

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.034

鸡粪沼渣好氧堆肥颗粒尺度下氧气渗透深度表征

马双双¹ 黄晶¹ 李仁权² 孙晓曦¹ 韩鲁佳¹ 黄光群¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 青海藏地堂生物科技开发有限公司, 西宁 810000)

摘要: 利用傅里叶变换显微红外光谱技术对鸡粪沼渣好氧堆肥颗粒尺度下氧气渗透深度进行了量化表征。用于表征鸡粪沼渣颗粒氧气渗透深度的显微红外透射光谱法的光谱采集范围为 $750 \sim 4\,000 \text{ cm}^{-1}$, 光谱分辨率 16 cm^{-1} , 像素点尺寸 $6.25 \mu\text{m} \times 6.25 \mu\text{m}$, 扫描次数 8 次。鸡粪沼渣好氧堆肥样品经冷冻干燥处理后, 应采用石蜡切片技术制成 $12 \mu\text{m}$ 薄片, 选取 $2\,856 \text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,640 \text{ cm}^{-1}$ 代表脂肪类化合物, $1\,568 \text{ cm}^{-1}$ 和 $3\,001 \text{ cm}^{-1}$ 代表芳香族化合物作为氧气渗透深度边界判定特征波长, 且氧气渗透深度终点定义为差分曲线迅速下降处。鸡粪沼渣颗粒氧气渗透深度较小, 介于 $7 \sim 20 \mu\text{m}$ 范围内动态变化, 其符合指数关系式。研究结果表明, 采用傅里叶显微红外透射光谱法判定好氧堆肥颗粒氧气渗透深度具有可行性, 但应根据不同物料特性, 选用适用的方法和技术参数。

关键词: 鸡粪沼渣; 好氧堆肥; 氧气渗透深度; 显微红外成像

中图分类号: S141.1; O433.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)08-0296-06

Characterization of Oxygen Penetration Depth during Chicken Manure Digestate and Wheat Straw Co-composting

MA Shuangshuang¹ HUANG Jing¹ LI Renquan² SUN Xiaoxi¹ HAN Lujia¹ HUANG Guangqun¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Qinghai Zangditang Biological Technology Development Co., Ltd., Xining 810000, China)

Abstract: It is an attempt to characterize of the oxygen penetration depth at the particles scale during chicken manure digestate co-composting wheat straw by Fourier transform infrared microspectroscopy (FT-IRM). It is presented to improve the anaerobic/aerobic co-process mechanism, in order to ensure adequate oxygen supply. The spectral range, spectral resolution and pixel dimensions in the transmission spectra were $750 \sim 4\,000 \text{ cm}^{-1}$, 16 cm^{-1} and $6.25 \mu\text{m} \times 6.25 \mu\text{m}$, and a mean spectrum of 8 scans was used for the second-derivative analysis with nine smoothing points. Chicken manure digestate aerobic composting samples by freeze-drying treatment should be made into $12 \mu\text{m}$ slice by using paraffin section technology. Selection of $2\,856 \text{ cm}^{-1}$, $1\,640 \text{ cm}^{-1}$ and $1\,568 \text{ cm}^{-1}$, $3\,001 \text{ cm}^{-1}$ was done to represent aliphatic component and aromaticity, respectively, which were used for deciding the boundary of oxygen penetration depth. The difference curve drops rapidly was regarded as the terminal point of oxygen penetration depth. The oxygen penetration depth of chicken manure digestate particles fluctuated within $7 \sim 20 \mu\text{m}$, which was lower than that of pig manure aerobic compost particles. The variation in the oxygen penetration depth can be described by an exponential fitting function. The results indicated that it was feasible to determine the oxygen penetration depth of aerobic composting particles by FT-IRM, but the method and technical parameters should be selected according to the characteristics of different materials.

