

高水分蔬菜废物和花卉废物批式进料联合堆肥的中试

张相锋, 王洪涛*, 聂永丰(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要:以滇池流域典型农业废物蔬菜(西芹)和花卉废物(石竹)为原料,进行了 2 种配比的蔬菜废物和花卉废物联合堆肥的中试研究.堆肥一次发酵采用批式进料温度反馈通气量控制的静态好氧技术,发酵周期 15d.对于西芹与石竹废物各占一半的堆肥试验,在一次发酵阶段,堆体温度在 55℃ 以上保持 10d,最高温度达 65℃,可有效杀灭致病菌,堆体含水率从 64.2% 减少为 46.3%,有机质含量从 74.7% 下降到 55.6%,体积减少为原来的一半,pH 值稳定在 7 左右.二次发酵采用周期性翻堆,自然腐熟,周期 30d.对堆肥产物的腐熟度和养分分析表明,堆肥产物稳定性好,养分含量高.这表明,采用温度反馈通气量控制的静态好氧堆肥技术,蔬菜废物和花卉废物联合堆肥可以在 45d 内获得高质量的堆肥产品,将堆肥产品返还土壤能有效减少固体废物非点源污染,提高土壤肥力.

关键词:高水分蔬菜废物;花卉废物;联合堆肥;温度反馈通气量控制;批式进料

中图分类号:X712 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2003)05-05-0146

Co-Composting of High Moisture Vegetable Waste and Flower Waste in a Batch Operation

Zhang Xiangfeng, Wang Hongtao, Nie Yongfeng(Dept. of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Co-composting of different mixture made of vegetable waste and flower waste were studied. The first stage of composting was aerobic static bed based temperature feedback in a batch operation and control via aeration rate regulation. The second stage was window composting. The total composting period was 45 days. About the station of half of celery and half of carnation, the pile was insulated and temperatures of at least 55℃ were maintained for about 11 days. The highest temperature was up to 65℃. This is enough to kill pathogens. Moisture of pile decreased from 64.2% to 46.3% and organic matter was degraded from 74.7% to 55.6% during composting. The value of pH was had stable at 7. Analysis of maturity and nutrition of compost show that end-products of composting were bio-stable and had abundant nutrition. This shows that co-composting of vegetable waste and flower waste can get high quality compost by optimizing composting process during 45 days. Composting can decrease non-point resource of organic solid waste by recycling nutrition to soil and improve fertility of soil.

Keywords: high moisture vegetable waste; flower waste; co-composting; temperature feedback and control via aeration rate regulation; batch fed

滇池目前呈严重富营养化状态,随着点源污染的有效控制,面源污染,如蔬菜花卉废物,所占比重正逐步超过点源.在应用堆肥技术处理蔬菜和花卉废物的过程中,蔬菜废物(如芹菜、白菜等)含有较高的初始水分和较少的骨料,花卉废物(如石竹、玫瑰等)含有较多的木质纤维素和较少的水分,二者均难以直接进行有效堆肥.将蔬菜废物和花卉废物按适当比例混合后,可获得水分、孔隙度和 C/N 适中的堆肥原料^[1,2].基于温度反馈的通气量控制作为堆肥过程控制的一种方法,具有操作简单、效果好的

特点,静态好氧堆肥技术通过这种优化堆肥过程控制可以快速去除水分与稳定有机质^[3-5].本文采用这种基于温度反馈的通气量控制技术进行了 2 种蔬菜废物和花卉废物联合堆肥的初步研究.

1 试验材料与方法

本中试选择废西芹植株作为蔬菜废物,废

基金项目:国家重大科技攻关专项(K99-05-35-02)

作者简介:张相锋(1973~),男,博士研究生,主要从事固体废物污染控制与资源化技术研究.

收稿日期:2002-09-24;修订日期:2002-11-29

* 通信联系人

弃石竹植株作为花卉废物进行试验研究,试验原料均取自昆明大渔乡小流域面源污染控制示范区.芹菜和石竹采用农用青饲料粉碎机进行预处理,物料的基本物理化学指标见表 1.2 种配比的蔬菜和花卉废物混合物料性质见表 2,每组试验 3 个重复.

