X^2 - 0.0045X \quad (r^2 = 0.998)$$

式中, X 为废品与可堆肥垃圾的有效分拣率; T 为单位重量垃圾的分拣时间, $\text{h} \cdot \text{kg}^{-1}$.当有效分拣率达到70%~90%时,垃圾分拣效率为27~46 kg/h.本项研究厨余垃圾有效分拣率约为73%,实际分拣效率值(36.8 ± 10.5) kg/h与上式接近.连续的分拣作业试验表明,分拣效率还和分拣操作熟练程度有关,会随着操作次数的增多而逐渐提高.社区人工分拣可以依靠拾荒的人力资源.拾荒是包括我国在内的发展中国家生活垃圾资源化再生的主要收集渠道^[19~21],社区固定拾荒人员开展规范化的人工分拣操作,从技术上而言是可行的.

源分离厨余垃圾含有丰富的有机质和营养元素,其重金属含量更是比混合垃圾堆肥低近1个数量级^[22],因此源分离可为后续处理工艺提供理想的厨余垃圾原料.社区分离的厨余垃圾含有较高的水分,占厨余垃圾质量28.0%的水分可以通过10.36 MPa 简易机械压缩脱除,脱除的主要水分形式为游离水和间隙水,剩余的为吸附水和内部水一般很难通过机械力移除,这可以减少后续运输环节的渗滤液渗漏污染.压缩脱水后的厨余垃圾的水分仍高达78.7%,这可能是厨余垃圾堆肥过程的温度难以持续升高的主要原因.如果采取的后续处理工艺为好氧堆肥,还需进一步研究适宜于社区的厨余垃圾脱水干燥技术.高水分厨余垃圾同粪便、粪渣等有机废物混合厌氧发酵也是高水分厨余垃圾的可能出路^[14].

压缩厨余垃圾产生的渗滤液可以在生物稳定和稀释后浇灌植物.采用稀释5~10倍的渗滤液浇灌凤仙花,其植株干重是清水浇灌的1.46~2.94倍.测定稀释的渗滤液中含有58.1~201.8 mg/L的 NH_4^+ ,为植物生长提供了充足的营养元素.Gutierrez-Miceli等^[23]使用垃圾蚯蚓堆肥的渗滤液作为高粱的肥料,用渗滤液培育的高粱总干重可达到120~123 g,高于清水培育的105~111 g.也有研究用渗滤液浇灌黄槿和潺槁树,它们的生长是清水培育的3~12倍^[24].然而,渗滤液原液中有有机质和重金属

浓度较高会造成植物枯萎.本研究用渗滤液原液浇灌的植株部分或完全枯萎,用贮存时间较短、有机质浓度高、pH值低的新鲜渗滤液浇灌,凤仙花基本难以存活.Thian^[25]研究了100%、50%和25%渗滤液浓度对水葫芦生长的影响:试验3周后100%浓度完全枯萎,50%浓度有15片叶子完全枯萎,而25%浓度只有3片叶子完全枯萎,高浓度的有机质和重金属含量可能是叶片枯萎的主要原因.

4 结论

(1)社区生活垃圾的人工分拣效率为36.8 kg/h,分拣操作有一个逐步熟练的过程,分拣效率会随着分拣次数增加而增加.社区固定拾荒人员开展规范化的人工分拣操作,技术上是可行的.

(2)社区分拣出的厨余垃圾有机质含量高达44.693%,营养元素N、P、K的含量分别为2.586%、0.649%和1.274%,C/N为17.427,而重金属含量仅为从混合垃圾集中分选出的可堆肥原料的0.07~0.82倍,是理想的生物资源化利用原料.

(3)社区分拣出的厨余垃圾水分含量高达85.4%,采用简易机械压缩脱水可以渗滤液的形式去除占垃圾总质量28.0%的水分,但压缩脱水后的厨余垃圾水分含量仍高达78.7%,是影响后续堆肥处理效果的关键因素.

(4)采用生物稳定和稀释的渗滤液浇灌凤仙花,植株干重是清水浇灌的1.46~2.94倍,压缩渗滤液浇灌具有较好的肥效.