Key words: chicken manure digestate; aerobic composting; oxygen penetration depth; infrared microspectroscopy

引言

随着我国沼气工程的快速发展, 大量畜禽粪便

等有机废弃物用于生产清洁能源沼气, 但同时也产生了大量厌氧发酵残余物——沼渣和沼液等^[1]。如直接将沼渣施用于土壤则存在性质不稳定、传播

收稿日期: 2017-01-04 修回日期: 2017-02-21

基金项目: 欧盟框架计划项目(690142)、国家国际科技合作专项(2015DFA90370)和国家重点研发计划项目(2016YFE0112800)

作者简介: 马双双(1992—), 女, 博士生, 主要从事生物质资源与利用研究, E-mail: shuangshuangma@cau.edu.cn

通信作者: 黄光群(1979—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事生物质资源与利用研究, E-mail: huangguangqun@126.com

致病菌、造成“二次污染”等问题^[2-3]。大量沼渣的资源化利用已成为制约我国沼气工程规模化发展的瓶颈,若不加以合理利用易导致环境污染。已有研究表明,沼渣经过高温好氧堆肥发酵不仅能够稳定沼渣的性质,提高其性能,还能提高其所含有机物复合化、资源化效率,具有明显的社会生态效益^[4-5]。

近年来,基于颗粒尺度的厌氧/好氧联合反应机制开展的好氧堆肥研究^[6-7],可有效提高好氧堆肥效率、优化节能减排工艺,并为其提供理论基础。好氧堆肥颗粒和气相形成固、液、气三相单元^[8-9],氧气通过颗粒表面的水相扩散到颗粒内部成为溶解氧,溶解氧经好氧微生物消耗产生径向浓度梯度并最终减小至零,由此产生具有径向梯度的氧气渗透深度,具体包括好氧层和过渡区^[10]。课题组首次验证了利用傅里叶变换显微红外光谱成像技术(Fourier transform infrared microspectroscopy, FT-IRM)量化表征猪粪好氧堆肥颗粒尺度微观结构具有可行性^[10],但仅局限于方法可行性和好氧层厚度的探索性表征。沼渣为发酵残余物,具有更为稀松的孔隙结构,经过二次好氧发酵后,基于显微红外成像光谱技术有针对性的和可适用的氧气渗透深度成套表征方法尚未见报道。

本文基于前期研究基础,针对沼渣好氧堆肥,利用傅里叶变换显微红外透射光谱法进行颗粒尺度下氧气渗透深度微观表征方法研究并获取成套技术参数,旨在为研究适用于沼渣的好氧堆肥颗粒尺度反应机制提供理论和方法学支撑。

1 材料与方法

1.1 好氧堆肥试验与理化指标测定分析

好氧堆肥试验的主要原料为采自北京市大兴区留民营村沼气站中温厌氧发酵 18 d 后的鸡粪沼渣;堆肥填充料为选自山东省东营市农村的麦秸,并切短至 3~5 cm 备用。将鸡粪沼渣和麦秸按质量比 22.5:1 进行均匀混合,总质量为 47 kg,调配初始混合物料的含水率及碳氮比分别在 65% 和 25 左右,将混合后物料置于实验室规模智能型好氧堆肥反应器系统中(图 1)^[11]。设置通风间隔为 15 min,通风速率为 2.0 L/min。好氧堆肥试验持续 21 d,在第 0、6、12、15、18、21 天分别取样并置于 -4℃ 冷柜中保存备用。每次取样结束后,启动反应器系统搅拌装置对好氧堆肥堆体进行搅拌并混合均匀,以减少堆体上、中、下层空间差异性^[12]。

参照 TMECC 标准方法测定堆肥物料含水率和有机质含量;利用 Vario EL CHNOS 型元素分析仪测定分析总碳、总氮质量分数并计算碳氮比。

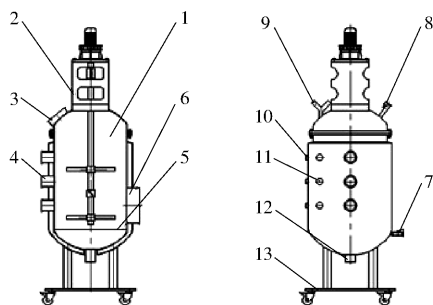


图 1 好氧堆肥反应器系统主罐体结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of intelligent aerobic composting reactor system

1. 物料舱 2. 搅拌装置 3. 入料口 4. 取样口 5. 布气筛网
6. 出料口 7. 进气口 8. 补水口 9. 出气口 10. 温度传感器通道
11. 氧浓度传感器通道 12. 沥出液收集口 13. 可移动式支撑底座

