



城市生活垃圾中纤维素与木质素随龄期变化的规律

王成豪, 张振营

(浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

摘要: 在填埋过程中, 生活垃圾中的纤维素与木质素含量会随着填埋龄期的增加而发生变化。为了研究垃圾中纤维素与木质素随龄期变化的规律, 采用美国国家可再生能源实验室方法, 分别测定了杭州天子岭垃圾填埋场的不同龄期城市生活垃圾(Municipal solid waste, MSW)及机械生物处理(Mechanical biological treatment, MBT)垃圾中纤维素与木质素含量, 分析了 MSW 中纤维素与木质素含量随龄期的变化规律以及 MBT 垃圾和 MSW 在纤维素与木质素含量上的差异。结果表明: MSW 中纤维素、木质素的降解速率均随龄期的增加由快变慢, 但纤维素降解速率远大于木质素; 纤维素与木质素比值随着龄期的增加而减小, 其减小的幅度逐渐变小并趋于平缓。MBT 垃圾中纤维素含量相较于新鲜垃圾出现了显著下降, 同时木质素在剩余垃圾中所占比例明显增大。天子岭垃圾填埋场的 MBT 技术手段处理效果较好, 可以作为新建垃圾填埋场处理垃圾的技术参考, 也可作为已建垃圾场技术升级的参考。该研究采用定量试验验证了 MBT 技术的优势, 为 MBT 技术推广提供了有力支撑。

关键词: 城市生活垃圾; 机械生物处理; 木质素; 纤维素; 龄期; 变化规律

中图分类号: X705

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2024)11-0832-07

引文格式: 王成豪, 张振营. 城市生活垃圾中纤维素与木质素随龄期变化的规律[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2024, 51(6): 832-838.

Reference Format: WANG Chenghao, ZHANG Zhenying. Study on the changes of cellulose and lignin in municipal solid waste with age[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2024, 51(6): 832-838.

Study on the changes of cellulose and lignin in municipal solid waste with age

WANG Chenghao, ZHANG Zhenying

(School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: During the landfill process, the cellulose and lignin content of household waste will change with the increase of landfill age. To study the changes of cellulose and lignin in waste with age, the method of the National Renewable Energy Laboratory in the United States was used to measure the cellulose and lignin content in municipal solid waste (MSW) at different life stages and mechanical biological treatment (MBT) waste at the Tianziling landfill in Hangzhou. It analyzed the change law of cellulose and lignin content in MSW with age, as well as the differences in cellulose and lignin content between MBT waste and MSW. The results show that the degradation rate of lignin and cellulose in MSW varies from being fast to being slow with increasing age, but the degradation rate of cellulose is much higher than that of lignin. The ratio of cellulose to lignin decreases with age, and the magnitude of its decrease gradually decreases and tends to plateau. The cellulose content in MBT waste has significantly decreased compared to fresh waste, while the proportion of lignin in remaining waste has significantly increased. The MBT technology of Tianziling landfill has a good treatment effect, and can be used as

收稿日期: 2024-03-20 网络出版日期: 2024-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978625, 51678532)

作者简介: 王成豪(1998—), 男, 浙江温州人, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程方面的研究。

通信作者: 张振营, E-mail: zhangzhenyinga@163.com

technical reference for the treatment of waste in newly built landfills, as well as reference for the upgrading of existing landfill technologies. The study uses quantitative experiments to verify the advantages of MBT technology, providing strong support for the promotion of MBT technology.

