

高 娣, 奚永兰, 刘 洋, 等. 江苏徐州沛县大屯街道有机生活垃圾的理化性质分析[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(4): 965-970.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.04.022

江苏徐州沛县大屯街道有机生活垃圾的理化性质分析

高 娣^{1,2}, 奚永兰^{1,3}, 刘 洋^{1,3}, 曹风雷⁴, 朱 艳^{1,2}, 王宇欣^{1,2}, 孔祥平¹,
杜 静^{1,3}, 叶小梅^{1,2}

(1.江苏省农业科学院循环农业研究中心,江苏 南京 210014; 2.南京农业大学资源与环境学院,江苏 南京 210014; 3.江苏大学农业装备工程学院,江苏 镇江 212013; 4.江苏省沛县大屯街道环卫办公室,江苏 沛县 221611)

摘要: 为了将农村有机生活垃圾作为厌氧发酵原料提供理论依据,以江苏省徐州市沛县大屯街道王庄村生活垃圾分类处置中心的有机生活垃圾为研究对象,连续 12 月次对有机生活垃圾堆垛进行多点采样,分析沛县大屯街道有机生活垃圾的理化特征。结果表明,分类后沛县大屯街道有机生活垃圾含水率为 75%~80%;有机碳含量约为 40%;全氮含量较高,为 12~26 g/kg;碳氮比(*C/N*)主要为 17~23;木质素含量为 3%~13%。可以看出,沛县大屯街道有机生活垃圾适合作为厌氧发酵物料。

关键词: 农村有机生活垃圾;理化特征;发酵原料

中图分类号: S141.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)04-0965-06

Analysis on physical and chemical properties of organic domestic waste in Datun Street, Pei County, Xuzhou City, Jiangsu province

GAO Di^{1,2}, XI Yong-lan^{1,3}, LIU Yang^{1,3}, CAO Feng-lei⁴, ZHU Yan^{1,2}, WANG Yu-xin^{1,2},
KONG Xiang-ping¹, DU Jing^{1,3}, YE Xiao-mei^{1,2}

(1. Research Center for Circular Agriculture, Jiangsu Academy of Agriculture Sciences, Nanjing 210014, China; 2. College of Resources and Environment, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210014, China; 3. School of Agricultural Equipment Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 4. Sanitation Office of Datun Street in Pei County, Jiangsu Province, Pei County 221611, China)

Abstract: To provide theoretical basis for using organic domestic waste as fermentation material in rural areas, the organic domestic waste from domestic waste classification and disposal center in Wangzhuang Village, Datun Street, Pei County, Xuzhou City, Jiangsu province was selected as the research object. The physical and chemical characteristics of organic domestic waste in Datun Street, Pei County were analyzed by multi-point sampling for 12 months consecutively. The results showed that the moisture content of organic domestic waste in Datun Street of Pei County ranged from 75% to 80% after classification, the organic carbon content was about 40%, the total nitrogen content was 12–26 g/kg, the carbon-nitrogen ratio (*C/N*) was 17–23, the content of lignin was 3%–13%. It can be seen that organic domestic waste in Datun Street of Pei County is suitable for anaerobic fermentation material.

Key words: rural organic domestic waste; physical and chemical characteristics; fermentation material

随着中国经济的飞速发展,城乡差距越来越大,

为了进一步减小城乡之间的差距,近年来党中央提出了乡村振兴战略目标,在《中共中央国务院关于实施乡村振兴战略的意见》中,党中央将“改善农民居住环境,建设美丽宜居乡村”列为重要目标之一^[1]。随着农民生活水平的不断提高,农村固体废弃物的数量急剧增长,给农村环境造成了巨大压力。因此,建设美

收稿日期:2020-01-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD1100600)