表 1 试验材料性质

Table 1 Properties of experimental materials

项目	西芹	石竹	项目	西芹	石竹
有机质/ %	70	80	C/ %	41	60
粒径/ mm	<10	<50	N/ %	2.7	2
灰分/ %	30	20	C/ N	15	30
含水率/ %	85	55			

表 2 混合物料性质

Table 2 Properties of mixed materials

项目	51 号	16 号	项目	51 号	16 号
西芹:石竹	65:35	50:50	灰分/ %	25	35
有机质/ %	75	65	含水率/ %	72.7	64.2
粒径/ mm	<50	<50	C/ N	22.5	27

堆肥过程一般为二阶段发酵.第一阶段为高温发酵阶段,主要完成有机物料的快速分解,第二阶段为腐熟阶段,主要完成硝化作用和腐殖化作用.在堆肥的不同温度段微生物的量和种类有很大差异,一次发酵阶段,温度分布一般在 40℃~70℃,其中 50℃~60℃微生物的生物量和种类最为丰富,降解速率最大,65℃~70℃微生物种类很少,但杀灭致病菌的效果最好^[4].也有研究表明,在 60℃~80℃时,堆体仍保持丰富的微生物群落^[6].

本试验采用二阶段发酵,一次发酵采用静态好氧堆肥技术,二次发酵采用条垛式堆肥技术^[7].其中,一次发酵在自制的静态好氧床内进行^[2],进料方式为批式,即一次性投料,待一次发酵完成后全部取出,再进行下一次发酵.一次发酵过程控制采用温度反馈的通气量手动控制,主要控制阶段分为灭菌期和最佳降解期.在堆肥初期,待温度升高到 65℃左右,通过调节风门将堆体温度控制在第一温度段(60℃~70℃),尽量保持此温度段 3d,达到彻底杀灭病原菌的目的;然后,调节进风量,使堆体温度保

持在第二温度段(50℃~60℃),使堆体物料在较多的微生物作用下快速降解,15d 后完成一次发酵.二次发酵在露天的混凝土地面上进行,堆高约 50cm,每周翻堆一次,发酵时间 30d.

试验主要测试一次发酵阶段堆体温度、有机质、灰分、含水率、pH 值及堆体体积随时间的变化,并根据堆体温度的变化和不同温度段的控制要求通过调整供风速率控制堆肥进程.测温采用热电阻式温度传感器,测温点位于堆体的竖向中心,在平面上的左、中、右布置 3 个传感器,每天测试 3 次,取平均值作为当天的堆体温度.通气量的测定采用转子流量计.有机质为马沸炉 550℃灼烧 10h 至恒重;pH 用 pH 计测试;含水率采用 105℃烘 24h 至恒重^[8].

二次发酵完成后,对堆肥产品进行了耗氧速率和总氮磷钾、腐殖酸的测试.耗氧速率采用 Stentiford 法^[9],总有机碳、总氮、总磷、总钾采用标准方法^[10].

2 结果与讨论

2.1 温度和通气量变化

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^[5].在堆肥一次发酵阶段,基于温度反馈的通气量控制中,2 种配比 51 号和 16 号的堆体温度随通气量的变化见图 1. USEPA 规定对于静态好氧堆肥,堆体温度达 55℃以上应至少 3d,以杀灭致病菌^[11].从图 1 可以看出,51 号堆体温度达 55℃以上的天数为 6d,其中 2d 温度达 70℃以上;16 号堆体温度达 55℃以上的天数为 10d,可以满足杀灭致病菌的要求.51 号在堆肥初期温度迅速升高到 60℃以上,第 4 天平均最高温度达到 73℃,但保持在 60℃以上的时间只有 4d,随即迅速下降,在一次发酵完成后,堆体温度为 30℃左右.这说明,51 号堆体内易降解有机物含量较高,在一次发酵的初期降解作用明显,一旦易降解物质消耗完毕,微生物降解剩余的有机物不能产生足够的热量,保持堆体的相对高温,导致堆体温度持续下降,这也和试验中测试的有机质变化相一致.16 号在堆肥初期温度迅速升高到 60℃以上,第 4 天平均最高温度达到

65℃,随后在60℃上下窄幅波动,在一次发酵后期,温度持续下降到40℃左右.堆肥初期,在堆体温度达到控制范围后,渐进减小通风量导致温度下降,渐进增大通风量反而会导致温度上升(图1),这可能是通风量一定程度地减小抑制了微生物的活性,导致产热变少,通风量一定程度地增大激发了微生物的活性,导致产热增多,在这一时期如何更有效地通风还需进一步研究.

