

污泥好氧堆肥过程中有机质含量的变化

康 军^a, 张增强^b, 贾 程^a, 张学政^a

(西北农林科技大学 a. 资源环境学院, b. 理学院, 陕西 杨凌 712100)

[摘要] 【目的】研究污泥好氧堆肥过程中有机质含量的变化, 为提高污泥堆肥质量及正确评价污泥堆肥的肥效提供参考依据。【方法】以城市污泥和小麦秸秆、玉米秸秆为堆肥原料, 设置 4 个处理(处理 1 调理剂为小麦秸秆糠($d < 5$ mm), 处理 2 调理剂为小麦秸秆段($3 \text{ cm} < d < 5 \text{ cm}$), 处理 3 调理剂为玉米秸秆糠($d < 5$ mm), 处理 4 调理剂为玉米秸秆段($3 \text{ cm} < d < 5 \text{ cm}$), 进行为期 35 d 的高温好氧堆肥试验, 研究堆肥过程中堆体温度、有机质降解率及水溶性有机碳(DOC), 腐殖质(HM)及其组成和纤维素含量的变化。【结果】随着堆肥时间的延长, 4 个处理的堆体温度呈先升高后降低的变化趋势; 堆肥结束时, 处理 1~4 的有机质降解率分别为 31.30%, 27.09%, 54.87% 和 48.97%; DOC 含量呈下降趋势, 至堆肥结束时处理 1~4 的 DOC 含量分别为 9.48, 7.15, 9.10 和 11.07 g/kg; 4 个处理的腐殖质含量均先下降后升高, 之后趋于稳定, 胡敏酸与富里酸的比值(H/F)呈逐渐升高趋势, 至堆肥结束时, 处理 1~4 的 H/F 分别为 1.54, 2.21, 1.56 和 1.90; 粗纤维降解缓慢, 较难腐殖化。【结论】污泥和玉米秸秆糠混合堆肥效果最佳。H/F、水溶性有机质和温度可作为判断腐熟度的指标。

[关键词] 污泥; 堆肥; 有机碳; 水溶性有机碳; 腐殖质; 粗纤维

[中图分类号] X705

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2009)06-0118-07

Changes of organic matter content during aerobic co-composting of sewage sludge with straw

KANG Jun^a, ZHANG Zeng-qiang^b, JIA Cheng^a, ZHANG Xue-zheng^a

(a. College of Resources and Environment, b. College of Science, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】Changes of organic matter content during aerobic co-composting of sewage sludge with straw were studied to provide reference for the improvement of the efficiency and quality of the sewage sludge compost fertilizer. 【Method】Aerobic co-composting of sewage sludge mixed with wheat straw and maize straw, lasting 35 d, was carried out. Wheat straw bran ($d < 5$ mm), wheat straw chip ($3 \text{ cm} < d < 5 \text{ cm}$), maize straw bran ($d < 5$ mm) and maize straw chip ($3 \text{ cm} < d < 5 \text{ cm}$) were amendments in treatment 1~4 respectively. The following parameters were measured at different composting stages: total organic carbon (TOC), dissolved organic carbon (DOC), humic substances content (humic and fulvic acid), H/F and fiber. The role and relevance of DOC, H/F and temperature, used as parameters of compost maturity, were analyzed. 【Result】TOC decreased during composting process constantly, Dec of TOC reached 31.30%, 27.09%, 54.87% and 48.97% respectively; DOC concentration declined to 9.48, 7.15, 9.10 and 11.07 g/kg gradually; humus content didn't increase significantly; H/F, increased to 1.54, 2.21, 1.56 and 1.90 respectively in the four treatments; Fiber was degraded slowly. 【Conclusion】The results showed Maize straw bran is the best amendment in composting. H/F, temperature and dissolved organic carbon can

* [收稿日期] 2008-10-22

[基金项目] 陕西省科技攻关项目(2005K02-G05-04).

[作者简介] 康 军(1985-), 男, 陕西宝鸡人, 在读硕士, 主要从事固体废弃物资源化与处理研究。E-mail: kant123@126.com

[通信作者] 张增强(1963-), 男, 陕西扶风人, 教授, 博士生导师, 主要从事固体废物处理与环境修复研究。

E-mail: zhangzq58@126.com

be used as indicators of compost maturity.