作者简介:高 娣(1996-),女,河南郑州人,硕士,主要从事固体废弃物资源化利用方面的研究。(E-mail)gaodizz@foxmail.com

通讯作者:叶小梅,(E-mail)yexiaomei610@126.com

丽宜居乡村,必须解决农村生活垃圾问题。

与城市生活垃圾的处理规模相比,人们对农村生活垃圾的关注度和处理程度不高,大多数垃圾露天随意堆放,不但孳生蚊虫,而且会产生恶臭气味,从而严重污染环境卫生。造成这一局面的原因是多方面的,其中的主要原因是农村居民较为分散,尤其在山村地区,这导致生活垃圾的运输处置成本非常高^[2],因此需要探索低成本的农村生活垃圾处理模式。目前,在各种生活垃圾的处理方法中,厌氧发酵法因其既能有效处理垃圾又能产生清洁的能源而受到广泛关注,成为近年来研究的热点,厌氧发酵主要指废弃物在厌氧条件下通过微生物的代谢活动而被稳定化,同时产生甲烷、二氧化碳和氢气的过程^[3]。分析有机垃圾的营养含量对评价厌氧发酵质量具有重要意义,不同地方的生活垃圾营养成分受到经济和生活习惯的影响有较大差别。农村生活垃圾中餐厨垃圾等易腐有机物含量高,是厌氧发酵较好的原料,而且农村不同于城市,具有广阔的地理空间,适合建设厌氧发酵设施。

沛县作为江苏省较早启动垃圾分类的县(市),自从2016年启动农村生活垃圾分类试点工作后,农村的环境面貌得到了有效改进,进一步提高了农民的生活质量和幸福指数。2017年6月,沛县被中华人民共和国住建部确定为全国农村生活垃圾分类和资源化利用示范县,大屯街道成为江苏省农村生活垃圾分类试点镇。2019年9月,沛县被列为国家卫生县城。随着国家“绿色宜居村镇技术创新”项目的启动,沛县大屯街道也被列为分类后村镇生活垃圾资源化利用的项目示范工程所在地。除了较为普遍的堆肥处理方式外,厌氧发酵处理技术是实现生活垃圾资源化利用的另一重要路径,因此有必要对当地的有机生活垃圾进行理化性质分析,从而为生活垃圾发酵工程的技术路线选择提供主要基础参数。由于沛县有机垃圾的前段分拣较为细致且大屯街道各个垃圾处理站点都采用同样的垃圾分类模式收集,因此本研究选取大屯街道王庄村的生活垃圾分类处置中心为取样点,按月对大屯街道生活垃圾分类处置中心的生活垃圾原料堆垛进行为期1年的多点采样,分析其含水率、全氮含量、全磷含量、全钾含量、有机碳含量、纤维素含量、半纤维素含量、木质素含量的变化,研究用该生活垃圾原料进行厌氧发酵的可行性。由于目前尚缺少对沛县有机生活垃圾理化性质的分析,所以这一选题具有较大的研究价值。

1 材料与方法

1.1 试验材料

2018年9月至2019年8月,对在江苏省徐州市沛县大屯街道王庄村生活垃圾分类处置中心的生活垃圾原料堆垛进行多点采样,各点取2 kg样品并混合后取2 kg混合样品,采样频率为每月1次。

1.2 研究方法

在测定理化性质指标时,设3个平行样,结果取平均值。

1.2.1 含水率的测定 样品于105℃烘箱中烘干至恒质量时的质量占样品原质量的比例即为样品的含水率,计算公式如下:

$$\text{含水率} = (m_0 - m_1) / m_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中, m_1 为样品中的干物质质量(g), m_0 为样品的总质量(g)。

1.2.2 有机碳含量的测定 样品中有机碳含量的测定采用稀释热法^[4],利用浓硫酸和重铬酸钾迅速混合时所产生的热量来氧化有机质,剩余的重铬酸钾用硫酸亚铁来滴定,根据所消耗的重铬酸钾的量来计算样品中有机碳含量,计算公式如下:

$$\text{有机碳含量} = \frac{[(V_1 - V_2) \times c \times 0.003 \times 1.330]}{m} \times 100\% \quad (2)$$

