

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.05.011

外加热源对典型有机废弃物生物干化的影响

向虹霖, 蒋建国, 高语晨, 孟园, 徐一雯, 艾克来木·艾合买提,
鞠彤瑶, 韩思宇, 郭晏然
(清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 通过对典型有机废弃物进行生物干化实验,探究了外加热源对生物干化效果的影响。在不加热和40℃加热两个条件下,对果蔬、厨余和园林垃圾等典型有机废弃物的生物干化效果进行了比较。结果发现,外加热源对不同基质干化效果的影响程度不同,但能够明显提升有机废弃物生物干化的效果。加热可使得反应器保持高温状态,使基体长期处于微生物代谢旺盛阶段,有利于生物干化。果蔬与园林垃圾协同干化时,升温累积值在10 d后达到了151℃·d,比不加热条件下高出111%。在加热条件下,园林垃圾独立干化的最终含水率能降到10.34%、生物干化指数为2.54、低位热值为13 920.8 kJ/kg,优于不加热条件。

关键词: 有机废弃物; 生物干化; 外加热源; 累积升温曲线

中图分类号: TU993 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)05-0071-08

Effect of Additional Heating Source on Bio-drying of Typical Organic Wastes

XIANG Hong-lin, JIANG Jian-guo, GAO Yu-chen, MENG Yuan, XU Yi-wen,
AIHEMAITI Aikelaimu, JU Tong-yao, HAN Si-yu, GUO Yan-ran
(School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Effect of additional heating source on bio-drying of typical organic wastes was investigated by bio-drying experiments. The bio-drying effect of typical organic wastes (such as fruit and vegetable waste, kitchen waste and garden waste) with 40℃ heating or without heating was compared. The effects of additional heating source on different substrates were quite different, but heating could significantly improve the bio-drying efficiency of all organic wastes. Heating could keep the reactor at a high temperature and make the substrate degradation in the vigorous metabolism stage for a long time, which was beneficial to bio-drying. When fruits and vegetables were dried together with garden wastes, the cumulative value of heating reached 151℃·d after 10 days, which was 111% higher than that without heating. Under the condition of heating, the final moisture content of garden waste could be reduced to 10.34%, the bio-drying index was 2.54, and the lower heating value (LHV) was 13 920.8 kJ/kg, which were better than those without heating.

Key words: organic wastes; bio-drying; additional heating source; cumulative heating curve

随着我国城市经济迅速发展和人口迅猛增长,城市生活垃圾的产生量也随之增多。据统计,2017年我国城市生活垃圾清运量达到了 2.15×10^8 t,与10年前相比几乎翻了一倍。研究表明^[1-2],我国城

市生活垃圾以厨余类等有机垃圾为主,占比近60%;同时,果蔬垃圾的处理问题也随着农村产业结构的不断优化调整而愈发突出^[3]。近年我国城市绿化建设迅速发展,建成区绿地面积达20 991 km²

(2017年),绿化覆盖率达40.91%,由此产生的园林绿化垃圾也逐年增加,北京市每年园林垃圾的产生量至少在 $200 \times 10^4 \text{ t}^{[1]}$ 。厨余和果蔬垃圾含水率高但热值低^[4-5],易被微生物降解^[6];园林垃圾富含木质素、纤维素等大分子有机物,其含水率较低且易腐化。

生物干化技术,是一种由机械控制曝气,利用好氧微生物降解有机物产生的能量^[6-9],对流蒸发快速去除有机废弃物水分的生物处理手段。研究表明,蒸发是水分的主要损失方式,占90%,其中蒸发热则是主要的热量消耗来源^[10]。生物干化与堆肥的区别在于其需要保留废弃物基质的有机质含量^[11],通过抑制有机物的降解保存能量^[12],以保证干化后的产物可以用作生产垃圾衍生燃料(RDF)的原料^[6,13-15],研究表明,含水率为7%~15%的低水分物料具有适合作为燃料的热值,一般为15 000 kJ/kg左右^[16]。

为达到以上目的,需对生物干化技术进行优化。研究表明,微生物在降解高分子质量有机物方面起到关键作用^[17],而温度是影响微生物代谢活动最重要的因素,因此通过外加热源保证微生物代谢活动可有助于提升生物干化效果^[13,18]。研究证明,对干化设备外加热源可灵活调节堆体温度,使反应基质温度保持在较高水平,刺激微生物代谢的同时保证较高的水分蒸发效率。尤其在冬季寒冷条件下,为保证生物干化效果,预加热可缩小其与夏季高温条件下的生物干化差异^[19]。一般而言,温度为45℃时干化失水速率最快^[20],持续通风条件下采用40℃加热获得产物的含水率相对更低^[21-22],部分实验还通过预热空气通风强化生物干化效果^[23]。

