

畜禽粪便堆肥腐熟度评价指标体系研究

钱晓雍¹, 沈根祥¹, 黄丽华¹, 奚 刚², Giovanni Minuto³

(1.上海市环境科学研究院,上海 200233; 2.上海上实现代农业有限公司,上海 202183; 3.意大利阿本加农业技术推广站,阿本加 17031)

摘 要:以牛粪和猪粪两种畜禽粪便分别与秸秆混合堆肥,全面考察了堆肥过程中与腐熟度有关的理化指标和生物指标变化。结果表明,在 3 个月的堆肥熟化试验考察期内,堆肥初期堆体升温迅速,50℃以上高温持续时间累计超过 15 d;物料 pH 值先升后降,60 d 后稳定在 8.0 左右;含水率和 C/N 持续下降,C/N 60 d 后接近 20;氨氮含量呈先升后降趋势,胡敏酸和富里酸比值则先降后升;Solvita 腐熟等级、种子发芽势和根系建成指标不断升高,而作物生长指标则无显著变化。由腐熟度指标相关性分析表明,最能体现堆肥腐熟程度的 Solvita 腐熟等级与 C/N、种子发芽势、根系建成指标呈高度相关,与含水率和腐殖酸呈低度相关。据此,结合常规温度指标建立了堆肥腐熟度评价指标体系,用于科学指导农牧业废弃物堆肥质量控制。

关键词:畜禽粪便;堆肥;腐熟度;指标体系

中图分类号:S141.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)03-0549-06

An Index System for Evaluating the Maturity of Animal Manure Composting

QIAN Xiao-yong¹, SHEN Gen-xiang¹, HUANG Li-hua¹, XI Gang², Giovanni Minuto³

(1.Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 2.SIIC Dongtan Modern Agriculture Co. Ltd., Shanghai 202183, China; 3.Centro Regionale di Sperimentazione ed Assistenza Agricola, Albenga 17031, Italy)

Abstract: Under aerobic conditions in a climate chamber, high temperature composting of dairy and swine manures with crop straws were studied to determine the variation of maturity indexes of the composting, including physical, chemical and biological indexes. The results indicated that: the temperature rose rapidly, and lasted for more than 15 d over 50℃; the pH values had a rise followed by a drop, and stayed stable at around 8.0 after 60 d; the moisture and C/N ratio dropped, and the C/N ratio was close to 20 after 60 d; the NH₃-N content had experienced from increase to decrease, while the HA/FA ratio was opposite, from decrease to increase; the Solvita maturity degree, germination index and root establishment index all increased during the composting; the growth index had no significant change. The correlation analysis among maturity indexes showed that, the Solvita maturity degree, which was the best representative of composting maturity, was highly correlated with C/N ratio, GI, root establishment index, and slightly correlated with moisture and humic acids. Therefore, the index system for evaluating the maturity of animal manure composting was established together with the regular index of temperature based on the results from this study.

Keywords: animal manure; composting; maturity; index system

随着我国农村经济的迅速发展和大量农业劳动力转移,农牧业生产过程中产生的大量废弃物,如畜禽粪便和农田秸秆等随地堆放和就地焚烧现象相当严重,不仅造成了极大的资源浪费,而且也引起了严重的环境污染问题^[1]。对农牧业废弃物进行堆肥处理,一者可以解决农牧业废弃物的出路问题,改善农村生

态环境,二者也可促进生态农业和循环经济的发展,因此是目前国内外最为提倡的有效处理方式^[2]。但是,与国外发达国家比较而言,我国在畜禽粪便堆肥处理质量控制上,堆肥产品质量标准除卫生学指标外,仅从堆肥产品的含水率、pH 值、养分含量等理化指标片面评价产品的肥效性,缺乏比较全面和科学的堆肥腐熟度评价指标,尤其是缺少农艺指标考察,从而造成了有些堆肥产品在还没有完全腐熟的情况下就被推向市场,施用于农田,对农作物生长和农业生产造成了负面影响^[3-5]。

本研究在借鉴发达国家堆肥质量腐熟度控制 Solvita 腐熟等级评价先进技术基础上^[6],以上海地区

收稿日期:2008-05-26

基金项目:中意环保合作项目“促进崇明岛东滩绿色农业发展的有机农业技术和体系”

