

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.024

# 沼渣好氧堆肥种子发芽指数快速预测可行性分析

黄光群 黄晶 张阳 韩鲁佳

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

**摘要:** 种子发芽指数是衡量好氧堆肥植物毒性和腐熟度的重要参数。以沼渣和猪粪为主要原料, 麦秸和蘑菇渣为辅料, 利用自行研制的智能型好氧堆肥反应器系统开展了联合好氧堆肥试验, 基于获取的种子发芽指数和基本理化指标数据进行了相关性和回归建模分析研究。试验结果表明: 种子发芽指数与挥发性固体、总碳、总氮、半纤维素和木质素干基相对含量以及碳氮比均具有显著的相关性( $R \geq 0.83$ , Sig. 为 0.000)。所构建的一元和二元线性预测模型均具有良好的拟合度( $R \geq 0.81$ , Sig. 为 0.000), 其中, 以总碳和总氮为二元变量的种子发芽指数快速预测模型( $R = 0.92$ , SEP 为 7.58)具有最好的预测能力。该研究为种子发芽指数的快速预测分析提供了方法学支撑。

**关键词:** 沼渣; 猪粪; 好氧堆肥; 种子发芽指数; 快速预测

中图分类号: X705; S141.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)05-0177-06

## Feasibility Analysis of Rapid Prediction of Seed Germination Index during Digestate Aerobic Composting

Huang Guangqun Huang Jing Zhang Yang Han Lujia

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Seed germination index (GI) is a key indicator of plant toxicity and maturity for composting. A combined aerobic composting experiment was carried out in a self-developed intelligent aerobic composting reactor system. The main materials were poultry manure digestate and pig slurry. The wheat straw and mushroom substrates were taken as bulking agents. Based on the obtained data of GI and the basic physicochemical parameters (volatile solid, VS; hemicellulose, HC; total carbon, CT; total nitrogen, NT; the ratio of total carbon to total nitrogen, CT/NT; lignin), Pearson correlation analysis and regression modeling were developed. The results showed that there were significant correlations ( $R \geq 0.83$ , Sig. was 0.000) between GI and the total volatile solid, total carbon, total nitrogen, hemicellulose and lignin contents on a dry basis, respectively. The unitary and binary linear models constructed had good degree of fitting ( $R \geq 0.81$ , Sig. was 0.000). The values of  $R$  and SEP of unitary linear models were (0.88, 9.75), (0.88, 10.32), (0.82, 12.73), (0.81, 12.77), (0.91, 8.23) and (0.91, 8.74) based on VS, HC, CT, NT, CT/NT and lignin, respectively. And the values of  $R$  and SEP of binary linear models were (0.92, 7.48) and (0.93, 7.58) using CT-NT and HC-lignin. In all calibrations, modeling using CT-NT as binary variables ( $R$  was 0.92, SEP was 7.58) had the best prediction efficiency. This study provides a methodology to support the rapid prediction analysis of GI. Although binary modeling using CT-NT had the best prediction efficiency, it was limited by the aerobic composting reactor volume and the number of samples obtained. Therefore, expanding the sample size should be needed to improve the model accuracy in the further research.

**Key words:** digestate; pig slurry; aerobic composting; seed germination index; rapid prediction

收稿日期: 2016-02-02 修回日期: 2016-03-09

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD47B01)、教育部新世纪优秀人才支持计划项目和国家国际科技合作专项(2015DFA90370)