目前未曾针对果蔬、厨余以及园林垃圾等典型有机废弃物的干化条件进行深入研究,外加热源对3种不同基质生物干化效果带来的影响未知。因此本实验针对此3类典型有机废弃物,在外加热源条件下,对其温度、含水率和有机质含量等指标进行分析,并与传统生物干化效果进行对比,旨在为有机废弃物生物干化后物料制备RDF提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本实验所用有机废弃物均根据我国垃圾的一般分类自行配制,原料均购于清华大学照澜院菜市场及食堂,园林垃圾来源于山东某农场。果蔬垃圾:

40%白菜+20%萝卜+30%苹果+10%橘子;厨余垃圾:40%白菜+35%米饭+20%肉+5%豆腐。园林垃圾:50%麦冬草+50%柳树枝叶。

本实验所用园林垃圾共两种,其中新鲜园林垃圾作为物料用于探究独立干化效果,含水率为70%左右;晾晒后的园林垃圾作为调理剂,与果蔬、厨余垃圾联合干化,起调节含水率的作用,初始含水率为57.18%。实验所用有机废弃物的相关物理性质如表1所示。

表1 有机废弃物的物理性质

Tab.1 Properties and moisture content of organic wastes

项 目	果蔬+园林垃圾	厨余+园林垃圾	园林垃圾
MC/%	72.00 ± 0.40	69.75 ± 0.42	73.25 ± 0.72
VS:TS/%	90.25 ± 0.43	92.46 ± 0.56	89.74 ± 0.46
C/%	40.51 ± 0.01	45.53 ± 0.17	42.61 ± 0.13
H/%	6.16 ± 0.01	6.68 ± 0.06	5.88 ± 0.00
N/%	1.70 ± 0.01	3.55 ± 0.05	2.59 ± 0.11
C/N值	23.80 ± 0.15	12.81 ± 0.23	16.49 ± 0.67

生物干化性能与微生物密切相关,含水率(MC)对微生物活性起到十分重要的影响^[7]。已有研究表明,初始含水率为70%的物料的生物干化指数最高^[14,24],因此本实验以园林垃圾为调理剂,将实验所用物料初始含水率均控制在70%左右。果蔬与园林垃圾混合物料的初始含水率为72.00%,厨余与园林垃圾的混合物料初始含水率为69.75%,独立干化的园林垃圾初始含水率为73.25%,其挥发性有机质含量(VS/TS)为89.74%左右,C/N值为16.49。实验前,果蔬、厨余垃圾分别破碎成边长为1cm的立方体块状物,园林垃圾经破碎机切割为1~3cm的草叶段,混匀后放入冰箱(4℃)备用。

1.2 实验设备

实验以3种不同基质(果蔬、厨余、园林垃圾)作为物料,探究在不加热和40℃加热的条件下,反应器的温度、物料含水率以及挥发性有机质含量变化,以定量比较生物干化效果。实验在密闭装置中进行,共持续10d。

本实验使用的生物干化装置如图1所示,主要由圆柱体的中心反应器、温度监控系统以及通风系统构成。中心反应器为PVC材质,内径为15cm、高为29cm,总容积为15L。通风系统与反应器由多孔板连通,孔径为2mm,通过气泵进行通风布气。入口处放置硅胶粒,以避免因空气湿度过大而增大实验误差^[7]。为了研究外加热源对生物干化效果

的影响,外层包裹可加热型保温带用于加热,且实验在聚氨酯材质的保温箱中进行,以提升反应器保温效果。通风系统由转子流量计控制通风量,根据已有研究,本实验采用 $48 \text{ L}/(\text{kg} \cdot \text{h})^{[25-26]}$ 的通风量进行连续通风。反应器顶部装入海绵和硅胶粒用于吸收冷凝水蒸气^[13],避免未吹出的水回落至物料而增大误差。

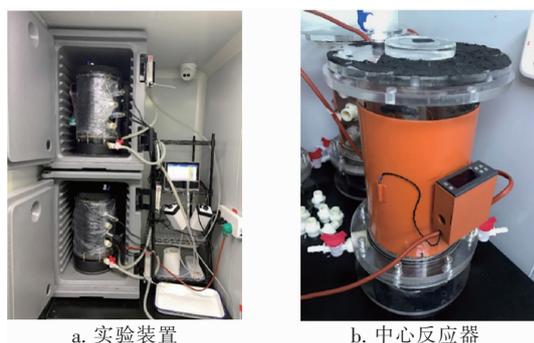


图1 生物干化装置照片

Fig. 1 Photographs of bio-drying equipment

1.3 监测项目与方法

本实验采用温度传感器对堆体内部温度进行在线连续监测,并自动记录温度数据。生物干化前后物料样品由元素分析仪进行元素(C、N、H和O)测定,干化过程中每隔12h通过取样口进行取样,分别使用105℃烘箱和600℃马福炉测定含水率(MC)和挥发性固体含量(VS)。

