

城市污泥与稻草堆肥的腐熟度指标研究

张 桥^{1,2}, 吴启堂¹, 黄焕忠³, 周立祥⁴

(1. 华南农业大学资源环境学院 广东省农业环境保护重点实验室, 广东 广州 510642; 2. 广东省土壤肥料总站, 广东 广州 510500; 3. 香港浸会大学生物系, 香港; 4. 南京农业大学资源与环境学院, 江苏 南京 210095)

摘要: 采用翻堆方式将稻草与未消化城市污泥进行堆肥, 测定常见几种化学和生物参数的变化, 探讨其作为腐熟度指标的可行性。结果表明, $(C/N)_{\text{终点}}/(C/N)_{\text{起始}}$ 比值和铵态氮可作为堆肥腐熟度的指标, 当 $(C/N)_{\text{终点}}/(C/N)_{\text{起始}}$ 小于 0.6 和铵态氮浓度低于 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 堆肥基本腐熟。水溶性有机碳与水溶性铵态氮之比值也可作为堆肥腐熟度的新的复合指标, 当比值大于 9 时, 堆肥基本腐熟。挥发性固体重、 C/N 、 pH 及 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与堆肥原料有关, 只可作为参考。

关键词: 污泥; 稻草; 堆肥; 腐熟度指标

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 1672-2043(2004)04-0782-05

Maturity Indices of Co - Composting Sewage Sludge With Rice Straw

ZHANG Qiao^{1,2}, WU Qi-tang¹, HUANG Huan-zhong³, ZHOU Li-xiang⁴

(1. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Key Laboratory of Agricultural Environment Protection of Guangdong, Guangzhou 510642, China; 2. Soil and Fertilizer Center of Guangdong, Guangzhou 510500, China; 3. Department of Biology, Hong Kong Baptist University, Kowloon Tang, Hong Kong, China; 4. College of Natural Resources and Environment, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Composting is one of the most employed methods to treat the sewage sludge before it is recycled in agriculture, but un-matured compost is harmful to the plants, therefore it is important to find a appropriate maturity index to evaluate the maturity of the composting products. Plant test is the final and the most persuadable mode to do that, but it takes too long time to complete it. Conventional chemical and biological parameters were determined to select some convenient indices indicating the compost maturity during co - composting of non - digested sewage sludge with rice straw. The composting was carried out through turning pile mechanically and the composting product was regularly sampled. Volatile solid, pH , total N, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, total C and soluble - C were compared using seed germination index of cress. The compost did not mature until 56 days and after 70 days, and the seed germination index reached 190%, which implied the compost stimulated significantly the plant root elongation. Volatile solid, total - C and C/N decreased continuously during the composting. The decrease of total - N continued 7 days and then increased. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ and soluble - C reached a peak and then decreased continuously. $(C/N)_{\text{final}}/(C/N)_{\text{initial}}$ and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ could be considered as maturity indices, and when $(C/N)_{\text{final}}/(C/N)_{\text{initial}}$ was lower than 0.6 and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ less than $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ the compost matured. The ratio of soluble - C / $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ also might be a new index for the maturity and when it was higher than 9 the matured compost. Volatile solids, C/N , pH , and $\text{NO}_3^- - \text{N}$, which depended much on the composition of raw material, should only be regarded as additional references.

Keywords: sewage sludge; rice straw; composting; maturity indices

堆肥广泛应用于污泥农用处理上^[1], 堆肥产物的腐熟程度影响其使用效果。未经处理的有机废物和未

腐熟的堆肥会提高土壤中微生物的活性, 在一定程度上引起氮的缺乏, 形成厌氧环境及产生氨和某些低分子量有机酸, 从而抑制作物种子发芽和幼苗根系生长^[2], 亦会产生臭味^[3]。因此, 近年来, 堆肥腐熟度的评估方法, 一直是堆肥研究的重要课题。

堆肥通常应用于作物生产, 因此植物试验是评价

收稿日期: 2003 - 10 - 26

基金项目: 广东省自然科学基金(021007)、美国 Rockefeller Brothers

Fund、广州市建委以及广东省农业环境保护重点实验室基金

作者简介: 张 桥(1972—), 男, 博士。

堆肥腐熟度的最终和最具说服力的方法^[4]。本研究利用城市污泥与稻草进行堆肥,以种子发芽指数作为判断堆肥腐熟的指标,通过测定堆肥过程中种子发芽指数及相关化学指标变化,以判断堆肥是否腐熟,探索评价堆肥腐熟度的指标。