作者简介: 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

通信作者: 韩鲁佳(1964—),女,教授,博士生导师,主要从事生物质资源与利用研究,E-mail: hanlj@cau.edu.cn

## 引言

据统计估算,我国畜禽粪便年产量已达 30 亿 t 左右,是世界上产出量最大的国家<sup>[1]</sup>。当前,畜禽粪便已成为我国主要农业面污染源。根据第一次全国污染源普查动态更新数据<sup>[2]</sup>,2010 年畜禽养殖业主要水污染物排放量中化学需氧量(COD)、氨氮分别为当年工业源排放量的 3.23 倍和 2.3 倍。以沼气和有机肥工程为核心的畜禽粪便循环利用是集约化畜禽养殖企业解决环境污染实现资源化利用的重要发展模式<sup>[3]</sup>。沼渣是畜禽粪便等有机废弃物经微生物厌氧发酵的剩余物,具有良好的肥料化利用潜力。但有研究表明,因其潜在的致病菌和植物毒性,沼渣好氧堆肥再处理可作为其循环利用的安全技术途径<sup>[4-7]</sup>。

种子发芽指数(Seed germination index, GI)作为重要的生物学指标,是衡量好氧堆肥植物毒性和腐熟度的重要参数<sup>[8-9]</sup>,其方法通常所需测试时间长,且过程较为繁琐,迫切需要方便、快速的分析方法。研究表明,畜禽粪便 pH 值、电导率、干物质、比重等与其氮、磷、钾等肥料成分含量具有较好的相关性,从而可基于理化特性参数快速预测肥料成分含量<sup>[10-15]</sup>。为了探讨沼渣畜禽粪便好氧堆肥种子发芽指数是否与其理化性质存在密切相关性,本文以沼渣和猪粪为主要原料,利用智能型好氧堆肥反应器系统开展联合好氧堆肥试验,基于获取的种子发芽指数和基本理化指标数据进行相关性和回归建模分析研究,以期种子发芽指数的快速预测分析提供方法学支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

#### 1.1.1 试验材料

以畜禽粪便和秸秆为原料的沼气工程剩余物沼渣的主要成分为纤维素类物质,易降解有机质含量较低。使用沼渣与畜禽粪便联合堆肥,可借助易降解有机质含量丰富等特点促进沼渣深度发酵,同时沼渣还可作为调理剂,有利于堆肥通风供氧<sup>[16-17]</sup>。本文中好氧堆肥试验以沼渣、猪粪为主要原料,麦秸和蘑菇渣为辅料。供试沼渣取自北京市三元绿荷奶牛养殖中心金银岛牧场沼气站升流式固体厌氧反应器发酵 20 d 经固液分离后得到的固体剩余物;猪粪取自北京昌平区某规模化养猪场;麦秸和蘑菇渣分别取自山东省东营市某种植基地和北京市农林科学院通州区蘑菇养殖基地。将麦秸和蘑菇渣分别切短至 2~3 cm,再与主要原料均匀混合,并调整含水率

和碳氮比分别为 60% 和 20:1 左右。

#### 1.1.2 堆肥试验

使用自主研发的好氧堆肥反应器系统<sup>[18]</sup>开展堆肥试验。该系统主要包括反应器和智能控制系统,其中反应器如图 1 所示。

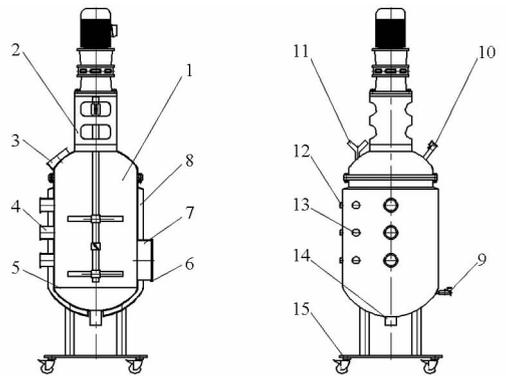


图 1 反应器主罐体结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of reactor's main tank

1. 物料舱 2. 搅拌系统 3. 入料口 4. 取样口 5. 布气筛网
6. 快装盲板 7. 出料口 8. 保温层 9. 进气口 10. 补水口
11. 出气口 12. 温度传感器通道 13. 氧浓度传感器通道
14. 沥出液收集口 15. 可移动式支撑底座

