

不同填充料污泥好氧堆肥的性质变化及腐熟度

李承强, 魏源送, 樊耀波*, 王敏健 (中国科学院生态环境研究中心环境水化学国家重点实验室, 北京 100085, E-mail: lichengqiang @21.cn.com)

摘要: 对脱水污泥与 4 种填充料进行了好氧堆肥试验, 温度、含水率、有机质、pH 和电导率等参数的监测表明堆肥过程能顺利进行。通过研究化学指标水溶性有机碳、 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 及生物学指标 Cress 发芽指数 GI (Germination Index) 随时间的变化规律, 发现 $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 是影响生物学参数 Cress 发芽结果的重要因素, 其含量变化与 GI 间具有较好的相关关系。本文提出 $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 作为本堆肥工艺的腐熟度评价指标, 腐熟堆肥的 $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 含量范围为 0.5 ~ 1.4 mg/g, 其变化与初始堆料有关。

关键词: 堆肥化; 腐熟度; 污泥处置

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301 (2001) 03-06-0060

The Character Changes and Maturity of Sewage Sludge Aerobic Co-composting with Various Bulking Agents

Chengqiang Li, Yuansong Wei, Yaobo Fan, Minjian Wang (SKLEAC, Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China E-mail: lichengqiang @21.cn.com)

Abstract: In Aerobic co-composting of four bulking agents and de-watered sewage sludge, the records of temperature, moisture, organic matter, pH and conductivity with time showed the composting could be successfully processed. The changes of chemical parameters, water soluble organic carbon, nitrate, ammonium and biological parameter Cress Germination Index (GI) with time during the composting process were investigated. Ammonium concentration was found to be an important chemical factor affecting Cress Germination Index and had significant negative correlation with GI which could be used as a good index of compost maturity in this study. The value of ammonium which changed with the initial components in composting would be 0.5 ~ 1.4 mg/g at the end of the processes in all composts.

Key words: composting; maturity; sewage sludge disposal

腐熟度的评价与堆肥系统密切相关, 受堆肥原料、堆肥方式和所用填充料的影响。腐熟度作为衡量堆肥产品的质量指标, 多年来国内外学者进行了广泛研究, 但至今仍未取得一个合理统一的标准和方法。本文针对所选用的污泥好氧发酵仓式堆肥系统, 研究了温度、含水率、有机质、pH、电导率、水溶性有机碳 (Water Soluble Organic Carbon, WSOC)、 $\text{NO}_3^- \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 及生物学指标 Cress 发芽指数 GI 在堆肥过程中的变化情况, 探讨污泥与不同填充料好氧堆肥的腐熟度评价问题, 以了解本堆肥工艺参数和堆料性质的变化规律及为污泥堆肥腐熟度评价提供合适的评价指标。

1 材料和方法

1.1 试验装置

本试验采用时间-温度联合控制污泥好氧堆肥系统, 试验装置如图 1 所示。

1.2 试验材料

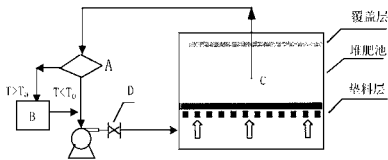
(1) 污泥 采自北京市朝阳区方庄污水厂的脱水污泥, 该厂所处理的污水主要为生活污水, 因此脱水污泥的有机质含量较高。经测定, 含水率 80 % ~ 85 %, pH 中性, 有机质含量在 45 % 以上。

(2) 填充料 本试验选 4 种填充料: 木片 (北京市木材厂的下脚料)、麦壳、玉米芯和稻壳 (北京近郊农村的农业废弃物)。

基金项目: 国家“九五”重点科技攻关项目 (96-909-01-05)
作者简介: 李承强 (1974 ~), 男, 贵州贵阳人, 硕士, 主要研究方向为城市污水处理技术。

收稿日期: 2000-11-25

* 通讯联系人



A. 温度控制器 B. 时间继电器 C. 温度传感器 D. 阀门

图 1 污泥堆肥试验装置示意图

Fig.1 Test equipment of the sewage sludge aerobic co-composting

1.3 试验方法

堆肥池的容积为 4.2 m³ ,有效容积为 3.5 m³ .上堆前用填充料在通风板上垫上一层约

10cm 的垫料层以使堆体的通气均匀.各轮污泥与填充料的配比如表 1 .