1 材料与方法

1.1 供试材料

城市污泥于 2000 年 2 月采自广州市大坦沙污水处理厂,为未消化脱水污泥,其含水量为 79%,有机碳含量 $291 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量 $38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,C/N 为 7.6;稻草作为调理剂,购自广州市花都区,切成约 3 cm 长,其含水量为 13%,有机碳含量 $467 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量 $7.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,C/N 为 60.5。

1.2 试验设计

设定堆肥 C/N 为 20/1,污泥用量为 2 200 kg,稻草用量为 500 kg,体积为 7.5 m^3 。采用人工翻堆方式堆肥,每堆插 3 支温度计(插至堆体中部),早上 8:30 记录温度,当温度高于 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,2~3 d 翻一次,温度低于 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 后,每隔 5 d 翻一次。堆肥过程中定期采样备测各指标。采样后即测定种子发芽指数,以确定堆肥是否腐熟,当种子发芽指数达到 50% 以上时,认为堆肥已腐熟^[5],结束堆肥。

1.3 测定项目

参照《土壤分析方法》^[6]对堆肥样品进行挥发性固体重、有机碳和全氮的测定;参照《水和废水监测分析方法》^[7]对堆肥浸提液进行水溶性有机碳、水溶性全氮、水溶性有机氮、铵态氮和硝态氮的测定。堆肥浸提液的浸提方法为:测定水分后,根据水分含量计算并称取相当于 10.00 g 干样的湿样,装入体积 500 mL 的塑料瓶中,加入 100 mL 蒸馏水,在往复振荡机上振荡 1 h ($150 \text{ 次} \cdot \text{min}^{-1}$),再用离心机以 $8\,600 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速率离心 20 min ,然后用慢速滤纸过滤。取部分滤液进行水芹 (*Lepidium sativum*, L.) 种子发芽试验,种子发芽指数按如下公式计算^[8]:

$$\text{种子发芽指数} = (\text{堆肥浸提液种子发芽率} \times \text{根长}) / (\text{蒸馏水种子发芽率} \times \text{根长})$$

2 结果与讨论

2.1 温度

从堆肥过程中温度的变化趋势图可以看出(图 1),堆肥经历了两个阶段:第一阶段的高温快速分解阶段(从第 3 d 到第 26 d)和第二阶段的熟化阶段(第

26 d 之后)^[9,10]。到第 3 d,堆肥温度达 $55 \text{ }^\circ\text{C}$,之后最高温度为 $73 \text{ }^\circ\text{C}$,维持 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上高温的时间有 20 多天。有人认为^[11-13],堆肥过程中温度应控制在 $45 \text{ }^\circ\text{C} \sim 65 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间,在 $55 \text{ }^\circ\text{C} \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间比较好。温度过低,杀不死病原菌;温度过高,又会抑制微生物的生长。本次堆肥中最高温度达 $73 \text{ }^\circ\text{C}$,维持 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右的高温时间为 8 d。因此,本次污泥与稻草堆肥的翻堆频率,高温阶段堆肥温度过高,需增加翻堆次数来散热以维持适宜温度。

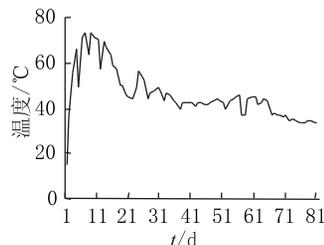


图 1 堆肥温度变化

Figure 1 Change of the temperature during composting

2.2 种子发芽指数

根据试验结果所计算的种子发芽指数在堆肥的 42 d 内均为 0(图 2),到第 56 d 时,达到 53%,符合意大利有关堆肥腐熟标准的要求^[5],说明到此时,堆肥已腐熟;到 70 d 时,种子发芽指数达 190%,说明完全腐熟的堆肥,对于根系的生长,不但无抑制作用,还起到了一定的促进作用,这与前人的研究结果相吻合^[5,8,14]。