为更好地衡量不同条件下有机废弃物的生物干化效率,采用生物干化指数 I 对生物干化效果进行判定,即水分去除率与挥发性固体含量降解率之比。不同的 I 值是根据反应促进蒸发的能力与系统能够带走水蒸气能力的不同而发生改变的^[12,25],从而证明该通风条件是否适用于生物干化,其定义见式(1)。为了比较不同干化条件下的温度变化及差异,对各组实验的温度累积指标 $TC^{[8,27-28]}$ (即某时刻物料温度与周围环境温度之差的累积和)进行测算,其定义见式(2)。

① 生物干化指数 I

$$I = w_1/w_2 \quad (1)$$

式中: w_1 为水分总去除率,%; w_2 为挥发性固体的总降解率,%。

② 温度累积指标 TC

$$TC = \sum_{i=1}^n (T_{mi} - T_{ai}) \cdot \Delta t \quad (2)$$

式中: T_{mi} 、 T_{ai} 分别为第 i 天的物料、环境温度,℃; n 为实验总时长; Δt 为该温度持续时间,d。

2 结果与讨论

2.1 温度变化

在相同通风量条件下,对不同基质生物干化过程中的温度变化进行监测,结果如图2所示。外加40℃热源时,协同干化物料均能够在前3h快速升温到35℃。研究表明,由于生物干化实验需要通过增大通风量来降低物料含水率,因此其最高温度往往在55℃左右^[7],而对于一些中温微生物而言,为达到理想的生物干化性能,温度需保持在中温水平(35℃左右)以上^[29],因此外加热源十分有利于创造适合生物代谢反应的条件。

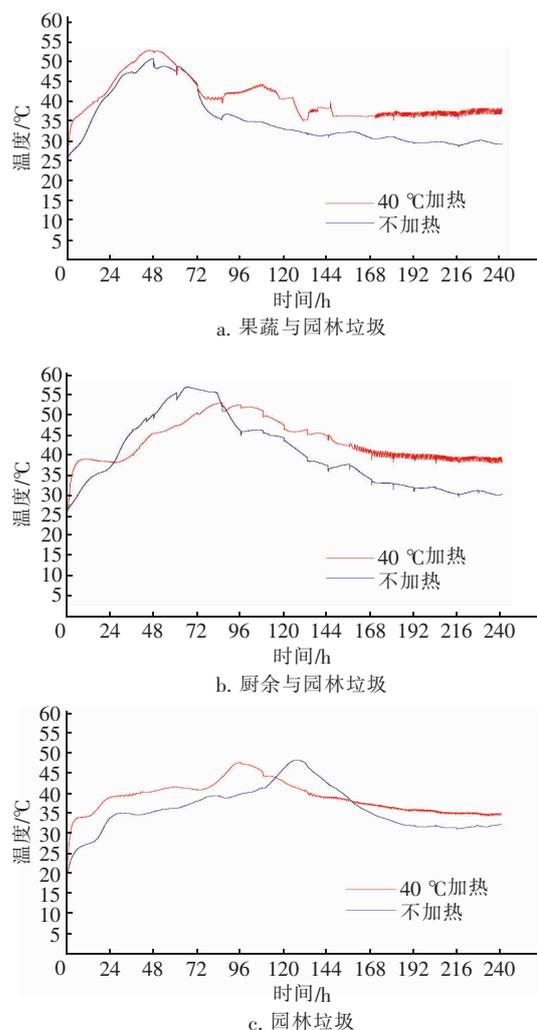


图2 不同基质协同干化时温度变化曲线

Fig. 2 Variation of bio-drying temperature with different substrates

果蔬与园林垃圾协同干化实验中,外加40℃热

源的基体升温速率更快,在45 h左右达到52.9℃的温度峰值,且反应温度长时间稳定在40℃左右。随着反应的进行,微生物代谢活动逐渐降低,反应堆体温度仍保持35℃以上直至实验结束。与之相比,不加热条件下的果蔬与园林垃圾堆体最高温度仅为50.7℃,且在80 h左右温度迅速下降最终趋于室温。厨余与园林垃圾协同干化实验中,其情况存在些许差异:不加热条件下的反应堆体率先达到57℃的高温,但因其保温性能较差,在达到峰值后的24 h内温度迅速下降,并于反应132 h后下降至40℃以下;与之相比,外加40℃热源条件下的反应器在最初50 h迅速升温至35℃以上,此后温度保持较为稳定的升温状态,反应86 h时达到峰值53℃,并长期稳定在40℃以上。园林垃圾独立干化实验中,温度变化趋势与协同干化相似,40℃加热条件下在96 h左右达到峰值47.8℃,而未加热时物料升温存在明显的滞后性,加热明显提高了生物干化反应速率,且反应中期温度下降更为缓慢。加热条件下堆体温度全程平均保持在35℃以上,保证了持续稳定的干化温度需求。