试验中反应器系统采用二元反馈和自动控制模式。基于上、中、下层温度传感器(Heraeus 32208551 型,德国)和氧浓度传感器(City Technology 40X-V 型,英国)实时获取的数据,控制布气系统使堆体氧浓度始终大于 5%;当堆体温度大于 65℃时加大通气量。

试验时,分别于堆肥过程第 3、6、12、18 天进行堆体上、中、下层取样,取样量各约 500 g,用于理化、生物学指标测定分析。每次取样结束后,启动搅拌系统将堆体充分混合至均匀。本研究总计获取堆肥样品 13 个,冷藏留存备用。

### 1.2 理化及生物学指标测试分析方法

堆肥样品理化及生物学指标测定分析方法如表 1 所示。

含水率、pH 值、电导率、GI、浸提液在波长 465 nm 和 665 nm 处的光密度比值(E4/E6)基于鲜样测得。总碳(CT)、总氮(NT)、挥发性固体(VS)、木质素(Lignin)、纤维素(Cellulose)和半纤维素(HC)含量用烘干基样品经粉碎过 1 mm 筛后测得。各分析值为平行样品平均值。碳氮比为计算值。

### 1.3 数据分析方法

基于获取的理化和生物学参数数据,利用 SPSS Statistics V. 20. 0 (SPSS 公司,美国)软件平台的相关性分析和回归分析工具箱进行数据分析。

相关性分析采用 Pearson 法,并进行双侧显著性检验。基于与种子发芽指数显著相关的理化参数,

表1 理化及生物学指标测定分析方法

Tab.1 Analysis methods for physicochemical and biological properties

参数	方法和主要仪器	参考标准或文献
含水率	干燥法(70℃, 24 h)	TMECC 03.09A <sup>[19]</sup>
电导率	EC 计测定	TMECC 04.10A
pH 值	pH 计测定	TMECC 04.11A
挥发性固体含量	燃烧法(540℃, 4 h)	TMECC 03.02A
总碳	元素燃烧法(Elementar)	TMECC 04.01A
总氮	Vario EL III, 德国)	
碳氮比	计算值	TMECC 05.02A
E4/E6	紫外分光光度法(Shimadzu UV-2550, 日本)	Fatma 等 <sup>[20]</sup>
纤维素含量	Van - Soest 洗涤法,	
半纤维素含量	(Foss Fibertec	GBT 6434—2006 <sup>[21]</sup>
木质素含量	2010, 瑞典)	
GI	黄瓜种子培养	TMECC 05.05A, 李季等 <sup>[8]</sup>

表2 堆肥主要原料和混合物料基本理化特性

Tab.2 Initial physicochemical properties of main materials and mixture

物料	含水率/%	挥发性固体含量/% <sup>a</sup>	总碳/% <sup>a</sup>	总氮/% <sup>a</sup>	碳氮比 <sup>a</sup>
沼渣	66.55	67.11 ± 0.66	32.42 ± 0.50	1.68 ± 0.01	19.30 ± 0.17
猪粪	65.07	85.62 ± 0.04	38.07 ± 0.36	4.25 ± 0.00	8.96 ± 0.09
麦秸	6.37	92.85 ± 0.24	41.44 ± 0.48	0.67 ± 0.02	62.02 ± 3.70
蘑菇渣	37.94	90.48 ± 0.17	43.44 ± 0.37	1.48 ± 0.09	29.50 ± 1.95
混合物料	60.64	83.98 ± 0.18	43.70 ± 0.17	2.65 ± 0.03	16.49 ± 0.12

注：a 表示干基。

由图2可知,堆肥初期,反应器内堆体各层温度快速升至50℃以上,进入高温期,堆体上层、中层、下层最高温度分别为66.54℃、67.60℃和66.30℃。各层堆体高温期均持续了10d左右,第11天后堆体温度开始缓慢下降,有小幅波动后逐渐接近环境温度。堆肥效果良好,符合我国粪便无害化卫生要求<sup>[22]</sup>。