式中, V_1 为滴定空白样品所用 FeSO_4 溶液的体积(ml), V_2 为滴定样品所用 FeSO_4 溶液的体积(ml), c 为所用 FeSO_4 溶液的当量浓度(N),0.003为1当量浓度碳的质量(g),1.330为氧化校正系数, m 为样品干质量(g)。

1.2.3 全氮含量的测定 样品全氮含量的测定采用凯氏定氮法^[4],将样品烘干至恒质量后,首先经粉碎机粉碎,再过60目筛,然后取0.1~0.2 g样品进行消煮。将消煮液冷却、定容后取过滤液进行蒸馏,然后采用酸式滴定法进行测定,计算公式如下:

$$\text{全氮含量} = \frac{(V - V_0) \times c \times 14 \times 10^{-3} \times n}{m} \times 10^3 \quad (3)$$

式中, V 为滴定样品所用酸标准溶液体积(ml), V_0 为滴定空白样品所用酸标准溶液体积(ml), c 为所用酸标准溶液浓度(mol/L),14为氮原子的摩尔质量(g/mol), m 为烘干样品质量(g), n 为消煮溶液定容体积(L)/所取体积(L)。

1.2.4 全磷含量的测定 样品经 H_2SO_4 - H_2O_2 消煮后,采用钒钼黄比色法测定其全磷含量^[4]。消煮后

样品中的正磷酸盐在酸性条件下可以与偏磷酸盐、钼酸盐形成稳定的黄色钼钼酸盐,用分光光度计可以测得样品中的全磷含量,计算公式如下:

$$\text{全磷含量} = \frac{\rho \times V \times \text{分取倍数} \times 10^{-3}}{m} \quad (4)$$

式中, ρ 为通过标准曲线查得的显色液中磷的质量浓度($\mu\text{g/ml}$), V 为显色液体积(ml),分取倍数=消煮液体积/吸取的消煮液体积, m 为干样品质量(g)。

1.2.5 全钾含量的测定 样品用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮后,可以采用火焰光度计测定样品中的全钾含量^[4],计算公式如下:

$$\text{全钾含量} = \frac{\rho \times V \times \text{分取倍数} \times 10^{-3}}{m} \quad (5)$$

式中, ρ 为通过标准曲线查得的显色液中钾的质量浓度($\mu\text{g/ml}$), V 为测定液体积(ml),分取倍数=消煮液体积/吸取的消煮液体积, m 为干样品质量(g)。

1.2.6 半纤维素、纤维素和木质素含量的测定 采用范氏洗涤纤维分析法测定样品中的纤维素、半纤维素、木质素含量^[4]。先将样品用中性洗涤剂煮沸,煮沸后剩余的部分为中性洗涤纤维,主要成分为半纤维素、纤维素、木质素和硅酸盐。然后用酸性洗涤剂处理样品,洗涤后剩余的部分为酸性洗涤纤维,主要包括纤维素、木质素和硅酸盐。再用72%硫酸处理酸性洗涤纤维,所剩残渣主要包括木质素和硅酸盐。最后,将残渣放入马弗炉中灰化,消失的那一部分即为木质素。因此,通过上述不同处理前后的质量差分别可以计算出半纤维素、纤维素和木质素含量(本研究以质量分数计)。

1.3 数据处理与分析

试验数据采用SPSS 25.0进行计算、统计和统计分析,作图软件为OriginPro 9.1。

2 结果与分析

2.1 沛县大屯街道有机生活垃圾的处理现状

大屯街道位于江苏省徐州市沛县中北部,南邻沛城,西接安国镇,东临微山湖,总面积为 51.5 km^2 ,总人口为 1.223×10^5 人,地处苏北滨湖平原,气候宜人,风景优美,土地肥沃,物产丰富,属于温暖带半湿润气候,四季分明,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,秋季天高气爽,春季天气多变,年平均气温为 $14.2 \text{ }^\circ\text{C}$,年平均无霜期约为201 d,一般年平均降水

量为 816.4 mm ,年平均相对湿度为72%^[5]。此外,大屯街道是工业强镇和农业大镇,其中农作物以小麦、水稻为主,粮食作物面积为 5600 hm^2 ,村镇工业和私营个体企业基础扎实,经济发展迅猛^[6]。

