

# 城市沼渣堆肥工艺及其施肥技术的优化

许文江<sup>1</sup>, 章明清<sup>2</sup>, 洪翠云<sup>3</sup>, 李夏兰<sup>4</sup>

(1. 福建省亚热带植物研究所, 福建 厦门 361006;

2. 福建省农业科学院 土壤肥料研究所, 福建 福州 350013;

3. 福建省亚热带植物生理生化重点实验室, 福建 厦门 361006;

4. 华侨大学 化工学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 为探讨缩短城市沼渣堆肥时间,提高堆肥效率和沼渣施肥技术,采用二步法对好氧堆肥工艺进行物料配比中试试验,开展毛豆种植的沼渣施肥试验.研究结果表明:调理剂菇土、稻壳、木屑可以促进堆肥效率;堆体初期 24 h,它们比对照组的温度分别提高 8.5、3℃,产品水的质量分数分别减少 45%、38%、14%,种子发芽率指数分别提高 10%、8%、7%,产品粒度分别减少 54%、34%、20%;毛豆种植配施沼渣有机肥与对照施肥比较,产量增加 9.4%,土壤渗漏水硝态氮、总磷质量浓度分别减少 13.4%、21.6%,配施沼渣有机肥有利于毛豆增产和降低菜田氮磷淋失.

**关键词:** 沼渣;二步堆肥;好氧工艺;调理剂;毛豆种植

**中图分类号:** X 799.305

**文献标志码:** A

当前,大多城市采用厌氧发酵方式处理有机生活垃圾,产生的沼气用来发电,沼渣经过堆肥及后续处理后制成肥料,这符合国际环保组织倡导的垃圾资源化、无害化的原则.但是,沼渣堆肥时间长达一个月,产品使用范围小、效益低下,极大限制了城市生活垃圾发酵产沼气发电技术的推广<sup>[1-3]</sup>.国内外学者对堆肥研究表明:沼渣采用好氧堆肥方式能缩短堆肥时间、减少有害气体产生.沼渣经机械脱水后,其粘连性比较大,不利于物料透气.在堆肥原料中适当加入木屑、稻壳、菇土、麸皮等添加料可以调节物料水的质量分数、透气性,并促进物料发酵<sup>[4-6]</sup>.在堆肥工艺研究方面,学者研究堆肥微生物菌群、腐熟度指标、堆肥设施等技术,但对快速堆肥技术的研究还少见报道<sup>[7-8]</sup>.因此,建立一种沼渣快速堆肥工艺、亟需完善的关键技术.本文采用具有自主产权的二步法堆肥及施肥技术<sup>[9-10]</sup>,研究沼渣快速堆肥的中试优化条件及其施肥技术.

## 1 材料与方法

### 1.1 菌种

腐熟菌剂 L601, L602(福建省亚热带植物研究所采集保藏)主要由芽孢杆菌属、高温放线菌属和高温单孢菌属等微生物菌株构成.

### 1.2 堆肥材料

沼渣(厦门市生活垃圾处理厂)中水分占 70%~85%、全碳占 55%~75%(干基)、全氮占 1.5%~2.5%(干基);稻壳、木屑、菇土等(采购自厦门市农贸市场)经预处理、筛选后,直径都小于 5.6 mm.

### 1.3 仪器与设备

配置热风机及时间继电器,堆肥仓长为 10.0 m、宽为 4.0 m、高为 5.0 m. 0.2 m 高的底部作为鼓气、气流缓冲、导污层,使风流均匀地通过通风孔道进入堆肥仓.收集渗滤液将其排出.仓壁用保温材料

收稿日期: 2015-09-16

通信作者: 许文江(1967-),男,副研究员,主要从事有机肥料及生物技术的研究. E-mail: xump@163.com.

基金项目: 国家农业科技成果转化项目(2014GB2C410092);福建省厦门市科技计划重点项目(3502Z20092002, 3502Z20151259)

制成,并做防腐保护.