将表 1 所述 4 种不同配比的堆料充分混匀后上堆,堆体表面覆盖一层约 10cm 厚的填充料,以防止堆肥过程中水分的散失和吸收堆肥过程中产生的臭气.采用时间继电器和温度反馈控制系统,分别控制离心风机为堆体进行间歇通风供氧和堆体温度不致太高,控制点温度设为 60℃.一次发酵完成后转入腐熟仓内进行熟化.堆体温度由 XS 型智能温度巡检仪自动每 6h 记录一次.

表 1 污泥与填充料的配比方案

Table 1 Ratio of the sewage sludge and bulking agent				
轮次	A	B	C	D
填充料	麦壳/回流堆肥/污泥	木片/污泥	稻壳/污泥	玉米芯/污泥
配比(V: V)	1/1/1	2/1	1/1	1/1.5
污泥 VS/ %	47.9	58.6	74.7	57.6

1.4 采样和分析

采样时间在堆肥试验的第 0、3、7、14、21、35、49 和 80d.采样点为堆肥温度控制点附近范围内,每次采样约 5kg.将采集的样品混匀,装

入干净的塑料袋中.部分新鲜样品在 4℃冰箱内保存,24h 内分析完毕;剩余样品平铺在托盘中,在风室进行风干干燥.样品各化学参数的分析方法及条件见表 2.

表 2 堆肥过程分析参数及其分析方法

Table 2 The prameters and analysis methods of aerobic co-composting process			
参数	测试条件	仪器和分析方法	样品
含水率/ %	105℃下 24h	减重(烘箱 DL109)	鲜样
有机质 VS/ %	550℃下灼烧 4h	减重(马弗炉 MFJ10T)	烘干样
pH	1:10 的水提取液	玻璃电极(pHS-3)	鲜样
EC	1:10 的水提取液	DDS-11A 型电导率仪	风干样
WSOC	1:10 的水提取液	TOCS00 分析仪	风干样
NO ₃ -N	1:10 的水提取液	离子色谱法(HITACHI)	风干样
NH ₄ ⁺ -N	10%NaCl 提取	土壤农化分析 ^[1]	鲜样

1.5 Cress 发芽实验^[2]

新鲜样品与水按 1:10(W: V) 比例混合振荡 2h,提取液在 5000r/min 下离心分离 20min,上清液经滤纸过滤后待用.把一张大小合适的滤纸放入干净无菌的 9cm 培养皿中,滤纸上整齐摆放 20 粒 Cress 种子(Lepidium sativuml.).准确吸取 3 ml 滤液于培养皿中,在 25℃ 黑暗条件下的培养箱中培养 48h .

GI(发芽指数, Germination Index) 由下式计算:

$$GI = (\%Seed\ germination) \times (\%Root\ length) / 100$$

$$\%Seed\ germination = \text{样品发芽数} / \text{对照发芽数}$$

$$\%Root\ length = \frac{\text{样品根长度}}{\text{对照根长度}} \times 100$$

2 结果与分析

2.1 堆肥过程的一般工艺参数及性质变化

(1)温度的变化 温度的变化反映了堆体内微生物活性的变化,能很好的反映堆肥过程所达到的状态.堆料中的有机质在微生物的作用下用于微生物的细胞合成,同时分解为 CO₂ 和水,在此过程中产生大量热量促使堆体温度上升.堆体温度在 55℃ 条件下保持 3d 以上