种子发芽指数的测定^[13]:将鲜样与去离子水配成 0.1 g/mL 浸提液,取浸提液 20 mL 于垫有滤纸的培养皿中,均匀地放入 20 粒饱满的黄瓜种子,然后放置在 30℃ 的培养箱中避光培养 48 h,培养结束后统计种子的发芽率并测量根长。每个样品做 2 个重复,以去离子水作为对照。种子发芽指数的计算公式为

$$G = \frac{A_1 A_2}{B_1 B_2} \times 100\%$$

式中 G ——种子发芽指数

A_1 ——堆肥样品浸提液培养种子的发芽率

A_2 ——堆肥样品浸提液培养种子的总根长

B_1 ——去离子水培养种子的发芽率

B_2 ——去离子水培养种子的总根长

1.2 氧气渗透深度表征

1.2.1 样品预处理

在为期 21 d 的好氧堆肥试验中,选取沼渣颗粒为研究对象进行氧气渗透深度的探究。参照文献^[10],以空气为分散介质,将沼渣原料和堆肥样品在 -80℃ 下预冻 8 h 后利用 ALPHA 1-2 plus 型冷冻干燥仪进行冻干处理。干燥条件: -42℃, 10 Pa, 24 h。将冻干样品过 2 mm 振动筛,获得冻干颗粒样品。

区别于猪粪颗粒样品,沼渣颗粒为二次发酵后产物,样品疏松程度高,通过预试验发现冰冻切片技术无法形成完整切片,故采用石蜡切片技术对沼渣堆肥冻干样品进行预处理。由于显微红外透射光谱法要求切片厚度不宜超过 20 μm,但厚度越小切割难度越大,依据切片过程中切片难易程度,优选确定沼渣堆肥颗粒石蜡切片厚度为 12 μm。切片过程中,使用 ZnS 红外窗片作为样品载体。

切片过程的具体操作步骤如下^[14-15]:

(1)脱水:将固定好的样品分别用体积分数为

70%、80%、85%、90%、95%、100%、100%的乙醇-水溶液各脱水1 h。

(2)透明:将脱水后的样品分别用体积比1:3、1:2、2:3的二甲苯-乙醇溶液各透明处理1 h左右,以及用纯二甲苯处理2次,每次1 h左右。具体透明处理时间以样品透明为准。

(3)浸蜡:浸蜡是将石蜡融入组织而起支撑作用的过程,石蜡浸入程度关系到切片的成功与否。将透明后的样品先置于体积分数为50%的石蜡-二甲苯溶液中,时间约为1 d。之后再将样品置于100%石蜡-二甲苯溶液中,时间约为2 d。为了保持石蜡处于溶液状态,整个浸蜡过程置于高于石蜡熔点3℃左右的干燥箱中(60℃)。

(4)包埋:将石蜡在干燥箱中溶解并保持2 h左右,在干燥箱中将石蜡倒入预热好的方纸盒内,并将浸蜡后的样品放入溶解的蜡液中。将纸盒小心移出干燥箱,待石蜡凝固至样品不再移动后,将纸盒移至冷水中凝固。

(5)切片:将凝固的蜡块修整整齐,大小合适,使用820-Rotary Microtome型手摇切片机切成厚度12 μm薄片。

(6)展片:将切好的石蜡片在温水中展开,置于ZnS窗片中央,50℃干燥。

(7)脱蜡:将干燥后的蜡片置于体积分数为100%(3次)、75%、50%的二甲苯-乙醇溶液中各10 min,溶去石蜡。然后将样品置于体积分数为100%(2次)、80%、50%、25%的乙醇-水溶液中各10 min,溶去二甲苯。最后将样品在蒸馏水中清洗

3次,溶去乙醇。

1.2.2 显微红外透射光谱采集

显微红外图像采集使用Spotlight 400型傅里叶变换红外显微成像系统(PerkinElmer公司,美国),光谱扫描参数为:扫描范围750~4 000 cm⁻¹,光谱分辨率16 cm⁻¹,像素点尺寸6.25 μm × 6.25 μm,扫描次数为8次。

获取原始谱图后,利用SpectrumIMAGE软件提取沼渣颗粒从外边缘处由表及里的原始光谱并进行二阶导数处理,二阶导数的差分宽度为9。每个颗粒均沿不同方向进行光谱提取,提取次数为4次。