Key words: sewage sludge; compost; organic carbon; dissolved organic carbon (DOC); HM; fiber

城市污泥是指城市生活污水、工业废水处理过程中产生的固体废弃物,污泥处理一直是市政管理中的重要问题之一^[1]。污泥中含有大量的有机质和氮、磷等植物养分,可以作为有机肥料,但污泥中也含有病原微生物、重金属和有机污染物,并且容易产生恶臭,极易造成二次污染^[2]。高温堆肥处理可以有效消灭污泥中的病原微生物、减少有机污染物、钝化重金属、减轻恶臭,防止二次污染,并可以获得富含有机质的有机肥料^[3]。堆肥过程中有机质的含量变化,对于评价堆肥的腐殖化程度有重要的意义^[4]。占新华等^[5]研究了城市污泥堆肥过程中水溶性有机物的理化特性,认为水溶性有机物的理化特性,可以用来表征堆肥的腐熟度,张雪英等^[6]得到了类似的结论。张雪英等^[7]研究了堆肥处理对污泥腐殖物质组成和光谱学特征的影响,认为通过分子结构分析能更科学地判断堆肥的腐熟度。目前,有关畜禽粪便

与农作物秸秆混合堆肥过程中,有机质含量的变化已有不少研究报道^[8-10],而有关城市污泥与农作物秸秆混合堆肥过程中有机质含量的变化的研究鲜见报道。为此,本研究采用静态强制鼓风堆肥系统,以城市污泥、小麦秸秆和玉米秸秆为材料,研究城市污泥与农作物秸秆混合堆肥过程中,堆体温度及总有机碳、水溶性有机碳、腐殖质和粗纤维含量等的变化规律,以期为污泥堆肥质量的提高以及正确评价污泥堆肥的肥效提供依据。

1 材料与方法

1.1 堆肥原料

脱水污泥由陕西杨凌示范区污水处理厂提供;小麦秸秆和玉米秸秆由当地农户提供。

1.2 堆肥装置

堆肥装置为静态强制通风堆肥器^[11](图1)。

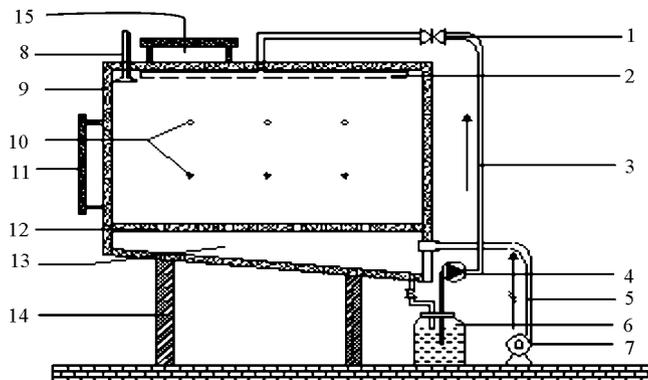


图1 试验堆肥装置示意图

1. 阀门;2. 布水孔;3. 给水管;4. 水泵;5. 通风管;6. 水桶;7. 鼓风机;8. 排气管;9. 保温层;10. 温度计插孔;
11. 出料口;12. 布气板;13. 布气室;14. 支持架;15. 进料口

Fig. 1 Schematic diagram of the in-vessel forced aerobic composting system

1. Valve;2. Bore for water distribution;3. Pipe for water supply;4. Bump;5. Pipe for air supply;6. Water barrel;
7. Air blower;8. Bore for air discharge;9. Foam Door for the sample;10. Bore for thermometer;11. Door for composting material;12. Screen;13. Bore for air distribution;14. Bracket;15. Input

该堆肥器由布水孔、布气板、通风装置等组成,有效体积约为240 L;采用鼓风的方式来补充堆肥所需的氧气,鼓风机的功率为100 W,风压为300 Pa,风量为0.055 m³/min,能满足堆肥需氧、降温、降低含水率的要求,鼓风机连接自动控制装置,工作5 min,休息35 min。

1.3 试验设计

试验设4个处理,处理1调理剂为小麦秸秆糠

($d < 5$ mm),处理2调理剂为小麦秸秆段($3 \text{ cm} < d < 5 \text{ cm}$),处理3调理剂为玉米秸秆糠($d < 5$ mm),处理4调理剂为玉米秸秆段($3 \text{ cm} < d < 5 \text{ cm}$)。根据污泥及调理剂的含水率和C/N,计算确定污泥与小麦秸秆和玉米秸秆的质量比,控制初始堆料的总含水率在58%~62%,C/N为25:1。各处理堆肥材料主要性质见表1。每处理堆制35 d,堆肥期间每天9:00,15:00和21:00分别测量堆体温度,取其