Key words: municipal solid waste; mechanical biological treatment; lignin; cellulose; age; change law

0 引言

随着城市化进程的加快,城市生活垃圾的产量逐年增长。世界银行^[1]和联合国报告^[2]指出,到 2050 年,城市生活垃圾的总产量预计将会达到 34 亿 t。填埋是中国城市生活垃圾的主要处置方法,当前许多垃圾填埋场都面临扩建扩容,这会使得填埋高度不断增加,因而对垃圾填埋场的稳定性要求随之提高。同时,有机物的降解会使填埋堆体沉降,使得城市生活垃圾(Municipal solid waste, MSW)中有机物含量随垃圾填埋龄期的增加而产生变化,且可降解有机物的降解过程会直接影响填埋场的使用寿命。因此,研究 MSW 中可降解有机物含量随龄期变化的规律,可为填埋场的稳定性评估和管理提供基础支持,具有重要的科学价值和工程价值。

目前,各国学者对 MSW 中纤维素与木质素做了很多研究。Hossain 等^[3]通过室内接种、渗滤液回灌后中和的试验方法测定了垃圾的产气量,发现在固气转化发生时,MSW 的可压缩性随产气量的增加而增加。Hull 等^[4]对 1989—1999 年间美国新泽西州的垃圾试样进行了成分和降解状态分析,研究发现,经过降解后,垃圾中的纤维素等可降解物质的含量大幅减少,木质素等难降解物质的比例相应上升。Kim^[5]通过对 MSW 的研究发现:好氧降解与厌氧降解条件下所降解纤维素的质量基本相同,且均未观察到木质素的降解。Ham 等^[6]对纽约州塔斯顿岛垃圾填埋场中垃圾的纤维素与木质素质量含量进行现场测定,并采用 C/L 值(其中 C 表示垃圾中纤维素的质量含量, L 表示垃圾中木质素的质量含量)与龄期的关系作为评价垃圾降解程度的指标,结果发现 C/L 值与龄期的变化大致呈线性关系。瞿贤等^[7]通过测定上海老港填埋场中垃圾的纤维素与木质素含量,得到了垃圾中纤维素与木质素的质量分数变化曲线,结果发现: C/L 值可指示填埋垃圾的降解过程;纤维素含量在降解过程中呈下降趋势,而木质素含量在降解过程中呈上升趋势。Baldwin 等^[8]将 11 个试验垃圾样品分别填埋到填埋场的不同位置,并对这些试验中纤维素与木质素

的含量进行了为期 6 年的观测,发现 11 个试样中纤维素降解速率要远远大于木质素降解速率。刘永刚等^[9]利用美国国家可再生能源实验室(National renewable energy laboratory, NREL)方法对纤维素、木质素含量进行测定,发现 NREL 方法不仅具有很高的测量精度,还具有批量测定的优点。Barlaz^[10]通过钻孔取得填埋场垃圾样,采用范式纤维洗涤法测得了 MSW 的 C/L 值,发现不同地区填埋场中垃圾组分的不同会导致 C/L 初始值存在较大差异。Lissens 等^[11]采用湿式氧化法对 MSW 进行预处理,发现对 MSW 进行预处理可以大大减少纤维素含量。孙秀丽等^[12]通过酸性洗涤法,采用 Slogistic 模型来表征 MSW 的木质素和纤维素含量与龄期之间的关系,发现纤维素与木质素含量随龄期的增加总体呈下降趋势。从上述研究中可以看出,MSW 中的纤维素比木质素降解速率更快。MSW 中纤维素与木质素比值的变化能够反映垃圾填埋场中有机物降解的进程和速率,而木质素和纤维素的相对含量变化也可以表征填埋场的稳定性的变化。随着龄期的增加, C/L 值降低,表明有机物质的降解程度逐渐增加,垃圾填埋场的稳定性逐渐增强。因此,对 MSW 中 C/L 值的研究,可以为垃圾填埋场的生物降解程度评估、寿命预测和稳定性评估提供重要的依据。

近几年,许多国家通过对生活垃圾进行预处理来降低有机物的降解带来的填埋场失稳的风险。从 2005 年开始,德国禁止未经处理的垃圾进入垃圾填埋场中填埋,提出了机械生物处理(Mechanical biological treatment, MBT)的方法^[13]。MBT 技术可以减少污染物数量、垃圾渗滤液数量和甲烷排放量。这一技术将机械破碎、筛分等手段与好氧、厌氧等微生物分解技术相结合,利用该技术可以从源头上减少垃圾的填埋量,减少渗滤液的产出量和填埋气对环境的污染^[14-15]。MSW 经过 MBT 预处理后,填埋量大大减少,总有机碳以及沼气排放量都低于新鲜未处理的 MSW。尽管 MBT 技术有许多优势,但预处理后的 MBT 垃圾仍需要进行填埋处理。由于 MBT 垃圾与 MSW 仍存在着较大的差异,处理后的垃圾中纤维素与木质素含量并不明确,其对垃