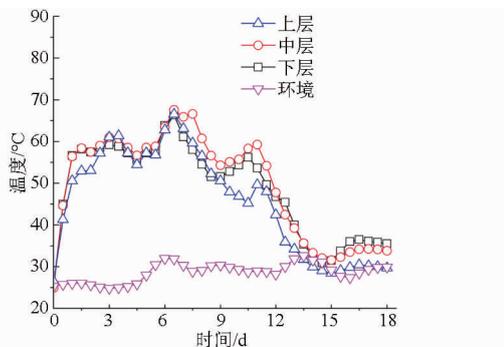


图2 堆肥过程温度动态变化曲线

Fig.2 Curves of temperatures during composting

## 2.2 堆肥过程主要理化参数和GI动态变化

堆肥过程各理化和生物学指标动态变化情况如表3所示。随着堆肥的进行,挥发性固体不断降解,堆体趋于稳定和腐熟。各理化和生物学指标动态变

分别构建一元或二元线性回归模型。并对所建模型分别进行模型拟合度检验、方差分析、回归系数显著性分析以及残差分析。模型主要评价参数包括相关系数(R)、预测标准差(SEP)、t检验 Sig. 值和标准化残差。对于二元线性回归模型,利用容忍度(T)和方差膨胀率(VIF)进行共线性检验。

基于 Origin Pro V. 8. 5 (OriginLab, 美国) 和 SPSS Statistics V. 20. 0 (SPSS 公司, 美国) 进行数据绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 堆肥原料参数及堆肥试验

沼渣、猪粪与原料初始混合物料基本理化特性如表2所示。

图2所示为堆体上、中、下3层中心温度和环境温度随时间动态变化曲线。

表3 各理化和生物学参数统计分析

Tab.3 Statistics of physicochemical and biological properties

参数	最小值	最大值	平均值	标准差
pH 值	6.63	8.60	7.73	0.62
电导率/(mS·cm <sup>-1</sup> )	2.20	4.72	3.49	0.73
挥发性固体含量/%	74.31	83.98	79.53	2.75
总碳/%	35.58	43.70	39.88	3.24
总氮/%	2.65	3.46	3.00	0.24
碳氮比	10.55	16.48	13.40	1.87
E4/E6	2.29	4.62	3.56	0.75
纤维素含量/%	18.65	24.62	22.27	1.81
半纤维素含量/%	4.24	19.86	13.38	5.10
木质素含量/%	11.75	19.01	14.83	2.31
GI/%	2.40	61.40	22.23	24.39

化趋势与已有研究<sup>[7-8,16]</sup>基本一致。

种子发芽指数综合反映了堆肥的植物毒性,被认为是最敏感、最可靠的堆肥腐熟度评价指标。一般情况下,GI 大于 50% 可认为堆肥对种子基本无毒性<sup>[8]</sup>。由图3可知,堆体各层初始数值偏低,随着堆肥的进行,数值显著增大,至堆肥后期均大于 60%,沼渣通过联合好氧堆肥性质更趋安全、稳定。