1.4 试验过程

试验使用塑料浅盘和堆肥仓,采用二步法静态堆肥发酵、强制通风,以及控温的工艺方式<sup>[9-10]</sup>. 一步堆肥发酵时,加入质量分数为 10%的腐熟菌剂 L601,工艺温度为 52.5 ℃,堆肥时间为 72 h(堆肥初期 24 h 不通气控温);二步堆肥发酵时,加入质量分数为 10%的腐熟菌剂 L602,工艺温度为 57.5 ℃,堆肥时间为 48 h.

浅盘堆肥的料层厚度为 10 cm,并适时翻料透气. 在堆肥仓试验中料层高 1.2 m,由热风机、温度控制仪、时间继电器控制发酵堆肥的温度、通风量.

1.5 试验设计

2012 年春夏季供试蔬菜为毛豆,地点在福建省龙海市,沼渣有机肥施肥试验设计方案,如表 1 所示. 每个处理号施加无机肥氮、磷、钾的量为 204,204,204 kg·hm<sup>-2</sup>,处理号 1 为对照. 小区面积 20 m<sup>2</sup>,随机区组排列,3 次重复. 试验实施前,取一个基础土样 8 kg;试验结束后,按处理和重复各取一个土样 8 kg. 试验点的基础土壤主要肥力指标(ASI 法):供试土壤为灰泥田;有机质质量比为 26.9 g·kg<sup>-1</sup>;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>质量浓度为 15.2 mg·L<sup>-1</sup>,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>质量浓度为 40.5 mg·L<sup>-1</sup>,有效磷质量浓度为 46.37 mg·L<sup>-1</sup>,速效钾质量浓度为 77.3 mg·L<sup>-1</sup>;pH 值为 4.85.

表 1 沼渣有机肥施肥的田间试验设计方案

Tab.1 Designs for field test of fertilizing biogas residues organic fertilizer						
处理号	1	2	3	4	5	6
<i>m</i> /kg·hm <sup>-2</sup>	0	204	214	224	235	245

1.6 测试方法

用重铬酸钾容量法测定有机质,用半微量凯氏定氮法测定全氮<sup>[11-12]</sup>. 种子发芽率指数(*I*<sub>G</sub>)测定采用黄瓜种子<sup>[13]</sup>. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 用靛酚蓝比色法测定;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 用紫外分光光度法测定,总磷用硫酸-高氯酸氧化-钼锑抗比色紫外可见光光度计法测定<sup>[11-12]</sup>.

1.7 统计分析方法

用 DPS(data processing system)软件进行差异性的统计学分析. 其中:*P*≤0.05 为差异具有统计学意义,用小写字母表示,如 a 与 b 是差异具有统计学意义;a 与 ab 比较,它们有相同的 a,差异不具有统计学意义.

2 结果与分析

2.1 调理剂添加量对沼渣堆肥的影响

试验采用浅盘堆肥,调理剂的添加量对沼渣堆肥的影响,如表 2 所示. 表 2 中:*w*<sub>C</sub> 为调理剂添加量;*w*<sub>w</sub> 为水的质量分数;*I*<sub>G</sub> 为种子发芽率指数.

