

不同通风量对农村污泥生物干化的影响研究

刘甜甜^{1*}, 王梦菲², 吴小苏¹, 刘俊峰¹, 温江丽¹

¹北京农业职业学院水利与建筑工程系, 北京

²哈尔滨工业大学环境学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2024年1月15日; 录用日期: 2024年1月30日; 发布日期: 2024年2月29日

摘要

为实现农村污泥的减量化和资源化, 采用了自主设计的农村污泥生物干化试验装置, 以啤酒糟为调理剂, 研究了不同通风量对农村污泥生物干化的影响效果, 设3个试验堆体, 采用10 min开/20 min关的间歇通风方式, 其通风量分别为1.0、1.5和1.9 L/(min.kg干物质), 试验周期为18 d, 测定了堆体温度(平均温度、积累温度)、水分(含水率、水分去除量)、挥发性固体(VS)、pH、O₂和CO₂等指标, 研究结果表明, 当采用10 min开/20 min关的间歇通风方式, 通风量为1.5 L/(min.kg干物质)时生物干化效果较理想, 此时有利于堆体温度的升高、水分的去除以及VS的降解, 同时发现在生物干化过程中不必对堆体的pH进行调整。

关键词

农村污泥, 生物干化, 通风量

Study on the Effect of Different Ventilation Rates on the Biodrying of Rural Sludge

Tiantian Liu^{1*}, Mengfei Wang², Xiaosu Wu¹, Junfeng Liu¹, Jiangli Wen¹

¹Department of Water Conservancy and Construction Engineering, Beijing Agricultural Vocational College, Beijing

²School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang

Received: Jan. 15th, 2024; accepted: Jan. 30th, 2024; published: Feb. 29th, 2024

Abstract

In order to achieve the reduction and resource utilization of rural sludge, a self-designed rural sludge biodrying experimental device was adopted, with beer lees as a bulking agent. The effect of different ventilation rates on rural sludge biological drying was studied. Three experimental piles

*通讯作者。

文章引用: 刘甜甜, 王梦菲, 吴小苏, 刘俊峰, 温江丽. 不同通风量对农村污泥生物干化的影响研究[J]. 环境保护前沿, 2024, 14(1): 173-180. DOI: 10.12677/aep.2024.141024

were set up, and an intermittent ventilation mode of 10 min on/20 min off was adopted, with ventilation rates of 1.0, 1.5, and 1.9 L/(min. kg dry matter), respectively. The experimental period was 18 days. The temperature (average temperature and accumulation temperature), moisture content (moisture content and moisture removal amount), volatile solids (VS), pH, O₂, and CO₂ were measured. The research results showed that the best drying effect was achieved when the ventilation rate was 1.5 L/(min. kg dry matter), which was conducive to the increase of reactor temperature, removal of moisture, and degradation of VS. At the same time, it was found that the pH of the reactor did not need to be adjusted during the biodrying process.

Keywords

Rural Sludge, Biodrying, Ventilation Quantity

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国农村生活水平的提高以及农村污水处理设施的完善,农村污泥产量逐年增加[1]。农村污泥具有分散、含水率高、有机质含量高、富含氮、磷、钾等营养元素、性质复杂等特点,如果不采用合理的处理方式,不仅造成环境污染,也会导致资源浪费[2] [3]。但是目前国内外对污泥的处理研究主要集中在城镇污泥,缺乏对农村污泥处理的系统研究,由于农村污泥与城镇污泥性质有较大的区别,因此专门研究农村污泥的处理处置具有重要的指导意义。

由于农村污泥含水率较高,影响后续的处理处置,因此对农村污泥进行干化处理,降低其含水率,是目前解决农村污泥问题的关键。生物干化技术即作为一种比较理想的干化技术,最早是由美国康奈尔大学的 Jewell 等人于 1984 年研究牛粪生物干燥时提出[4],主要利用好氧微生物自身发酵产生的热量去除物料中的水分,不需要额外添加热源,既经济又环保[5] [6]。目前,国内外的生物干化主要集中于城市生活垃圾、禽畜粪便、市政污泥、厌氧消化污泥等高湿度物料[7] [8] [9],未见应用于农村污泥的相关报道。