圾填埋场的使用寿命和垃圾填埋场稳定性的影响尚不清楚,不能直接使用 MSW 相关研究成果,因此需要对 MBT 垃圾中纤维素与木质素含量做进一步研究。Robinson^[16]对 MBT 垃圾进行分析,发现 MBT 技术可显著减少渗滤液的产量。Robinson 等^[17]发现,与普通的城市生活垃圾处理手段相比,MBT 垃圾在被填埋后仍需要处理的工序更少。Siddiqui^[18]将英国 MBT 垃圾和德国 MBT 垃圾进行成分分析,发现 MBT 技术处理后的垃圾具有更好的可生物降解潜力。Pimolthai 等^[19]对 MBT 垃圾试样进行了岩土性能测试,发现相较于未经处理的垃圾填埋场渗滤液,MBT 垃圾试样中渗滤液具有非常低的化学需氧量、铵和重金属浓度。综上可以看出,现有研究尚缺乏 MSW 纤维素与木质素含量随龄期变化的规律以及对 MBT 垃圾与 MSW 中纤维素与木质素含量差异的研究,而 C/L 值对于垃圾填埋场中有机物生物降解程度评估、垃圾填埋场使用寿命预测以及垃圾填埋场稳定性评估具有重要意义,因此有必要对 MSW、MBT 垃圾中纤维素与木质素的含量及其比值随着龄期变化的规律做进一步的研究。

本文对中国杭州天子岭填埋场中填埋龄期为 0~20 年的垃圾进行全断面钻孔取样,通过 NREL 方法^[20]测定了不同龄期 MSW 试样和 MBT 垃圾试样的纤维素与木质素含量,分析了两者的含量随填埋龄期变化的规律;对比了 MBT 垃圾中纤维素与木质素含量与 MSW 的差异。本文对更高效处理垃圾和提高垃圾填埋场使用寿命提供了一定依据,可为新建垃圾场处理垃圾的技术手段选择和既有垃圾场技术升级改造提供参考。

1 试验材料及试验方法

1.1 试验材料

试验所用材料取自杭州天子岭垃圾填埋场的 MSW 和 MBT 垃圾,原料经粉筛、过筛(0.5 mm)和 65 ℃干燥 5 h 备用。天子岭填埋场不同埋深的 MSW 组分质量占比见图 1。图 1 可以看出:天子岭填埋场 MSW 中橡胶塑料含量较高;随着填埋龄期的增加,纸张含量快速下降,而灰土含量则相反,随着填埋龄期的增加,灰土含量有所上升。

MBT 垃圾组分如图 2 所示,从图中可以看出,橡胶塑料、砖瓦石子、玻璃、灰土(<5 mm)所占质量百分比比较高。MBT 垃圾的含水率为 20.17%,密度为 0.49 g/cm³。