全镇共设19个行政村,常住人口为 5.7×10^4 人,春夏季日产垃圾量较大,可达65 t,秋冬季日产垃圾量较少,为55 t左右,人均日产垃圾量为 $1.14 \sim 0.96 \text{ kg}$ 。沛县自从2016年启动农村生活垃圾分类试点后,积极推进垃圾分类工作,形成了“户分类投放、村分拣收集、镇回收清运、有机垃圾生态处理”的模式,创新性地采用“两分法”的分类方式,将生活垃圾分为“可堆肥垃圾”和“其他垃圾”,每天定时收集垃圾,将“其他垃圾”经中转站压缩后送到垃圾焚烧厂,并对“可堆肥垃圾”进行资源化处理。

2.2 沛县大屯街道有机生活垃圾理化性质的年度变化

2.2.1 沛县大屯街道有机生活垃圾含水率的年度变化 垃圾的含水率受当地气候、季节、垃圾成分等多种因素的影响。从图1可以看出,沛县大屯街道有机生活垃圾含水率偏高,整体在78%左右,其中4月、7月、9月的有机生活垃圾含水率大于78%,主要由于春夏季温度较高,人们消耗新鲜蔬菜、水果等含水率高的食物较多;而11月、12月、2月等月份的含水率低于78%,主要原因可能是秋冬季节新鲜蔬菜、水果的产量少、消耗量低,且垃圾的总产量也比春夏季节低。目前,大多数有机垃圾的处理方式为堆肥,有研究发现,堆肥原料最适合的含水率约为65%^[7],但是有机垃圾的含水率较高,为80%~70%,不适合采用堆肥处理。基于农村有机垃圾的高含水率、高有机质含量的特性,采用厌氧发酵方式处理农村有机垃圾,不但可以实现垃圾的无害化和资源化,同时可以创造一定的经济利益^[8]。综上所述,用厌氧发酵法处理沛县大屯街道的有机生活垃圾较堆肥处理法更为适宜。

2.2.2 沛县大屯街道有机生活垃圾中养分含量的年度变化 沛县大屯街道有机生活垃圾主要由剩菜、剩饭、菜叶、果皮等组成,所以其有机碳、氮、磷、钾等营养元素含量丰富。从图2、图3可以看出,沛县大屯街道有机生活垃圾的有机碳含量和全氮含量丰富,其中1~12月的平均有机碳含量约为40%,4月、5月的有机碳含量均低于35%,分别为29%、30%,可能是由于冬季过后,居民的饮食结构发生了变化,从高脂肪、高热量饮食转换为清淡饮食;1~12月的全氮含量为12~

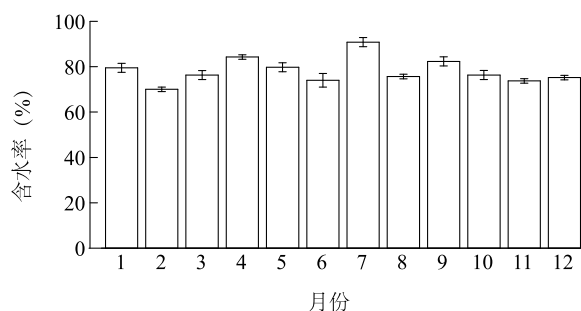


图1 沛县大屯街道有机生活垃圾含水率的年度变化

Fig.1 Annual changes in moisture content of organic domestic waste in Datun Street, Pei County

26 g/kg,其中9月、10月、11月的全氮含量都较低,分别为12 g/kg、15 g/kg、11 g/kg,可能由于该时间段属于夏秋交替的季节,肉类等蛋白质食物的消耗量较少,而12月、1月、2月的全氮含量较高,分别为26 g/kg、21 g/kg、23 g/kg,可能由于冬季春节期间肉类等蛋白质食物的消耗量较高。从图3还可以看出,1-12月沛县大屯街道有机生活垃圾的全磷含量为2~12 g/kg,全钾含量为7~16 g/kg。厌氧发酵过程中起主导作用的是产甲烷菌,产甲烷菌生长状态良好是厌氧发酵过程顺利进行的前提,由于产甲烷菌所需的主要营养物质为有机碳、氮、磷、钾等,而大屯街道有机生活垃圾中有机碳、氮、磷、钾含量丰富,因而均能满足厌氧发酵的工艺要求^[9]。

