

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.17.021

热通风强化厨余垃圾生物干化及嗜热菌筛选与应用

杨国栋¹, 李婧琳², 韦嘉盈², 宋萌珠², 蒋建国²

(1. 深圳市宝安区市容环境综合管理服务中心, 广东 深圳 518101; 2. 清华大学 环境学院, 北京 100084)

摘要: 针对厨余垃圾处理过程中含水率高和降解时间长等问题,结合其无害化和资源化处理的主流思想,开发了热通风强化厨余垃圾生物干化技术,系统性评估了通风量和通风温度对生物干化效果的影响。在通风量为 $0.6\text{ L}/(\text{kg}\cdot\text{min})$ 和通风温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的优化条件下运行144 h,厨余垃圾堆体含水率可由65.1%降至47.9%,生物干化指数达到3.55。进一步在该条件下分离筛选出优势嗜热菌(*Siminovitchia thermophilus*),并将其接种至干化堆体中。结果表明,接种该优势菌可使堆体含水率在56 h内降至50%以下、在88 h内降至42.3%,显著提升了厨余垃圾干化效果,缩短了干化时间。

关键词: 厨余垃圾; 生物干化; 热通风; 优势嗜热菌

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)17-0146-06

Kitchen Waste Bio-drying Enhancement via Thermal Ventilation and Thermophilic Bacteria Utilization

YANG Guo-dong¹, LI Jing-lin², WEI Jia-ying², SONG Meng-zhu², JIANG Jian-guo²

(1. City Appearance and Environment Management & Service Center of Shenzhen Bao'an District, Shenzhen 518101, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A thermal ventilation enhanced bio-drying technology was developed to address the issues of high moisture content and prolonged degradation time in kitchen waste treatment, and in alignment with the prevailing concepts of harmless and resource-oriented waste management. The effects of ventilation rate and ventilation temperature on the efficiency of the bio-drying process were systematically investigated. Under ventilation rate of $0.6\text{ L}/(\text{kg}\cdot\text{min})$ and temperature of $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ sustained over 144 hours, the moisture content of the kitchen waste pile was reduced from 65.1% to 47.9%, with the bio-drying index reaching 3.55. The dominant thermophilic bacterial strain, *Siminovitchia thermophilus*, was further isolated and selected under the optimized conditions and subsequently inoculated into the drying pile. The inoculation of this dominant bacterial strain was found to reduce the moisture content of the pile to below 50% within 56 hours and to 42.3% within 88 hours, thereby significantly improving the drying efficiency of kitchen waste and reducing the overall drying time.

Key words: kitchen waste; bio-drying; thermal ventilation; dominant thermophilic bacteria

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07202005)

通信作者: 李婧琳 E-mail: lijingli21@mails.tsinghua.edu.cn

厨余垃圾具有高含水率(70%~80%)和易腐烂的特点^[1],导致其收储难度较大,长期堆放容易产生渗滤液,进而污染土壤、地下水和地表水等。如果在堆放和运输过程中管理防护不当,还可能导致与其他垃圾交叉污染,引发病菌传播扩散^[2]。

常见的厨余垃圾资源化技术包括厌氧消化、生物水解、生物干化、好氧堆肥、压榨+热水解技术等。其中,生物干化技术在去除水分、减容减重方面有较好的效果^[3];同时,其高温好氧过程可避免渗滤液的产生,并且生物干化产物还可被进一步加工制成垃圾衍生燃料(RDF)等资源化产品。因此,生物干化是一种经济、环保、实用的处理方法。该技术的原理是利用堆体中微生物降解有机物所产生的能量促进水分蒸发和去除,同时通过机械控制曝气,对流蒸发去除水分^[4]。然而传统生物干化技术的干化周期较长,通常在14 d以上,且生物干化系统运行稳定性较差^[5]。因此需要对传统生物干化技术进行改良,以进一步提高生物干化效能。