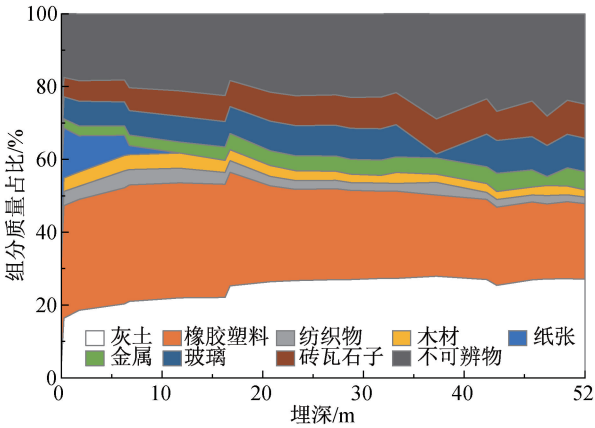


图 1 天子岭填埋场不同埋深的 MSW 组分质量占比

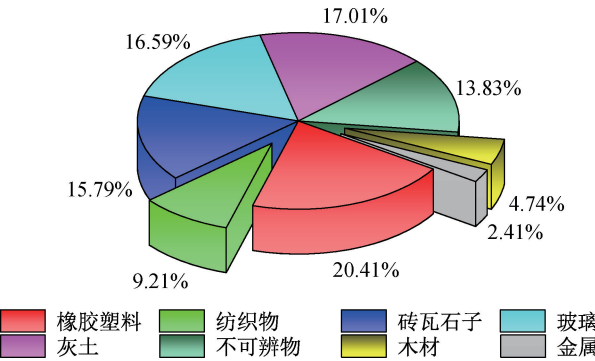


图 2 MBT 垃圾的组成(质量百分比)

1.2 试样制备

经过 24~48 h 烘干处理后,垃圾可以初步分为以下 4 种类型:粗粒重质垃圾(如大块石子、金属、玻璃等),塑料,粗粒可降解垃圾(包括大块竹木、大块织物和大块纸张),细粒垃圾(如细树枝条、砂土、腐殖土以及无法进一步分拣出的塑料、纸张和织物等组分)。随后,进行细粒垃圾的颗粒分析试验,所用土工筛孔径从大到小依次为 20.00、0.50 mm 和 0.25 mm。试验结束后将粒径大于 0.50 mm 的垃圾归类为粗粒重质垃圾。完成上述步骤后,进行垃圾粉碎,将粗粒可降解垃圾与挑出的需粉碎细粒垃圾投入粉碎机中进行粉碎,粉碎后的试样与孔径小于 0.50 mm 的垃圾混合装袋。

1.3 试验方法

采用 NREL 方法测定不同龄期(0~20 年)下 MSW 中纤维素、木质素含量及 MBT 垃圾纤维素与木质素含量,并进一步比较 MBT 垃圾和 MSW 的木质素纤维素含量差异。

对于制备好的试样,称取 300 mg 试样,放入压力管中,记录重量(精度为 0.100 mg)后在压力管中加入 3.00 mL 浓度为 72% 的硫酸,并使用搅拌棒搅拌,随后将压力管置于 30 ℃水浴中,水浴

60 min,使用搅拌棒每 5~10 min 搅拌一次;待水解完成后,将浓硫酸水解液转移至 100 mL 的四口瓶中,加入 84.0 mL 去离子水,将浓度稀释至 4%;随后,将四口瓶置于高压灭菌器中,密封的试样在 121 ℃ 下高压灭菌 1 h,高压灭菌循环结束后,让水解物慢慢冷却至接近室温。下一步进行酸溶木质素含量测定,将约 50.0 mL 的试样倒入储存瓶中,用去离子水定量地将所有剩余固体从压力管转移到过滤坩埚中,在 105 ℃ 烘箱中干燥直到达到恒定重量后,将试样从烘箱中取出放入干燥器中冷却;冷却结束后,记录坩埚和干燥残渣的重量,将坩埚和残渣放入温度在 575 ℃ 的马弗炉中 24 h;放入干燥器中冷却一段时间后,称量并记录坩埚和灰分恒重时的重量,计算出酸不溶性木质素含量。

在紫外可见分光光度计上测量试样在波长为 240 nm 紫外光的吸光度,初步计算酸溶性木质素含量,进一步结合酸不溶性木质素含量计算出木质素含量。其过程如下:首先使用去离子水稀释,使吸光度保持在 0.7~1.0 nm 范围内,记录稀释度,再使用相同的溶剂作为对照组,从而得出酸溶性木质素含量。其次,将之前获得的水解液用碳酸钙中和,当 pH 值达到 5~6 时,停止碳酸钙的添加,使其沉淀,并取出上清液,溶液沉淀后的 pH 值约为 7;最后取滤液 5.00 mL,通过 0.2 μm 过滤器过滤后置于透明刻度采样瓶备用,使用高效液相色谱仪对试样测定稀释后葡萄糖浓度,从而得出纤维素含量。