作者简介:钱晓雍(1981—),男,浙江湖州人,工程师,主要从事农村环境保护科研工作。E-mail:qianxy@saes.sh.cn

通讯作者:沈根祥 E-mail:shengx@saes.sh.cn

典型的畜禽粪便(牛粪和猪粪)为堆肥试验研究对象,通过全面考察堆肥过程中与腐熟度有关的理化指标和生物指标变化及其相关性,因地制宜地筛选适合我国国情的简便易行且具有代表性的堆肥腐熟度评价指标,并对市场上 2 种商品有机肥进行了腐熟度质量评价,为提高畜禽粪便堆肥质量及其质量控制水平提供手段与依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试牛粪采自上海光明荷斯坦金山种奶牛场,猪粪采自上海南汇供港猪场,秸秆分别来自上述两家牧场周边农田,经粉碎后与粪便混合均匀。堆肥原料主要成分见表 1。评价用的商品有机肥 A 和 B 购于市场,其基本的理化性状见表 2。

表 1 堆肥原料的主要成分

Table 1 Properties of raw materials for the composting

堆肥原料	含水率/%	TN/%	TOC/%	C/N
牛粪	84.84	2.87	39.75	13.87
秸秆(来自奶牛场周边农田)	11.29	0.59	38.68	66.11
猪粪	78.19	3.51	42.01	11.97
秸秆(来自猪场周边农田)	15.16	0.67	38.77	57.87

表 2 商品有机肥主要理化性状

Table 2 Main physical and chemical characteristic of commercial composts

商品有机肥	堆肥时间/d	含水率/%	TN/%	TOC/%	C/N
A	45	38.10	2.45	56.72	23.15
B	60	35.83	2.15	45.33	21.08

1.2 试验设计

1.2.1 堆肥装置及试验时间

堆肥容器为泡沫塑料保温箱,有效尺寸为 50 cm×50 cm×50 cm,保温层壁厚 5 cm,置于上海市环境科学研究院人工气候室内进行为期 90 d 的试验,人工气候室内温度和湿度分别维持在 30 ℃和 70%。

1.2.2 试验分组

本试验设牛粪秸秆堆肥和猪粪秸秆堆肥 2 个处理,每处理 6 个重复,每个重复 50 kg。根据堆肥预备试验结果,牛粪秸秆堆肥处理中新鲜牛粪和秸秆按质量比 2:1 混合,猪粪秸秆堆肥处理中新鲜猪粪和秸秆按质量比 3:2 混合,每个重复混合均匀后分别装入保

温箱,每周翻堆 1 次。

1.3 采样及测定

1.3.1 采样方法

每个重复在堆体中央深 25 cm 处插一温度计,每日中午 12:00 测定温度,采样时间为堆肥第 0、30、60、90 d 采样,在翻堆充分、搅拌均匀后,按 5 点采样法采样;同时在第 30、60、90 d 取出每个处理中的两个重复进行生物指标考察实验。

1.3.2 测定指标与方法

1.3.2.1 理化指标

pH 值通过 1:5 固液比浸提滤液测定;含水率采用铝盒烘干法;全氮采用凯氏定氮法;总有机碳采用重铬酸钾氧化法;氨氮采用碱解扩散法;腐殖质中的胡敏酸和富里酸采用焦磷酸钠浸提-重铬酸钾容量法;Solvita 腐熟等级采用 Solvita 测试法^[6]。

1.3.2.2 种子发芽势

取堆肥鲜样按水肥比 2:1 浸提,过滤后取滤液以 3 200 r·min⁻¹ 离心 30 min,吸取上清液以 100%、75% 和 50% 的浓度混合相应比例蒸馏水后,分别吸取 2 mL 置于铺有滤纸的培养皿中,放置 10 粒水堇(*Lepidium sativum*)种子,在 25 ℃恒温培养箱中黑暗培养 72 h,然后用以下公式计算每个浓度的种子发芽势,最后取 3 个浓度的平均数,作为该堆肥样品的种子发芽势。

种子发芽势(%)=

$$\frac{\text{不同浓度浸提液的种子发芽数} \times \text{根长}}{\text{蒸馏水的种子发芽数} \times \text{根长}} \times 100$$

