

未消化城市污泥与稻草堆肥过程中的养分变化研究

张 桥¹, 吴启堂¹, 黄焕忠², 周立祥³

(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. 香港浸会大学生物系, 香港; 3. 南京农业大学资源与环境学院, 江苏 南京 210095)

摘 要: 采用静态强制通气堆和人工机械翻堆两种试验方式对城市污泥进行堆肥处理, 对堆肥过程中养分的变化规律进行了研究。结果表明, 堆肥过程中全量 P 和全量 K 含量呈线性上升, 氮由于以氨气形式挥发损失, 全氮含量的上升幅度较小。有效磷含量在堆肥前期上升, 后期则下降; 速效钾含量呈不断上升趋势; 水溶性全氮、铵态氮、硝态氮、有机氮和水溶性全磷、正磷酸盐形态磷、水溶性有机磷的含量在堆肥初期上升, 但后期下降。污泥稻草堆肥的时间以 50 d 左右为宜。

关键词: 未消化污泥; 稻草; 堆肥; 养分转化

中图分类号: X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 – 0267(2002)06 – 0489 – 04

Nutrient Transformation in Co – composting of Undigested Sewage Sludge With Rice Straw

ZHANG Qiao¹, WU Qi-tang¹, HUANG Huan-zhong², ZHOU Li-xiang³

(1. Guangdong General Station of Soil and Fertilizer, Guangzhou 510500, China; 2. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 51064, China; 3. Department of Biology, Hong Kong Baptist University, Kowloon Tang, Hong Kong; 4. College of Natural Resources and Environment, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Land utilization is an economical and popular disposal methods of sewage sludge. But proper treatment such as composting is necessary before it is applied to land. Two different composting styles including mechanic turning and forced aeration piles were studied in the experiment. The results showed that the total contents of P and K increased continuously during composting. Total N increased less than total P and K because of ammonia volatilization. Available P increased during the first period, but they decreased during later maturing period, while available K increased continuously. Water soluble total N, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ followed the similar trend than available P. It is about 50d for an appropriate composting time when composting with undigested sludge and rice straw.

Keywords: undigested sludge; rice straw; composting; nutrient transformation

据建设部 1999 年底统计, 我国已有城市污水处理厂 307 座, 城市污水的处理率为 7.8%, 干污泥产量达 $1.5 \text{ 万 t} \cdot \text{d}^{-1}$ 。根据《中华人民共和国国民经济与社会发展的“十五”计划》的要求, 到 2005 年我国城市污水的处理率要达到 40%。因此, 污泥的产量在未来几年内将成倍增长, 数量巨大。

污泥含有丰富的植物所必须的各种养分及有机质。大量研究表明, 污泥农用后可提高作物产量^[1-3]、培肥土壤及改善土壤理化性质^[4-6], 因此污泥农用被

认为是最有潜力的处置方式, 美国、英国和法国的污泥农用率分别达 62%、60% 和 60%^[7]。然而, 污泥若未经稳定后农用, 其中有机质的分解将消耗氧, 造成土壤中氧含量不足, 危害作物, 同时分解过程中产生的中间产物也可危及作物的生长^[8]。因此在污泥农用时通常应进行稳定化处理, 尽量消除其潜在危害。污泥稳定化的方式主要有消化、堆肥等。由于污泥的 C/N 比较低, 含水量较高, 因此用污泥进行堆肥时需加入适量的调理剂以调节 C/N 和水分含量。常用的调理剂有木屑、禾秆、稻壳、粪便、树叶、垃圾等。本试验以稻草作为调理剂和膨胀剂, 对未消化的城市污泥进行堆肥处理, 根据种子发芽指数判断堆肥的腐熟程