(或 50℃以上保持 5~7d),是杀灭堆料中所含的致病微生物,保证堆肥的卫生学指标合格和堆肥腐熟的重要条件^[3,4]。4 轮堆肥的温度变

化如图 2 所示,由图 2 可看出,4 种不同堆料的堆温都达到了 55℃,并保持了 3d 以上。

(2) 含水率和有机质的变化 堆肥中有机

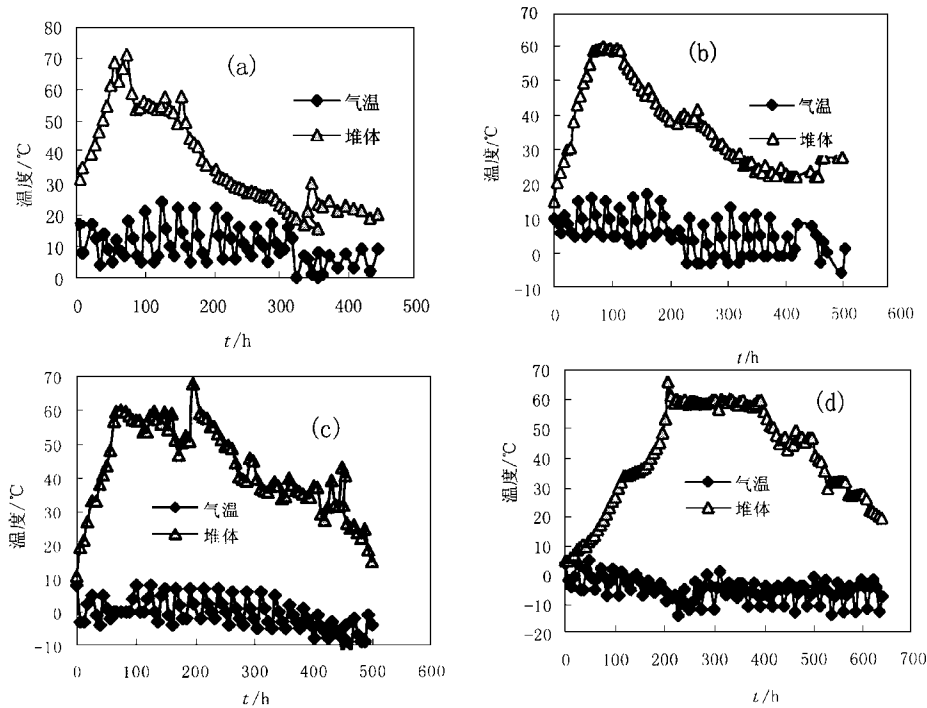


图 2 堆肥温度随时间的变化

Fig.2 Variation of the aerobic co-composting temperature with time

物的分解,微生物的生长繁殖,水是不可缺少的条件.污泥堆肥与城市垃圾堆肥在堆料水分控制方面有所不同,城市垃圾由于水分含量低而需加入水分;污泥因为含水率高而需调低水分,办法是加入含水率低的填充料如木片、煤灰、农业废弃物等.堆肥过程的含水率一方面由于有机物的氧化分解产生水分而增加,另一方面由于通风作用以水蒸气的形式挥发而降低,含水率的变化是这 2 方面因素迭加的结果.图 3 是试验所得到的 4 轮堆肥含水率变化曲线,从图中可看出,4 轮堆肥的含水率在初期为 54.1%、68.7%、73.1%和 76.1%,堆肥结束时变为 52.3%、61.3%、74.4%和 60.7%,与初始值相比,含水率分别下降了 1.8%、7.4%、-1.3%和 15.4%.前 3 轮堆肥含水率变化不明显,这可能与当时环境温度变低,堆肥过程中产水及环境对湿度的散失有不利影响有关。

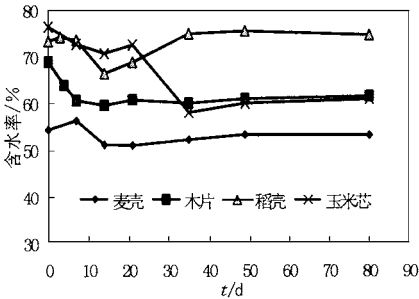


图 3 不同填料堆肥含水率随时间的变化
Fig.3 Variation of moisture efficiency in the aerobic co-composting piles added different bulking agents with time

在堆肥过程发生的生化反应中,有机质是微生物赖以生存和繁殖的重要因素.高温好氧堆肥中适合堆肥的有机质含量变化范围为 20%~80%,过高和过低都不利于堆肥过程的正常进行^[5].图 4 是本试验 4 轮堆肥 vs 的变化

曲线.从图 4 可看出,VS 一般随堆肥的进行而逐渐下降,降解主要发生在高温期,而腐熟期 VS 变化不大.堆肥结束时与堆肥初期相比,4 轮堆肥的 VS 分别下降了 3.35 %、6.16 %、9.79 %和 10.64 %.堆肥 A 的 VS 下降较小,原因是该轮试验中加入了回流堆肥,可降解的有机质较其它 3 轮试验少.