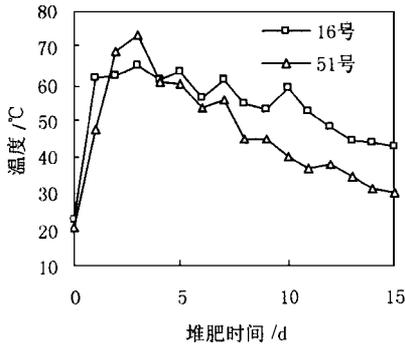


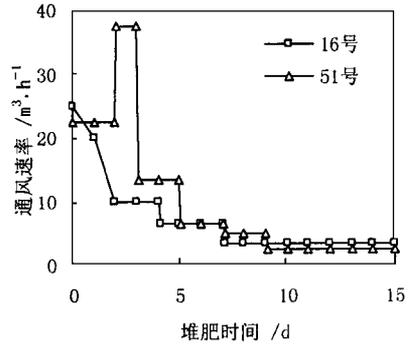
图1 堆肥过程中温度和通风速率的变化

Fig.1 Changes in temperature and aeration rate of piles in composting process

适宜堆肥的水分含量和物料持水力等性质有关,高的水分含量减少了堆体的孔隙和增大气体传质阻力,造成堆体的局部厌氧;低的水分含量会抑制微生物活性^[12].同时,在一次发酵中,由于堆体的自产热作用,反应在高温状态下进行,进入堆体的空气经过堆体排入大气时能带走大量的水分,约90%的热通过水分蒸发的形式散失^[4].51号和16号的堆肥物料随时间变化和含水率变化情况见图2.51号物料水分含量从最初的72.7%,经一次发酵完成时下降为60.9%;16号物料含水率从最初的64.2%,经一次发酵完成时下降为46.3%(第4天加水一次调节物料水分在65%左右,以保持正常发酵的进行),这说明大量的水分去除发生在一次发酵阶段.51号物料含有较高的初始水分,导致整个堆肥阶段结束时堆肥物水分仍然较高,在二次发酵阶段可能会形成一定的厌氧环境.16号初始水分比较合适,堆肥启动较快,但水分散失严重,在一次发酵第4天降至58%,温度也呈下降趋势(图1,2),说明微生物活性有所下降,此时经过加水使得堆体水分调整到65%

从图1还可以看出,一次发酵实际的堆体温度手动控制仍不够精细,更多的依靠操作者的技术和经验,和控制灭菌温度段65℃~70℃相比,16号达65℃以上仅1d,51号为2d,但最高日平均温度达73℃,超出了控制范围;51号实际发生的最大降解期堆体温度围绕55℃变化的趋势不明显.

2.2 水分和体积的变化



左右,同时适当降低通风速率,堆体温度保持在较好的控制下.这说明适当的水分控制有助于实现良好的温度控制.在堆肥一次发酵初期由于物料自重压缩作用和降解作用,物料体积的减少非常明显,其中51号含有较多的水分,压缩作用更加明显;在堆肥一次发酵后期,51号由于水分散失和易降解成分的消耗完毕,体积逐渐稳定(图2).16号在新一轮的降解作用下,体积又有所减少,在一次发酵完成时,51号和16号的体积基本接近,均较初始物料体积减少了50%以上(图2).

2.3 pH值变化

研究表明,富含纤维素和蛋白质的物料堆肥的最佳pH值为接近8.0,在pH≤5.0时底物的降解速率几乎为0,在pH≥7.0比pH≤6.0时底物有更大的降解能力,在pH≥9.0时底物的降解速率降低^[13].在一次发酵中,51号和16号堆肥物料pH值为6.5~9(图3).16号在堆肥初期,堆肥物料从弱酸性迅速改变为中性,并一直维持在7左右;51号pH值的波动较大,最高达8.8,最低为7.通过前面的分析可以看出,

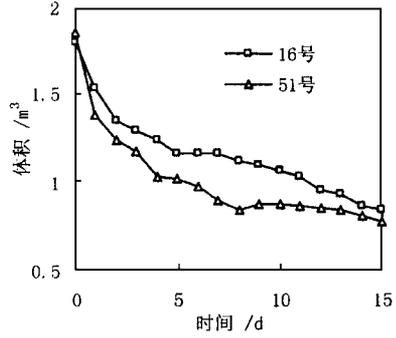
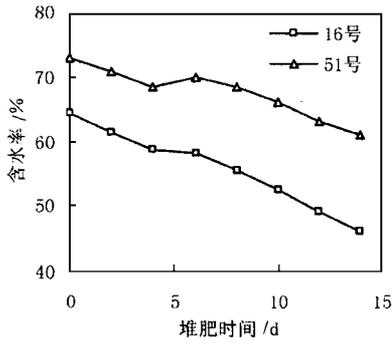


图 2 堆肥过程中含水率及物料体积的变化

Fig. 2 Changes in moisture content and volume of piles in composting process

51 号的通风变化较大,可能直接导致了 pH 值的波动.另外,51 号原料中含有较多的 N,堆肥时有机氮的分解产生了较多的氨氮,也会导致物料 pH 值的上升.