1.2.3 氧气渗透深度判定方法

根据堆肥颗粒径向二阶导数光谱变化,选择因氧化反应而显著增加和降解的代表性物质,并确定上述2种物质官能团所对应的特征波长。为减小误差,每种物质选取2个特征波长。分别提取4个特征波长下的二阶导数光谱图像及其径向二阶导数光谱值,将代表同种物质的特征波长二阶导数取平均值,再根据这2组数值沿径向的变化趋势判定氧气渗透深度。

1.3 数据分析方法

分别用SPSS Statistics V. 20.0软件和OriginPro 2017软件进行数据统计分析及图形绘制。

2 结果与讨论

2.1 主要理化特性

堆肥原料和初始混合样品的含水率、有机质含量及碳氮比测定结果如表1所示。

表1 堆肥原料及初始物料基本理化特性

Tab.1 Main physicochemical properties of raw materials and initial mixture

物料	含水率/%	有机质质量分数/%	总碳质量分数/%	总氮质量分数/%	碳氮比
鸡粪沼渣	66.60 ± 0.08	59.84 ± 0.33	33.80 ± 0.10	1.29	26.30 ± 0.18
麦秸	6.71 ± 0.06	93.22 ± 0.04	45.75 ± 0.25	1.05 ± 0.04	43.82 ± 1.23
混合物料	64.05 ± 0.07	61.26 ± 0.32	34.31 ± 0.08	1.27 ± 0.01	27.05 ± 0.22

堆肥过程中堆体氧体积分数维持在10%以上,堆体温度历经升温期、高温期和降温期3个阶段,且高温期(≥50℃)持续时间约为3 d,与传统未经发酵原料好氧堆肥相比,沼渣好氧堆肥高温期较短,完成腐熟过程也会相应减短,这与TEGLIA等^[16]研究报道一致。图2为沼渣堆肥过程中堆体碳氮比的动态变化曲线。如图2所示,在堆肥反应过程中,碳氮比整体呈下降趋势,从初始值25逐渐降至15。HIRAI等^[17]研究显示,若堆肥起始的碳氮比在25~30之间,当其降到20或者以下时,可认为堆肥达到腐熟。如图3所示,鸡粪沼渣原料的种子发芽指数

为72.04%。整个堆肥过程中,种子发芽指数整体呈上升趋势且波动较大,反应结束时,沼渣堆肥的种子发芽指数为91.23%。尽管鸡粪沼渣并未表现出较强的植物毒性,但经过二次堆肥后,其种子发芽指数增高,可有效确保沼渣的高效循环利用。

2.2 堆肥颗粒氧气渗透深度表征

2.2.1 特征波长的选取

图4a为一代表性好氧堆肥颗粒的显微中红外透射光谱总吸光度图,每个像素点的值是其设定波段范围内总吸光度的平均值,图中颗粒内部各区域总吸光度无显著差异,无法从原始图谱上进行氧气

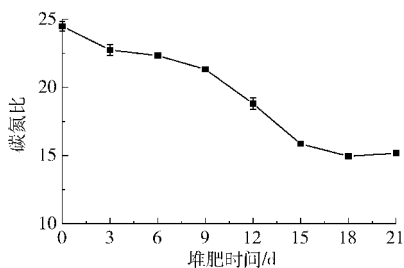


图 2 堆体碳氮比的动态变化曲线

Fig. 2 Changing curve of C/N ratio during composting

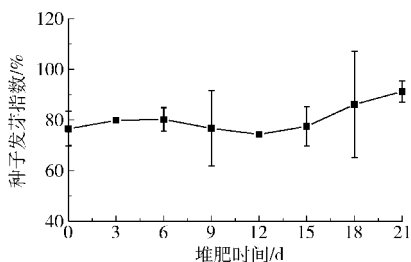


图 3 堆体种子发芽指数动态变化曲线

Fig. 3 Changing curve of seed germination index during composting

渗透深度判定分析。从颗粒边缘开始,沿颗粒径向选取第 0、4、8、12、16 像素点,此 5 点分别距离颗粒边缘 0、25、50、75、100 μm ,提取其原始光谱和二阶导数图谱,结果如图 4b、4c 所示。对比分析可得,原始光谱经二阶导数处理特征波长更加明晰,同时消除了基线漂移。