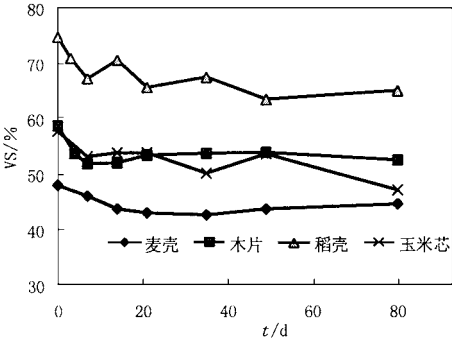


图 4 不同填料堆肥 VS 随时间的变化

Fig.4 Variation of VS in the aerobic co-composting piles added different bulking agents with time

(3) pH 和电导率 CEC 的变化 pH 值的变化是揭示堆肥进行比较直观的参数.适宜的 pH 值可使微生物有效地发挥作用,保留堆料中有效的氮成分,pH 太高和太低都会影响堆肥的效率.图 5 是本试验 4 轮堆肥 pH 的变化曲线,从图 5 中可看出,初期 pH 值随着堆肥的进行而升高,4 轮堆肥的 pH 值在高温期时分别从初始的 6.90、6.90、7.44 和 7.49、上升到 7.95、8.54、8.76 和 8.15,在腐熟期内 pH 值逐步下降,有研究指出这与 NH_4^+ 的散失有关^[6].本试验的 pH 值变化范围在 6~9 之间,在堆肥微生物的适应范围内,不必进行调整.

电导率 CEC 的大小与堆肥的含盐量有关,对于用作土壤调理剂的堆肥产品,其 CEC 不宜过大,否则会影响植物的正常生长^[7].图 6 表示了堆肥 CEC 随时间的变化情况,从图 6 中可看出,由于堆料中有机质降解,CEC 随堆肥的进行呈上升趋势,堆肥结束后各轮的 CEC 分别为 3.4、4.1、3.2 和 3.3 mS/cm,小于 Garcia 给出的腐熟堆肥的电导率值,可以安全施用^[8].

2.2 堆肥的腐熟度指标

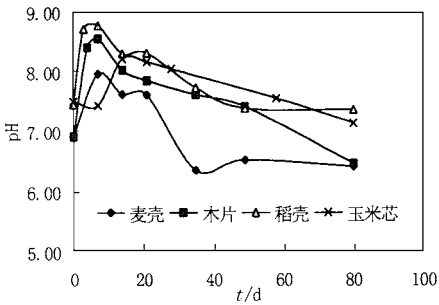


图 5 不同填料堆肥 pH 随时间的变化

Fig.5 Variation of pH in the aerobic co-composting piles added different bulking agents with time

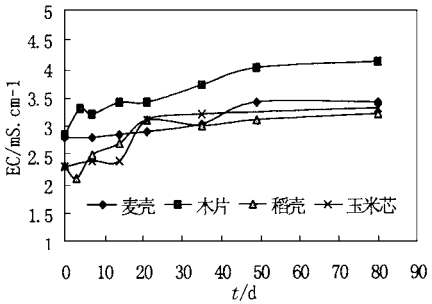


图 6 不同填料堆肥电导率随时间的变化

Fig.6 Variation of CEC in the aerobic co-composting piles added different bulking agents with time