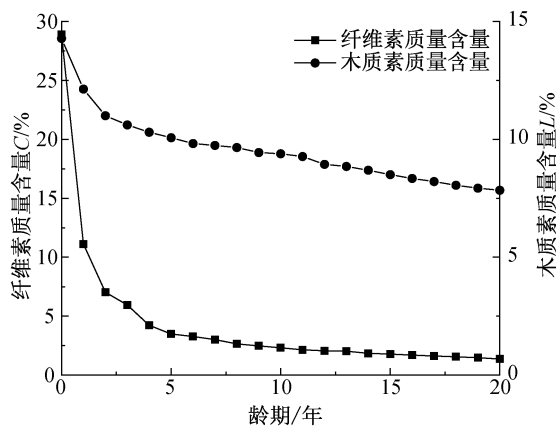
2 结果与讨论

2.1 MSW 中纤维素与木质素含量分析

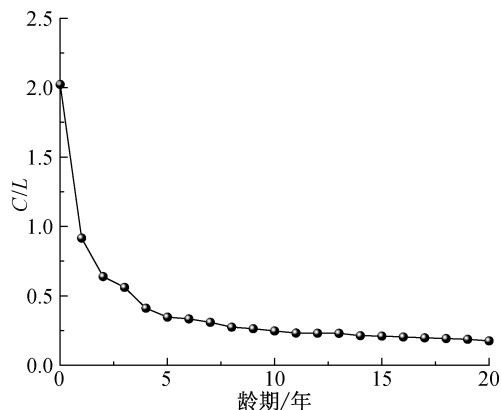
2.1.1 MSW 纤维素与木质素含量随龄期的变化规律

本文测定了不同龄期试样中的 C 和 L ,通过计算 C/L ,得到 C 和 L 及 C/L 随龄期的变化曲线,试验结果如图 3 所示。其中图 3(a)为 C 和 L 随龄期的变化曲线,图 3(b)为 C/L 随龄期的变化曲线。MSW 中的纤维素的初始含量为 28.9%,木质素的初始含量为 14.3%,二者的比值为 2.023。由图 3(a)可以看出,随着龄期的增加,纤维素与木质素含量呈下降趋势并逐渐趋于平缓,MSW 中纤维素含量由刚开始填埋时的 28.9% 下降到填埋 20 年的 1.4%,MSW 中木质素含量由刚开始填埋时的 14.3% 下降到填埋 20 年的 7.8%。另外,值得注意

的是,MSW 中纤维素的降解速率要远远大于木质素,这可能是纤维素作为一种可降解物质与木质素相比更容易降解,因此纤维素降解速率较木质素降解速率要快。



(a) C 和 L 随龄期的变化曲线



(b) C/L 随龄期的变化曲线

图 3 C 、 L 及 C/L 随龄期的变化曲线

由图 3(b)可以看出,随着龄期的增加, C/L 呈下降趋势,开始时 C/L 值下降较快,到龄期为 10 年时,其变化幅度减小,逐渐趋于平缓。具体表现为,随着垃圾填埋龄期增加,MSW 的 C/L 值由刚开始填埋时的 2.023 逐渐下降到填埋 20 年的 0.175。

2.1.2 MSW 纤维素、木质素与相关文献对比

将本文 C/L 值随龄期的变化曲线与其他研究人员对 MSW 试验所得结果进行比较,如图 4 所示。由图 4 可以看出,在垃圾填埋过程中, C/L 值的减小速率随着龄期的增加而不断减缓。这是由于在填埋过程中,随着龄期的增加,微生物增殖速率变慢,剩余可降解有机物的含量逐渐降低,降解速率降低。相对来说,Ham 等^[6]研究得到的 C/L 值的减小速率较慢,这主要是由于国外垃圾组成里竹木及纸张含量较国内要高,其竹木的木质素含量在 32% 左右,纸张的木质素含量在 20% 左