(5)基于社区人工分拣模式下的生活垃圾减量化集成技术可以减排垃圾产生量的52.6%,但是分拣工人的补贴和管理措施、高水分厨余垃圾的烘干脱水或厌氧处理技术、渗滤液浇灌的长期风险等问题还有待进一步研究.

参考文献:

- [1] 中国城市环境卫生协会.全国城镇环境卫生“十一五”规划[R].2006.1-2.
- [2] 张越.城市生活垃圾减量化管理经济学[M].北京:化学工业出版社,2004.1-5.
- [3] 陈海滨,章程,潘绮.生活垃圾减量化的综合效益及优先地位分析[J].环境科学与技术,2006,29:84-86.
- [4] 王如松,颜京松,徐成,等.城市生活垃圾处理利用生态工程技术[J].农村生态环境,1999,15(3):1-5.
- [5] Colon M, Fawcett B. Community-based household waste management: Lessons learnt from EXNORA's 'zero waste management' scheme in two South Indian cities[J]. Habitat International, 2006, 30(4): 916-931.

- [6] Zurbrugg C, Drescher S, Patel A, *et al.* Decentralised composting of urban waste—an overview of community and private initiatives in Indian cities [J]. *Waste Manage*, 2004, **24** (7): 655-662.
- [7] Zurbrugg C, Drescher S, Rytz I, *et al.* Decentralised composting in Bangladesh, a win-win situation for all stakeholders [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2005, **43** (3): 281-292.
- [8] 康晓鹏, 王世和. 南京市居民生活垃圾调查及减量化分析 [J]. *环境科学与管理*, 2009, **34** (2): 46-48.
- [9] 章嫣. 杭州市生活垃圾分类模式新探 [J]. *城市管理与科技*, 2008, **10** (6): 70-71.
- [10] 林媚珍, 夏丽娜. 广州城市生活垃圾分类收集处理方法 [J]. *广州大学学报 (自然科学版)*, 2004, **3** (5): 438-442.
- [11] Tchobanoglous G, Theisen H, Vigil S. 固体废物的全过程管理——工程原理及管理问题 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 69-76.
- [12] 耿士锁. 高含水率有机垃圾资源化处置对策 [J]. *江苏环境科技*, 2002, **15** (2): 24-25.
- [13] Velis C A, Longhurst P J, Drew G H, *et al.* Biodrying for mechanical-biological treatment of wastes: A review of process science and engineering [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100** (11): 2747-2761.
- [14] 陈朱蕾, 周传斌, 周磊, 等. 粪便与厨余垃圾地理式处理工艺研究 [J]. *给水排水*, 2005, **31** (5): 74-79.
- [15] 中国国家标准化管理委员会. 城镇垃圾农用控制标准 (GB 8172-87) [S]. 1987. 1-2.
- [16] 李春萍, 蒋建国, 李国学, 等. 北京市生活垃圾堆肥适宜性的判别分析 [J]. *环境卫生工程*, 2009, **17** (2): 54-57.
- [17] Eggert R. *Engineering design* [M]. New Jersey: Pearson Prentice Hall Press, 2005. 394.
- [18] 邵立明, 何晶晶, 刘永德. 农村生活垃圾源头分流收集效果影响因素分析 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26** (1): 326-329.
- [19] Medina M. Scavenger cooperatives in Asia and Latin America [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2000, **31** (1): 51-69.
- [20] 刘京媛, 徐海云. 我国城市生活垃圾分类收集与收费方式探讨 [J]. *环境卫生工程*, 2004, **12** (1): 23-27.
- [21] 徐振渠. 垃圾收集与利用的优化整合 [J]. *建设科技*, 2003, **9**: 56-57.
- [22] 杜金科夫, 扎伊采夫. 垃圾的处理和利用 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1987. 150.
- [23] Gutierrez-Miceli F A, Garcia-Gomez R C, Rincon-Rosales R, *et al.* Formulation of a liquid fertilizer for sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) using vermicompost leachate [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**: 6174-6180.
- [24] Cheng C Y, Chu L M. Phytotoxicity data safeguard the performance of the recipient plants in leachate irrigation [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **145** (1): 195-202.
- [25] Thian S H. Leachate treatment by floating plants in constructed wetland [D]. Malaysia: Universiti Teknologi Malaysia, 2005.