在果蔬与园林垃圾协同干化实验中,不加热堆体温度在40℃以上的时间占实验总时长的22.8%,40℃加热的则占45.2%;在厨余与园林垃圾协同干化实验中,不加热基体温度在40℃以上的时间占实验总时长的42.5%,40℃加热时则占62.08%;园林垃圾独立干化规律相似。有研究表明,高温期和升温期是堆体产、脱水的主要阶段,也是脱水效率的峰值期^[30]。从温度来看,外加热源整体对厨余与园林垃圾协同干化的影响相对较小,但其带来的更适合微生物代谢反应环境的优越性十分显著。

2.2 含水率和有机质含量

对果蔬与园林垃圾、厨余与园林垃圾协同干化过程中含水率进行检测,结果如图3所示。可以看出,40℃加热条件下基质含水率下降相对更快。在干化过程中,物料的含水率均存在波动和短暂升高的情况,主要由于高温条件下,代谢水产生量可能会大于通风带走水蒸气的量^[31]。外加热源条件下,果蔬与园林垃圾干化后最终含水率达到22.30%,厨余与园林垃圾干化后最终含水率为21.48%;相比不加热,外加热源对果蔬与园林垃圾协同干化的影响更为明显。针对厨余和园林垃圾干化的基质条件,最后2 d的基体含水率近乎相似,考虑其温度差

异,这可能是由于随着时间变化微生物的代谢活动减弱,含水率的变化主要受到通风量的影响,相同通风量能够带走的水蒸气量有限,代谢活动更高的基体则干化效果可能因此受到限制。园林垃圾独立干化实验中,不加热条件下最终含水率为32.62%,而在40℃加热条件下则为10.34%,由此可见,外加热源对降低园林垃圾含水率的效果十分显著,而且外加热源干化后使得物料可以满足垃圾衍生燃料(RDF)含水率<25%的生产条件^[32],有利于后续的资源化利用。

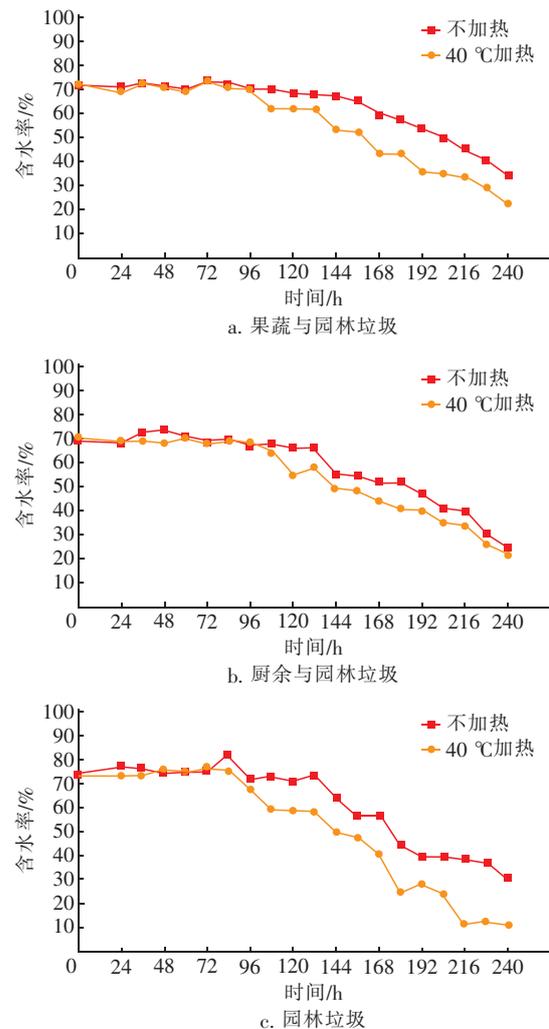


图3 不同基质协同干化的含水率变化曲线

Fig.3 Variation of moisture content with different substrates

随着反应的进行,不同基质的挥发性固体含量逐渐下降(如图4所示),其中加热对果蔬与园林垃圾协同干化的挥发性固体含量影响不大,VS最终含量分别为83.83%(不加热)和83.28%(40℃加热)。厨余与园林垃圾协同干化后,其挥发性固体