度^[9、10],探索堆肥过程中各养分指标的变化情况,以充分利用这两种有机肥源。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试污泥为广州市大坦沙污水处理厂的脱水污泥(2000 年 2 月 17 日),其基本性质为有机碳 291 g · kg⁻¹,全氮 38 g · kg⁻¹,C/N 为 7.6,含水量为 78.8%。稻草取自广州市花都区,切成约 3 cm 长,其基本性质为有机碳 467 g · kg⁻¹,全氮 7.7 g · kg⁻¹,C/N 为 60.5,含水量为 12.9%。

1.2 试验方法

堆肥试验设机械翻堆和静态强制通气堆两个处理方式。各物料用量见表 1。

表 1 污泥稻草堆肥物料用量(湿重, kg)
Table 1 Volume of raw material in co-composting of undigested sewage sludge with rice straw (wet weight, kg)

堆肥方式	污泥	稻草	木块	C/N	堆垛体积/m ³
机械翻堆	2 200	500	—	20/1	7.5
强制通气	2 200	500	270	20/1	7.5

注:“—”表示不使用该物料。

表 2 堆肥过程中全氮、全磷、全钾含量的变化(g · kg⁻¹)
Table 2 Changes of total N, total P and total K during composting (g · kg⁻¹)

时间 /d	全 N		全 P		全 K	
	机械翻堆	通气堆	机械翻堆	通气堆	机械翻堆	通气堆
0	21.57(1.30)b	21.57(1.30)c	7.30(0.35)f	7.30(0.35)e	13.26(0.43)e	13.26(0.43)e
4	20.85(0.94)bc	21.05(0.52)c	8.43(0.77)e	7.50(0.28)d	15.16(0.28)d	14.01(0.24)d
7	19.67(0.45)c	23.03(0.29)bc	8.62(0.28)e	8.64(0.41)cd	15.99(0.28)d	15.34(0.22)c
14	21.37(0.28)bc	23.05(0.62)bc	10.08(0.34)d	9.00(0.37)c	17.48(0.37)c	15.50(0.16)c
28	22.19(0.16)ab	27.42(0.78)a	11.38(0.10)c	10.91(0.51)b	20.25(0.11)b	18.81(0.50)b
42	23.45(0.28)a	27.85(0.33)a	12.79(0.25)b	11.12(0.35)b	20.87(0.26)b	20.24(0.41)a
56	23.93(0.18)a	28.55(0.75)a	13.92(0.13)a	12.06(0.50)ab	23.39(0.40)a	20.41(0.61)a
70	23.75(0.26)a	24.61(0.47)b	14.35(0.12)a	12.63(0.37)a	24.14(0.09)a	20.16(0.93)a

注:表中数据为 3 次重复的平均数,括号内数据为标准误差,同一列中有同一字母者表示差异不显著(P=0.05)。

由表 2 可见,全氮含量在堆肥过程中呈上升趋势。机械翻堆方式堆肥的全氮含量在堆肥前 7 d 内有所下降,由开始时的 21.57 g · kg⁻¹,降至第 7 d 时的 19.65 g · kg⁻¹,之后一直上升,到堆肥结束时含量为 23.75 g · kg⁻¹,比堆肥开始时的含量上升了 10%;通气堆方式堆肥的全氮含量比机械翻堆方式堆肥的全氮含量上升快,且堆肥过程中含量一直上升,堆肥开始时的全氮含量为 21.57 g · kg⁻¹,堆肥至 56 d 时含量上升至 28.55 g · kg⁻¹,70 d 时含量为 24.61 g · kg⁻¹。

全磷含量(表 2)在堆肥过程中呈线性上升。机械翻堆方式由堆肥开始时的 7.30 g · kg⁻¹,上升至堆肥 70 d 结束时的 14.35 g · kg⁻¹,上升了 96%;通气堆方