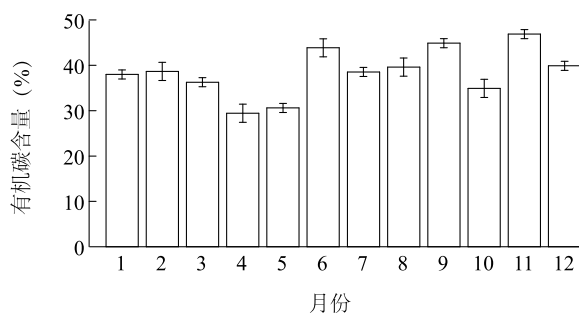


图2 沛县大屯街道有机生活垃圾中有机碳含量的年度变化

Fig.2 Annual changes in organic carbon content of organic domestic waste in Datun Street, Pei County

2.2.3 沛县大屯街道有机生活垃圾碳氮比 (C/N) 的年度变化 一般认为,适宜的碳氮比(有机物中有机碳质量分数与总氮质量分数的比值)为15~30^[7]。若碳氮比过高,表明含氮量不足,缓冲能力较低,pH值容易降低,反之若碳氮比过低,则表明含氮量过高,微生物会将多余的氮代谢为氨(NH₃)释放出来,从而使影响发酵液酸碱度的物质碳酸氢铵

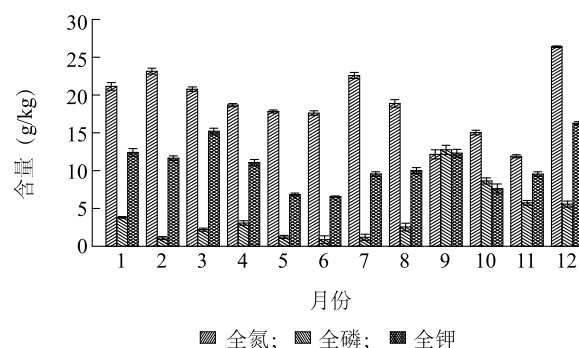


图3 沛县大屯街道有机生活垃圾中氮、磷、钾含量的年度变化

Fig.3 Annual changes in nitrogen, phosphorus and potassium contents of organic domestic waste in Datun Street, Pei County

(NH₄HCO₃)含量增加,碳酸氢铵含量增加虽然可以提高发酵液的缓冲能力,但是铵盐容易积累,从而抑制发酵反应的进行^[10]。从图4可以看出,沛县大屯街道1-12月有机生活垃圾的平均碳氮比约为17,其中12月、2月的碳氮比较低,分别为15、16,可能是春节期间肉类等蛋白质食物的消耗量较大等原因造成的;而4月的碳氮比比2月更低,可能是2019年4月肉类价格有所降低,肉类消费量增加造成的,6月、9月、11月的碳氮比较高,分别为24、36、40,结合当地的蔬果消耗量分析可知,可能是夏季蔬果和秋季红薯、马铃薯等高淀粉含量的应季蔬果消耗量较大。综上可知,沛县大屯街道各月份有机生活垃圾的碳氮比较适宜厌氧发酵。

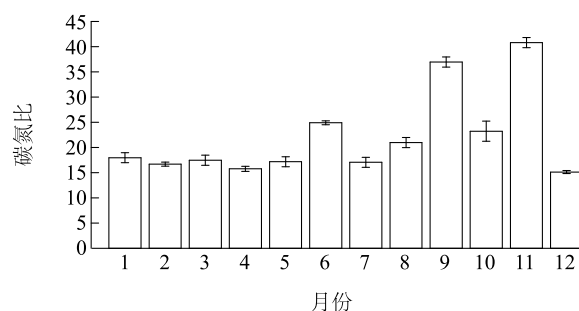


图4 沛县大屯街道有机生活垃圾碳氮比的年度变化

Fig.4 Annual changes in carbon-nitrogen ratio of organic domestic waste in Datun Street, Pei County