含量在不加热条件下降低更明显,且随着时间变化存在较大波动。结合温度变化曲线可知,不加热条件下厨余与园林垃圾协同干化的温度先升高,导致前期微生物的代谢活动更加旺盛^[33],可降解的有机物被迅速分解利用,到干化后期由于可降解物质不足使得微生物难以保持较高活性。反应后期,加热基体温度存在升高的滞后性,使短期内基质降解加快,出现明显的挥发分含量下降。随着反应的继续进行,不同条件下的挥发性固体含量均趋于稳定,VS最终含量分别为87.08% (不加热)和88.50% (40℃加热)。

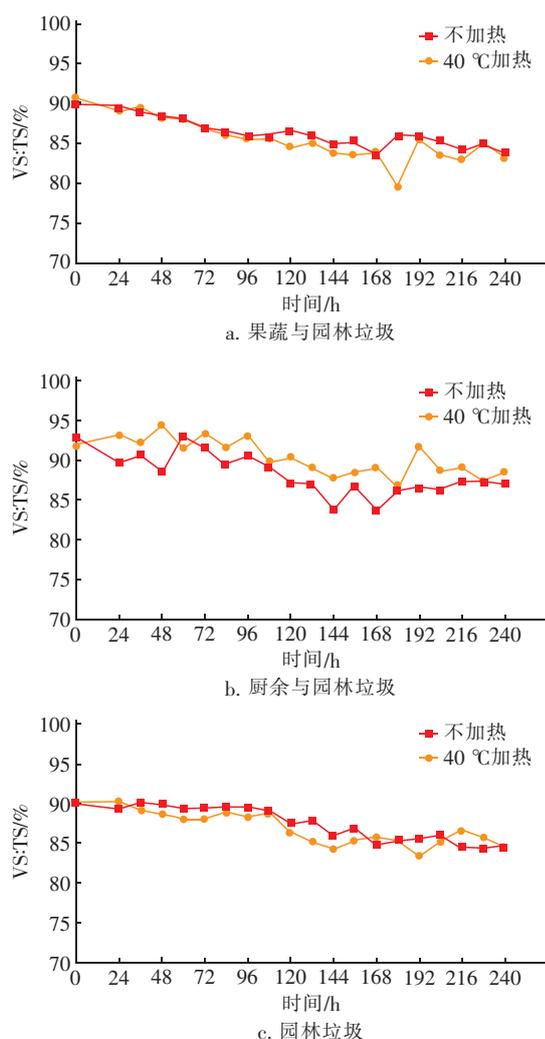


图4 不同基质协同干化的挥发性固体含量变化曲线

Fig.4 Variation of volatile solid with different substrates

不同条件下,园林垃圾独立干化的挥发性固体含量变化趋势相似,但有机质含量无明显减少,VS最终含量均在84%左右,协同干化最终的有机质含量与园林垃圾自身有机质含量十分相近,说明在协

同干化反应中被消耗的有机质主要来自果蔬或厨余垃圾,这也可以证明园林垃圾独立干化时含水率的降低受到外加热源的影响较大,因此40℃加热能有效提升其干化效果。

2.3 累积升温变化规律

为更直观地了解不同工况下的干化温度变化,对其升温累积情况进行比较,如图5所示。可以看出,所有工况下累积升温曲线大致均呈S型。在不加热条件下,3种基质在0~3d升温迅速,果蔬和园林垃圾之后趋于稳定,其余两种基质在3~6d升温速率逐渐趋缓,7~10d温度趋于稳定。这可能是由于反应时间增加,原料的容重减小而增大了原料通气空间,从而增加了物料与通风的对流损失^[34]。在加热条件下,3种基质在5d时仍有较大的升温速率,直至干化结束。比较40℃加热和不加热条件下的物料升温累积效果,前者明显优于后者。果蔬和园林垃圾协同干化的升温累积值差异更为明显,10d后的升温累积值为151℃·d,比不加热条件下(71.4℃·d)高出111%。实验结果表明,反应初期生物代谢活动旺盛,加热使得物料升温更高且维持高温时间更长,能更加充分地降解物料有机质以产生更多的热量。反应后期不加热堆体,温度虽高于室温但整体温度下降显著,冷却阶段的低温环境不利于水分蒸发,空气的吸湿能力受到限制,不利于生物干化反应的继续进行^[29]。