1.3.2.3 作物生长指标

取堆肥产品分别以 20%、40%、60%、80%、100% 的体积比与草炭混合装入直径 15 cm 的花盆,每个比例设置 5 个花盆作为重复,并设置 100% 的草炭作为空白对照,每个花盆播撒 125 粒水堇(*Lepidium sativum*)种子后,置入人工气候室,设定温度 25 ℃、湿度 75%、自然光照 12 h·d⁻¹,21 d 后测定干物质生物量,并以各处理和空白对照的干物质比值平均值作为作物生长指标值。

1.3.2.4 根系建成指标

取堆肥产品分别以 20%、40%、60%、80%、100% 的体积比与草炭混合装入直径 10 cm 的花盆,每个比例 5 个重复,每个花盆移栽 1 株 8 cm 左右高的番茄植株后,置入人工气候室,设定温度 25 ℃、湿度 75%、自然光照 12 h·d⁻¹,40 d 后测定番茄株高。

2 结果与分析

2.1 堆肥过程中理化指标变化及其腐熟度分析

2.1.1 温度变化

温度被认为是堆肥稳定度评价最简便快捷的物理指标,当其趋于环境温度时,表明堆肥已稳定,一般认为堆肥温度在 50 ℃ 以上并维持 5~10 d,就能达到符合粪便无害化卫生标准^[7]。从图 1 堆肥过程中温度变化可以看出,牛粪秸秆堆肥和猪粪秸秆堆肥在启动后 4 d 内温度都达到了 50 ℃ 以上,并都在 50 ℃ 以上维持超过了 15 d,最高温度分别达到了 65.7 ℃ 和 71.2 ℃,在 60 d 以后温度趋于环境温度,表明堆肥趋于腐熟。

2.1.2 pH 值变化

从图 1 看出,牛粪秸秆堆肥和猪粪秸秆堆肥的 pH 值都呈现出先上升后下降趋于稳定的趋势,说明在堆肥初期没有出现因厌氧导致有机酸积累的情况,pH 值的上升与氨氮的产生有关,而后期 pH 的回落则是因为氨氮的挥发所致,在 60 d 以后,pH 值持续稳定在 8.0 左右,符合腐熟堆肥 pH 值在 8.0~9.0 的一般标准。

2.1.3 含水率变化

水分是影响堆肥效果的重要参数,堆肥过程中含水率的下降,一方面与堆体温度和高温维持时间有关,另一方面也与秸秆的添加量有关,秸秆所占比例越大,透气性越好,越有利于气体的蒸发和散失^[5]。从图 1 中含水率变化可以看出,牛粪秸秆堆肥和猪粪秸秆堆肥的含水率都呈下降趋势,至 90 d 时,相比与牛粪秸秆堆肥下降的 21.99%,猪粪秸秆堆肥下降幅度较大,达到了 30.62%,这与猪粪秸秆堆肥中秸秆混合比例较高有关。

2.1.4 氨氮变化

从图 1 堆肥过程中氨氮变化可以看出,牛粪秸秆堆肥和猪粪秸秆堆肥氨氮都呈先升高后下降的趋势,这是由于堆肥初期随着温度的升高,微生物氨化作用增强使氨氮含量增加,之后,由于氨的挥发和微生物对氮的固定作用,氨氮含量不断下降。由于氨氮含量变化受温度、pH、微生物代谢、通气条件和氮源条件的影响,这一参数通常只作为堆肥腐熟度的参考^[10]。