堆肥的腐熟度评价指标可分为 3 类,物理学指标、化学指标和生物学指标,物理学指标用于描述堆肥的表观变化,简单易于现场监测,但不够准确.物理学指标用于定性描述堆肥过程所处状态,难以进行定量分析.本试验将堆肥腐熟度的物理学指标变化归纳为:堆肥后期温度自然降低,不再吸引蚊蝇及令人不快的气味;由于真菌的生长,堆肥出现白色菌丝;腐熟堆肥应是深褐色的,具有泥土的气息.化学指标则给出了堆肥变化的基本信息,考虑到腐熟度在生物学上的含义,将化学指标结合生物学指标对腐熟度进行评价是目前较为常用的方法.本文主要就 WSOC 、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和生物学指标 GI 进行了研究.碳源是微生物利用的能源,氮是微生物利用的原料营养源.研究以表示碳、氮成分的化学参数在堆肥过程中变化规律是一种比较传统的和实用的腐熟度评价方法^[9]

(1) 水溶性有机碳(WSOC)的变化 微生物

不能直接利用堆料中的固相成分,需通过微生物分泌胞外酶将堆料中的可降解成分水解为水溶性成分才能加以利用.通过研究水溶性成分随堆肥过程的变化,用以判断堆肥的腐熟度.图 7 是本试验 4 轮堆肥过程中 WSOC 的变化情况,从图中可看出,4 轮堆肥的 WSOC 随堆肥的进行,微生物大量繁殖,堆料中的有机质在胞外酶的作用下发生水解,水溶性有机碳含量升高;随后由于有机质由微生物合成自身物质及转化为 CO_2 ,WSOC 含量逐步降低.堆肥结束后,4 轮堆肥的 WSOC 含量范围为 5.8 ~ 14.4 mg/g .

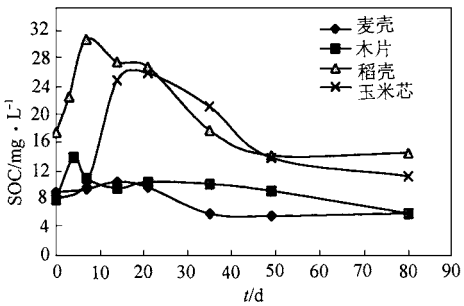


图 7 不同填料堆肥 WSOC 随时间的变化

Fig.7 Variation of WSOC in the aerobic co-composting piles added different bulking agents with time

(2) $\text{NO}_3^- \text{ - N}$ 的变化 堆肥氮素转化是微生物过程的结果,主要包括氮素的固定和释放.在堆肥初期,由于堆体温度较高,硝化细菌的活动受到抑制而使 $\text{NO}_3^- \text{ - N}$ 含量出现下降或变化不大的状况;堆肥后期,堆体温度下降,硝化细菌活性增强,堆料中的 $\text{NH}_4^+ \text{ - N}$ 等氮素成分通过硝化作用而转化为 $\text{NO}_3^- \text{ - N}$,其含量出现上升的趋势.图 8 显示了 4 轮堆肥试验中 $\text{NO}_3^- \text{ - N}$ 的变化情况.从图 8 中可看出,不同填充料堆肥的 $\text{NO}_3^- \text{ - N}$ 的变化差别较大.以木片和麦壳为填充料的堆肥,由于可供利用碳源较少,实际 C/N 值较低,在腐熟期发生了明显的硝化过程,腐熟堆肥 $\text{NO}_3^- \text{ - N}$ 含量与初期相比,分别上升了 18.7 和 5.4 倍,达到 2085 和 5189 mg/kg .

(3) $\text{NH}_4^+ \text{ - N}$ 的变化 图 9 显示了 4 轮堆肥试验 $\text{NH}_4^+ \text{ - N}$ 含量随堆肥过程的变化情况.从图 9 中可看出,4 轮堆肥的 $\text{NH}_4^+ \text{ - N}$ 变化规律是一