研究表明,嗜热微生物在生物干化过程中发挥着重要作用^[6-7],而温度是影响其代谢活动的关键因素,因此,适当的热辅助可有效提高微生物活性,进而提升干化效率。笔者通过在传统生物干化系统中引入外加热源,并结合通风量、通风温度等运行参数,对生物干化过程中厨余垃圾的温度、含水率等指标进行测定和分析。同时,通过从堆体分离、提取以及添加嗜热优势菌,探究其对生物干化的影响,以优化生物干化效果并缩短干化周期。

1 材料与方法

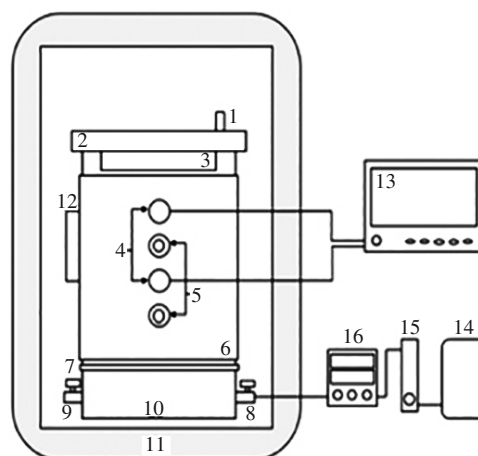
1.1 实验材料与运行条件

实验用厨余垃圾为自行配制,原料包括白菜(36%)、白萝卜(12%)、番茄(6%)、柑橘(6%)、香蕉皮(5%)、米饭(21%)、肉类(11%)、鸡蛋(3%),配制好的厨余垃圾原料含水率为83.6%。实验进一步使用木屑作为调理剂,按照3:1的比例将厨余垃圾与木屑充分混合,将堆体的初始含水率调至65%。生物干化反应器在不同辅热通风温度(40、60℃)和通风量[0.6、1.0 L/(kg·min)]下运行,探究不同条件下的生物干化效果。利用平板划线法对嗜热优势菌进行分离提纯及鉴定,并将其接种至固体培养基上,在55℃下富集、筛选。采用紫外可见分光光度计,在波长为600 nm条件下测定接种菌液的OD

值,直至其达到需求浓度。菌种鉴定通过取纯化菌种的PCR产物进行DNA测序。

1.2 实验装置

实验采用的生物干化装置如图1所示,主要包括生物干化反应器、温度监控系统和通风系统。生物干化反应器由圆柱中心反应器及底部的渗滤液收集器组成,中间由多孔板连通。外部包裹约3 cm厚的海绵,并置于保温箱内,以减少实验过程中温度散失所造成的影响。通风系统通过位于渗滤液收集器的进风口进风,经过多孔板送风,以避免气流分布不均匀的问题。同时,通风系统由玻璃转子流量计控制通风量,并在测温口进行实时温度测量。圆柱中心反应器顶部安装了约5 cm厚的海绵和硅胶粒,用于吸收反应过程中产生的冷凝水,并在每次取样时进行更换。



1.排气孔 2.中心反应器盖 3.海绵及硅胶粒 4.测温口 5.取样口
6.PVC制反应器 7.多孔板 8.进风口 9.渗滤液排放口 10.渗滤液收集器 11.保温箱隔热层 12.外加热源 13.实时温度监测器
14.气泵 15.转子流量计 16.加热温控仪

图1 生物干化反应器

Fig.1 Bio-drying reactor

1.3 检测方法

每8 h分别从上、下取样口各取一次样,将样品置于105℃烘箱中烘干24 h,取出样品冷却后称量,再将样品置于105℃烘箱中烘干0.5 h,冷却称量样品直至恒质量,采用以下公式计算含水率:

$$MC = \frac{m_1}{m_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中:MC为含水率,%; m_1 为样品损失质量,g; m_i 为样品总质量,g。