表 2 调理剂添加量对沼渣堆肥指数的影响

Tab.2 Effect of adding amount of amount on residue compost index

<i>w</i> <sub>C</sub> /%	稻壳		木屑		菇土	
	<i>w</i> <sub>w</sub> /%	<i>I</i> <sub>G</sub> /%	<i>w</i> <sub>w</sub> /%	<i>I</i> <sub>G</sub> /%	<i>w</i> <sub>w</sub> /%	<i>I</i> <sub>G</sub> /%
0	47 <sup>a</sup>	75 <sup>d</sup>	47 <sup>a</sup>	74 <sup>d</sup>	46 <sup>a</sup>	76 <sup>d</sup>
5	39 <sup>b</sup>	77 <sup>c</sup>	41 <sup>b</sup>	78 <sup>bc</sup>	37 <sup>b</sup>	79 <sup>c</sup>
10	33 <sup>c</sup>	80 <sup>b</sup>	32 <sup>c</sup>	81 <sup>a</sup>	27 <sup>c</sup>	85 <sup>b</sup>
15	29 <sup>d</sup>	82 <sup>a</sup>	33 <sup>de</sup>	80 <sup>ab</sup>	24 <sup>d</sup>	87 <sup>b</sup>
20	30 <sup>d</sup>	80 <sup>b</sup>	34 <sup>d</sup>	78 <sup>c</sup>	24 <sup>d</sup>	87 <sup>ab</sup>
25	31 <sup>d</sup>	79 <sup>b</sup>	36 <sup>c</sup>	75 <sup>d</sup>	23 <sup>d</sup>	89 <sup>a</sup>

稻壳添加量对沼渣堆肥种子发芽指数也有显著的影响. 随着稻壳量超过 15%,种子发芽率指数呈下降的趋势. 稻壳添加量为 15%,20%,25%时,终点水的质量分数的差异没有统计学意义,稻壳最佳添加量是 15%. 因为,经过前期发酵产沼气的沼渣大部分是由较稳定的腐殖质组成<sup>[14]</sup>;稻壳相比沼渣,在

堆肥过程中有大量的有机质需被降解成稳定的腐殖质,还产生一些对植物的有害物质,这些有害物质仍需微生物进一步降解<sup>[15]</sup>.

木屑添加量对沼渣堆肥终点水的质量分数有显著水平的影响;各处理的堆肥终点水的质量分数最低为 32%、最高为 41%;木屑添加量 10%、15%的终点水的质量分数、种子发芽率指数和 5%、20%的差异有统计学意义;木屑添加量 10%、15%之间的终点水的质量分数、种子发芽率指数差异没有统计学意义;而添加量 15%的原料成本比 10%的高. 因此,在沼渣中添加适量的木屑可以提高堆肥效率,木屑最佳添加量是 10%.

木屑添加量对沼渣堆肥的种子发芽率有显著水平的影响. 木屑处理号的堆肥终点平均水的质量分数是 35.2%,稻壳的质量分数是 32.4%;木屑处理号的平均种子发芽率指数是 78.4%,稻壳的质量分数是 79.6%. 因此,木屑的堆肥效率稻壳添加料略差.

菇土添加量对沼渣堆肥终点水的质量分数和种子发芽率指数均有显著水平的的影响. 随着菇土添加量的增加,堆肥终点水的质量分数逐步下降,种子发芽率指数逐步升高;当添加量达 10%,水的质量分数、种子发芽率指数分别为 27%,85%,达到堆肥腐熟标准;当添加量超过 10%,终点水的质量分数、种子发芽率的变化量没有显著差别.

菇土添加量 10%时,终点水的质量分数、种子发芽率都优于有机肥料的行业标准<sup>[13]</sup>. 因此,在沼渣中添加菇土可以较大地提高堆肥效率,菇土最佳添加量是 10%. 菇土和稻壳、木屑添加料比较,堆肥效率较高. 食用菌培养料经灭菌、熟化,成为真菌可利用的营养基. 收割食用菌后的下脚料即菇土,结构蓬松,含有大量的真菌,菇土可以直接作为植物的营养土. 试验也表明,沼渣与菇土堆肥初期,微生物生长速度快、代谢旺盛产生大量热量,因此,料层温度升高快.

2.2 调理剂添加量对沼渣中试堆肥的影响

试验采用堆肥仓堆肥,调理剂添加量采用浅盘堆肥试验得到的最佳比例分别为 15%的稻壳、10%的木屑、10%的菇土. 调理剂添加量对沼渣中试堆肥的影响,如表 3 所示. 表 3 中: $t_{\max}$ 为初期最高温度; $d$ 为产品粒度.