平均值作为当天的堆体温度,同时测定当天的气温。各处理分别于第 0,3,7,14,21 和 35 天在翻堆均匀后选 10 个点采样,每次采样约 2 kg。样品在 40 ℃

低温烘干,粉碎,充分研磨,过孔径为 0.16 mm 的筛,供测定用。

表 1 堆肥材料的基本性质

Table 1 Properties of raw materials used in composting

处理编号 Treatment code	原料 Raw material	含水率/% Moisture content	有机碳/(g·kg ⁻¹) Organic carbon	凯氏氮/(g·kg ⁻¹) Kjeldahl nitrogen	pH
1	污泥 Sewage sludge	83.46	355.39	35.79	7.50
	小麦秸秆糠 Wheat straw bran	8.59	506.77	7.72	—
2	污泥 Sewage sludge	75.05	388.01	31.53	7.69
	小麦秸秆段 Wheat straw chip	6.73	512.06	7.26	—
3	污泥 Sewage sludge	54.08	251.27	32.29	7.60
	玉米秸秆糠 Maize straw bran	8.99	524.78	11.68	—
4	污泥 Sewage sludge	66.20	207.08	24.82	7.75
	玉米秸秆段 Maize straw chip	17.49	500.11	14.85	—

1.4 测定项目与方法

所有测定项目均设 4 个重复。

1.4.1 有机质降解率(*Dec*)的测定 总有机碳含量采用 0.8 mol/L K₂Cr₂O₇-H₂SO₄ 外加加热法测定;灰分含量采用 550 ℃灼烧法^[12]测定。有机质降解率用以下公式^[13]计算:

$$Dec = 100 \times [(A_f - A_i) / (A_f \times (100 - C_i))] \times 100\%$$

式中: A_i 和 A_f 分别为 100 g(以干质量计)初始和最终物料中的灰分含量, C_i 为 100 g(以干质量计)初始物料中的有机碳含量。所有测定项目均设 4 个重复。

1.4.2 水溶性有机碳(DOC)含量的测定 将堆肥按 $m(\text{水}) : m(\text{堆肥}) = 10 : 1$ 的比例加水浸提,25 ℃振荡 24 h,过 0.45 μm 滤膜,用 VCPH-TOC 分析仪测定滤液中 DOC 含量。

1.4.3 腐殖质(HM)、胡敏酸(HA)和富里酸(FA)含量的测定 将堆肥样品用 0.1 mol/L Na₄P₂O₇ + 0.1 mol/L NaOH 浸提,过滤,收集滤液备用。取 2.00 mL 滤液,逐滴加入 0.5 mol/L H₂SO₄ 调节 pH 值为 7.0,沸水浴蒸发至近干,直接用 K₂Cr₂O₇ 容量法^[12]测定 HM 含量。

吸取 30.00 mL 浸提液于 250 mL 锥形瓶中,逐滴加入 0.5 mol/L H₂SO₄ 调 pH 值为 1.0~1.5,将锥形瓶置于 80 ℃水浴保温 30 min,使 HA 充分分离,用慢速滤纸过滤,用 0.05 mol/L H₂SO₄ 反复洗涤沉淀并过滤,直到滤液无色为止,沉淀即为 HA。将沉淀用 0.05 mol/L NaOH 洗涤,过滤,重复数次直到滤液无色为止,收集各次滤液于 100 mL 容量瓶中定容,测定 HA 含量,具体操作同 HM 测定。计算 FA 含量:FA 含量=HM 含量-HA 含量。

1.4.4 粗纤维含量的测定 粗纤维采用酸性洗涤

剂法(ADF)^[14]测定。

2 结果与分析

2.1 污泥好氧堆肥过程中温度的变化

温度是堆肥效果的重要评价参数,堆体的温度变化反映了堆体内微生物活性的变化,堆体温度升高是微生物代谢产热累积的结果,反过来又决定了微生物的代谢活性^[15]。在堆肥进程中,可将堆体温度变化划分为升温期、高温期、降温期 3 个阶段^[16]。一般认为,堆体温度在 55 ℃条件下保持 3 d 以上,可以杀灭堆料中所含病原菌,满足堆肥卫生学指标和腐熟的要求^[17]。由图 2 可知,堆肥开始 1 d 后,随着微生物代谢活性的增强及其大量繁殖,4 个处理堆体的温度均迅速上升,达最高温度维持一段时间,之后逐渐降低。处理 1 堆体温度可升至 60 ℃以上,并且可维持 10 d 左右;处理 2 由于秸秆粒径大,堆体空隙率较大,热量容易散失,堆体温度较处理 1 低,且高温期也较短;处理 3 堆体温度上升较快,在 55 ℃以上可维持 6 d 左右;处理 4 高温期较其他 3 个处理短,这是因为秸秆粒径过大,不易保温所致。4 个处理堆肥均达到无害化标准^[18]。结果表明,用玉米秸秆作为调理剂更有利于堆体升温,这是由于玉米秸秆中易降解的纤维素含量较高,微生物容易利用^[19]。