将已烘干至恒质量的样品置于600℃马福炉中灼烧6 h,取出样品冷却后称量。采用以下公式计算

挥发性固体含量:

$$VS = \frac{m'_l}{m_d} \times 100\% \quad (2)$$

式中:VS为挥发性固体含量,%; m'_l 为样品损失质量,g; m_d 为样品干质量,g。

由于生物干化是以降低含水率的同时提高作用对象热值为核心的一项技术,因此引入生物干化指数对干化效果进行评价^[8],计算公式如下:

$$I = \frac{w_1}{w_2} \quad (3)$$

式中: I 为生物干化指数; w_1 为水分总去除量,g; w_2 为挥发性固体总降解量,g。

另外,为了比选最优的通风量及通风温度,引入空气利用率参数,计算公式如下:

$$AE = \frac{M_1}{V_a} \quad (4)$$

式中:AE为空气利用率, g/m^3 ; M_1 为干化后水分的总去除量,g; V_a 为实验通入空气量, m^3 。

2 结果与讨论

2.1 通风参数对堆体温度和含水率的影响

根据生物干化过程中堆体温度的变化,可将其分为升温期(初始温度至 40°C)、中温期($40\sim 45^\circ\text{C}$)、高温期($45\sim 60^\circ\text{C}$)以及降温期($60\sim 40^\circ\text{C}$)。研究表明,通风量和通风温度对堆体温度的影响在不同阶段会呈现出不同的特征。

在通风量为 $0.6 \text{ L}/(\text{kg}\cdot\text{min})$ 条件下,不同通风温度下堆体温度的变化曲线如图2(a)所示。当通风温度为 60°C 时,从升温期进入到中温期所需时间为 16.6 h ,高温期保持了 37.8 h ,平均降温时间为 47.5 h 。而当通风温度为 40°C 时,进入中温期需要 27.1 h ,高温期仅保持了 34.6 h ,平均降温时间为 20.9 h 。以上结果表明,高通风温度有助于堆体迅速升温进入中温期,并在降温阶段减缓温度下降速率,使得堆体长时间处于中高温阶段,有助于水分去除。这也与图2(b)的堆体含水率变化趋势相吻合,当通风温度为 60°C 时,堆体含水率在高温阶段有较大的跌幅,且最终含水率更低。然而,随着堆体中的微生物由对数增长期进入稳定期,微生物代谢产热的效率低于对数期,且微生物总量持续上升导致其代谢的产水量亦有所增加,因此使得堆体含水率在 64 h 后略微回升。而当通风温度为 40°C 时,堆体含水率变化较为平缓,这可能是由于 40°C 的通