2.1.5 胡敏酸和富里酸比值变化

胡敏酸与富里酸是腐殖质的重要组成成分,在很大程度上对腐殖质的质量起决定性作用,而胡敏酸和

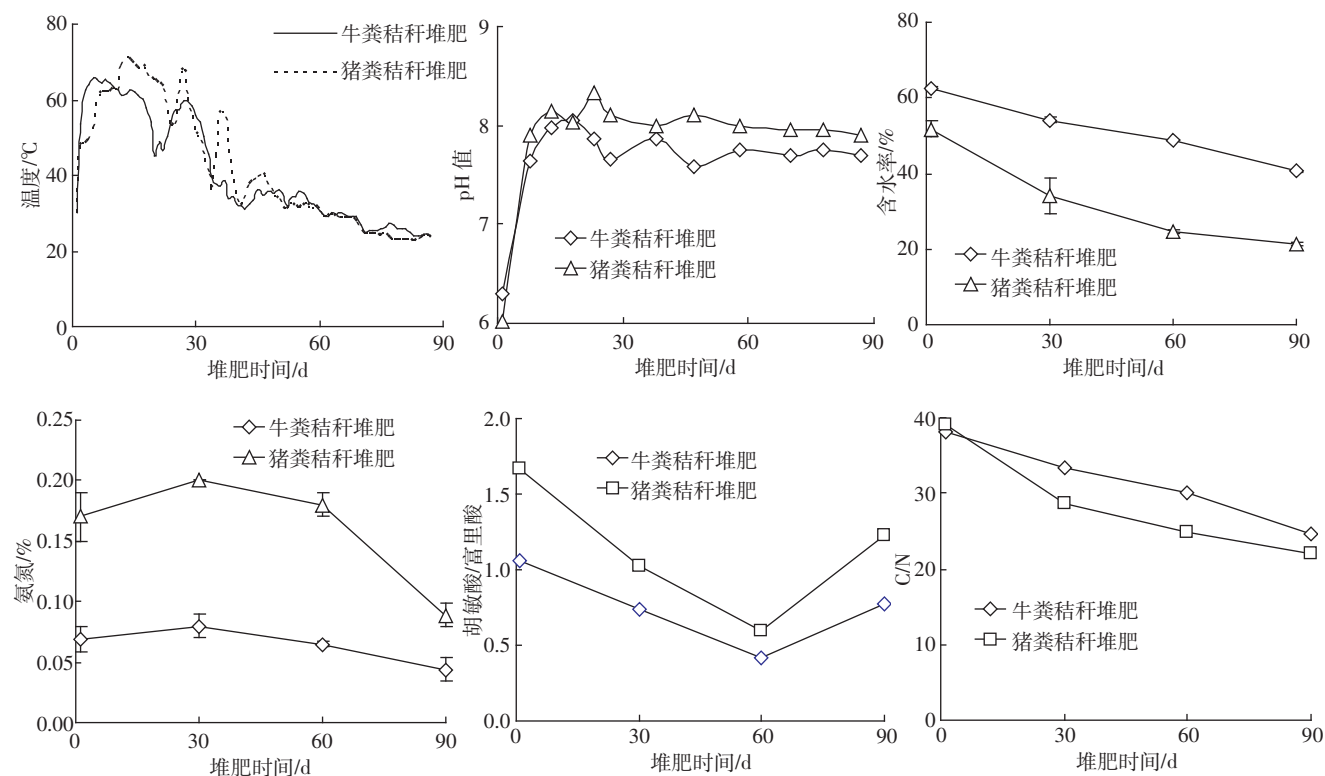


图1 堆肥过程中理化指标的变化趋势

Figure 1 Variation of physical and chemical indexes during the composting

富里酸比值代表堆肥的腐殖化程度^[11]。图 1 中胡敏酸和富里酸比值变化呈先下降后上升的趋势,这可能是由于堆肥初期腐殖质中胡敏酸的不稳定成分被快速分解导致胡敏酸含量下降,而在堆肥后期微生物主要利用较难降解的物质为碳源,在这类物质降解的同时,逐渐形成了结构稳定的腐殖质类物质,使胡敏酸含量增加,同时富里酸在堆肥过程中一直处于被转化而含量下降的状态。堆肥后期胡富比的升高表明腐殖化程度不断提高,堆肥趋向腐熟。

2.1.6 C/N 变化

C/N 是堆肥腐熟度评价比较直观的化学指标,堆肥过程中 C/N 不断下降,理论上应趋于微生物菌体的 C/N 即 16 左右,一般认为堆肥产品 C/N 小于 20 时可以认为基本腐熟^[9]。从图 1 C/N 变化可以看出,牛粪秸秆堆肥和猪粪秸秆堆肥 C/N 在 90 d 都达到了 20 左右,符合堆肥腐熟 C/N 要求。

2.1.7 Solvita 腐熟等级变化

Solvita 测试法是目前国际上作为堆肥腐熟度评价最为普遍采用的有效方法,已被欧美等 13 个国家

采用,其中瑞典、丹麦、西班牙、挪威等国已将该方法作为官方测试方法^[12]。从表 3 可以看出,牛粪秸秆堆肥和猪粪秸秆堆肥在 90 d 后 Solvita 腐熟度等级都达到了最高的 8 级,根据 Solvita 测试标准,可以认为基本达到腐熟度要求。