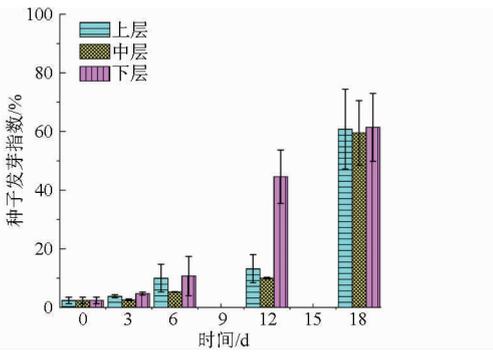


图3 堆肥过程GI动态变化曲线

Fig. 3 Curves of GI during composting

## 2.3 相关性分析

沼渣联合好氧堆肥过程各理化和生物学参数相关性分析见表4。

表4 各理化和生物学参数相关性分析

Tab. 4 Correlation analysis of physicochemical and biological properties

参数	pH 值	电导率	挥发性固体含量	总碳	总氮	碳氮比	E4/E6	纤维素含量	半纤维素含量	木质素含量
电导率	-0.93**									
挥发性固体含量	-0.45	0.30								
总碳	-0.70**	0.60*	0.84**							
总氮	0.13	-0.04	-0.90**	-0.60*						
碳氮比	-0.52	0.41	0.97**	0.90**	-0.88**					
E4/E6	0.68*	-0.68*	-0.54	-0.71**	0.32	-0.61*				
纤维素含量	-0.08	0.09	0.72**	0.49	-0.80**	0.70**	-0.20			
半纤维素含量	-0.21	0.07	0.87**	0.76**	-0.78**	0.84**	-0.42	0.61*		
木质素含量	0.47	-0.32	-0.91**	-0.82**	0.84**	-0.92**	0.52	-0.58*	-0.83**	
GI	0.31	-0.16	-0.89**	-0.84**	0.83**	-0.91**	0.46	-0.56*	-0.89**	0.92*

注: \*\*在0.01水平(双侧)上显著相关; \*在0.05水平(双侧)上显著相关。

## 2.4 线性回归模型

基于相关性分析结果,选取挥发性固体、总碳、总氮、半纤维素和木质素干基相对含量以及碳氮比作为构建种子发芽指数预测模型的可选自变量。

基于各基本理化参数建立一元线性回归模型及检验结果如表5所示。回归模型和回归系数经检验

由表4可知,种子发芽指数与挥发性固体、总碳、总氮、半纤维素和木质素干基相对含量以及碳氮比呈现良好的相关性,且经0.01水平(双侧)检验,相关性均显著。

其中,种子发芽指数与总氮和木质素干基相对含量呈现高度正相关,种子发芽指数与挥发性固体、总碳、半纤维素、纤维素干基相对含量和碳氮比呈现高度负相关。主要由于好氧堆肥过程微生物不断分解可生物降解基质,挥发性固体不断降解,从元素组成而言,作为其主要组成部分的碳元素相对于氮元素明显减少;从主要有机组成而言,半纤维素、纤维素含量相对于木质素明显减少。随着堆肥的进行,堆体降解趋于平稳,腐殖物质趋于稳定,植物毒性逐渐降低<sup>[8-9]</sup>。

均具有显著的统计学意义, $R$ 介于0.81和0.91之间,以碳氮比为自变量的模型精度最高;以挥发性固体为自变量的模型自变量数据最易获取;上述模型精度均有待于提升。

基于燃烧法和元素分析仪可同时便捷获取总碳和总氮含量<sup>[19]</sup>,通过Van - Soest洗涤法<sup>[21]</sup>可同时

表5 基于理化指标的GI线性预测模型

Tab. 5 Linear modeling for based on physicochemical properties

参数	回归方程	Sig.	共线性		$R$	SEP
			$T$	VIF		
挥发性固体含量 $a$	$I_{GI} = -7.901a + 650.607$	0.000			0.88	9.75
半纤维素含量 $b$	$I_{GI} = -4.247b + 79.069$	0.000			0.88	10.32
总碳 $c$	$I_{GI} = -6.295c - 273.255$	0.000			0.82	12.73
总氮 $d$	$I_{GI} = 84.517d - 231.451$	0.000			0.81	12.77
碳氮比 $e$	$I_{GI} = -11.936e + 182.198$	0.000			0.91	8.23
木质素含量 $f$	$I_{GI} = 9.722f + 1.258$	0.000			0.91	8.74
总碳 $c$ 、总氮 $d$	$I_{GI} = -3.984c + 52.453d + 23.666$	0.000	0.645	1.549	0.92	7.48
半纤维素含量 $b$ 、木质素含量 $f$	$I_{GI} = -1.92b + 6.205f - 44.081$	0.000	0.313	3.199	0.93	7.58