风温度不足以及时蒸发堆体水分,导致空气携带水分的能力较弱。

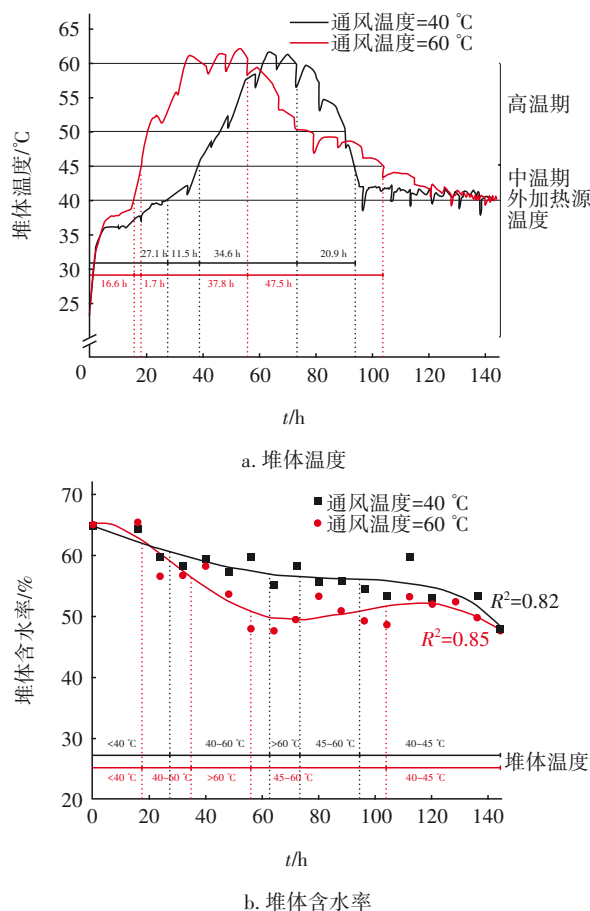


图2 不同通风温度下堆体温度和含水率的变化曲线

Fig.2 Variation curves of temperature and moisture content of kitchen waste pile under different ventilation temperatures

在通风温度为 60°C 条件下,不同通风量下堆体温度的变化曲线如图3(a)所示。可知,通风量对堆体的升温速率、峰值温度及高温期时长均有一定影响。当通风量为 $0.6 \text{ L}/(\text{kg}\cdot\text{min})$ 时,堆体的升温速率为 $2.63^\circ\text{C}/\text{h}$,峰值温度可以达到 60°C 以上;而当通风量增至 $1.0 \text{ L}/(\text{kg}\cdot\text{min})$ 时,升温速率仅为 $1.04^\circ\text{C}/\text{h}$,峰值温度仅为 55°C ,且高温期时长较通风量为 $0.6 \text{ L}/(\text{kg}\cdot\text{min})$ 时减少了 15.6 h 。同时,在通风量较低条件下,堆体降温阶段的温度高于通风量较高时的。这是因为在降温阶段,堆体中大量微生物死亡或进入休眠状态,活性减弱,导致生物产热减少;而此时过高的通风量会促进水分蒸发,导致空气带走的热量超过微生物产热量,引起堆体温度迅速下降且微生物降解过程减弱。因此过高的

通风量不利于堆体在生物干化反应期间维持高温状态,导致堆体含水率下降较慢[见图3(b)],降低了生物干化效果。此外,实验后期堆体密度上升导致空气难以进入到基质之中,削弱了通风量对水分去除的影响。以上结果说明,通风温度为生物干化过程中最主要的影响因素,其对水分去除的影响要大于通风量。因此,在进行参数设定时应平衡好通风温度与通风量。

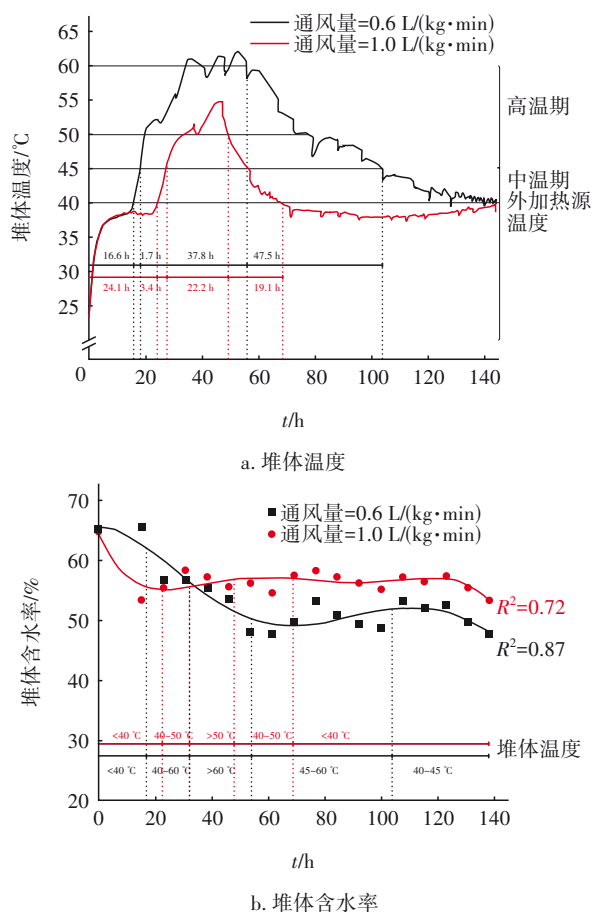


图3 不同通风量下堆体温度和含水率的变化曲线

Fig.3 Variation curves of temperature and moisture content of kitchen waste pile under different ventilation rates