2.2 污泥好氧堆肥过程中有机质降解率的变化

有机质是微生物赖以生存和繁殖的基本条件,因此有机质在堆肥过程中的变化,可在一定程度上反映堆肥的进程,有机质的降解率可用来判断堆肥的腐熟度^[20-21]。由图 3 可见,污泥经过好氧高温堆肥处理,大量有机质在微生物的作用下被分解,4 个处理的有机质降解率随堆肥时间的延长而增大。35

d时,处理1因秸秆粒径较小,比表面积大,有利于微生物利用,高温期维持较长,其有机质降解率较处理2高;处理3和处理4有机质降解率较处理1和处理2高,这是由于处理3和处理4均采用玉米秸

秆作为调理剂,其含有大量较易降解的纤维素,有利于微生物利用。表明用纤维素含量高的玉米秸秆糠堆肥效果最好,有机质降解率最高,有利于堆肥减量化。

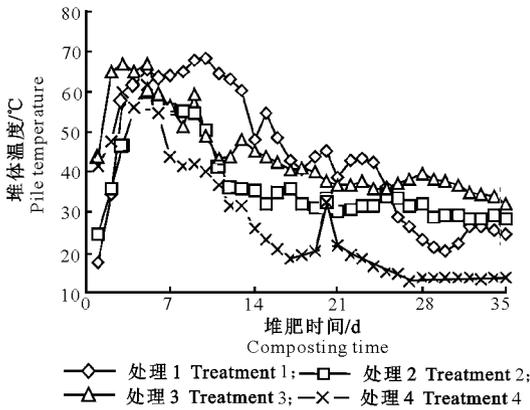


图2 污泥好氧堆肥过程中不同处理堆体温度的变化

Fig. 2 Changes of pile temperature of each treatment during aerobic sewage sludge composting

2.3 污泥好氧堆肥过程中水溶性有机碳含量的变化

在堆肥过程中,微生物不能直接利用物料中的固相成分,需要通过其分泌的胞外酶将物料中的可降解成分水解成水溶性成分后,才能加以利用^[22]。污泥堆肥过程中,水溶性有机物的变化较固相组分更能灵敏地反映堆肥的腐熟状况,因此很多学者通过研究物料浸提液中 DOC 的含量,来判断堆肥的腐熟度^[23-24]。图4表明,随着堆肥时间延长,4个处理的 DOC 含量均逐渐降低,与 Said-Pullicino 等^[23]和占新华等^[5]的研究结果一致。这可能是由于微生物代谢主要集中在液相,DOC 被优先利用,微生物胞外酶溶解固相有机物的速率小于液相 DOC 的分解速率,故水溶性有机碳在整个堆肥过程中呈下降趋势。堆肥结束时(35 d),处理1~4的 DOC 含量分别为9.48,7.15,9.10和11.07 g/kg,均低于 Bernal 等^[22]提出的堆肥腐熟指标(DOC < 17 g/kg),表明堆肥已完全腐熟。

2.4 污泥好氧堆肥过程中的 HM 含量及其组成的变化

由图5和图6可见,在污泥堆肥初期(0~3 d),4个处理的 HM 含量均减少;3~7 d HA 含量均增加,7 d后 HA 含量变化幅度较小,这可能是部分腐殖酸被微生物矿化,新形成的腐殖酸量和被矿化腐殖酸量相当,导致腐殖酸含量变化较小。在堆肥过