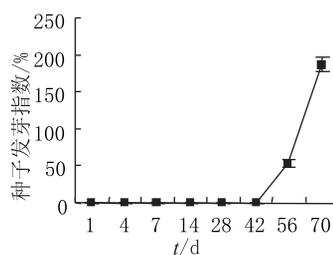


图 2 堆肥种子发芽指数变化

Figure 2 Change of seed germination index

2.3 挥发性固体重

由于堆肥过程中有机物的不断降解,堆肥样品的挥发性固体重不断下降(表 1),由堆肥开始时的 73% 降至堆肥结束时的 49% 左右,下降率为 33%。根据美国科罗拉多州健康标准局的要求,挥发性固体经堆肥后必须降解 38% 以上,产品中挥发性固体含量应低于 65%^[15]。本试验在堆肥结束时,堆肥的挥发性固体含量与挥发性固体降解率与罗拉多州的标准基本一致。

表 1 堆肥过程中部分化学指标的变化趋势
Table 1 Changes of some chemical indices during composting

指标	堆肥时间/d							
	1	4	7	14	28	42	56	70
挥发性固体重/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	727.0 (8.2)	743.6 (4.5)	698.5 (7.7)	662.4 (16.5)	586.8 (2.5)	564.3 (14.7)	522.2 (1.6)	493.4 (2.1)
有机碳/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	431 (2)	426 (12)	409 (20)	364 (8)	355 (2)	318 (3)	303 (3)	281 (1)
全氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	21.57 (1.30)	20.85 (0.94)	19.67 (0.45)	21.37 (0.28)	22.19 (0.16)	23.45 (0.28)	23.93 (0.18)	23.75 (0.26)
碳氮比	20.15 (1.30)	20.46 (0.54)	20.81 (0.77)	17.04 (0.58)	16.02 (0.10)	13.58 (0.07)	12.65 (0.15)	11.82 (0.15)
铵态氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	2 536 (92)	8 618 (351)	10 116 (362)	8 591 (1 107)	7 540 (493)	2 310 (392)	452 (50)	82 (3)
硝态氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	702 (27)	2 319 (60)	3 360 (111)	2 268 (69)	4 108 (418)	2 062 (175)	1 544 (59)	765 (74)
水溶性有机碳/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	939.6 (140.0)	3 992.7 (503.8)	4 723.7 (49.1)	4 861.0 (135.9)	5 298.7 (288.1)	4 373.0 (303.8)	3 150.7 (35.2)	1 798.3 (146.8)
pH	7.79 (0.08)	8.01 (0.06)	8.23 (0.05)	7.93 (0.06)	8.26 (0.05)	8.32 (0.04)	7.47 (0.03)	6.95 (0.03)

注:表中各行数据为3次重复平均数,括号内数据为该数据上一行数据的标准误差。

2.4 有机碳

堆肥过程中有机碳的变化呈不断下降的趋势(表1)。从开始时的43%降至结束时的28%,下降率为35%。这是由于有机质的分解引起碳的挥发损失,从而使有机碳含量不断下降。

2.5 全氮

堆肥后的前几天,氮挥发损失量大,故其含量下降;第7d后全氮含量一直上升,堆肥结束时全氮含量比初始时上升了10%。与堆肥体积及堆肥重量的减少相比,氮上升的幅度较小,因此必然存在氮的损失(表1)。氮的损失主要是由于氨的挥发引起,因此堆肥过程中应采取措施防止氨的挥发损失,以得到养分含量较高的有机肥料。

2.6 C/N

堆肥过程中C/N比不断下降,由堆肥开始时的20/1下降到堆肥结束时的11.8/1(表2)。对于C/N比为30/1条件下的堆肥,通常把固相C/N比作为堆肥的腐熟度指标,当C/N降至20以下时,认为堆肥达到腐熟^[16,17]。但对一些原料(如污泥)来说,其本身的C/N较低,一般不到10/1,此时这一指标就不适合作为腐熟度参数^[18]。为此,Morel等^[8]建议采用 $T = (C/N)_{\text{终点}} / (C/N)_{\text{起点}}$,并认为当 T 小于0.6时,堆肥达到腐熟。本次堆肥由于用污泥作为原料,污泥的C/N约为7.5/1,用稻草将堆料C/N调为20/1,因此不能以20/1作为衡量堆肥腐熟的指标。根据种子发芽

指数试验,本次堆肥到56d时达腐熟,此时的C/N为12.6,计算所得 T 值为0.63,这与Morel等人所建议的 T 值基本一致。因此,可认为 T 值能较好地反应堆肥的腐程程度,可作为堆肥的腐熟度指标,当 T 值接近或小于0.6时,堆肥基本腐熟。

2.7 铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)