通风量是影响生物干化效率的重要因素。通风量过大,虽然利于带走水分,但是不利于热量的积累,影响水分的去除[10];通风量较低利于热量的积累,但是不利于水分的蒸发[11] [12] [13]。因此,采用合适的通风量,使水分去除和热量积累达到平衡是影响生物干化效果的关键。Navaee-Ardeh 等人[14]研究了不同通风速率条件下城市固体废弃物的生物干化效果,结果发现通风速率与干化效率呈正比。Cai 等人[10]研究了污泥生物干化过程中通风对物料的温度和水分蒸发的影响,表明强制通风是影响水分散失的主要因素。Colomer-Mendoza 等人[13]研究了通风速率对园林废弃物生物干化的影响,结果发现较高的通风速率会不利于生物干化的进行。Zawadzka 等人[15]研究了通风速率对城市生活垃圾生物干化的影响,结果发现较高的通风速率有利于水分的去除,但是不利于热量的积累及升温。

本文主要研究通风量对农村污泥生物干化的影响,考察了不同通风量条件下堆体温度、水分、VS、pH、O₂ 和 CO₂ 等指标的变化,以明确在合适的通风量情况下农村污泥的生物干化效果。由于农村污泥分散、含水率高、性质复杂,对其进行生物干化不仅可以降低其含水率,便于后续的处理处置,而且还可解决农村污泥引起的环境问题,对美丽乡村建设和生态文明建设具有重要的意义。