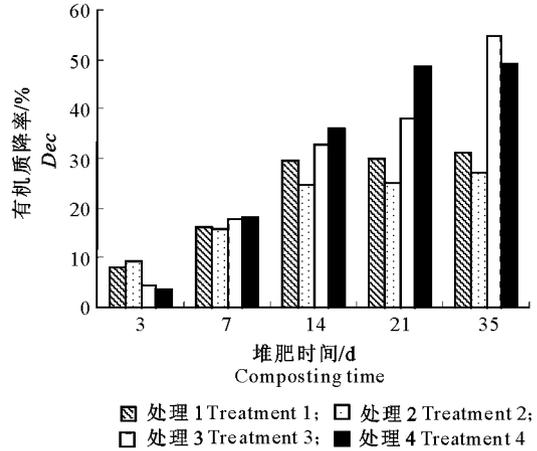


图3 污泥好氧堆肥过程中不同处理有机质降解率的变化

Fig. 3 Dec of organic carbon of each treatment during aerobic sewage sludge composting

程中,随着堆肥时间的延长,4个处理的 HA 含量和 FA 含量的比值(H/F)总体上呈增加趋势,在堆肥结束时,处理1~4的 H/F 分别达到1.54,2.21,1.56和1.90。由图6可知,4个处理的 HA 含量均呈上升趋势,FA 含量均呈下降趋势。表明在污泥堆肥中,HM 含量与原料初始性质关系密切,堆肥初始处理2和3的 HM 含量较处理1和4高,故其最终的 HM 含量也较处理1和处理4高。这与周少奇等^[25]和 Chefetz 等^[26]的研究结果一致,但与高伟等^[8]和 Inbar 等^[27]用畜禽粪便堆肥后 HM 含量大幅度升高的结果有一定差异。说明用腐殖酸作为判断腐熟度的指标具有一定的局限性。

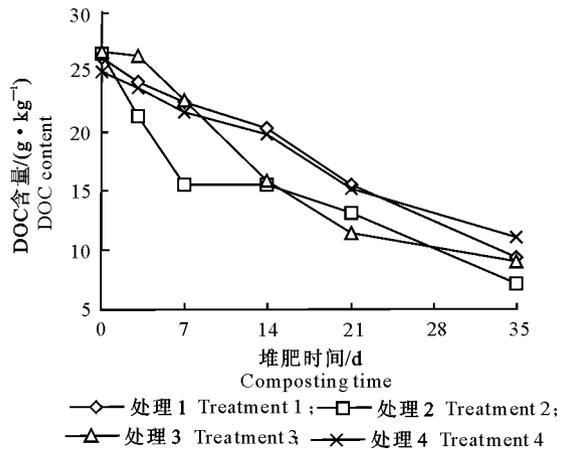


图4 污泥好氧堆肥过程中不同处理 DOC 含量的变化

Fig. 4 Changes of DOC content of each treatment during aerobic sewage sludge composting

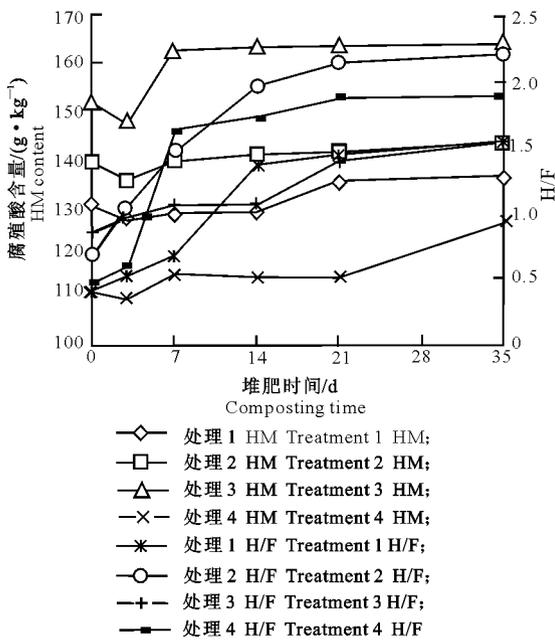


图 5 污泥好氧堆肥过程中不同处理 HM 含量和 H/F 的变化

Fig. 5 Changes of HM and H/F of each treatment during aerobic sewage sludge composting

2.5 污泥好氧堆肥过程中粗纤维含量的变化

秸秆富含有机质和农作物生长所需的营养元素,可以作为堆肥原料用于生产有机肥,这种方式与将秸秆粉碎后直接还田相比,可大大缩短秸秆在土壤中的解降时间^[28]。尽管许多微生物能分解单独存在的纤维素,但由于在细胞壁中纤维素受木质素的保护,而木质素有完整而坚硬的外壳,不易被微生物降解。因此,纤维素的分解受到限制,在整个堆肥过程中粗纤维降解缓慢,主要集中在高温期^[19]。