注: Sig. 为回归模型和回归系数  $t$  检验的 Sig. 值;  $I_{GI}$  表示种子发芽指数 GI。

获取半纤维素和木质素数据,且均具有较高的分析精度。因此,分别以总碳、总氮、半纤维素和木质素含量为二元变量,构建种子发芽指数预测模型,所构建预测模型和评价分析结果如表5所示。总碳、总氮、半纤维素含量、木质素含量为二元变量构建的种子发芽指数预测模型 $R$ 分别为0.92和0.93,SEP较所建立的一元线性回归模型均有明显减小,回归模型和回归系数经检验均具有显著的统计学意义,模型不存在共线性分析问题。其中,以总碳、总氮为二元变量的种子发芽指数预测模型性能最好。所建模型经残差分析,均符合正态分布,回归模型具有较好的合理性。

综合分析,以总碳、总氮为二元变量的线性模型标准化残差与正态分布一致性、有关模型评价参数以及自变量数据获取的便捷性和准确性综合分析,该模型具有最好的定量预测能力。

本文中受好氧堆肥反应容积和获取样品数量所

限,所建模型虽具有较好的拟合度,但仍需扩充样本量以提升模型精度。

### 3 结论

(1)以沼渣和猪粪为主要原料,利用智能型好氧堆肥反应器系统开展了联合好氧堆肥试验,试验效果良好。试验结果表明,沼渣与畜禽粪便联合好氧堆肥有助于沼渣的安全、稳定、高效循环利用。

(2)种子发芽指数与挥发性固体、总碳、总氮、半纤维素、木质素干基相对含量以及碳氮比均具有显著的相关性,其中,与总氮、木质素干基相对含量呈现正相关。

(3)以总碳和总氮二元变量为代表的种子发芽指数快速预测模型均具有良好的拟合度,为种子发芽指数的快速预测分析提供了方法学支撑。但仍需扩大样本量以提升模型精度和泛化能力。

### 参 考 文 献

- 郭冬生,彭小兰. 畜禽粪便污染与治理利用方法研究进展[J]. 浙江农业学报,2012,24(6):1164-1170.  
GUO Dongsheng, PENG Xiaolan. Pollution of livestock and poultry feces and countermeasures [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2012, 24(6): 1164-1170. (in Chinese)
- 中华人民共和国环境保护部,中华人民共和国国家统计局,中华人民共和国农业部. 第一次全国污染源普查公报[R]. 中华人民共和国国家统计局,2010.
- 中华人民共和国国务院令 第643号. 畜禽规模养殖污染防治条例[Z]. 2013.
- 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.
- ABDULLAHI Y A, AKUNNA J C, WHITE N A, et al. Investigating the effects of anaerobic and aerobic post treatment on quality and stability of organic fraction of municipal solid waste as soil amendment [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(18): 8631-8636.
- PILAR A, EDUARDO M, DAVID T, et al. Effects of digested, composted, and thermally dried sewage sludge on soil microbiota and mesofauna [J]. Applied Soil Ecology, 2011, 48(2): 236-242.
- BUSTAMANTE M A, ALBURQUERQUE J A, RESTREPO A P, et al. Co-composting of the solid fraction of anaerobic digestates, to obtain added-value materials for use in agriculture [J]. Biomass and Bioenergy, 2012, 43: 26-35.
- 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.
- HAUG R T. The practical handbook of compost engineering [M]. London: Lewis Publishers, 1993.
- PICCININ S, BORTONE G. The fertilizer value of agricultural manure: simple rapid methods of assessment [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1991, 49: 197-208.
- STEVENS R J, O'BRIC C J, CARTON O T. Estimating nutrient content of animal slurries using electrical conductivity [J]. The Journal of Agricultural Science, 1995, 125(2): 233-238.
- YANG Z L, HAN L J, LI Q F, et al. Estimating nutrient contents of pig slurries rapidly by measurement of physical and chemical properties [J]. The Journal of Agricultural Science, 2006, 144(3): 261-267.
- XING L, HAN L J. Evaluation of specific gravity and electrical conductivity for determining nutrient concentrations in suspensions of poultry manure [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2007, 16(6): 913-919.
- MARINO P, DE FERRARI G, BECHINI L. Description of a sample of liquid dairy manures and relationships between analytical variables [J]. Biosystems Engineering, 2008, 100(2): 256-265.
- HUANG G Q, WANG X Y, HAN L J. Rapid estimation of nutrients in chicken manure during plant-field composting using physicochemical properties [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(2): 1455-1461.
- 宋彩红,贾璇,李鸣晓,等. 沼渣与畜禽粪便混合堆肥发酵效果的综合评价 [J]. 农业工程学报,2013,29(24):227-234.  
SONG Caihong, JIA Xuan, LI Mingxiao, et al. Comprehensive evaluation of co-composting fermentation effect of biogas residue mixed with livestock manure [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(24): 227-234. (in Chinese)
- 刘丽雪,陈海涛,韩永俊. 沼渣物理特性及沼渣纤维化学成分测定与分析 [J]. 农业工程学报,2010,26(7):277-280.