式由堆肥开始时的 7.30 g · kg⁻¹,上升至堆肥 70 d 结束时的 12.63 g · kg⁻¹,上升了 73%。

1.3 测定指标

参照 Page 等人^[11]对堆肥样品进行全氮、全磷、全钾、有效磷和速效钾的分析,参照国家环保局《水和废水监测分析方法》^[12]对堆肥浸提液进行水溶性养分指标的分析。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 次 · min⁻¹),再用离心机以 8 600 r · min⁻¹ 的速率离心 20 min,然后用慢速滤纸过滤。

2 结果与讨论

2.1 全量 N、P、K

堆肥过程中不同时期采取的样品的全氮、全磷和全钾的含量见表 2。

全钾含量的变化趋势与全磷含量的变化趋势相类似(表 2)。机械翻堆方式由堆肥开始时的 13.26 g · kg⁻¹,上升至结束时的 24.14 g · kg⁻¹,上升了 82%;通气堆方式由堆肥开始时的 13.26 g · kg⁻¹,上升至结束时的 20.16 g · kg⁻¹,上升了 52%。

堆肥过程中由于有机质的分解,堆体体积和堆料重量不断减少,若养分不损失,则养分被浓缩,其含量将不断上升,且有机质分解越快,则养分含量上升得越快。本试验中全磷和全钾的含量呈线性上升,这是由于磷和钾在堆肥过程中未损失,被浓缩;机械翻堆

方式堆肥全磷和全钾的含量一直比通气堆方式堆肥的含量高,这是由于机械翻堆方式堆肥比通气堆方式堆肥的有机质分解快,浓缩程度高。全氮含量的变化与全磷和全钾含量的变化趋势有所不同,其含量比磷钾含量的上升程度低,这是由于堆肥过程中氮以气体的形式挥发损失,这与前人的结果相一致^[13,14]。

2.2 有效 P、速效 K

两种堆肥方式有效 P 含量在堆肥过程中都是先升高(表 3),到第 42 d 达到最大,然后急剧下降。机械翻堆方式到第 42 d 时,有效 P 含量达 1.15 g · kg⁻¹,但到堆肥 70 d 结束时,降至 0.54 g · kg⁻¹;通气堆方式到 42 d 时,有效 P 含量为 1.19 g · kg⁻¹,但堆肥结束时,降至 0.68 g · kg⁻¹。这说明堆肥腐熟后期一部分速效 P 转化为缓效 P。

速效 K 含量在堆肥过程中呈上升趋势(表 3)。机械翻堆方式速效 K 的含量由开始时的 9.19 g · kg⁻¹,增至堆肥结束时的 13.31 g · kg⁻¹,含量增加了 45%,且含量大致呈线性上升;通气堆方式到堆肥结束时,含量为 11.85 g · kg⁻¹,仅增加 13%,且在后 4 次采集

表 3 堆肥过程中有效磷和速效钾含量的变化(g · kg⁻¹)
Table 3 Changes of available P and available K during composting (g · kg⁻¹)

时间 /d	有效磷		速效钾	
	机械翻堆	通气堆	机械翻堆	通气堆
1	0.87(0.020)c	0.87(0.020)d	9.19(0.01)g	9.19(0.01)c
4	0.99(0.042)b	0.63(0.006)ef	9.43(0.12)fg	9.24(0.21)c
7	0.89(0.027)c	0.60(0.019)f	9.62(0.11)f	9.62(0.35)c
14	1.02(0.003)b	1.00(0.035)c	10.43(0.21)e	11.18(0.11)b
28	1.01(0.021)b	1.15(0.034)ab	11.65(0.10)d	12.08(0.32)ba
42	1.15(0.015)a	1.19(0.014)a	12.22(0.05)c	12.13(0.27)a
56	0.81(0.037)c	1.11(0.029)b	12.66(0.11)b	11.92(0.18)a
70	0.54(0.025)d	0.68(0.014)c	13.31(0.07)a	11.85(0.20)a

注:表中数据为 3 次重复的平均数,括号内数据为标准误差,同一列中有同一字母者表示差异不显著(P=0.05)。

表 4 堆肥过程中各水溶性氮含量的变化(g · kg⁻¹)
Table 4 Changes of each soluble N during composting (g · kg⁻¹)