GE 等^[10]在研究猪粪好氧堆肥颗粒的好氧层厚度时,认为颗粒好氧层中发生了脂肪族类物质的分解与芳香族化合物的形成过程,因此可利用 2 类物质官能团所在波长位置作为判定好氧层厚度的特征峰。如图 4c 所示,在鸡粪沼渣好氧堆肥过程中,堆肥样品中脂肪族化合物不断发生氧化降解,从而造成脂肪族甲基官能团 C—H 在 2 850 cm^{-1} 左右吸收减弱,1 550 ~ 1 590 cm^{-1} 范围内的 1 568 cm^{-1} 所代表的芳香族化合物双键 C=O 或 C=C 因氧化反应吸收加强^[18],因此,可用于表征堆体颗粒氧气渗透深度,上述 2 个波数也可作为判定沼渣氧气渗透深度的特征波数。同时,也有研究者指出^[19-21],

1 640 cm^{-1} 和 3 001 cm^{-1} 也可分别代表脂肪类化合物的降解和芳香族化合物的合成。为减小单个特征波长所引起的分析误差,本研究中增加 2 个特征波长。

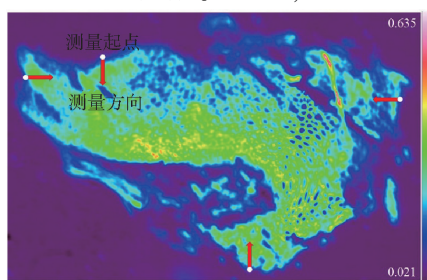
2.2.2 氧气渗透深度的判定

图 5 分别为鸡粪沼渣颗粒 2 856、1 640、1 568、3 001 cm^{-1} 处单波长二阶导数光谱样例。如图 6 所示,沿沼渣颗粒径向的二阶导数光谱值可以用来解析脂肪族化合物和芳香族化合物的浓度梯度,采用 Boltzman 方程拟合其数值变化曲线,并以此来判定沼渣颗粒中氧气渗透深度。如图 6a 所示,2 856 cm^{-1} 和 1 640 cm^{-1} 波数下的二阶导数光谱值均为负值,且由颗粒边缘到内部,数值逐渐减小,表明脂肪族化合物浓度越来越高。脂肪族化合物浓度梯度的形成是由于氧气扩散、沿粒径径向的水分差异和微生物活性差异等因素的共同作用,颗粒外层的脂肪族化合物和好氧降解反应速率大于其在颗粒内部的降解程度,故颗粒二阶导数光谱值沿颗粒径向由表及里减小^[10]。与此相反,如图 6b 所示,1 568 cm^{-1} 和 3 001 cm^{-1} 波数下的二阶导数光谱值均为正值,表示芳香族化合物的合成反应在厌氧条件下受抑制^[18]。

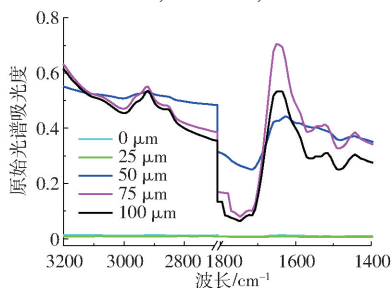
为准确判定氧气渗透深度,将代表 2 种物质的二阶导数光谱值进行差减,差减结果如图 7 所示。将测量起点(颗粒边缘)记为氧气渗透深度的起点,而在定义氧气渗透深度终点时,由于差减结果均为负值,故 GE 等^[10]定义的“将数值变为零或负值的一点记为终点”不适用于本研究。为此,本研究针对鸡粪沼渣颗粒,将差分曲线迅速下降处视为氧气渗透深度的终点。

2.2.3 氧气渗透深度的动态变化

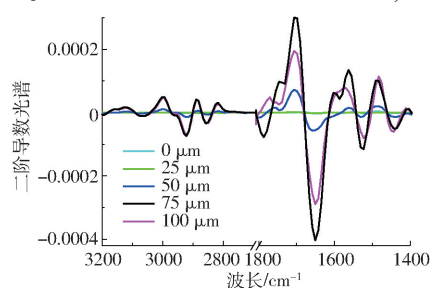
如图 8 所示,氧气渗透深度的实际测量结果存在较大的标准偏差,这与已有的 FT-IRM 研究结果一致,可能是由被测颗粒表面不均匀所致^[22]。区别于猪粪堆肥颗粒,沼渣颗粒在堆肥开始第 0 天,氧气渗透深度约为 7.5 μm ,这是由于沼渣颗粒为二次发酵,颗粒结构疏松。变化趋势整体呈增加的趋势,增