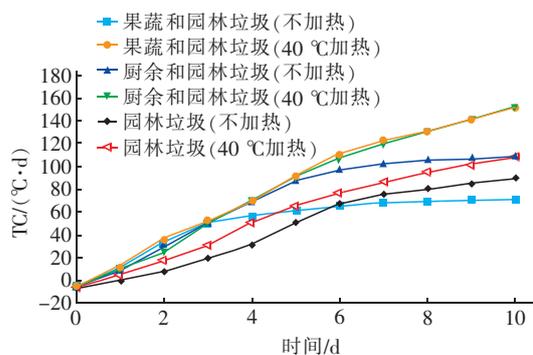


图5 不同基质条件及工况下升温累积变化曲线

Fig.5 Variation of temperature accumulation under different substrates and heating conditions

2.4 生物干化效果分析

综合上述结果及分析,计算得到不同基质条件下外加热源对生物干化指数以及物料低位热值(LHV)的影响,如表2所示。其中物料的低位热值可通过以下经验公式得到^[35]:

$$\text{低位热值} = \text{可燃分质量分数} \times 190 - \text{废物含水率} \times 25 \quad (3)$$

表2 不同基质条件下外加热源对生物干化指数和低位热值的影响

Tab.2 Influence of additional heating sources on bio-drying index and LHV with different substrates

项 目	生物干化指数	最终含水率/%	低位热值/(kJ·kg ⁻¹)		
			初始	最终	
果蔬+ 园林垃圾	不加热	2.00	34.18	3 057.6	9 629.5
	40℃加热	2.02	22.30	2 944.8	11 736.7
厨余+ 园林垃圾	不加热	2.03	25.05	3 687.2	11 773.6
	40℃加热	2.48	21.48	3 453.8	12 665.9
园林垃圾	不加热	2.30	32.62	2 611.3	10 447.0
	40℃加热	2.54	10.34	2 893.8	13 920.8

果蔬和园林垃圾协同干化时,40℃加热和不加热的生物干化指数无明显差异,分别为2.00和2.02,说明外加热源对果蔬与园林垃圾协同生物干化效果影响较小,主要体现在外加热源对反应温度无显著影响,且外加热源条件下消耗有机质含量相对更多。厨余和园林垃圾协同干化时,外加热源对其影响显著,40℃加热条件下生物干化指数为2.48,不加热条件下仅为2.03。园林垃圾独立干化效果规律与此类似,加热条件下的生物干化指数达2.54,最终含水率降至10.34%。由此可见,外加热源能同时有效降低果蔬和园林垃圾协同干化的含水率和有机质含量,因此对生物干化指数无显著影响。厨余与园林垃圾干化结果恰好相反,不加热条件下反而使得有机质含量显著降低。比较不同基质条件下生物干化指数可以发现,加热条件下园林垃圾独立生物干化效果最佳,在得到最低含水率的同时,有机质含量无大幅降低,这可能是由于园林垃圾独立干化时其相对蓬松的结构会导致膨胀效应,使空气能更好地穿过物料通过对流进行干化^[16]。研究表明,C/N值在20左右为有机固体废物堆肥或生物干化过程的理想条件,大于20或30时会减弱其效果,因此园林垃圾独立干化时(C/N值为16)有一定的优越性。

对比不同条件下各物料低位热值变化可以发现,园林垃圾加热干化后的低位热值较初始值增长约3.8倍,且比不加热条件下的最终热值高3 473.8 kJ/kg,说明外加热源对园林独立干化的优化效果最为明显。根据美国材料与试验协会(ASTM)对制备的垃圾衍生燃料低位热值不低于14 600 kJ/kg的要

求,园林垃圾加热干化结果基本满足典型有机废弃物制备RDF的要求,这为之后的研究提供了可靠的数据基础。

3 结论

① 通过对典型有机废弃物不同温度条件下的生物干化效果进行研究,发现加热对于保持反应器持续高温具有显著的优越性,它可以使得基体长期处于微生物代谢活动更为旺盛阶段,更加有利于生物干化。园林垃圾独立干化在加热条件下能够达到10.34%的最终含水率,且生物干化指数能够达到2.54,最终低位热值为13 920.8 kJ/kg,干化效果十分显著。

② 外加热源对不同基质条件生物干化效果的影响程度存在明显差异,保持相对更高的温度可以提升空气带走水蒸气的能力,同时对强化厨余垃圾生物干化效果更为显著。夏季实验室温度整体偏高,外加热源对环境条件影响不大,若是在冬季寒冷条件下对物料进行干化,外加热源能更好地提升生物干化效果,且能提高生物干化效率。

③ 外加热源会增大能耗,在实际应用过程中,需要根据物料本身特点以及干化环境的实际情况选择是否需要外加热源。

参考文献:

- [1] 王艳秋,付双立,任绍娟.北京市城市垃圾资源化利用潜力与途径研究[J].环境与可持续发展,2015,40(1):87-89.
WANG Yanqiu, FU Shuangli, REN Shaojuan. Study on the potential and approach of waste utilization in Beijing [J]. Environment and Sustainable Development, 2015, 40(1):87-89 (in Chinese).
- [2] 魏潇潇,王小铭,李蕾,等.1979~2016年中国城市生活垃圾产生和处理时空特征[J].中国环境科学,2018,38(10):3833-3843.
WEI Xiaoxiao, WANG Xiaoming, LI Lei, et al. Temporal and spatial characteristics of municipal solid waste generation and treatment in China from 1979 to 2016 [J]. China Environmental Science, 2018, 38(10):3833-3843 (in Chinese).
- [3] 张军文,沈建.城市果蔬垃圾处理现状及再利用对策[J].安徽农业科学,2017,45(36):41-43,49.
ZHANG Junwen, SHEN Jian. Present situation of waste treatment of fruits and vegetables in cities and countermeasures for reuse [J]. Journal of Anhui

- Agricultural Sciences, 2017, 45 (36): 41 - 43, 49 (in Chinese).
- [4] ZHAO S Q, HUANG W X, YIN R, *et al.* The effect of bio-drying pretreatment on heating values of municipal solid waste [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 1010/1012: 537 - 546.
- [5] BENIS K Z, SAFAIYAN A, FARAJZADEH D, *et al.* Municipal solid waste characterization and household waste behaviors in a megacity in the northwest of Iran [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2018, 16(5): 4863 - 4872.
- [6] MOHAMMED M, OZBAY I, DURMUSOGLU E. Bio-drying of green waste with high moisture content [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2017, 111: 420 - 427.
- [7] ZHOU H B, CHEN T B, GAO D, *et al.* Simulation of water removal process and optimization of aeration strategy in sewage sludge composting [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 171: 452 - 460.
- [8] 余旺, 黄绍松, 孙水裕, 等. 接种菌剂和外加能源对污泥生物干化效果的影响 [J]. *环境污染与防治*, 2012, 34(8): 39 - 43.
YU Wang, HUANG Shaosong, SUN Shuiyu, *et al.* Effect of microbial inoculants and additional energy on bio-drying of dewatered sludge [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2012, 34(8): 39 - 43 (in Chinese).
- [9] 吴直颖, 蔡璐, 郑国砥, 等. 生物干化工艺对污泥有机质组分与颗粒结构的改善 [J]. *中国给水排水*, 2016, 32(5): 4 - 8.
WU Zhiying, CAI Lu, ZHENG Guodi, *et al.* Improvement of organic composition and granular structure of sewage sludge by bio-drying process [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(5): 4 - 8 (in Chinese).
- [10] LIU T T, CUI C W, HE J G, *et al.* Effect of different bulking agents on water variation and thermal balance and their respective contribution to bio-generated heat during long-term storage sludge biodrying process [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(18): 17602 - 17610.
- [11] 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.
- [12] ZHANG D Q, HE P J, JIN T F, *et al.* Bio-drying of municipal solid waste with high water content by aeration procedures regulation and inoculation [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(18): 8796 - 8802.
- [13] MA J, ZHANG L, MU L, *et al.* Thermally assisted bio-drying of food waste: synergistic enhancement and energetic evaluation [J]. *Waste Management*, 2018, 80: 327 - 338.
- [14] SONG X, MA J, GAO J D, *et al.* Optimization of bio-drying of kitchen waste: inoculation, initial moisture content and bulking agents [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2015, 19(1): 496 - 504.
- [15] ZHANG D F, LUO W H, YUAN J, *et al.* Co-biodrying of sewage sludge and organic fraction of municipal solid waste: role of mixing proportions [J]. *Waste Management*, 2018, 77: 333 - 340.
- [16] COLOMER-MENDOZA F J, ROBLES-MARTINEZ F, HERRERA-PRATS L, *et al.* Biodrying as a biological process to diminish moisture in gardening and harvest wastes [J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2012, 14(6): 1013 - 1026.
- [17] BIAN B, HU X, ZHANG S, *et al.* Pilot-scale composting of typical multiple agricultural wastes: parameter optimization and mechanisms [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 287: 121482.
- [18] SLEZAK R, KRZYSZEK L, LEDAKOWICZ S. Biological drying of municipal solid waste from landfill [J]. *Dry Technology*, 2019, 38(1/2): 1 - 11.
- [19] 张晨, 李杨杨, 董黎明, 等. 预加热对柠檬酸脱水污泥冬季生物干化的影响 [J]. *中国环境科学*, 2019, 39(7): 242 - 251.
ZHANG Chen, LI Yangyang, DONG Liming, *et al.* Effect of preheating on bio-drying of citric acid dewatered sludge in winter [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(7): 242 - 251 (in Chinese).
- [20] ADANI F, BAIDO D, CALCATERRA E, *et al.* The influence of biomass temperature on biostabilization-biodrying of municipal solid waste [J]. *Bioresource Technology*, 2002, 83(3): 173 - 179.
- [21] 黄文雄, 苏红玉, 黄丹丹, 等. 通风方式对高含水率垃圾生物干化的影响 [J]. *中国环境科学*, 2012, 32(8): 1480 - 1486.
HUANG Wenxiong, SU Hongyu, HUANG Dandan, *et al.* Effect of aeration modes on high water content municipal solid waste bio-drying [J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(8): 1480 - 1486 (in Chinese).
- [22] 赵进. 城市生活垃圾生物干化工艺优化设计研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.