时间 /d	水溶性全氮		水溶性有机氮		水溶性铵态氮		水溶性硝态氮	
	机械翻堆	通气堆	机械翻堆	通气堆	机械翻堆	通气堆	机械翻堆	通气堆
1	3.10(0.26)f	3.10(0.26)f	0.56(0.17)e	0.56(0.17)d	2.54(0.09)c	2.54(0.09)f	0.70(0.027)e	0.70(0.027)d
4	10.67(0.29)c	12.27(0.31)d	2.05(0.27)d	0.93(0.28)d	8.62(0.35)ab	11.34(0.14)b	2.32(0.059)c	1.90(0.087)c
7	12.58(0.01)ab	16.53(0.34)a	2.46(0.42)d	1.16(0.35)d	10.12(0.36)a	15.37(0.67)a	3.36(0.111)b	2.63(0.184)c
14	11.90(0.61)b	13.68(0.80)c	3.31(0.49)c	4.29(0.19)c	8.59(1.11)ab	9.38(0.78)c	2.27(0.069)c	3.47(0.374)b
28	13.14(0.58)a	15.04(0.33)b	5.60(0.09)a	7.34(0.46)b	7.54(0.49)b	7.71(0.59)d	4.11(0.418)a	5.69(0.117)a
42	7.87(0.20)d	13.34(0.12)cd	5.56(0.20)a	8.38(0.40)a	2.31(0.39)c	4.96(0.51)e	2.06(0.175)c	2.61(0.249)c
56	4.71(0.17)e	12.18(0.34)d	4.26(0.13)b	8.58(0.34)a	0.45(0.05)d	3.61(0.24)ed	1.54(0.059)d	2.51(0.234)c
70	2.40(0.22)f	7.79(0.39)e	2.28(0.22)d	5.01(0.34)c	0.11(0.03)d	2.78(0.05)f	0.77(0.074)e	2.12(0.341)c

注:表中数据为 3 次重复的平均数,括号内数据为标准误差,同一列中有同一字母者表示差异不显著(P=0.05)。

的样品间差异不大。

2.3 水溶性全 N、有机 N、NH₄⁺ - N、NO₃⁻ - N

两种堆肥方式其水溶性全 N、NH₄⁺ - N、NO₃⁻ - N、有机 N 含量的变化都是先升高(表 4),然后下降。

机械翻堆方式水溶性全 N 的含量在堆肥后的前 4d 内急剧上升(表 4),由堆肥开始时的 3.10 g · kg⁻¹ 上升至 10.67 g · kg⁻¹,上升了 2.4 倍多,至 28 d 时达到最大 13.14 g · kg⁻¹,随后一直下降,到堆肥 70 d 结束时,降至堆肥初的水平(2.40 g · kg⁻¹)。通气堆方式水溶性全 N 含量在前 4 d 内也急剧上升,由堆肥时的 3.10 g · kg⁻¹ 上升至 12.27 g · kg⁻¹,上升了 2.95 倍,至 14 d 时达到最大,含量达 16.53 g · kg⁻¹,随后一直下降,但下降速度比机械翻堆慢,到堆肥 70 d 结束时为 7.79 g · kg⁻¹。

水溶性 NH₄⁺ - N 的含量在前 7 d 内急剧上升(表 4),尤其通气堆方式到第 7 d 时,水溶性 NH₄⁺ - N 的浓度达 1.5%,随后两种堆肥方式水溶性 NH₄⁺ - N 的含量均迅速下降,其中机械翻堆方式水溶性 NH₄⁺ - N 的含量下降比通气堆方式快,到堆肥 70 d 结束时,含量为 0.11 g · kg⁻¹,而通气堆方式水溶性 NH₄⁺ - N 的含量仍有 5.01 g · kg⁻¹。