2. 材料与方法

2.1. 试验材料

试验所用农村污泥取自北京某分散污水处理设施，啤酒糟取自某啤酒厂，试验原料的性质见表 1。

Table 1. Characteristics of the raw materials of biodrying

表 1. 生物干化原料性质

原料	含水率(%)	VS 含量(%)
农村污泥	78.86 ± 1.45	38.36 ± 1.62
啤酒糟	4.01 ± 0.09	94.08 ± 1.57

2.2. 试验装置与运行条件

试验过程中主要利用生物干化技术处理农村污泥，生物干化试验装置如图 1 所示。

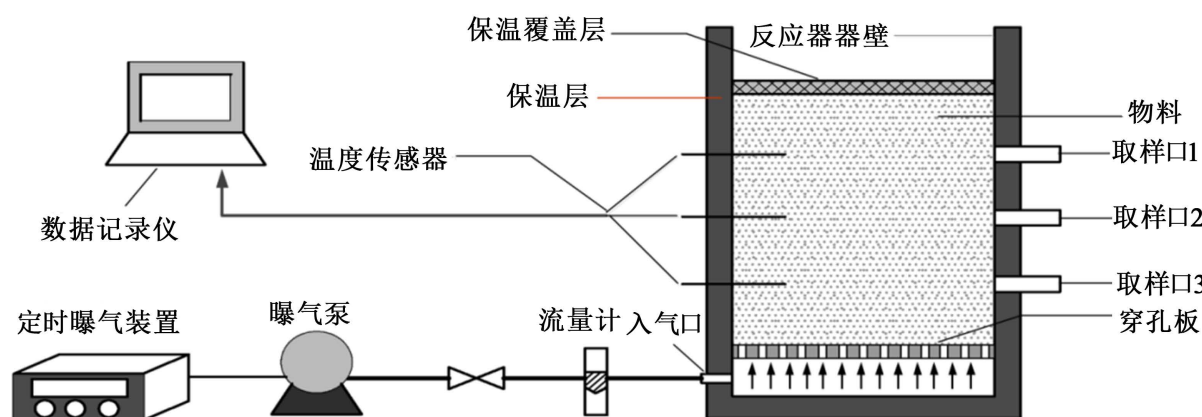


Figure 1. Schematic diagram of experimental equipment for biodrying

图 1. 生物干化试验装置示意图

生物干化试验装置主要由定时曝气装置、曝气泵、流量计、反应器、温度传感器、数据记录仪等组成。反应器主体是由有机玻璃制成，外壁用 15 cm 厚的保温棉包裹。此装置由定时曝气装置实现间歇通风，曝气泵进行曝气，流量计控制流量的大小。通过温度传感器和数据记录仪实时记录堆体的温度。距反应器底部约 30 cm 处设置一活动的有孔挡板，其均布直径 2 mm 的通风孔，便于支撑物料和均匀布气。反应器的一侧设有上中下三个取样口，取样时从三个取样口取样并混合均匀备用。

2.3. 试验方法

试验过程中共设置了 V1~V3 三个实验堆体，采用 10 min 开/20 min 关的间歇通风方式，其通风量分别为 1.0、1.5 和 1.9 L/(min.kg 干物质)。生物干化试验周期为 18 d，每 3 d 取一次样。

2.4. 检测方法

采用数字温控记录仪(仪器型号为: GS200-ET)实时监测堆体温度; 采用重量法测定含水率及 VS; 采用 pH 计测定 pH 值; 采用氧含量测定仪(仪器型号为 DR-700)测定 O₂ 含量; 采用 HCl 滴定法测定 CO₂ 含量。