由表 3 可知:与对照组相比,添加木屑、稻壳、菇土对沼渣中试堆肥的水的质量分数、种子发芽率、初期最高温度和粒度等指标具有显著水平的影响. 菇土、稻壳、木屑处理号的堆肥终点水的质量分数为 26%,29%,33%(木屑处理号堆肥时间延长 7 h 的终点水的质量分数是 29%),比对照处理号分别减少 45%,38%,14%;种子发芽率指数比对照处理号提高 10%,8%,7%. 其中,菇土处理号比稻壳、木屑的高. 在沼渣堆肥中提高效率的调理剂依次是菇土、稻壳、木屑.

表 3 调理剂添加量对沼渣中试堆肥的影响  
Tab. 3 Effect of conditioner amount on residue composting

添加物	$w/\%$	$I_G/\%$	$t_{\max}/^{\circ}\text{C}$	$d/\%$
对照组	47 <sup>a</sup>	75 <sup>b</sup>	39 <sup>c</sup>	35 <sup>a</sup>
木屑	33 <sup>b</sup>	82 <sup>a</sup>	42 <sup>b,c</sup>	28 <sup>ab</sup>
稻壳	29 <sup>bc</sup>	83 <sup>a</sup>	44 <sup>ab</sup>	23 <sup>bc</sup>
菇土	26 <sup>c</sup>	85 <sup>a</sup>	47 <sup>a</sup>	16 <sup>c</sup>

堆肥试验 24 h 前不调控温度,让物料自然发酵. 菇土处理号堆肥初期 24 h 的堆体温度达到 47℃,比稻壳、木屑处理号分别提高 3,5℃,因此,菇土能更好地促进沼渣堆肥. 微生物发酵消耗水分、产生热量进而降低堆体水的质量分数,其效率也就直接表现在堆肥过程中温度、水的质量分数的变化;一般情况下,堆体温度升高快,表明物料配比适合腐熟微生物的生长<sup>[7]</sup>.

沼渣在没添加调理剂(对照号)时,氧气接触面小,微生物生长、代谢缓慢,物料多处板结,产品粒度( $d\geq 5.6\text{ mm}$ )高达 35%,因此,堆肥效果较差. 菇土、稻壳、木屑处理号比对照组的产品粒度分别减少 54%,34%,20%. 调理剂起着骨架作用,改善沼渣的物理结构,增加物料的表面积,通气均衡. 因此,物料板结较少,菇土作为调理剂的产品粒度只有 16%,是沼渣堆肥的理想配料.

2.3 沼渣有机肥对毛豆产量及其土壤渗漏水氮磷质量浓度的影响

适当配施有机肥料,作物产量高于单一施用化肥,并可以减少土壤 N、P 元素流失<sup>[16]</sup>. 沼渣有机肥

施肥对毛豆产量及其土壤渗漏水氮磷质量浓度影响的田间试验,结果如表 4 所示.

由表 4 可知:配施沼渣有机肥对毛豆的产量有显著的影响,比对照施肥最高增产 1 225 kg · hm<sup>-2</sup>,增产率达到 9.4%;沼渣有机肥施肥量达到 235 kg · hm<sup>-2</sup>和 245 kg · hm<sup>-2</sup>的毛豆产量之间差异不具有统计意义,表明毛豆产量增产的沼渣有机肥施肥最佳量为(240±5) kg · hm<sup>-2</sup>;配施沼渣有机肥的氮、磷质量浓度最低只有对照施肥处理的 86.6%和 78.4%;沼渣有机肥施肥量达到 235 kg · hm<sup>-2</sup>和 245 kg · hm<sup>-2</sup>的氮、磷浓度之间差异不具有统计意义,表明减少毛豆氮、磷流失的沼渣有机肥施肥最佳数量为(240±5) kg · hm<sup>-2</sup>. 因此,配施沼渣有机肥有利于毛豆增产和降低菜田氮磷淋失,沼渣有机肥施肥最佳量为(240±5) kg · hm<sup>-2</sup>.