2.2 筛选培养优势嗜热菌以强化生物干化效果

由通风量为0.6 L/(kg·min)、通风温度为60 °C的优化实验堆体中分离筛选出优势嗜热菌,经培养后配制成不同浓度的菌液接种至厨余垃圾堆体中,以进一步强化生物干化效果。首先,将提取的嗜热菌在NCBI基因库序列中进行比对,发现样品菌与*Siminovitchia*属中的*Siminovitchia thermophilus*菌同源相似性最高(97%),如图4所示,且其适宜的生长

温度范围为50~55 °C,符合本实验所提取的样品菌生长的适宜温度条件。该菌种的标识符为SgZ-10 (=CCTCC AB2012110=DSM 105453=KACC 16873)。

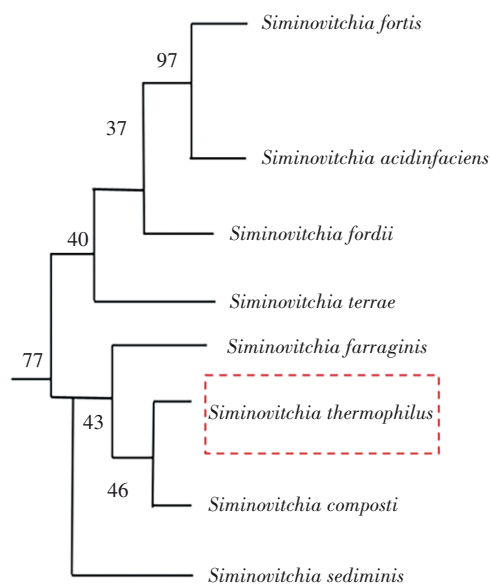


图4 优势嗜热菌属性

Fig.4 Attributes of dominant thermophilic bacteria

培养并选取浓度为 $OD_{600}=0.8$ 和 $OD_{600}=1.2$ 的优势嗜热菌液加入生物干化堆体中,考察不同接种浓度下堆体含水率和VS损失量的变化,结果见图5。

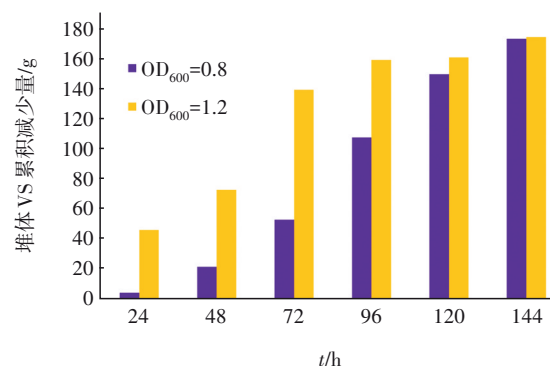


图5 优势嗜热菌对堆体VS损失量的影响

Fig.5 Effect of dominant thermophilic bacteria on VS loss of kitchen waste pile

从图5可以看出,当添加 $OD_{600}=1.2$ 的优势嗜热菌液时,堆体有较多的VS损失,且降解效率更高,在72 h内可以有效降解140 g的VS。这主要是通过微生物的氧化分解反应,将脂肪酸、纤维素、碳水化合物等大分子有机物降解成小分子物质,增大了水热传递面积,从而减少了堆体体积并促进水分蒸发^[9]。因此,较高的VS损失量可以实现堆体的快速稳定化,提高干化效率。由此可见,通过外接适宜浓度