2.2.4 沛县大屯街道有机生活垃圾中半纤维素、纤维素、木质素含量的年度变化 由图5可以看出,1-12月沛县大屯街道有机生活垃圾中的半纤维素含量为8%~22%,其中12月、1月、4月的半纤维素含量较低,分别为9.10%、8.00%、9.05%,这可能是由冬季新

鲜蔬菜的消耗量较少造成的;除了1月的纤维素含量为8%外,其余月份的纤维素含量基本都在10%以上,最高的是11月(18%);由于大屯街道的有机生活垃圾主要由剩饭、剩菜、菜叶和果皮组成,所以木质素含量偏低,1-12月的平均含量约为8%。在厌氧发酵过程中,易溶解的碳水化合物降解得最快,蛋白质、脂肪降解的速度次之,最难降解的是纤维素、木质素^[11]。农作物秸秆普遍被用作厌氧发酵的原料,其半纤维素含量约为20%,纤维素含量约为35%,木质素含量约为20%^[12]。综上,与农作物秸秆相比,沛县大屯街道有机生活垃圾更易降解。

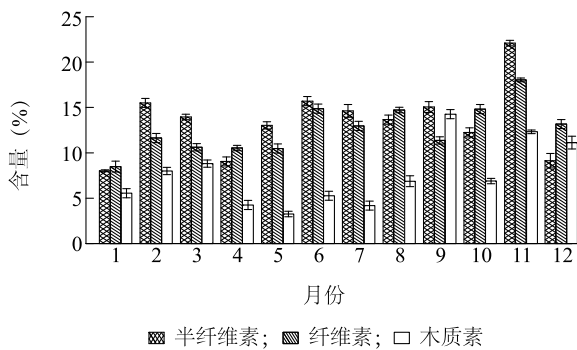


图5 沛县大屯街道有机生活垃圾半纤维素、纤维素、木质素含量的年度变化

Fig.5 Annual changes in hemicellulose, cellulose and lignin contents of organic domestic waste in Datun Street, Pei County

2.3 沛县大屯街道有机生活垃圾理化性质的相关性分析

通过对沛县大屯街道1年内有机生活垃圾理化

性质的相关性分析发现,不同养分含量间存在一定的相关性。由表1可以看出,全钾含量与全氮含量呈极显著正相关($r=0.492, P<0.01$),而全磷含量与全氮含量呈极显著负相关($r=-0.561, P<0.01$);沛县大屯街道有机生活垃圾的C/N与其他多数指标间具有较高的相关性,其中C/N与全氮含量呈极显著负相关($r=-0.849, P<0.01$),而C/N与有机碳含量呈极显著正相关($r=0.730, P<0.01$),C/N与全磷含量呈极显著正相关($r=0.627, P<0.01$),半纤维素含量也与C/N具有较高的相关性($r=0.717, P<0.01$),半纤维素含量与纤维素含量也呈极显著正相关($r=0.679, P<0.01$)。C/N是厌氧发酵的关键性指标,可以判断厌氧发酵效果的好坏,从以上相关性分析结果看出,C/N与全氮含量、全磷含量、有机碳含量、木质素含量、纤维素含量、半纤维素含量等均具有极显著相关性。

2.4 沛县大屯街道有机生活垃圾的可利用性展望

从环保的角度看,沛县大屯街道有机生活垃圾主要废弃物来源为剩饭、剩菜、蔬菜叶、瓜果皮等,这些物质在自然条件下极易发生降解、腐败,从而污染环境。采用厌氧发酵技术可以使农村有机生活垃圾更好地发酵降解。从经济角度看,厌氧发酵充分利用了有机废弃物中的有机质能源,使生活垃圾得到了再次利用,从而大大降低了能源成本^[13]。此外,农村地区地理空间大,便于就地建设有机生活垃圾厌氧发酵设施生产沼气,在当地处理生活垃圾大大节约了垃圾运输成本。由此可见,沛县大屯街道有机生活垃圾厌氧发酵具有较好的开发利用前景^[14]。