表 4 沼渣有机肥施肥对毛豆种植的影响

Tab. 4 Effect of fertilizing biogas residues as organic fertilizer on soybean planting

处理号	<i>m</i> /kg · hm <sup>-2</sup>	$\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho(\text{TP})/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	处理号	<i>m</i> /kg · hm <sup>-2</sup>	$\rho(\text{NO}_3^-\text{-N})/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\rho(\text{TP})/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
1	13 052 <sup>e</sup>	1 305 <sup>a</sup>	0.51 <sup>a</sup>	4	14 076 <sup>b</sup>	1 182 <sup>d</sup>	0.43 <sup>d</sup>
2	13 398 <sup>d</sup>	1 263 <sup>b</sup>	0.48 <sup>b</sup>	5	14 200 <sup>ab</sup>	1 151 <sup>ef</sup>	0.41 <sup>e</sup>
3	13 761 <sup>cd</sup>	1 219 <sup>c</sup>	0.45 <sup>cd</sup>	6	14 287 <sup>a</sup>	1 130 <sup>f</sup>	0.40 <sup>e</sup>

### 3 结论

1) 沼渣因水的质量分数高、粘度大,给堆肥造成很大困难,因此,有必要添加合适的调理剂. 试验表明,菇土、稻壳、木屑都可以作为沼渣堆肥的调理剂,它们的共同特点是能够降低沼渣的水的质量分数、粘度,使物料能够充足接触氧气,好氧微生物可以旺盛生长、代谢. 菇土作为调理剂,堆肥初期升温快速,最高温度可达 47 ℃,种子发芽率指数高达 85%,终点水的质量分数比其他调理剂减少 10%~21%. 因此,菇土比稻壳、木屑更适合作为沼渣堆肥的调理剂. 在农业生产中,菇土腐植质质量分数高、可直接作为植物的栽培基质,对植物种子的毒素较小,而且菇土质地细腻、疏松;菇土和沼渣混和,起着骨架作用,氧气接触面数倍增加,堆肥后板结程度也较小.

2) 目前,沼渣等堆肥生产采取接种高效微生物菌群、添加堆肥调理剂等技术,但耗时仍然较长,传统无通气的工艺需要 2 个月,通气而无控制温度的工艺需要 15 d,生产效率较低<sup>[1-7]</sup>. 试验结果表明,沼渣与菇土、稻壳、木屑等调理剂协同堆肥,采用控制堆体温度、强制通气的二步法好氧堆肥工艺,堆肥初期升温高,终点水的质量分数低于 30%,种子发芽率指数高于 80%,达到堆肥腐熟标准;堆肥时间 5 d,有效缩短城市沼渣生产周期.

3) 在我国农业生产中,蔬菜种植具有举足轻重的地位,但过量施肥会引起水体污染<sup>[17-18]</sup>,因此,有必要研究降低菜田氮磷流失的降污肥料产品. 试验结果表明,配施沼渣有机肥有利于毛豆增产,其土壤渗漏水硝态氮、总磷质量浓度减少 13.4%,21.6%,为沼渣有机复合肥的研发提供基础数据.

#### 参考文献:

[1] 刘波,朱昌雄.微生物发酵床零污染养猪技术研究与应用[M].北京:中国农业科学技术出版社,2009:3-35.

[2] BERNAL M P,ALBURQUERQUE J A,MORAL R.Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment[J].A Review Bioresour Technol,2009,100(22):5444-5453.

[3] LARCHEVE Q M,BALLINI C,KORBOULEWSKY N,et al.The use of compost in afforestation of mediterranean areas; Effects on soilproperties and young tree seedlings[J].Sci Total Env,2006,369(1/2/3):220-230.

[4] WILSHUSENA J H,HETTIARATCHI J P A,VISSCHERB A D,et al.Methane oxidation and formation of EPS in compost: Effect of oxygen concentration[J].Environmental Poll,2004,129(2):305-314.