3. 结果与讨论

3.1. 生物干化过程中温度的变化

农村污泥生物干化过程中不同通风量下堆体温度及积累温度的变化分别如图 2 和图 3 所示。

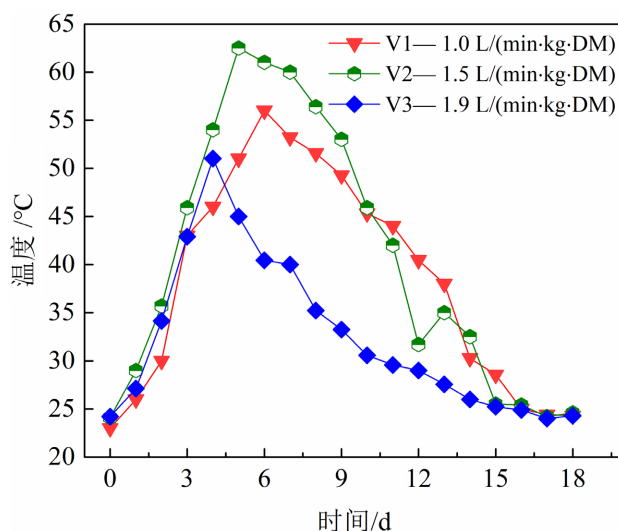


Figure 2. Effect of ventilation rate on pile temperature

图 2. 通风量对堆体温度的影响

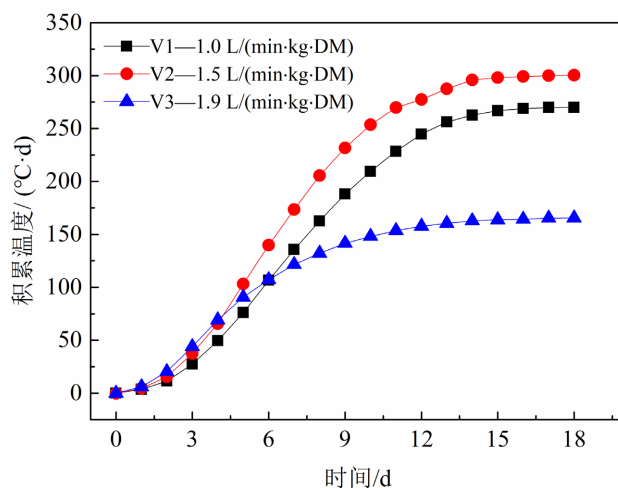


Figure 3. Effect of ventilation rate on accumulation temperature

图 3. 通风量对堆体积温度的影响

由图 2 可见,不同通风量下堆体的温度经历升温期、高温期和降温期三个阶段。这主要是由于堆体通风后,好氧微生物逐渐适应环境,开始大量生长繁殖,故产生大量的热量使堆体温度升高,后期由于营养物质的消耗殆尽,微生物活性下降,产生的热量减少,故堆体温度降低。不同通风量条件下堆体的温度变化不甚一致,V2 堆体升温最快,且堆体的最高温度可达 62°C,且高温期维持时间也较长,V1 通风量过低,不利于好氧微生物的生长繁殖,V3 通风量过高,不利于热量的积累,说明 V2 的通风量大小比较合适,微生物既不会因氧气过少而使活性受到抑制,堆体也不会因为通风量过大而带走过多的热量。此外,通过图 3 的积累温度发现,V2 在所有堆体中值最高(300.41 °C·d),从侧面说明了 V2 堆体的通风量较合适。

3.2. 生物干化过程中水分的变化

水分是评判生物干化效果的最直接的指标。农村污泥生物干化过程中不同通风量下含水率的变化见图 4，不同阶段水分去除量如图 5 所示。

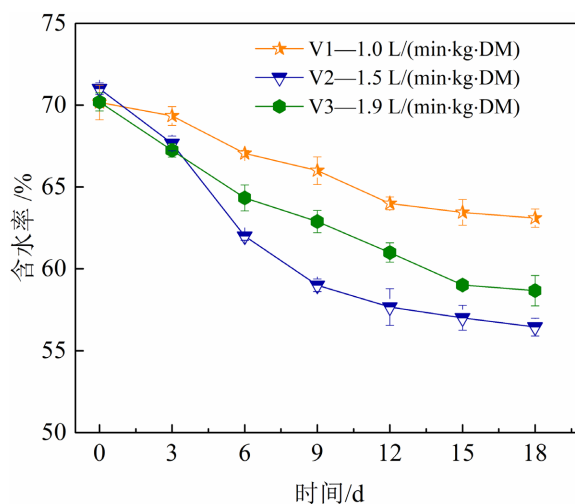
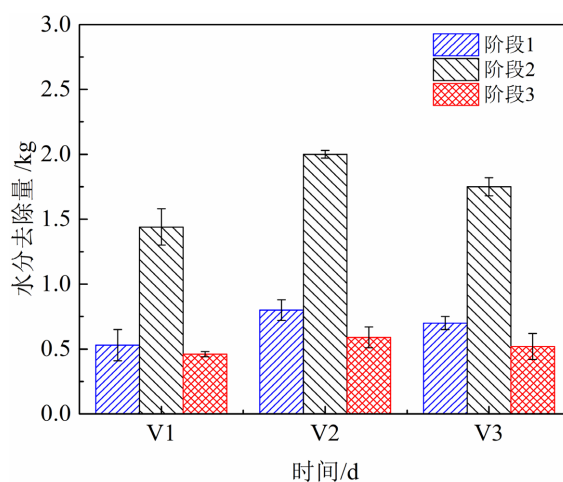


Figure 4. Effect of ventilation rate on moisture content
图 4. 通风量对堆体含水率的影响

由图 4 可以看出，不同通风量下堆体的含水率随着生物干化的进行均逐渐下降，且前期(前 9 d)的下降幅度明显高于后期，例如 V2 堆体前期由 70.22% 下降至 58.23%；后期由 58.23% 减至 56.45%，前期的下降幅度远大于后期。此外，不同堆体含水率变化也有较大差异。V1 堆体含水率下降最慢，其次为 V3 堆体，V2 堆体的含水率下降幅度最大，由 70.22% 降至 56.45%，说明 V2 堆体的通风量更有利于水分的去除。这主要是由于 V1 及 V3 堆体水分散失和热量积累没有达到很好的平衡。



注：阶段 1：0~3 d；阶段 2：4~12 d；阶段 3：13~18 d。

Figure 5. Effect of ventilation rates on moisture removal
图 5. 通风量对堆体水分去除量的影响

图 5 展示了不同阶段下堆体的水分去除量，可以发现 V2 堆体水分去除量最多，达到了 3.48 kg；V1 和 V3 分别为 2.61 kg 和 3.13 kg，与图 4 的结果相同。此外，不同阶段的水分去除量存在较大差异，阶段 2