右;另外国外垃圾填埋场对于厨余垃圾会进行提前分类处理,进一步导致国外的新鲜生活垃圾中厨余垃圾含量较低。

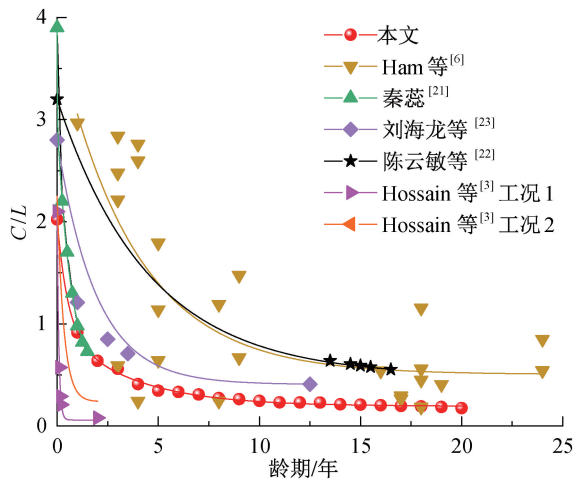


图 4 不同研究中 C/L 随龄期的变化曲线对比图

由图 4 还可以看出,本文试样的 C/L 值与龄期关系曲线和秦蕊^[21]、陈云敏等^[22]对中国天子岭垃圾填埋场 MSW 的 C/L 值与龄期的关系曲线比较相近,这是因为其试验材料来源于同一个地区,试验材料的组分比较相似,因此在纤维素与木质素含量研究上呈现出一定的相似性。值得注意的是,刘海龙等^[23]试验所得的 C/L 值与龄期的关系曲线与本文的试验结果相差较大,造成这一结果的主要原因是刘海龙的试验中所用的试验材料取自西安江村沟填埋场,试验材料组分以厨余类、塑料类和纸类为主,厨余垃圾含量在 57%左右,纸类含量在 9%左右,塑料含量在 12%左右;本文天子岭填埋场组分以塑料橡胶为主,塑料橡胶含量高达 31%,纸类含量在 17%左右,厨余垃圾含量较低,两者试验材料的可降解有机物含量差异较大。

2.2 MBT 垃圾中纤维素与木质素含量分析

2.2.1 MBT 垃圾和 MSW 的纤维素与木质素含量差异

本文测定了天子岭填埋场 MBT 垃圾中纤维素与木质素含量,测定前,从试样中除去了所有不可研磨物(金属、玻璃、陶瓷和石头)。剩余的垃圾在 70℃下干燥,并使用粉碎机一起磨成直径小于 0.5 mm 的细粉后,使用 NREL 方法进行木质素、纤维素含量的测量。计算纤维素含量与木质素含量的比值,试验得出 MBT 垃圾纤维素含量为 5.95%,木质素含量为 35.07%, C/L 值为 0.170。

从试验结果可以看出,天子岭填埋场的 MBT 垃圾中纤维素含量相较于新鲜垃圾有显著下降,而

木质素作为一种难降解物质含量增加。天子岭填埋场的纤维素含量从 28.89%降至 5.95%,木质素含量从 14.28%升至 35.07%。从试验结果中还可以看出,天子岭填埋场的 MBT 垃圾中纤维素含量与龄期为 3 年的 MSW 纤维素含量较为相近,木质素含量较 MSW 要大, C/L 值与龄期为 20 年的 MSW 相比要小。这是因为未降解的纤维素在部分纤维素周围形成物理屏障,从而阻止了微生物的进入,影响了微生物对垃圾的分解作用。另外由于 MBT 垃圾和 MSW 是两种不同来源的生物质,其成分可能存在显著的差异。MBT 垃圾的处理过程包括了机械筛选、磁选、风力分选等步骤,而 MSW 则是直接从城市中收集的混合垃圾。这些处理步骤也可能导致 MBT 垃圾和 MSW 在组成上的纤维素与木质素含量的差异。