- LIU Lixue, CHEN Haitao, HAN Yongjun. Determination and analysis of physical characteristics and fiber chemical composition of biogas residue [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7): 277-280. (in Chinese)
- 18 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]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 156-161. ZHANG Anqi, HUANG Guangqun, ZHANG Shaoying, et al. Design and test on an experimental aerobic composting reactor system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 156-161. (in Chinese)
- 19 US Composting Council. Test methods for the examination of composting and compost [M]. Bethesda, MD: US Composting Council, 2002.
- 20 FATMA S, SALMA H, MOHAMED C, et al. Maturity assessment of composted olive mill wastes using UV spectra and humification parameters [J]. Bioresource Technology, 2008, 99(15): 6900-6907.
- 21 GB/T 6434—2006 饲料中粗纤维的含量测定 过滤法[S]. 2006.
- 22 GB 7959—2012 粪便无害化卫生要求[S]. 2012.
- 

(上接第 176 页)

- 16 苗晓杰, 蒋恩臣, 王佳, 等. 对二甲氨基苯甲醛显色分光光度法检测水溶液中常微量尿素[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(8): 87-91. MIAO Xiaojie, JIANG Enchen, WANG Jia, et al. Using spectrophotometry with para-dimethyl-amino-benzaldehyde as chromogenic agent to determine macro and micro urea in aqueous solution[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2011, 42(8): 87-91. (in Chinese)
- 17 邓永红, 肖亮, 冯鑫佳, 等. 尿素对碱木质素溶液行为和吸附特性的影响[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2013, 41(1): 95-99. DENG Yonghong, XIAO Liang, FENG Xinjia, et al. The influence of urea on alkali lignin solution behavior and adsorption properties[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2013, 41(1): 95-99. (in Chinese)
- 18 李文卓, 王健龙, 高铭鲜. 木质素/黏土复合材料对尿素分子的缓释作用[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2013, 37(1): 91-95. LI Wenzhuo, WANG Jianlong, GAO Mingxian. Slow releasing properties for urea molecules of composite materials made of lignin and clay[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2013, 37(1): 91-95. (in Chinese)
- 19 刘振海. 聚合物量热测定[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- 20 张雯, 耿增超, 何绪生, 等. 生物质炭基氮肥中试制备工艺与特性分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 129-133. ZHANG Wen, GENG Zengchao, HE Xusheng, et al. Pilot preparation technology and properties of new biochar-based nitrogenous fertilizers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 129-133. (in Chinese)