表1 沛县大屯街道1年内有机生活垃圾理化性质的相关性

Table 1 Correlation of physical and chemical properties of organic domestic waste in Datun Street, Pei County

项目	相关系数								
	含水率	全氮含量	全磷含量	有机碳含量	全钾含量	C/N	纤维素含量	半纤维素含量	木质素含量
含水率	1.000								
全氮含量	-0.082	1.000							
全磷含量	0.063	-0.561 **	1.000						
有机碳含量	-0.267	-0.303	0.342 *	1.000					
全钾含量	-0.131	0.492 **	0.184	0.075	1.000				
C/N	-0.062	-0.849 **	0.627 **	0.730 **	-0.216	1.000			
纤维素含量	-0.274	-0.395 *	0.129	0.565 **	-0.366 *	0.564 **	1.000		
半纤维素含量	-0.181	-0.538 **	0.037	0.631 **	-0.339 *	0.717 **	0.679 **	1.000	
木质素含量	-0.268	-0.181	0.670 **	0.547 **	0.542 **	0.478 **	0.129	0.195	1.000

**表示在0.01水平(双尾)显著相关; *表示在0.05水平(双尾)显著相关。

3 结 论

通过1年内每个月对沛县大屯街道有机生活垃圾进行取样,分析其理化性质,主要结果为:沛县大屯街道有机生活垃圾含水率集中在75%~80%;有机碳含量约为40%;氮含量丰富,全氮含量为12~26 g/kg; C/N 主要为17~23,发酵过程中无需调节 C/N ;木质素含量较低(3%~13%),易降解;生活垃圾各理化性质间具有一定的相关性,尤其是 C/N 与其他大多数指标间具有显著相关性。综上可得,沛县大屯街道有机生活垃圾是较理想的厌氧发酵原料。

参考文献:

- [1] 李清海.生态宜居助力乡村振兴——中国建材总院“村镇生态建筑材料研究与部品开发”项目概述[J].中国建材,2019(8):120-121.
- [2] 朱慧芳,陈永根,周传斌.农村生活垃圾产生特征、处置模式以及发展重点分析[J].中国人口·资源与环境,2014,24(增刊3):297-300.
- [3] 杨林海.有机垃圾干式厌氧发酵处理试验研究[D].兰州:兰州理工大学,2013.
- [4] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2007:25-271.
- [5] 鄢 琨.沛县汉字文化广场景观设计与研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2014.
- [6] 欧阳爱荣.沛县经济发展状况的统计分析研究[J].农村经济与科技,2016,27(24):123-124.
- [7] 马 闯,扈 斌,刘福勇,等.有机废弃物好氧堆肥过程中微生物及酶活性变化状况综述[J].环境工程,2019,37(9):159-164,187.
- [8] 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.
- [9] 易龙生,饶玲华,王 鑫,等.餐厨垃圾理化性质及其厌氧发酵产气潜力分析[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(4):1584-1588.
- [10] 付胜涛,于水利,严晓菊.初沉污泥和厨余垃圾的混合中温厌氧消化[J].给水排水,2006,32(1):24-28.
- [11] GE XU M, XU F Q, LI Y B. Solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass: recent progress and perspectives[J]. Bioresource Technology, 2016, 205: 239-249.
- [12] 马 欢,刘伟伟,刘 萍,等.微波预处理对水稻秸秆糖化率与成分和结构的影响[J].农业机械学报,2014,45(10):180-186.
- [13] 刘彦国.农村生活废弃物发酵生产沼气的潜力分析[J].农业工程技术(综合版),2017,37(5):36.
- [14] 崔卫芳,张婷婷,席建超.太阳能辅助沼气发酵装置设计与试验[J].资源科学,2012,34(11):2034-2038.

(责任编辑:徐 艳)