(a) 显微红外透射光谱总吸光度图及光谱提取方向



(b) 堆肥颗粒径向原始光谱



(c) 堆肥颗粒径向二阶导数光谱

图 4 堆肥颗粒光谱信息

Fig. 4 Spectral information of composting particle

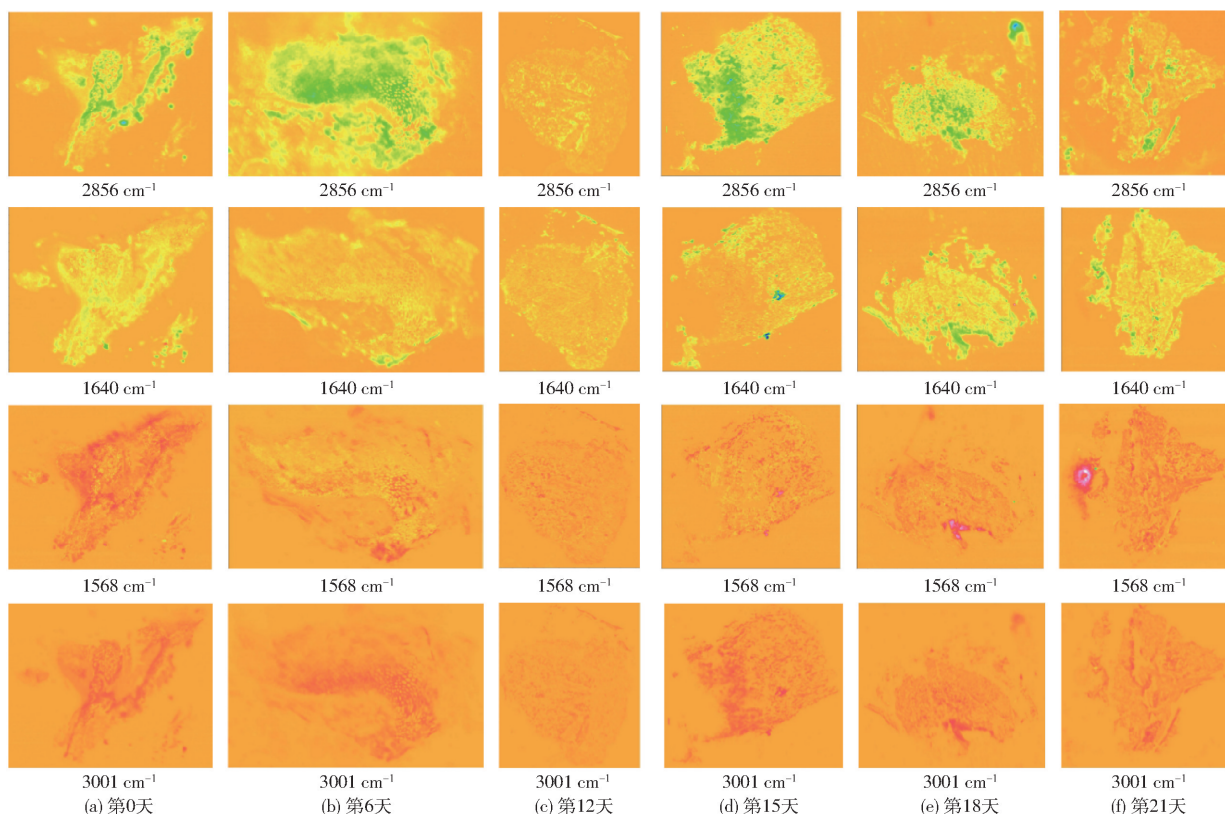


图5 单波长二阶导数光谱样例

Fig. 5 Second-derivative microscopic images during composting process

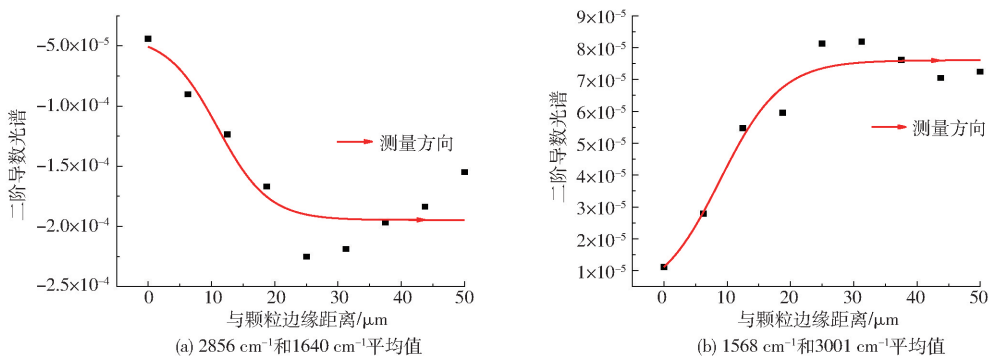


图6 某一颗粒径向二阶导数光谱变化

Fig. 6 Typical second-derivative spectral variations along measurement path

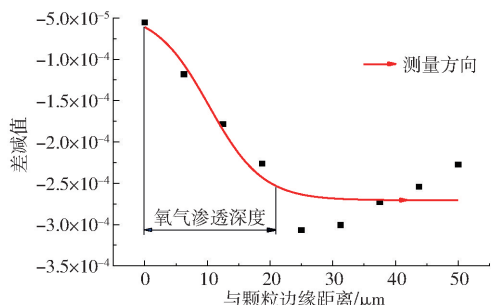


图7 某一颗粒径向二阶导数光谱差减值

Fig. 7 Difference values of second-derivative spectrum along measurement path

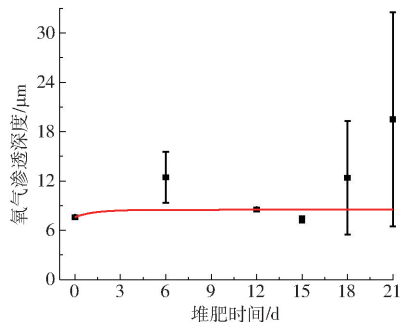


图8 氧气渗透深度动态变化规律

Fig. 8 Oxygen penetration depth changes during composting

幅较小。变化规律符合方程