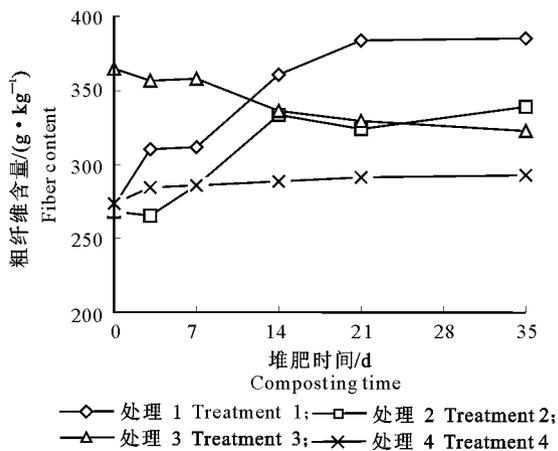


图 7 污泥好氧堆肥过程中不同处理粗纤维含量的变化

Fig. 7 Changes of fiber content of each treatment during aerobic sewage sludge composting

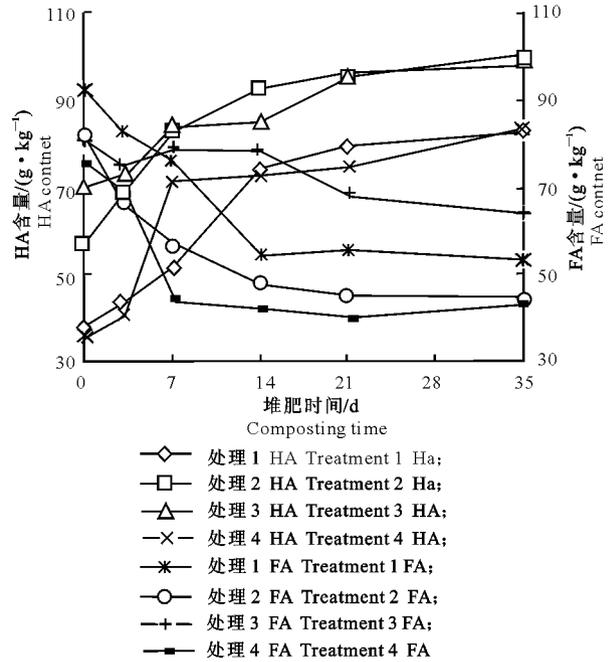


图 6 污泥好氧堆肥过程中不同处理 HA 和 FA 含量的变化

Fig. 6 Changes of HA and FA content of each treatment during aerobic sewage sludge composting

由图 7 可知,在整个堆肥过程中,4 个处理粗纤维降解极其缓慢,其中处理 1、处理 2 和处理 4 粗纤维含量从开始的 271.48,268.36 和 273.79 g/kg 分别增加到 385.39,338.96 和 292.98 g/kg,这与 Jouraiphy 等^[13]的研究结果相似,说明在短时间内秸秆很难被腐殖化,这严重地影响堆肥的质量;处理 3 污泥初始 C/N 较低,由于添加较多的调理剂,且其玉米秸秆纤维素含量较高,易于被微生物降解,故其粗纤维含量略微下降,从处理开始时的 364.43 g/kg 降低到堆肥 35 d 时的 322.96 g/kg。表明用玉米秸秆糠作调理剂堆肥效果最佳。

3 结论

1) 在污泥好氧堆肥过程中,有机质分解主要集中在升温期和高温期,降解率达 30% 以上。

2) 用 DOC 和温度变化作为判断堆肥腐熟指标,具有很好的一致性,适用于污泥堆肥。

3) HM 含量变化不明显,但 HA 和 FA 分别呈显著增加和减少趋势,处理 1~4 的 H/F 分别增加为 1.54,2.21,1.56 和 1.90,可见用腐殖酸含量变化判断腐熟度有一定的局限性。

4) 采用富含纤维素的玉米秸秆粉末作为调理剂,有利于堆体升温 and 减量化,提高堆肥质量。因

此,在添加碳源调节堆肥 C/N 时,更应关注有效碳源,减少粗纤维含量,以提高堆肥质量。

[参考文献]