的菌液,能有效增加堆体初期的微生物活性,削弱堆体中因酸堆积而导致的缓滞作用。

与无外源添加剂的实验组进行对照发现,外接优势嗜热菌浓度为 $OD_{600}=1.2$ 的实验组,在 56~80 h 时堆体含水率就下降至 45.0%,并在 88 h 时能进一步下降至 42.3%,显著低于未接菌的对照组。这表明外接一定浓度的优势菌对于提高生物干化效率、缩短生物干化周期有一定的效果。同时,在该时段堆体温度处于升温期至高温期(45~50℃),堆体中的菌种处于对数生长期;在这一阶段,干化系统内较高的温度和微生物活动水平显著提高了生物干化效果。

2.3 生物干化效果对比分析

与国内外相关研究对比发现(见表1),本研究结果优势明显。在未添加优势菌剂条件下[通风量

为 0.6 L/(kg·min),通风温度为 60℃],生物干化指数达到最高值(3.55),空气利用率为 94.7 g/m³。接种浓度 $OD_{600}=1.2$ 的优势嗜热菌后,同样条件下生物干化指数降至 3.14,空气利用率为 87.9 g/m³。这是因为引入外源微生物可能导致含水率减少的同时挥发性固体损失量增加,进而降低了生物干化指数。综合对比其他研究的最终含水率、生物干化指数、空气利用率以及运行周期等指标,本实验研究表明,外接一定浓度的嗜热优势菌(*Siminovitchia thermophilus*)能够显著缩短生物干化周期至 88 h 以内,有效提高了生物干化效率。然而,如果生物干化目标为获取较低的含水率和挥发性固体损失量以制备 RDF 等资源化产品,则应该选用无外接菌剂、通风量为 0.6 L/(kg·min)、通风温度为 60℃的运行条件。

表1 不同运行条件下生物干化实验结果
Tab.1 Experimental results of bio-drying under different operating conditions

项目	通风量/(L·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	通风温度/℃	实验时长/h	初始含水率/%	最终含水率/%	VS损失/%	生物干化指数	空气利用率/(g·m ⁻³)	参考文献
脱水污泥+厨余垃圾+木屑	0.67	25	480	62.7	20.0	36.5	2.47		[9]
脱水污泥+厨余垃圾+木屑	0.60	25	192	63.4	48.3	17.8	3.03	49.2	[10]
阶段式升温驯化物接种物+厨余垃圾+玉米芯,50℃	0.60	25	120	63.2	36.0	21.2	3.44	105.8	[11]
			96		45.0				
			72		50.0				
厨余垃圾+园林垃圾	0.80	25	240	68.2	14.0		1.89	56.9	[12]
			144		58.0				
厨余垃圾+园林垃圾,40℃	0.80	25	240	69.8	21.0		2.48		[13]
			168		44.0				
厨余垃圾+木屑+优势嗜热菌($OD_{600}=1.2$),40℃	0.60	60	88	65.1	42.3	21.5	3.14	87.9	本研究
厨余垃圾+木屑,40℃	1.00	40	144	65.1	50.8	24.1	2.47	56.7	
	1.00	60	144	65.1	53.1	15.3	3.35	48.0	
	0.60	40	144	65.1	48.1	18.7	3.20	95.4	
	0.60	60	144	65.1	47.9	16.8	3.55	94.7	

3 结论

① 在通风量为 0.6 L/(kg·min)、通风温度为 60℃的条件下,厨余垃圾堆体的干化效率更依赖于通风温度的变化,且通风温度对水分去除的影响要大于通风量。在此条件下运行 144 h,堆体含水率可降至 47.9%,生物干化指数达到 3.55,空气利用率为 94.7 g/m³,具有最优的干化效能。进一步从生物干化物料中分离提取优势嗜热菌(*Siminovitchia thermophilus*)并回接至干化系统后,干化效率显著提升,含水率在 88 h 内下降至 42.3%,明显低于未