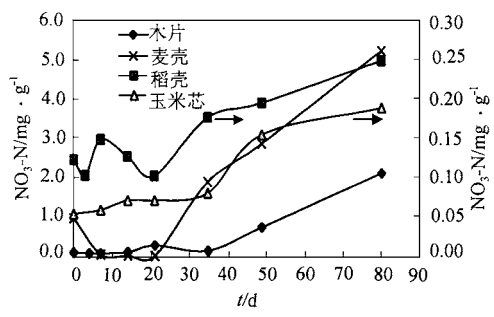


图 8 不同填料堆肥 $\text{NO}_3^- \text{ - N}$ 随时间的变化

Fig.8 Variation of $\text{NO}_3^- \text{ - N}$ in the aerobic co-composting piles added different bulking agents with time 致的.在堆肥高温期,由于含氮有机物的降解, $\text{NH}_4^+ \text{ - N}$ 大量产生,造成堆体内 $\text{NH}_4^+ \text{ - N}$ 含量增高.随着堆肥的进行,可降解氮成分减少, $\text{NH}_4^+ \text{ - N}$ 的产生量随之降低;同时, $\text{NH}_4^+ \text{ - N}$ 在堆肥腐熟期随硝化作用的明显增强转化为 $\text{NO}_3^- \text{ - N}$ 及因通风作用而挥发掉, $\text{NH}_4^+ \text{ - N}$ 含量逐步减少.

腐熟期内,各轮堆肥的 $\text{NH}_4^+ \text{ - N}$ 含量变化较小,

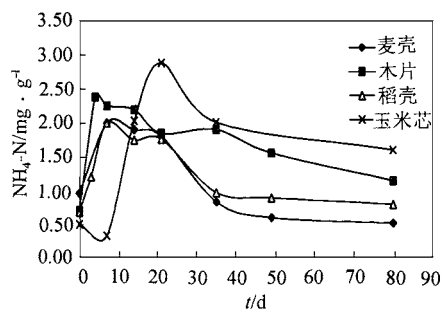


图 9 不同填料堆肥 $\text{NH}_4^+ \text{ - N}$ 随时间的变化

Fig.9 Variation of $\text{NH}_4^+ \text{ - N}$ in the aerobic co-composting piles added different bulking agents with time 趋于稳定.堆肥结束后,4 轮堆肥的 $\text{NH}_4^+ \text{ - N}$ 含量在 0.5 ~ 1.4 mg/g 的范围内.

(3) 生物学指标 用生物学的方法测定堆肥的毒性,是检验正在堆肥的有机质腐熟度的一种非常直接的和有效的方法^[10].用草种 Cress (Lepidum Sativuml.) 检测堆肥植物毒性的一个生物学指标称为发芽指数 (Germination Index, GI),GI 值不但能检测堆肥样品中的毒性,而能预测堆肥毒性的发展^[11,12].图 10 是 4 轮堆肥试

验 GI 的变化曲线.从理论上说 $GI < 100\%$,就可判断堆肥中有毒性,但一般认为当 $GI > 80\%$ 时可以判断堆肥腐熟.本试验在堆肥结束时 GI 分别达到了 85.2% 、 100.7% 、 116.8% 和 121.5% ,可以认为堆肥已经腐熟.

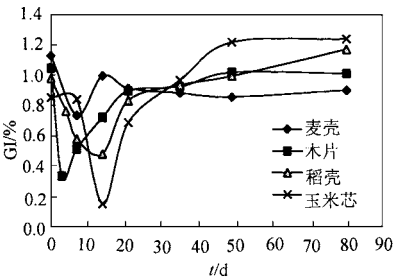


图 10 不同填料堆肥 GI 随时间的变化

Fig.10 Variation of GI in the aerobic co-composting piles added different bulking agents with time

化学参数 NH_4^+-N 是影响 Cress 发芽结果的一种植物毒性物质.根据图 11 所作的相关性分析可知, NH_4^+-N 的含量与 Cress 的 GI 间具有较好的相关性.考虑到腐熟度在化学和生物学上的含义^[10,11],将 NH_4^+-N 作为评价堆肥腐熟度是比较合理的,腐熟堆肥应该不含或含有少量的 NH_4^+-N .根据试验结果,污泥好氧堆肥过程可选择 NH_4^+-N 作为腐熟度的评价指标.其值因起始堆料的不同而表现有差异,腐熟堆肥的 NH_4^+-N 含量应在 $0.5\text{ mg/g} \sim 1.4\text{ mg/g}$ 范围内.