- [1] 陈 玲,赵建夫,李宇庆,等.城市污水厂污泥快速好氧堆肥技术研究[J].环境科学,2005,26(5):192-195.
Chen L,Zhao J F,Li Y Q,et al. Rapid and high-efficient composting process of municipal sewage sludge [J]. Environment Science, 2005, 26(5):192-195. (in Chinese)
- [2] Nasr F. Treatment and reuse of sewage sludge [J]. The Environmentalist, 1997, 17:109-113.
- [3] Hernandez T, Masciandaro G, Moreno J I, et al. Changes in organic matter composition during composting of two digested sewage sludges [J]. Waste Management, 2006, 26:1370-1376.
- [4] Li G X, Zhang F S, Sun Y, et al. Chemical evaluation of sewage sludge composting as a mature indicator for composting process [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2001, 32:333-345.
- [5] 占新华,周立祥,黄焕忠.城市污泥堆肥中水溶性有机物的理化特性变化[J].中国环境科学,2003,23(4):390-394.
Zhan X H, Zhou L X, Huang H Z. The changes of physico-chemical character of dissolved organic matter in composting of municipal sludge [J]. China Environmental Science, 2003, 23(4):390-394. (in Chinese)
- [6] 张雪英,张宇峰.污泥堆肥前后水溶性有机物的性质变化研究[J].农业环境科学学报,2008,27(4):1667-1671.
Zhang X Y, Zhang Y F. The changes of physico-chemical character of dissolved organic matter in sewage sludge before and after composting [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(4):1667-1671. (in Chinese)
- [7] 张雪英,黄焕忠,周立祥.堆肥处理对污泥腐殖物质组成和光谱学特征的影响[J].环境化学,2004,23(1):96-101.
Zhang X Y, Huang H Z, Zhou L X. The changes of fractionation and spectroscopic characterization of humic substances before and after sewage sludge composting [J]. Environmental Chemistry, 2004, 23(1):96-101. (in Chinese)
- [8] 高 伟,郑国砥,高 定,等.堆肥处理过程中猪粪有机物的动态变化特征[J].环境科学,2006,27(5):986-990.
Gao W, Zheng G D, Gao D, et al. Transformation of organic matter during thermophilic composting of pig manure [J]. Environment Science, 2006, 27(5):986-990. (in Chinese)
- [9] 杨国义,夏钟文,李芳柏,等.不同通风方式对猪粪高温堆肥氮素和碳素变化的影响[J].农业环境科学学报,2003,22(4):463-467.
Yang G Y, Xia Z W, Li F B, et al. Transformation of nitrogen and carbon during pig manure composting under different aeration modes at high-temperature [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2003, 22(4):463-467. (in Chinese)
- [10] Huang G F, Wu Q T, Wong J W C, et al. Transformation of organic matter during co-composting of pig manure with sawdust [J]. Bioresource Technology, 2006, 97:1834-1842.
- [11] 曾现来,张增强,张永涛.城市生活垃圾堆肥试验装置的设计[J].环境污染治理技术与设备,2006,7(10):109-112.
Zeng X L, Zhang Z Q, Zhang Y T, et al. Design of a composting reactor for municipal solid waste composting [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2006, 7(10):109-112. (in Chinese)
- [12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,1999:30-34.
Bao S D. Agricultural chemical assay of soil [M]. 3rd Edition. Beijing: Agricultural Press, 1999:30-34. (in Chinese)
- [13] Jouraiphy A, Amir S, Gharous M E, et al. Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformation during composting of sewage sludge and green plant waste [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2005, 56: 101-108.
- [14] Soest V P J. Use of detergents in the analysis of fibrous feeds. II. A rapid method for the determination of fiber and lignin [J]. Journal of the Association of Official Agricultural Chemists, 1963, 46:829-835.
- [15] Macgregor S T, Miller F C, Psarianos K M, et al. Composting process control based on interaction between microbial heat output and temperature [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1981, 41(6):1321-1330.
- [16] 李国学,张福锁.固体废物堆肥化与有机复混肥的生产[M].北京:化学工业出版社,2000:123-137.
Li G X, Zhang F S. Composting of solid waste and product of organic-chemical mixed and fermented fertilizer [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2000:123-137. (in Chinese)
- [17] 黄懿梅,安韶山,白红英,等.鸡粪与不同秸秆高温堆肥中氮素的变化特征[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2004,32(11):53-57.
Huang Y M, An S S, Bai H Y, et al. Study on the nitrogen changes during the composting of chicken manure and different straws under higher temperature [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2004, 32(11): 53-57. (in Chinese)
- [18] 中华人民共和国卫生部. GB 7959-1987 粪便无害化卫生标准[S].北京:中国标准出版社,1988.
Ministry of Health of People's Republic of China. GB 7959-1987 Sanitary standard for the non-hazardous treatment of night soil [S]. Beijing: Standards Press of China, 1988. (in Chinese)
- [19] 席北斗,刘鸿亮,白庆中,等.堆肥中纤维素和木质素的生物降解研究现状[J].环境污染治理技术与设备,2002,3(3):19-23.
Xi B D, Liu H L, Bai Q Z, et al. Study on current status of lignin and cellulose biodegradation in composting process [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2002, 3(3):19-23. (in Chinese)
- [20] Chefetz B, Hatcher P G, Hadar Y, et al. Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste [J]. Journal of Environmental quality, 1996, 25(4):776-785.
- [21] Domeizel M, Khalil A, Prudent P. UV spectroscopy: a tool for