- ZHAO Jin. Design and Research on the Municipal Solid Waste Bio-drying Process Optimization [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015 (in Chinese).
- [23] 苗秋实. 污水厂污泥与厨余垃圾联合生物干化试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
- MIAO Qiushi. Experimental Study on Co-bio-drying of Sewage Sludge and Kitchen Waste [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013 (in Chinese).
- [24] HUILINIR C, VILLEGAS M. Simultaneous effect of initial moisture content and airflow rate on biodrying of sewage sludge [J]. *Water Research*, 2015, 82: 118 – 128.
- [25] YUAN J, ZHANG D F, LI Y, *et al.* Effects of the aeration pattern, aeration rate, and turning frequency on municipal solid waste biodrying performance [J]. *Journal of Environmental Management*, 2018, 218: 416 – 424.
- [26] 向虹霖, 蒋建国, 高语晨, 等. 通风量对有机废弃物生物干化的影响 [J]. *环境工程*, 2020, 38 (2): 128 – 134.
- XIANG Honglin, JIANG Jianguo, GAO Yuchen, *et al.* Effect of air-flow rate on bio-drying of organic waste [J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38 (2): 128 – 134 (in Chinese).
- [27] ZHAO L, GU W M, HE P J, *et al.* Effect of air-flow rate and turning frequency on bio-drying of dewatered sludge [J]. *Water Research*, 2010, 44 (20): 6144 – 6152.
- [28] 赵进, 王发洲, 王加军, 等. 堆积参数对 MSW 生物干化的影响 [J]. *安全与环境学报*, 2016, 16 (6): 281 – 286.
- ZHAO Jin, WANG Fazhou, WANG Jiajun, *et al.* Impact of the piling of parameters on the MSW drying process [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, 16 (6): 281 – 286 (in Chinese).
- [29] MA J, ZHANG L, MU L, *et al.* Energetic enhancement of thermal assistance in the cooling stage of biodrying by stimulating microbial degradation [J]. *Waste Management*, 2019, 89: 165 – 176.
- [30] 陈俊, 黄慧明, 魏本平, 等. 污泥生物干化工艺脱水过程及其能耗分析 [J]. *中国给水排水*, 2016, 32 (23): 130 – 134.
- CHEN Jun, HUANG Huiming, WEI Benping, *et al.* Analysis on dewatering process and energy consumption in sewage sludge bio-drying process [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32 (23): 130 – 134 (in Chinese).
- [31] CAI L, GAO D, CHEN T B, *et al.* Moisture variation associated with water input and evaporation during sewage sludge bio-drying [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 117: 13 – 19.
- [32] RAGAZZI M, RADA E C. RDF/SRF evolution and MSW bio-drying [J]. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 2012, 163: 199 – 208.
- [33] ZHAO L, GU W M, SHAO L M, *et al.* Sludge bio-drying process at low ambient temperature: effect of bulking agent particle size and controlled temperature [J]. *Drying Technology*, 2012, 30 (10): 1037 – 1044.
- [34] YUAN J, ZHANG D F, MA R N, *et al.* Effects of inoculation amount and application method on the biodrying performance of municipal solid waste and the odor emissions produced [J]. *Waste Management*, 2019, 93: 91 – 99.
- [35] 何品晶, 邵立明. 固体废物管理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- HE Pinjing, SHAO Liming. *Solid Waste Management* [M]. Beijing: High Education Press, 2004 (in Chinese).

作者简介: 向虹霖 (1994 –), 女, 四川绵阳人, 硕士研究生, 研究方向为有机废弃物生物干化及其资源化利用。

E-mail: xiangh13@163.com

收稿日期: 2020-01-15

修回日期: 2020-03-15

(编辑: 任莹莹)