$$y = -6295.7146 + \frac{6304.2103}{1 + e^{\frac{x+11.1607}{-1.2596}}} \quad (R^2 = 0.91)$$

式中 y ——氧气渗透深度, μm
 x ——堆肥时间, d

3 结论

(1) 显微红外透射光谱法可用于判定鸡粪沼渣堆肥颗粒氧气渗透深度, 光谱采集范围为 $750 \sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$, 光谱分辨率 16 cm^{-1} , 像素点尺寸 $6.25\text{ }\mu\text{m} \times 6.25\text{ }\mu\text{m}$, 扫描次数 8 次。选取 $2\,856\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,640\text{ cm}^{-1}$ 代表脂肪类化合物, $1\,568\text{ cm}^{-1}$ 和 $3\,001\text{ cm}^{-1}$ 代表芳香族化合物, 并以此作为氧气渗

透深度边界判定。鸡粪沼渣颗粒氧气渗透深度介于 $7 \sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 范围内动态变化, 其符合指数关系式。

(2) 区别于猪粪好氧堆肥颗粒, 鸡粪沼渣好氧堆肥样品经冷冻干燥处理后, 采用石蜡切片技术制成 $12\text{ }\mu\text{m}$ 薄片, 氧气渗透深度终点定义为差分曲线迅速下降处。研究结果表明, 采用傅里叶显微红外透射光谱法判定好氧堆肥颗粒氧气渗透深度, 应根据不同物料特性, 选用适用的预处理方法。