堆肥过程中铵态氮在堆肥后的7d内含量不断上升,由开始时的2 538 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,上升至第7d时的最高值10 116 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;之后含量急剧下降,堆肥结束时仅为82 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。硝态氮在堆肥后前28d内含量上升,由开始时的2 536 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,上升至28d时的最大值4 108 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;之后含量一直下降,堆肥结束时含量为765 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表1)。

Riffaldi^[20]等认为堆肥过程中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的减少和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的增加可以作为腐熟的参数,但因这两个指标受堆肥原料及堆肥条件影响显著,故并未提出定量的数据作为堆肥腐熟的指标。Zucconi^[3]等提出腐熟的堆肥中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度低于400 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。本试验到56d时,根据种子发芽指数表明堆肥已腐熟,此时 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的浓度452 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,这与Zucconi的结果基本一致。可见, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量能较好地反应堆肥腐熟程度,当 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 含量低于400 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,堆肥基本腐熟。

2.8 水溶性有机碳

水溶性有机碳的含量在堆肥后的28d内不断上

升, 28 d 时达到最大值 $5\ 299\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 随后含量一直下降, 堆肥结束时含量为 $1\ 798\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 1)。

堆肥后水溶性有机碳含量的上升是由有机质分解引起; 28 d 后由于分解产生的水溶性有机碳减少, 而此时腐殖化作用较快, 从而使水溶性有机碳的含量开始下降。

2.9 水溶性有机碳与水溶性铵态氮之比

对比堆肥中水溶性有机碳与水溶性铵态氮之比的变化趋势 (图 3) 与种子发芽指数的变化趋势 (图 2), 发现两个指标的变化趋势高度吻合。但至今未见有将水溶性有机碳与水溶性铵态氮之比值作为堆肥腐熟度指标的报道。

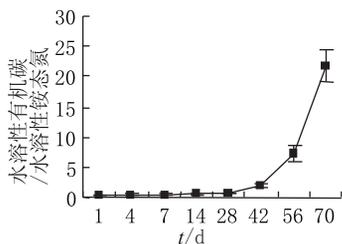


图 3 水溶性有机碳与水溶性铵态氮比变化趋势

Figure 3 Change of the ratio of soluble organic carbon to soluble ammonia

对水溶性有机碳与水溶性铵态氮之比值变化趋势与种子发芽指数变化趋势这两个指标进行相关分析。结果表明, 两个指标的相关系数为 0.99, 呈极显著的正相关。当种子发芽指数为 50%, 计算出水溶性有机碳与水溶性铵态氮比值为 9.09。从相关分析可以看出, 水溶性有机碳与水溶性铵态氮较好地反映了堆肥的腐熟程度, 建议将其作为堆肥腐熟度的新指标, 当其值大于 9 时, 说明堆肥已腐熟。

水溶性有机碳与水溶性铵态氮比值这一指标综合反映了堆肥腐熟的两个指标 (水溶性有机碳和水溶性铵态氮), 是一个复合指标, 它克服了单个指标中由于受堆肥原料不同而难以准确反映堆肥腐熟度的缺陷。

2.10 pH

堆肥后 pH 在前 42 d 内上升, 由开始时的 7.79, 上升至 42 d 时的最大值 8.32; 42 d 后 pH 开始下降, 堆肥 70 d 结束时为 6.95 (表 1)。堆肥后 pH 上升变化是由于物料分解过程中产生大量的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 引起; 42 d 后 pH 下降, 是由于 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 转化为氨挥发及硝化作用使 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的含量大大降低, 从而使 pH 下降到呈中性。有研究提出, pH 值可以作为评价堆肥腐熟的一个指标^[21], 并认为腐熟的堆肥一般呈弱碱性。本次

堆肥在 56 d 堆肥达腐熟时, pH 值为 7.47, 呈弱碱性, 与前人研究相似。但有些原料组合在未堆制时 pH 即为弱碱性。

3 结论

本研究表明, 污泥与稻草堆肥过程中挥发性固体重、有机碳及 C/N 值不断下降。全氮含量前期下降, 后期上升, 但铵态氮和硝态氮在堆肥过程中先上升, 后下降。因此, 堆肥一旦腐熟不应继续堆制, 以免有效氮的损失。