2.2 堆肥过程中生物指标变化及其腐熟度分析

国外早期的一些研究表明,对于多种不同原材料堆肥,固相 C/N 评价堆肥腐熟度并不能完全有效地代表所有类型堆肥的熟化程度^[12-13],利用堆肥水浸提液对植物种子的毒性试验检验腐熟度则是最精确和最有效的方法^[14],而作物生长和根系建成指标作为反映堆肥应用后作物生长发育情况的指标,也是检验腐熟度最实际和最直观的方法。从表 4 和图 2 可以看出,种子发芽势(GI)均呈上升趋势,说明堆肥生理毒性逐渐降低,堆肥逐渐达到腐熟,其中牛粪秸秆堆肥种子发芽势(24 h 和 72 h)在 60 d 后都已经基本达到 100%;作物生长指标随着堆肥的进行变化不够显著,同处理

表 4 堆肥过程中种子发芽势和作物生长指标的变化趋势

Table 4 Variation of germination index and growth

index during the composting				
堆肥处理	堆肥时间/d	种子发芽势/%		作物生长指标
		GI(24 h)	GI(72 h)	
牛粪秸秆堆肥	30	88 b*	112 bc	1.04 a
	60	96 b	172 a	1.09 a
	90	119 a	207 a	1.09 a
猪粪秸秆堆肥	30	68 c	78 c	0.50 c
	60	86 b	165 ab	0.60 c
	90	129 a	198 a	0.75 b
商品有机肥 A	45	84 bc	104 c	0.84 b
商品有机肥 B	60	88 b	163 ab	0.85 b

注:* 采用软件 SPSS 11.5 统计分析得到的显著性差异(P<0.05)。

表 3 堆肥过程中 Solvita 腐熟度指标的变化趋势

Table 3 Variation of Solvita maturity index during the composting

堆肥处理	堆肥时间/d	CO ₂ 等级	NH ₃ 等级	Solvita 腐熟等级
牛粪秸秆堆肥	30	5	5	5
	60	7	5	7
	90	8	5	8
猪粪秸秆堆肥	30	5	4	5
	60	6	4	6
	90	8	4	8
商品有机肥 A	45	7	5	7
商品有机肥 B	60	8	5	8

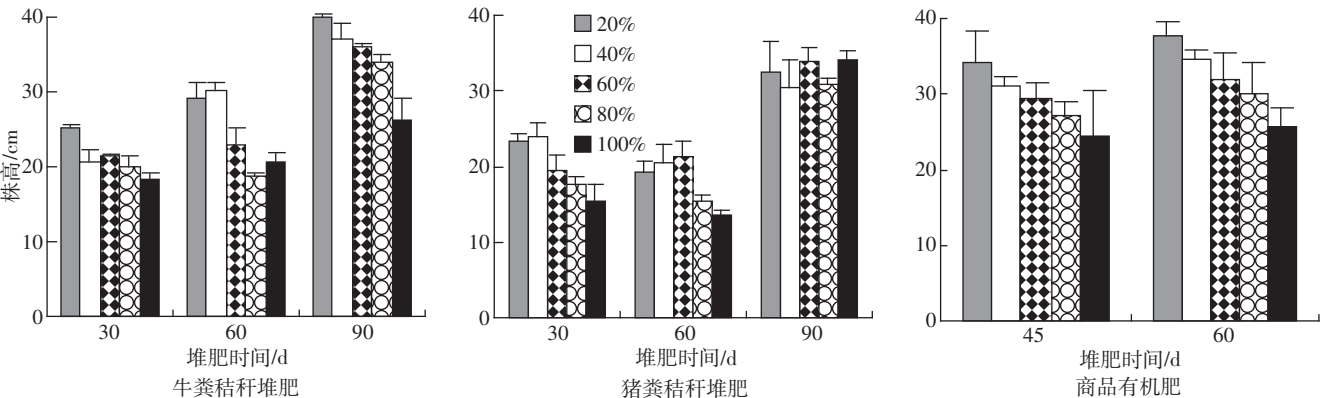


图 2 堆肥过程中根系建成指标(株高)的变化

Figure 2 Variation of root establishment index(plant height)during the composting