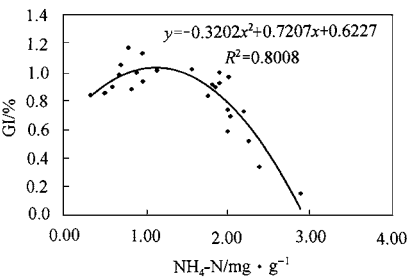


图 11 NH_4^+-N 与 GI 的相关性曲线

Fig.11 Relationship between NH_4^+-N and GI

3 结论

(1)通过对 4 种填充料麦壳、木片、稻壳、玉米芯与污泥进行好氧高温堆肥实验,在本试验条件下都可使堆肥过程正常进行,堆制出合格

的堆肥.

(2)研究了评价堆肥腐熟度指标的种子 Cress 的 GI、WSOC、 $NO_3^- - N$ 、 $NH_4^+ - N$ 等,结果表明 WSOC 在不同填充料污泥堆肥过程中的变化具有相似性,腐熟堆肥的 WSOC 在 $5.8\text{ mg/g} \sim 14.4\text{ mg/g}$ 之间,变化范围较大.不同填充料污泥堆肥的硝态氮变化差异较大,对于以麦壳和木片为填充料的污泥好氧堆肥,腐熟堆肥的硝态氮含量因硝化作用显著而大大增加,其含量分别为 2085 mg/g 和 5189 mg/g ;而以稻壳和玉米芯为填充料的污泥,腐熟堆肥的硝态氮含量增加并不显著.

(3)化学指标 $NH_4^+ - N$ 在各轮试验中的变化规律比较一致,并且与 GI 具有明显的负相关关系.考虑到腐熟度在化学和生物学上的含义,将 $NH_4^+ - N$ 推荐为本污泥堆肥系统的腐熟度评价指标,试验得到腐熟堆肥的 $NH_4^+ - N$ 含量在 $0.5\text{ mg/g} \sim 1.4\text{ mg/g}$ 范围内.

参考文献:

- 1 南京农学院编.土壤农化分析.南京:农业出版社,1985.54 ~ 57.
- 2 Tiquia S M, Tam N F. Elimination of Phytotoxicity during co-composting of spent pig-manure sawdust litter and pig sludge. Bioresource Technology, 1998, 65: 43 ~ 49.
- 3 中华人民共和国标准. 粪便无害化卫生标准. GB7959 ~ 87.
- 4 USEPA. A plain English Guide to the EPA Part 503 Biosolids Rule. EPA/8322/ R-93/003, 1994.
- 5 陈世和, 张所明. 城市垃圾堆肥原理与工艺. 上海: 复旦大学出版社, 1990. 22.
- 6 Emeterio iglesias Jimenez, Vicor Perez Garcia. Composting of domestic refuse and sewage sludge. I. Evolution of temperature, pH, C/N ratio and cation-exchange capacity. Resource, Conservation and Recycling, 1991, 6: 45 ~ 60.
- 7 Fang M, Wong J W C. Effects of lime amendment on availability of heavy metals and maturation in sewage sludge composting. Bioresource Technology, 1999, 106: 83 ~ 89.
- 8 Garcia et al. Study on water extract of sewage sludge composts. Soil Sci. Plant Nutr., 1991, 37(3): 399 ~ 408.
- 9 Yona Chen, Yoseph Inbar. Chemical and Spectroscopical Analyses of Organic Matter transformations During Composting in Relation to Compost Maturity. in: Hoitink H A, Keener H M. Science and Engineering of Composting: Design, Environmental, Microbiological, and Utilization Aspects. Renaissance Worthington, OH. Publ., 1993. 551 ~ 600.
- 10 Zucconi et al. Evaluating toxicity of immature compost. Biocycle, 1981, 22: 54 ~ 57.
- 11 Zucconi et al. Biological evaluation of compost maturity. Biocycle, 1981, 22: 27 ~ 29.
- 12 Mathur S P et al. Determination of Compost Biomaturity. I. Literature Review. Biological Agriculture and Horticulture, 1993, 10: 65 ~ 85.