2.2.2 MBT 垃圾纤维素与木质素含量与相关文献对比

本文中 MBT 垃圾的 C/L 值与既有研究对 MBT 垃圾测得的 C/L 值列举于表 1。由表 1 可以看出,MBT 垃圾中纤维素含量较新鲜生活垃圾要小很多,木质素所占比例要高于 MSW, C/L 值要比新鲜生活垃圾低很多。这是因为 MBT 垃圾经过生物降解后,可降解有机物含量大幅降低,难降解有机物和无机物的相对含量则大幅增加,纤维素的降解速率较木质素的降解速率要快很多。另外,天子岭填埋场 MBT 垃圾的 C/L 值较文献报道的国外相同技术手段处理的垃圾填埋场的 C/L 值要低,其主要原因是目前天子岭填埋场利用机械手段(包括粉碎、过滤、离心和筛选等步骤)对材料进行分类,区分出易于生物降解和难以生物降解的成分。此外,MBT 技术还将较大的物质细分或粉碎至更小的尺寸,以便进行后续的好氧和厌氧生物处理,加快生活垃圾内有机物的降解。相较于已有的 MBT 垃圾填埋场,天子岭垃圾填埋场处理垃圾的工序更多,处理得更细致,因此处理后的效果更好。

表 1 天子岭填埋场 MBT 垃圾纤维素、木质素及比值与研究成果的对比

垃圾类别	纤维素含量/%	木质素含量/%	C/L
天子岭新鲜生活垃圾	28.89	14.28	2.02
天子岭填埋场 MBT 垃圾	5.95	35.07	0.170
英国 MBT 垃圾	10.24	12.63	0.811
德国 MBT 垃圾	7.96	13.01	0.612

3 结 论

本文采集了杭州天子岭垃圾填埋场的 MSW 试样和 MBT 垃圾试样,采用美国国家可再生能源实验室方法分析了 MSW 中纤维素与木质素含量随龄期的变化规律以及 MBT 垃圾和 MSW 在纤维素与木质素含量上的差异。主要结论如下:

a)MSW 的纤维素与木质素含量及其比值(C/L)与龄期之间存在一定的关系。随着龄期的增加,MSW 的木质素和纤维素含量及其比值减小,其减小的幅度逐渐变小并趋于平缓,纤维素降解速率要远大于木质素降解速率。

b)MBT 垃圾中纤维素含量相较于新鲜垃圾有显著下降,而木质素作为一种难降解物质其含量相对增加;MBT 垃圾的 C/L 值显著降低,表现出与垃圾降解程度具有较好的相关性,通过 C/L 值可以看出 MBT 垃圾的降解程度较大。

c)本文 MSW 和 MBT 垃圾的 C/L 值与相关文献比较发现,MSW 中纤维素与木质素的比值的减小速率较国外要快;天子岭填埋场 MBT 垃圾的 C/L 值较已有的文献报道的经同样技术手段处理后垃圾的 C/L 要低,即降解程度更高。这表明天子岭垃圾填埋场的 MBT 技术手段处理效果更好,可作为我国其他新建垃圾填埋场对垃圾进行处理的技术参考,也可作为已建垃圾填埋场技术升级的参考。

本文从定量的角度验证了 MBT 技术的优势,为 MBT 技术推广提供了有力支撑。值得注意的是,本文测定的垃圾龄期为 0~20 年,由此得出的结论是否适合更长龄期的垃圾有待进一步的研究。此外,纤维素与木质素仅为垃圾中的两种有机物,其他有机物的含量随垃圾龄期的变化规律也有待进一步研究。本文反映垃圾降解程度所用的指标为 C/L ,指标较为单一,后续将采用 C/L 、填埋产气量、降解稳定化程度指数等多指标来研究垃圾的降解程度。

参考文献:

[1] Kaza S, Yao L C, Bhada-Tata P, et al. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050[R/OL]. (2018-09-20)[2024-03-20]. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>.

[2] Fan G Y, Zhang Z Y, Zhang J H, et al. Effect of loading rate on shear strength parameters of mechanically and biologically treated waste[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2022, 16(12): 160.