参 考 文 献

- 邱珊, 赵龙彬, 马放, 等. 不同通风速率对厌氧残余物沼渣堆肥的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(8): 2402–2408. QIU Shan, ZHAO Longbin, MA Fang, et al. The influence of aeration rate on intermittent forced-aeration composting of biogas residue [J]. China Environmental Science, 2016, 36(8): 2402–2408. (in Chinese)
- SALMINEN E, RINTALA J, HÄRKÖNEN J, et al. Anaerobically digested poultry slaughterhouse wastes as fertiliser in agriculture [J]. Bioresource Technology, 2001, 78(1): 81–88.
- BUSTAMANTE M A, ALBURQUERQUE J A. Co-composting of the solid fraction of anaerobic digestates, to obtain added-value materials for use in agriculture [J]. Biomass & Bioenergy, 2012, 43(8): 26–35.
- 赵越, 宋彩红, 李鸣晓, 等. 基于无害化程度评价的沼渣混合物料堆肥配比优化[J]. 东北农业大学学报, 2015, 46(8): 32–37. ZHAO Yue, SONG Caihong, LI Mingxiao, et al. Optimization of material proportion of biogas residue mixed with livestock manure co-composting based on evaluation of degree of harmlessness [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2015, 46(8): 32–37. (in Chinese)
- BUSTAMANTE M A, RESTREPO A P, ALBURQUERQUE J A, et al. Recycling of anaerobic digestates by composting: effect of the bulking agent used [J]. Journal of Cleaner Production, 2013, 47(5): 61–69.
- REINHARDT T. Organic acids as a decisive limitation to process dynamics during composting of organic matter [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2002: 177–188.
- SMET E, LANGENHOVE H V, BO I D. The emission of volatile compounds during the aerobic and the combined anaerobic/aerobic composting of biowaste [J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(8): 1295–1303.
- BONGOCHGETSAKUL N, ISHIDA T. A new analytical approach to optimizing the design of large-scale composting systems [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(6): 1630–1641.
- VLYSSIDES A, MAI S, BARAMPOUTI E M. An integrated mathematical model for co-composting of agricultural solid wastes with industrial wastewater [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(20): 4797–4806.
- GE J, HUANG G, YANG Z, et al. Characterization of the dynamic thickness of the aerobic layer during pig manure aerobic composting by Fourier transform infrared microspectroscopy [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(9): 5043–5050.
- 张安琪, 黄光群, 张绍英, 等. 好氧堆肥反应器试验系统设计与性能试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 156–161. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140725&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.025.
- ZHANG Anqi, HUANG Guangqun, ZHANG Shaoying, et al. Design and test on an experimental aerobic composting reactor system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 156–161. (in Chinese)
- 黄光群, 黄晶, 张阳, 等. 鸡粪沼渣联合好氧堆肥基质降解与气体排放研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 220–226. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160931&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.031.
- HUANG Guangqun, HUANG Jing, ZHANG Yang, et al. Substrate degradation and gases emission during chicken manure digestate co-composting [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 220–226. (in Chinese)
- 李季, 彭生平. 堆肥工程实用手册[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- ROSSI S, ANFODILLO T, MENARDI R. Trephor: a new tool for sampling microcores from tree stems [J]. IAWA Journal, 2006, 27(1): 89–97.
- 李素坤, 张秋芝, 郝玉兰, 等. 玉米成熟期茎秆石蜡切片方法的研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(8): 3935–3937. LI Sukun, ZHANG Qiuzhi, HAO Yulan, et al. Research on the method of paraffin section of the corn stalk in its maturity stage [J]. Journal of Agricultural Science, 2010, 38(8): 3935–3937. (in Chinese)
- TEGLIA C, TREMIER A, MARTEL J L. Characterization of solid digestates: part 2, assessment of the quality and suitability for composting of six digested products [J]. Waste and Biomass Valorization, 2011, 2(2): 113–126.
- HIRAI M F, CHANYASAK V, KUBOTA H. Standard measurement for compost maturity [J]. Biocycle, 1983, 24(6): 54–56.
- CHAI Xiaoli, HAO Yongxia, LIU Guixiang, et al. Spectroscopic studies of the effect of aerobic conditions on the chemical characteristics of humic acid in landfill leachate and its implication for the environment [J]. Chemosphere, 2013, 91(7): 1058–1063.
- AIT B G, HAFIDI M, GILARD V, et al. Characterization of humic acids produced during composting of olive mill wastes: elemental and spectroscopic analyses (FTIR and ^{13}C -NMR) [J]. Agronomie, 2003, 23(1): 661–666.
- DROUSSI Z, D'ORAZIO V, HAFIDI M, et al. Elemental and spectroscopic characterization of humic-acid-like compounds during composting of olive mill by-products [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 163(2): 1289–1297.
- SMIDT E, PARRAVICINI V. Effect of sewage sludge treatment and additional aerobic post-stabilization revealed by infrared spectroscopy and multivariate data analysis [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(5): 1775–1780.
- LOUDEN J D, DUNCAN I A, KELLY J, et al. The application of infrared microimaging for the determination of the distribution, penetration depth, and diffusion profile of methyl centralite and dibutyl phthalate deterrents in nitrocellulose monoperforated propellant [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1993, 49(2): 275–289.