接菌的对照组。

② 此研究具有一定的应用及发展潜力,未来可从以下角度进一步优化,例如,可以考虑以负压通风方式代替正压通风,并适当增加翻堆频率,以减少堆体内部温度分层现象,从而提升水分去除效率并抑制冷凝水生成。另外还可以考虑研究接种复合菌剂,或在不同干化阶段添加特定功能型优势菌种,以提升堆体高温期的保留时间及最高温度,最大化发挥微生物的降解作用。同时需要关注干化过程中微生物群落的动态变化,以及外接菌剂和

各微生物群落之间的作用机理。

参考文献:

- [1] 严祥瑞,辛立庆,王昊书,等. 新型全混合式厨余垃圾生物干化工艺效能实证研究[J]. 中国环境科学, 2021,41(7): 3291-3297.
YAN Xiangrui, XIN Liqing, WANG Haoshu, *et al.* Empirical study on the performance of the novel full-mixed kitchen waste biodrying[J]. China Environmental Science, 2021, 41(7): 3291-3297(in Chinese).
- [2] 刘郡. 城市厨余垃圾资源化回收利用现状分析与研究[J]. 资源节约与环保, 2021, 36(10): 146-148.
LIU Jun. Analysis and research on the current status of resource utilization and recycling of urban food waste[J]. Resource Economization & Environmental Protection, 2021, 36(10): 146-148(in Chinese).
- [3] 王子源. 国内厨余垃圾处理现状及主体工艺论证[J]. 广东化工, 2020, 47(12): 164-166, 169.
WANG Ziyuan. Analysis on the current situation of kitchen waste disposal in China and the technology demonstration of the processing technology of Chinese kitchen waste [J]. Guangdong Chemical Industry, 2020,47(12):164-166, 169 (in Chinese).
- [4] YUAN J, ZHANG D, 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.
- [5] AKILA W Y. Effect on biodrying and rapid drying of food wastes for biochar manufacturing [J]. Agricultural Research & Technology: Open Access Journal, 2017, 7 (5):128-130.
- [6] PARK S, SONG H, KIM M. Performance and bacterial communities for bio-drying with thermophili bacteria of sewage sludge [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018,22(12): 4806-4813.
- [7] MA J, MU L, ZHANG Z K, *et al.* Influence of thermal assistance on the biodegradation of organics during food waste bio-drying: microbial stimulation and energy assessment[J]. Chemosphere, 2021,272: 129875.
- [8] 陈峰. 生活垃圾高温好氧生物干化技术研究及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
CHEN Feng. Study and Application of High Temperature Aerobic Bio-drying Technology for Domestic Waste [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020 (in Chinese).
- [9] 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.
- [10] MA J, ZHANG L, MU L, *et al.* Multivariate insights of bulking agents influence on co-biodrying of sewage sludge and food waste: process performance, organics degradation and microbial community[J]. Science of the Total Environment, 2019, 681: 18-27.
- [11] 马皎. 高含水率城市有机垃圾联合调质及热辅助强化生物干化研究[D]. 大连:大连理工大学, 2020.
MA Jiao. Biodrying of Municipal Organic Waste with High Moisture: Enhancement by Co-substrate Regulation and Thermal Assistance [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020 (in Chinese).
- [12] 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).
- [13] 向虹霖,蒋建国,高语晨,等. 外加热源对典型有机废弃物生物干化的影响[J]. 中国给水排水, 2021, 37 (5):71-78.
XIANG Honglin, JIANG Jianguo, GAO Yuchen, *et al.* Effect of additional heating source on bio-drying of typical organic waste [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(5):71-78 (in Chinese).

作者简介:杨国栋(1980-),男,山东梁山人,博士,高级工程师,主要研究方向为固废处理处置与资源化利用。

E-mail:284047057@qq.com

收稿日期:2024-04-02

修回日期:2024-05-24

(编辑:刘贵春)