的去除量明显高于阶段 1 和阶段 3, 表明阶段 2 (高温期) 是生物干化过程中水分去除的主要功能阶段, 其次为阶段 1 和阶段 3, 因此生物干化过程中应尽量维持高温期的时间。

3.3. 生物干化过程中 VS 的变化

不同通风量作用下 VS 质量分数的变化情况如图 6 所示。

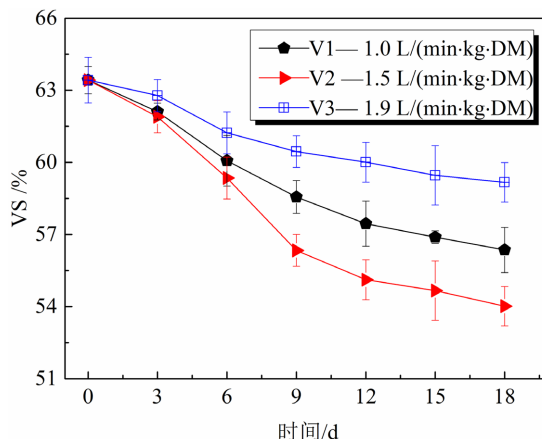


Figure 6. Effect of ventilation rate on VS mass fraction
图 6. 通风量对堆体 VS 质量分数的影响

从图中可以看出, 不同通风量作用下各堆体的 VS 质量分数均逐渐下降, 前期下降较快, 后期下降较慢, 最终趋于平缓, 这主要是由于前期易降解有机质充足, 微生物大量生长繁殖, 故消耗的有机质较多, 后期营养物质逐渐消耗, 易降解有机质逐渐减少, 故微生物对有机质的降解程度减弱。通风量大小对 VS 质量分数的变化有显著的影响, V2 堆体 VS 的变化趋势最明显, 由最初的 63.15% 降至最终的 54.03%, V1 的降解程度最低, 由最初的 63.15% 降至最终的 60.11%。V1 通风量过低, 导致堆体供氧量不足, V3 通风量过大, 不利于微生物的生长繁殖, 因此可以发现 V2 堆体的通风量较合适。

3.4. 生物干化过程中 pH 的变化

生物干化过程中由于微生物的新陈代谢, 系统内的 pH 会发生变化, 具体变化情况如图 7 所示。

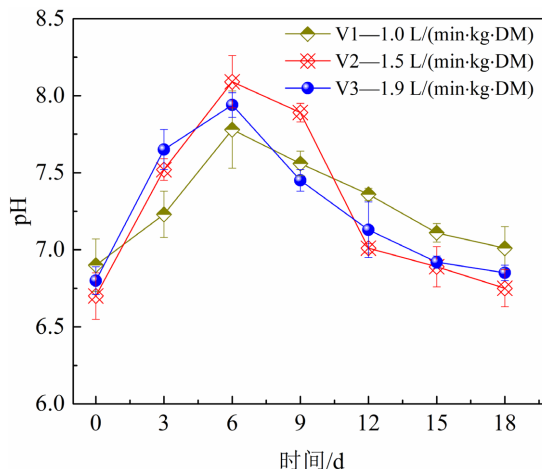


Figure 7. Effect of ventilation rate on pH
图 7. 通风量对堆体 pH 的影响

从图 7 可见, 不同通风量作用下的堆体 pH 均先升高后降低。生物干化过程中由于含氮化合物的存在, 会发生氨化作用, 堆体会产生大量的 NH_3 , 使堆体 pH 升高。后期随着含氮有机物的消耗, 微生物活性受到抑制, 堆体 NH_3 产生量减少, 同时由于硝化作用加强及有机酸的产生, pH 逐渐下降。可以发现 V1 堆体的 pH 下降幅度最小, V2 堆体 pH 下降幅度最大, 这主要是由于其通风量合适, 微生物新陈代谢旺盛, 因此会产生较多的 NH_3 。此外, 可以发现整个生物干化过程中所有堆体的 pH 均在 6.7~8.3 之间, 均在微生物生长繁殖的最适 pH 范围内, 因此不需要进行专门的调节。