水溶性 NO₃⁻ - N 的含量在堆肥后 28 d 内一直上升(表 4),到第 28 d 时,机械翻堆方式水溶性 NO₃⁻ - N 的含量达到 4.11 g · kg⁻¹,而通气堆方式达 5.69 g · kg⁻¹,随后一直下降,到堆肥结束时,机械翻堆水溶性 NO₃⁻ - N 的含量为 0.77 g · kg⁻¹,通气堆方式水溶性 NO₃⁻ - N 的含量仍有 2.12 g · kg⁻¹。

水溶性有机 N 的含量机械翻堆在堆肥前 28 d 内上升(表 4),在 28 d 时达到最大 5.60 g · kg⁻¹,随后下降,堆肥结束时含量为 2.28 g · kg⁻¹;通气堆水溶性有机 N 的含量在堆肥前 56 d 内一直上升,最高含量达 8.58 g · kg⁻¹,70 d 时降至 5.01 g · kg⁻¹。

各形态水溶性 N 指标的 含量在堆肥前期上升是由于物料中有机氮化合物矿化分解产生的^[15], 后期各水溶性 N 指标的 含量下降, 其中NH₄⁺ - N 是由于以 NH₃ 形式挥发损失^[13, 14], 或氧化成为硝态氮, 或被微生物固定; 水溶性NO₃⁻ - N 和水溶性有机 N 含量的下降是由于腐殖化作用或被微生物固定造成的; 水溶性全量 N 含量的变化则是各形态 N 综合作用的结果。

2.4 水溶性全 P、有机 P、PO₄³⁻ - P

堆肥过程中水溶性全量 P 的含量先上升, 后下降(表 5)。其中机械翻堆方式堆肥水溶性全量磷的含量在堆肥前 42 d 内不断上升, 第 42 d 时达 1 345 mg · kg⁻¹, 随后下降, 至堆肥结束时为 689 mg · kg⁻¹; 通气堆方式水溶性全量 P 的含量是在堆肥前 28 d 内上升, 28 d 时为 1 637 mg · kg⁻¹, 随后下降, 到堆肥结束时含量为 1 108 mg · kg⁻¹。

通气堆方式堆肥过程中水溶性有机 P 的含量在前 42 d 一直增大, 达 1 270 mg · kg⁻¹, 随后下降; 但机械翻堆方式堆肥水溶性有机 P 的含量的变化趋势有所不同, 在堆肥后的前 42 d 内呈起伏式上升。

水溶性PO₄³⁻ - P 含量的变化趋势是在堆肥后的前 7 d 内下降(表 5), 随后上升。机械翻堆方式在堆肥 14 d 后达最大 (515 mg · kg⁻¹), 随后开始显著下降; 而通气方式在堆肥 28 d 后才开始显著下降。

上述各水溶性磷的含量变化是由物料矿化分解与微生物同化固定两个过程共同决定的, 当矿化分解占主导因素时, 则各水溶性磷含量上升, 当微生物同化固定的量比矿化分解产生的量大时, 则含量下降。

3 结论

堆肥过程中有机质分解, 全量 P 和全量 K 养分含量呈线性上升。氮存在以氨气形式的挥发损失, 全氮含量的上升幅度较小, 因此堆肥应注意防止氮的挥发损失。有效磷含量在前期上升, 后期下降; 速效钾含量呈上升趋势。各水溶性氮和各水溶性磷的含量在堆肥初期上升, 但后期下降。因此, 对氮、磷而言, 要使堆肥中的速效养分含量较高, 堆肥的后熟时间不宜过长。根据本试验结果, 堆肥结束的适宜时间为堆肥后 50 d 左右, 因为到此时, 全量 N、P、K 养分含量已基本稳定, 有效 P、K 养分含量较高, 各水溶性 P 含量也较高, 而各水溶性 N 中, 铵态氮含量较低, 不会对作物种子萌发和根系生长产生不良影响。