[5] WANG P,CHANGA C M,WATSON M E,et al.Maturity indices for composted dairy and pig manures[J].Soil Biology and Biochemistry,2003,36(5):767-776.

[6] 魏自民,李晨辰,赵越,等.生活垃圾微生物接种堆肥水溶性有机物紫外光谱特性研究[J].东北农业大学学报,2015,46(2):83-88.

[7] 李国学,张福锁.固体废物堆肥化与有机复混肥生产[M].北京:化学工业出版社,2000:5-27.

[8] 陈济琛,任香芸,蔡海松,等.嗜热脂肪土芽孢杆菌 CHB1 固体发酵工艺[J].农业环境科学学报,2008,27(6):2478-2483.

[9] 许文江,许传俊,陈丽璇,等.污泥好氧堆肥及桉树施肥试验研究[J].福建农业学报,2010,25(6):759-765.

[10] 许文江,刘美龄,谢小青,等.污泥二步法静态好氧堆肥发酵工艺[J].华侨大学学报(自然科学版),2011,32(5):546-550.

[11] 文启孝.土壤有机质研究法[M].北京:农业出版社,1984:1-74.

[12] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000:1-103.

[13] 张陇利,刘青,徐智,等.复合微生物菌剂对污泥堆肥的作用效果研究[J].环境工程学报,2008,2(2):266-269.

[14] 黄勤楼,翁伯奇,刘明香,等.建阳市以沼气为纽带的生态农业建设实践与思考[J].福建农业学报,1999,14(4):57-61.

[15] 林代炎,杨菁,叶美锋,等.城市生活垃圾堆肥发酵中微生物菌群变化规律的研究[J].生物技术通报,2006(增刊1):387-390.

[16] 张维理,武淑霞,翼宏杰,等.中国农业面源污染形势估计及控制对策.[J].中国农业科学,2004,37(7):1008-1017.

[17] 黄东风,邱孝煊,李卫华,等.福州市郊蔬菜施肥现状及菜地土壤养分累积特征分析[J].福建农林大学学报(自然科学版),2009,38(6):633-638.

[18] 章明清,姚宝全,李娟,等.福建菜田氮、磷积累状况及其淋失潜力研究[J].植物营养与肥料学报,2014,20(1):148-155.

## Studies on Composting Process of Municipal Biogas Residues and Optimization of Fertilizer Practice

XU Wenjiang<sup>1</sup>, ZHANG Mingqing<sup>2</sup>, HONG Cuiyun<sup>3</sup>, LI Xialan<sup>4</sup>

(1. Fujian Institute of Subtropical Botany, Xiamen 361006, China;

2. Fujian Academy of Agricultural Sciences, Institute of Soil and Fertilizer, Fuzhou 350013, China;

3. Fujian Institute of Subtropical Botany, Fujian Key Laboratory  
Subtropical Plant Physiology and Biochemistry, Xiamen 361006, China;

4. College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** To study how to shorten the composting time and enhance the composting efficiency and fertilizer practice of municipal biogas residues, fertilizer test of soybean planting was carried out on aerobic composting process to advance pilot test of material ratio by two-step method. The results showed that adding mushroom soils, rice husk and sawdust as conditioners could improve the composting efficiency. Compare with the control group, the temperature increased by 8, 5, 3 ℃, the water ratio of product decreased by 45%, 38%, 34%, the seed germination index increased by 10%, 8%, 7%, and the particle size reduced by 54%, 34%, 20% respectively in the initial 24 h. The output of green soybean increased by 9.4% than the control group when using biogas residues as organic fertilizer, and the concentrations of nitrate nitrogen and total phosphorus in soil percolating water decreased by 13.4% and 21.6% respectively. It can be clearly seen that fertilizing biogas residues as organic fertilizer is beneficial to increasing the yield of green soybean and reducing the loss of nitrogen and phosphorus in the vegetable fields.

**Keywords:** biogas residues; two-step composting technology; aerobic process; conditioner; soybean planting

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 刘源岗)