$(\text{C}/\text{N})_{\text{终点}} / (\text{C}/\text{N})_{\text{起始}}$ 和铵态氮指标能较好地反映堆肥的腐熟度, 可作为污泥 - 稻草堆肥腐熟的指标。当 $(\text{C}/\text{N})_{\text{终点}} / (\text{C}/\text{N})_{\text{起始}}$ 小于 0.6 和铵态氮含量低于 $400\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 说明堆肥已腐熟。本研究发现水溶性有机碳与水溶性铵态氮比这一指标, 与种子发芽指数指标相吻合, 也可作为反映污泥 - 稻草堆肥腐熟的新指标。当这一指标值大于 9 时, 堆肥腐熟。挥发性固体重、C/N、pH、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与堆肥原料有关, 只可作为堆肥腐熟与否的参考。

参考文献:

- [1] He XT, Traina SJ. Reviews and analyses: chemical properties of municipal solid waste composts[J]. *J Environ Qual*, 1992, 21: 318 - 329.
- [2] Keeling A A, Griffiths B S, Ritz K & Myers M. Effects of compost stability on plant growth, microbiological parameters and nitrogen availability in medis containing mixed garden - waste compost[J]. *Bioresource Technology*, 1995, 54: 279 - 284.
- [3] Zucconi F, de Bertoldi M. Compost specification for the production and compost from municipal solid waste[A]. In: de Bertoldi M, Ferranti MP et al. (eds.). *Compost: Production, Quality and Use*[C]. London: Elsevier Applied Science, 1987. 30 - 50.
- [4] Tiquia SM & Tam N F Y. Elimination of phytotoxicity during co - composting of spent pig - manure sawdust litter and pig sludge[J]. *Bioresource Technology*, 1998, 65: 43 - 49.
- [5] Zucconi F, Forte M, Monaco A & De Bertoldi M. Biological evaluation of compost maturity[J]. *Biocycle*, 1981b, 22: 27 - 29.
- [6] Page AL, Miller RH and Keeney DR. *Methods of Soil Analysis, Part 2: Chemical and Microbiological Properties*[M]. 2nd ed. ASA, SSSA Publ., Madison, Wisconsin, USA, 1982.
- [7] 国家环保局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法 (第三版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997.
- [8] Zucconi F, Pera A, Forte M & De Bertoldi M. Evaluating toxicity of immature compost[J]. *Biocycle*, 1981a, 22: 54 - 57.
- [9] Haug RT. *The Practical Handbook of Compost Engineering*[M]. Lewis Publishers, 1993.
- [10] Stentiford EI, Pereira - Neto JT and Mara DD. *Low Cost Composting: Research Monographs in Tropical Public Health Engineering*. Depart-

- ment of Civil Engineering[D]. University of Leeds, 1996.
- [11] Finstein M S, Miller F C, Strom P F, et al. Composting Ecosystem Management for Waste Treatment[J]. *Biotechnology*, 1983, June: 347 - 353.
- [12] Finstein M S, Miller F C, Strom P F. Monitoring and Evaluating Composting Process Performance[J]. *Journal WPCF*, 1986, 58(4): 272 - 278.
- [13] Leton TG and Stentiford EI. Control of Aeration in Static Pile Composting[J]. *Waste Management & Research*, 1990, 8: 299 - 306.
- [14] Wang NJ. Land application of sewage in China[J]. *Sci Total Environ*, 1996, 197: 149 - 161.
- [15] Willaiam H S, Margolis Z P and Janonis B A. High altitude sludge composting[J]. *Biocycle*, 1992, August: 68 - 71.
- [16] 陈世和,张所明. 城市垃圾堆肥原理与工艺[M]. 上海:复旦大学出版社,1990.
- [17] 刘更另,全维续. 中国有机肥料[M]. 北京:农业出版社,1991.
- [18] Hirai MF, Chanyama V and Kubota H. A stand ard measurement for compost maturity[J]. *Biocycle*, 1983, November/December: 54 - 56.
- [19] Morel T L, Colin F, Germon J C, Godin, et al. Methods for the evaluation of the maturity of municipal refuse compost[A]. In *composting of Agricultural and other Wastes*. ed. JKR Gasser. Elsevier Applied Science publishers[C]. London & New York, 1985. 56 - 72.
- [20] Riffaldi R, Levi - Minzi RP, & M de Bertoldi. Evaluation of compost maturity by means of chemical and microbial analyses[J]. *Waste Management & Research*, 1986, 4: 87 - 96.
- [21] USEPA. Compost of municipal wastewater sludges. Center for Env. Research Information Office of Research and Development: EPA, 1985. 625/4 - 85/014.