[3] Hossain M S, Gabr M A, Barlaz M A. Relationship of compressibility parameters to municipal solid waste decomposition [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(12): 1151-1158.

[4] Hull R M, Krogmann U, Strom P F. Composition and characteristics of excavated materials from a New Jersey landfill [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2005, 131(3): 478-490.

[5] Kim H. Comparative Studies of Aerobic and Anaerobic Landfills Using Simulated Landfill Lysimeters [D]. Gainesville: University of Florida, 2005:95-108.

[6] Ham R K, Norman M R, Fritschel P R. Chemical characterization of fresh kills landfill refuse and extracts [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1993, 119(6): 1176-1195.

[7] 瞿贤, 何品晶, 邵立明, 等. 生物反应器填埋条件下垃圾生物质组分的初期降解规律[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(9): 1219-1225.

[8] Baldwin T D, Stinson J, Ham R K. Decomposition of specific materials buried within sanitary landfills [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1998, 124(12): 1193-1202.

[9] 刘永刚, 冉宜骏, 高铭泽, 等. 桑叶中纤维素和木质素含量的测定[J]. *饲料研究*, 2019, 42(7): 58-60.

[10] Barlaz M A. Forest products decomposition in municipal solid waste landfills [J]. *Waste Management*, 2006, 26(4): 321-333.

[11] Lissens G, Klinke H, Verstraete W, et al. Wet oxidation treatment of organic household waste enriched with wheat straw for simultaneous saccharification and fermentation into ethanol [J]. *Environmental Technology*, 2004, 25(6): 647-655.

[12] 孙秀丽, 孔宪京, 邹德高, 等. 城市生活垃圾中可降解有机物降解规律研究[J]. *安全与环境学报*, 2010, 10(4): 46-49.

[13] Kuehle-Weidemeier M. Landfilling of mechanically-biologically pretreated municipal solid waste[C/OL]// *International Symposium Waste Management, Zagreb, VIII*. 2004. [2024-03-20]. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=120c4f3d79fb155339bca827e6cea0c5f116f02d>.

[14] Archer D E, Schwager J, Whiting K. Could MBT become the most significant waste management option? [C/OL]// *Proceedings of International Symposium MBT 2005, Hannover, Germany*. [2024-03-20]. <http://www.wasteconsult.net/files/downloads/2005-02%20Archer.pdf>.

[15] Bilitewski B, Oros C, Christensen T H. Mechanical biological treatment [M] // Christensen T H. Solid Waste Technology & Management. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2010: 628-638.

[16] Robinson H D. Environmental Impacts of landfilling MBT residues[C]//Proceedings of the International Symposium MBT. Hannover, Germany. 2005: 401-412.

[17] Robinson H D, Knox K, Bone B D, et al. Leachate quality from landfilled MBT waste[J]. Waste Management, 2005, 25(4): 383-391.

[18] Siddiqui A. Assessing pretreated municipal solid waste degradation by BMP and fibre analysis[J]. Environmental Research and Technology, 2019, 2(2): 57-62.

[19] Pimolthai P, Wagner J F. Soil mechanical properties of MBT waste from Luxembourg, Germany and Thailand [J]. Songklanakarin Journal of Science and Technology (SJT), 2014, 36(6): 701-709.

[20] Sluiter A D, Hames B, Ruiz R, et al. Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass [R/OL]. (2012-08-03) [2024-03-20]. <https://www.nrel.gov/docs/gen/fy13/42618.pdf>.

[21] 秦蕊. 不同降解龄期下垃圾结构及优先流渗透特性研究[D]. 杭州:浙江大学, 2009: 5-29.

[22] 陈云敏, 刘晓成, 徐文杰, 等. 填埋生活垃圾稳定化特征与可开采性分析: 以我国第一代卫生填埋场为例[J]. 中国科学: 技术科学, 2019, 49(2): 199-211.

[23] 刘海龙, 周家伟, 陈云敏, 等. 城市生活垃圾填埋场稳定化评估[J]. 浙江大学学报(工学版), 2016, 50(12): 2336-2342.

(责任编辑:康 锋)