内不同时间生物量没有显著差异($P<0.05$),因此不适合作为判别腐熟度的指标;根系建成指标随着堆肥的进行呈上升趋势,牛粪秸秆堆肥和猪粪秸秆堆肥在 60 d 后,株高都基本超过了 20 cm。

2.3 腐熟度指标间相关性分析

由于在实际操作过程中对上述所有指标进行检测,不仅烦琐费时,而且也很不经济。因此,通过对上述各指标间相关性分析,筛选简便实用的腐熟度指标作为实际生产中质量检测与控制指标,具有十分重要的实际应用价值。

表 5 为上述各指标间相关性分析的结果,由此可见,作为基本能代表堆肥产品腐熟程度和总体质量的 Solvita 腐熟等级指标与 C/N、种子发芽势、根系建成指标呈高度相关,其余指标间均相关性不高。因此,可以选取与 Solvita 试剂盒腐熟度等级呈高度相关的 C/N、种子发芽势和根系建成指标作为具有代表性的堆肥腐熟度控制指标。

2.4 堆肥腐熟度评价指标体系构建及其应用

在堆肥腐熟度评价中,单个指标往往比较片面,难以真实反映堆肥产品的腐熟情况,因此国外通常采用物理指标、化学指标和生物指标联合组成腐熟度评价指标体系的方法,确保堆肥产品腐熟度质量控制^[5]。目前,温度是堆肥稳定度评价最简便快捷的物理指标;C/N 则是堆肥腐熟度评价比较直观的化学指标;

而在生物指标中,反映植物毒性的种子发芽指标应用比较多,其他反映植物生长抑制的生物指标则应用较少。鉴此,根据上述各指标间相关性分析结果,选取理化指标(温度、C/N)和生物指标(种子发芽势、根系建成指标)组成堆肥产品腐熟度质量评价指标体系,并根据这 4 个指标在堆肥熟化过程中的考察结果,设置如下堆肥腐熟度等级参考标准,见表 6,用于农牧业废弃物堆肥熟化质量控制。

根据该指标体系对 2 种商品有机肥进行腐熟度质量评价结果表明,商品有机肥 A 的 C/N 处于 20~30 之间,种子发芽势仅在 100%左右,根系建成指标在 20~30 cm,腐熟度等级属于中等偏差,没有达到完全熟化的程度,施入农田后可能对作物生长有一定的影响;商品有机肥 B 的 C/N 接近 20,种子发芽势为 163%,根系建成指标达到了 31 cm,腐熟度等级属于较高水平,已经基本熟化。

3 结 论

(1)在畜禽粪便堆肥过程中,与腐熟度有关的物料温度、pH 值、含水率、氨氮、Solvita 腐熟等级、种子发芽势、根系建成指标等理化和生物指标变化显著。

(2)通过上述各指标间的相关性分析,选取与 Solvita 腐熟等级指标呈高度相关的 C/N、种子发芽势和根系建成指标作为具有代表性的堆肥腐熟度控制

表 5 腐熟度指标间的相关性分析

Table 5 Correlation coefficient among maturity indexes

Pearson 相关系数	含水率	C/N	腐植酸	Solvita 腐熟等级	GI(24 h)	GI(72 h)	根系建成指标(株高)
含水率	1.000	0.798*	-0.697	-0.288	-0.167	-0.126	-0.243
C/N	0.798*	1.000	-0.301	-0.735*	-0.350	-0.392	-0.666
腐植酸	-0.697	-0.301	1.000	-0.255	-0.157	-0.896**	-0.329
Solvita 等级	-0.288	-0.735*	-0.255	1.000	0.715*	0.773*	0.899**
GI(24 h)	-0.167	-0.350	-0.157	0.715*	1.000	0.851**	0.715*
GI(72 h)	0.126	0.392	-0.896**	0.773*	0.851**	1.000	0.556
根系建成指标(株高)	-0.243	-0.666	-0.329	0.899**	0.715*	0.556	1.000