3.5. 生物干化过程中 O_2 和 CO_2 的变化

生物干化过程中各堆体 O_2 和 CO_2 体积分数变化分别如图 8 和图 9 所示。

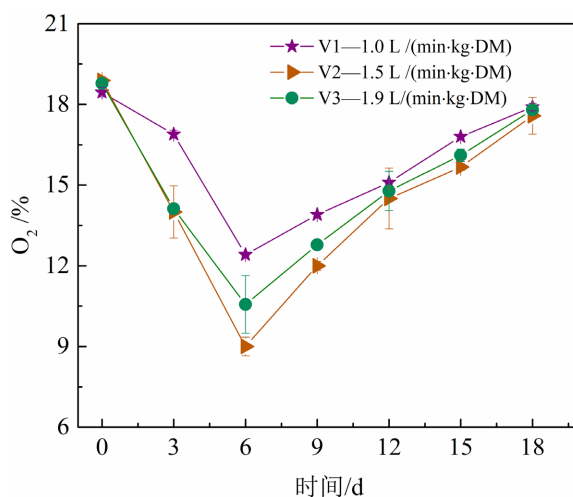


Figure 8. Effect of ventilation rate on O_2 volume fraction
图 8. 通风量对堆体 O_2 体积分数的影响

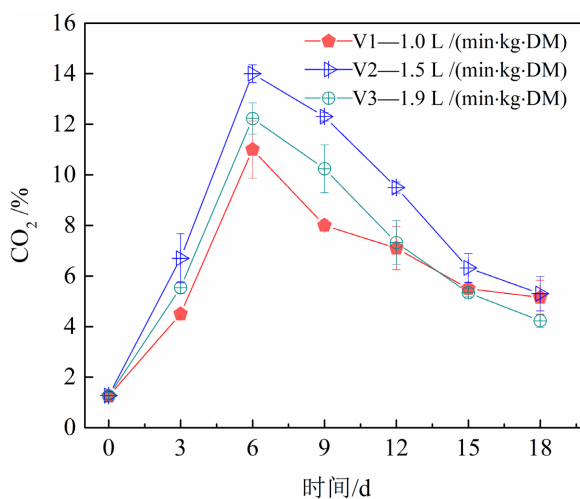


Figure 9. Effect of ventilation rate on CO_2 volume fraction
图 9. 通风量对堆体 CO_2 体积分数的影响

由图 8 和图 9 可知, 生物干化堆体中 O_2 体积分数先下降后上升, CO_2 则与之相反, 这主要是由于微生物在降解有机物时会消耗 O_2 , 释放 CO_2 , 生物干化初期堆体营养物质等比较充足, 微生物新陈代谢旺盛, 对有机物的降解速率较快, 故 O_2 体积分数先下降, CO_2 体积分数上升; 随着生物干化的进行, 营养

物质逐渐消耗殆尽,微生物活性受到抑制,对有机物的降解速率减慢,故 O₂ 体积分数逐渐上升,CO₂ 体积分数抓紧下降。

可以发现 V1 堆体 O₂ 和 CO₂ 体积分数变化幅度最缓,O₂ 体积分数最低为 11.45%,CO₂ 体积分数最高时仅为 10.46%,说明 V1 的通风量不足,抑制了微生物的生长繁殖。V2 堆体 O₂ 和 CO₂ 体积分数变化幅度最大,O₂ 体积分数最低时为 8.72%,说明 V2 的通风量比较适合,适合微生物的生长繁殖。V3 堆体的变化幅度同样比 V2 低,说明 V3 通风量过大,不适合微生物的生长繁殖。

4. 结论

本文在不同通风量作用下对农村污泥进行生物干化,以啤酒糟作为调理剂,得出以下结论:

(1) 通风量会对生物干化效果产生重要影响,通风量过大或过小均不利于生物干化的进行,当采用 10 min 开/20 min 关的间歇通风方式,通风量为 1.5 L/(min.kg 干物质)时生物干化效果较好。

(2) 最佳通风条件下生物干化堆体最高温度可达 62℃,含水率可降至 56.45%,而且生物干化过程中适当的通风有利于提高升温的速度以及堆料有机质的降解。

(3) 农村污泥生物干化过程中,pH 均在微生物生长繁殖的最适 pH 范围内,不需要进行专门的调节。

基金项目

北京市教育委员会科技计划一般项目(KM202312448002)。

参考文献

- [1] 颜瑾,李燕,熊仁,等.农村不同类型有机固体废弃物混合堆肥配比优化[J].环境工程学报,2018,12(7): 2106-2113.
- [2] 谢敏,吴鑫,王霄,等.农村剩余污泥脱水优化[J].环境工程,2021,39(6): 15-20.
- [3] 徐一啸.农村污泥处理方法研究进展综述[J].广东化工,2018,45(18): 91-92.
- [4] 栾奕,陈晨,薛莲,等.城市污水厂污泥资源化利用途径的研究[J].资源节约与环保,2015(4): 49.
- [5] 陈群玉.污泥生物干化研究现状[J].中国资源综合利用,2011,29(2): 35-38.
- [6] Ramirez, A.A., Godbout, S., Leveillee, F., et al. (2012) Effect of Temperature and Air Flow Rate on Carbon and Nitrogen Compounds Changes during the Biodrying of Swine Manure in Order to Produce Combustible Biomasses. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **87**, 831-836. <https://doi.org/10.1002/jctb.3744>
- [7] Cai, L., Chen, T.B., Gao, D., et al. (2016) Bacterial Communities and Their Association with the Bio-Drying of Sewage Sludge. *Water Research*, **90**, 44-51. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.12.026>
- [8] 费颖超.污泥生物干化过程的研究[D]:[硕士学位论文].沈阳:沈阳建筑大学,2014: 15-21.
- [9] Zhang, D.Q., He, P.J., Yu, L.Z., et al. (2009) Effect of Inoculation Time on the Bio-Drying Performance of Combined Hydrolytic-Aerobic Process. *Bioresource Technology*, **100**, 1087-1093. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.07.059>
- [10] Cai, L., Chen, T.B., Gao, D., et al. (2013) Influence of Forced Air Volume on Water Evaporation during Sewage Sludge Bio-Drying. *Water Research*, **47**, 4767-4773. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.03.048>
- [11] Zhao, L., Gu, W.M., He, P.J., et al. (2010) Effect of Air-Flow Rate and Turning Frequency on Bio-Drying of Dewatered Sludge. *Water Research*, **44**, 6144-6152. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.07.002>
- [12] Huiliner, C. and Villegas, M. (2015) Simultaneous Effect of Initial Moisture Content and Airflow Rate on Biodrying of Sewage Sludge. *Water Research*, **82**, 118-128. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.04.046>
- [13] Colomer-Mendoza, F.J., Herrera-Prats, L., Robles-Martínez, F., et al. (2013) Effect of Airflow on Biodrying of Gardening Wastes in Reactors. *Journal of Environmental Sciences*, **25**, 865-872. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(12\)60123-5](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(12)60123-5)
- [14] Navaee-Ardeh, S., Bertrand, F. and Stuart, P.R. (2006) Emerging Biodrying Technology for the Drying of Pulp and Paper Mixed Sludges. *Drying Technology*, **24**, 863-878. <https://doi.org/10.1080/07373930600734026>
- [15] Zawadzka, A., Krzystek, L., Stolarek, P., et al. (2010) Biodrying of Organic Fraction of Municipal Solid Wastes. *Drying Technology*, **28**, 1220-1226. <https://doi.org/10.1080/07373937.2010.483034>