表 5 堆肥过程中水溶性磷含量的变化 (mg · kg⁻¹)

Table 5 Changes of each soluble P during composting (mg · kg⁻¹)

时间 /d	水溶性全磷		水溶性有机磷		水溶性正磷酸盐	
	机械翻堆	通气堆	机械翻堆	通气堆	机械翻堆	通气堆
1	483(26)e	483(26)d	68(5)d	68(5)d	415(21)b	415(21)b
4	897(17)c	679(35)c	667(17)c	478(27)c	230(7)c	201(9)ed
7	1 142(36)b	822(42)c	899(83)b	626(46)c	243(40)b	196(4)ed
14	1 170(99)ab	1 553(5)a	654(95)c	924(24)b	515(27)a	629(24)a
28	1 074(52)b	1 637(96)a	686(74)c	1 028(66)b	388(10)b	609(33)a
42	1 345(32)a	1 498(95)a	1 104(36)a	1 270(76)a	241(11)c	228(19)c
56	1 221(8)ab	1 247(106)b	970(7)ab	1 093(96)b	251(7)c	153(21)d
70	689(41)d	1 108(15)b	564(34)c	927(32)b	125(16)d	181(17)cd

注: 表中数据为 3 次重复的平均数, 括号内数据为标准误差, 同一列中有同一字母者表示差异不显著 (P = 0. 05)。

参考文献:

[1] 于彩虹. 城市垃圾和污泥混合堆肥对作物产量和品质的影响[J]. 农业环境保护, 1996, **15**(6): 264 - 265, 276.

[2] 李艳霞, 薛澄泽, 陈同斌. 污泥和垃圾堆肥用作林木育苗基质的研究[J]. 农村生态环境, 2000, **16**(1): 60 - 63.

[3] 周立祥, 胡霭堂, 戈乃玢, 等. 城市污泥土地利用研究[J]. 生态学报, 1999, **19**(2): 185 - 193.

[4] 常玉海. 城市污泥对土壤物理化学性质的影响[J]. 农业环境与发展, 1993, **10**(3): 25 - 27.

[5] 郭鄯兰, 米尔芳, 田若涛. 城市污泥和污泥与垃圾堆肥的农田施用对土壤性质的影响[J]. 农业环境保护, 1994, **13**(5): 204 - 209.

[6] 张天红, 等. 西安市污水污泥林地施用效果的研究[J]. 西北农业大学学报, 1994, **22**(2): 67 - 71.

[7] Smith S R. Environmental Aspects of Land Application of Biosolids. Proc. Intel. Workshop on Biosolids Management and Utilization. Nan-jing, china. 2000.

[8] 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.

[9] CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment). The CAN National Standard (CCME) /BBNQ 0413 - 200 & B. C. Waste Management Act (Reg. 334/93), 1993.

[10] Zucconi F, Forte M, Monaco A & De Bertoldi M. Biological evaluation of compost maturity[J]. *Biocycle*, 1981, 22: 27 - 29.

[11] Page A L, Miller R H, Keeney D R. Method of soil analysis, Part 2 - Chemical and microbiological properties, 2nd ed, Agronomy, No. 9, ASA, SSSA Published, Madison, Wisconsin, U S A, 1982.

[12] 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.

[13] Kirchmann H, Widen P. Separately collected organic household wastes, Chemical composition and composting characteristics[J]. *Swedish Journal of Agricultural Research*, 1994, 3: 3 - 12.

[14] Martins O, Dewes T. Loss of nitrogenous compounds during composting of animal wastes[J]. *Bioresource Technology*, 1992, 42, 103 - 111.

[15] Mahimairaja S, Bolan N S, Hedley M J, Macgregor A N. Losses and transformation of nitrogen during composting of poultry manure with different amendments: an incubation experiment[J]. *Bioresource Technology*, 1994, 47: 265 - 273.