注:* 表示显著性水平为 0.05,即 $P<0.05$ 水平;** 表示显著性水平为 0.01,即 $P<0.01$ 水平。

表 6 畜禽粪便堆肥腐熟度评价指标体系

Table 6 Index system for evaluating the maturity of animal manure composting

类型	指标	描述	堆肥腐熟度等级		
			高	中	低
物理	温度	日常测量堆肥中心温度	在 50 ℃以上并维持 5~10 d,最终稳定在环境温度		
化学	C/N	测定堆肥 TN 和 TOC 含量	<20	20~30	>30
生物	种子发芽势	测量种子发芽数和根长(72 h)/%	>150	100~150	<100
	根系建成指标	测量植株高度/cm	>30	20~30	<20

指标,结合常规温度指标,构建了堆肥产品腐熟度评价指标体系。

(3)利用构建的指标体系对2种商品有机肥进行评价的结果表明,商品有机肥A没有达到完全熟化的程度,施入农田后可能对作物生长产生影响;而商品有机肥B则已基本熟化。

参考文献:

- [1] 汤江武, 吴逸飞, 薛智勇, 等. 畜禽固废弃物堆肥腐熟度评价指标的研究[J]. 浙江农业学报, 2003, 15(5): 293-296.
TANG Jiang-wu, WU Yi-fei, XUE Zhi-yong, et al. Study on evaluation index of maturity of livestock and poultry solid wastes[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2003, 15(5): 293-296.
- [2] He X T, Traina S J, Logan T J. Reviews and analyses; chemical properties of municipal solid waste composts[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1992(21): 318-329.
- [3] Ko H J, Kim K Y. Evaluation of maturity parameters and heavy metal contents in composts made from animal manure[J]. *Waste Management*, 2008(28): 813-820.
- [4] Bustamante M A, Paredes C, Marhuenda-Egáez F C, et al. Co-composting of distillery wastes with animal manures: Carbon and nitrogen transformations in the evaluation of compost stability[J]. *Chemosphere*, 2008(72): 551-557.
- [5] Emeterio I J. Evaluation of city refuses compost maturity: A review[J]. *Biological Wastes*, 1989(27): 115-141.
- [6] Woods End Research. Guide to Solvita testing for compost maturity index[J]. *Compost New Manual*, 2002(11): 1-8.
- [7] 吴银宝, 汪植三, 廖新倮, 等. 猪粪堆肥腐熟指标的研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2): 189-193.
WU Yin-bao, WANG Zhi-san, LIAO Xin-di, et al. Study on mature index of composting swine manure[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2003, 22(2): 189-193.
- [8] 秦莉, 李玉春, 李国学, 等. 城市生活垃圾堆肥过程中腐熟度指标及控制参数[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 189-194.
QIN Li, LI Yu-chun, LI Guo-xue, et al. Maturity indexes and operational parameters during composting municipal solid waste[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(12): 189-194.
- [9] 廖新倮, 吴银宝, 汪植三, 等. 堆体大小对猪粪堆肥影响和袋装堆肥的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 287-290.
LIAO Xin-di, WU Yin-bao, WANG Zhi-san, et al. Effects of pile size and packaging on swine manure composting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(4): 287-290.
- [10] 李吉进, 郝晋珉, 邹国元, 等. 高温堆肥碳氮循环及腐殖质变化特征研究[J]. 生态环境, 2004, 13(3): 332-334.
LI Ji-jin, HAO Jin-min, ZOU Guo-yuan, et al. Carbon and nitrogen circulation and humus characteristics of high-temperature composting[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(3): 332-334.
- [11] 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.
LI Guo-xue, ZHANG Fu-suo. Composting of solid waste and production of organic compound fertilizer [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000.
- [12] Veerapan C, Hiroshi K. Carbon/Organic nitrogen ratio in water extract as measure of composting degradation[J]. *Journal of Fermentation Technology*, 1981(59): 215-219.
- [13] Zuccconi F, Forte M, Monaco A, et al. Biological evaluation of compost maturity[J]. *Biocycle*, 1981(22): 27-29.
- [14] Zuccconi F, Monaco A, Forte M, et al. Phytotoxins during the stabilization of organic matter [C]//Gasser J K R, (ed.) Composting of agricultural and other wastes. London: Elsevier Applied Science Publishers, 1985: 73-86.
- [15] Cayuela M L, Sanchez-Monedero M A, Roig A. Evaluation of two different aeration systems for composting two-phase olive mill wastes[J]. *Process Biochemistry*, 2006(41): 616-623.