- monitoring humification and for proposing an index of the maturity of compost [J]. *Bioresource Technology*, 2004, 94(2): 177-184.
- [22] Bernal M P, Paredes C, Cegarra J, et al. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide-range of organic wastes [J]. *Bioresource Technology*, 1998, 63: 91-99.
- [23] Said-Pullicino D, Flora G E, Giovanni G. Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity [J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98: 1822-1831.
- [24] Chanyansak V, Kubota H. Carbon/organic nitrogen ration in water extracts as a measure of compost degradation [J]. *J Ferment Technol*, 1981, 59: 215-221.
- [25] 周少奇, 陆伟东, 林云琴. 城市污泥与有机垃圾交替式好氧厌氧堆肥化 [J]. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(9): 118-120.
- Zhou S Q, Lu W D, Lin Y Q. Alternative aerobic and anaerobic composting of municipal sewage sludge mixed with organic garbage [J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2006, 34(9): 118-120. (in Chinese)
- [26] Chefetz B, Hatcher P G, Hadar Y. Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste [J]. *Environ Qual*, 1996, 25: 776-785.
- [27] Inbar Y, Chen Y, Hadar Y. Solid state carbon-13 nuclear magnetic resonance infrared spectroscopy of composted organic matter [J]. *Soil Sci Am J*, 1989, 53: 1695-1701.
- [28] 田 旻, 柳丽芬, 张兴文, 等. 秸秆与污泥混合堆肥研究 [J]. *大连理工大学学报*, 2003, 43(6): 753-758.
- Tian Y, Liu L F, Zhang X W, et al. Study of co-composting of sewage sludge and straw biomass [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2003, 43(6): 753-758. (in Chinese)
-
- (上接第 117 页)
- [8] 马育华. 田间试验和统计方法 [M]. 北京: 农业出版社, 1995.
- Ma Y H. Field experimentation and statistic method [M]. Beijing: China Agriculture Publishing House, 1995. (in Chinese)
- [9] 崑诗松, 丁 元, 周纪芎, 等. 回归分析及试验设计 [M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1981: 297-302.
- Mao S S, Ding Y, Zhou J X, et al. Regression analysis and examination design [M]. Shanghai: Publishing Company of East China Normal University, 1981: 297-332. (in Chinese)
- [10] 唐启义, 冯明光. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- Tang Q Y, Feng M G. DPS data processing system for practical statistics [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [11] 黄土诚. 影响和提高薄荷醇含量的诸因素 [J]. *香料香精化妆品*, 1995(2): 39-43.
- Huang S C. Factors of influence and improvement on menthol contents [J]. *Flavour Fragrance Cosmetics*, 1995(2): 39-42.
- (in Chinese)
- [12] 刘 焱, 胡之璧. 植物类异戊二烯生物合成途径的调节 [J]. *植物生理通讯*, 1998, 34(1): 1-4.
- Liu D, Hu Z B. Regulation of biosynthetic pathway of isoprenoids in plants [J]. *Plant Physiology Communications*, 1998, 34(1): 1-9. (in Chinese)
- [13] 窦宏涛, 冯武焕. 薄荷优质高产栽培与加工 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2007: 26-31.
- Dou H T, Feng W H. Cultivation and processing for good quality and high yield of mint [M]. Beijing: Chinese Agriculture Publishing House, 2007: 26-31. (in Chinese)
- [14] 刘绍华. 辣薄荷在不同收割期油的质量比较 [J]. *中草药*, 1997, 28(5): 296-297.
- Liu S H. Studies on the quality of essential oil from peppermint (*Mentha piperita*) obtained at different period of harvest [J]. *China Tradit Herb Drugs*, 1997, 28(5): 296-297. (in Chinese)