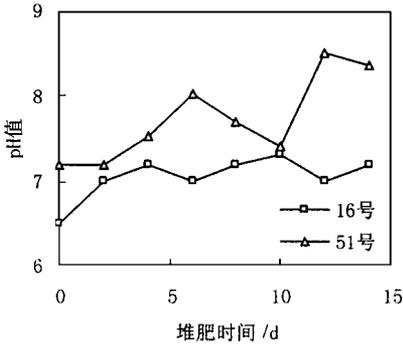


图 3 堆肥过程中 pH 值的变化

Fig. 3 Changes in pH value of piles in composting process

2.4 有机质降解

在堆肥的一次发酵阶段,有机质的降解主要是在好氧微生物的作用下逐步分解为小分子的有机物,一部分用于微生物细胞的合成,大量的有机质通过微生物的分解代谢转化为 CO₂ 排入大气.本次试验中,51 号和 16 号堆体有机质的降解趋势相类似(图 4):在一次发酵初期有机质降解迅速,在后期,降解趋势变缓.和 16 号相比,51 号物料含有较多的易降解有机物(芹菜的易降解成分较多,木质纤维素含量低),有机质降解速度较快,至一次发酵结束,51 号有机质下降为 37.2%;16 号物料中石竹的含量较高,而石竹中含有较多的木质纤维素降解较慢,经过一次发酵,有机质从初始的 74.7%下降为

55.6%,在二次发酵阶段,在真菌等微生物的作用下,木质纤维素类物质继续分解.灰分在整个堆肥过程中不发生变化,但有机质的减少导致物料干基中灰分含量的相对提高(图 4).

2.5 堆肥产品腐熟度与养分

堆肥腐熟度的指标很多,国际上至今没有统一的标准.这里选用最大耗氧速率(SOUR)小于 1 和腐殖化指数(HI = HA/FA)大于 1 作为堆肥物料基本腐熟的指标^[9,14].本中试二次发酵完成后,分别对 51 号和 16 号的产物进行的腐熟度与养分指标测试表明:2 种配比的蔬菜和花卉废物联合堆肥均可获得比较满意的堆肥产品(表 3).其中 16 号产物的腐殖酸总量较高,达 6.842%;51 号产物的养分含量较高,为 5.423%;51 号产物的稳定性也更好.和 51 号相比,16 号中花卉比例较高,木质纤维素含量也较高,在腐殖化过程中形成的腐殖酸也较多,而木质纤维素更难降解,达到腐熟需要更长的

表 3 堆肥产品腐熟度与养分测试结果

Table 3 Experimental results of compost maturity and nutrient

编号	51 号	16 号
全氮 / % (1)	1.423	1.486
全磷 / % (2)	0.851	0.729
全钾 / % (3)	3.149	2.64
总养分 / % (1) + (2) + (3)	5.423	4.855
腐殖酸 / %	5.34	6.842
胡敏酸(HA) / %	2.66	3.963
富里酸(FA) / %	2.68	2.879
HI	0.99	1.38
SOUR / mg·(g·h) ⁻¹	0.45	0.53

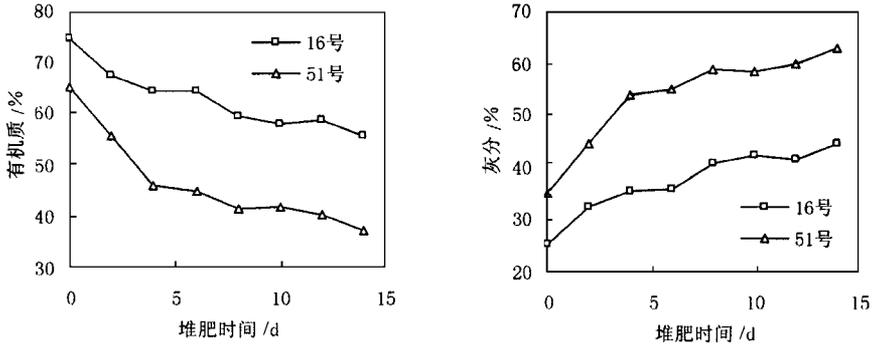


图 4 堆肥过程中有机质的变化

Fig. 4 Changes in organic matter of piles in composting process

时间,可见堆肥原料配比对最终产品的腐熟度与堆肥时间有重要影响.堆肥对农业更重要的是其改良土壤效用,因此在腐熟的前提下,16号产物的农用价值更大.

3 结论与建议

2种配比的蔬菜废物和花卉废物堆肥中试表明,一次发酵采用温度反馈的通气量控制的静态好氧堆肥技术,二次发酵采用条垛式的好氧堆肥技术,经过45d可以有效地将混合废物中的有机成分转化为稳定的类腐殖质,堆肥物的腐熟度良好,养分含量较高.其中石竹和芹菜比例为各半的情况下,堆肥效果较好.然而,昆明大渔乡小流域的蔬菜废物产生量几乎是花卉废物的4倍^[15],这种堆肥技术不足以实现全部种植业有机固体废物的非点源污染控制,需要进一步研究新的堆肥工艺(如序批式堆肥)或其他工艺(如厌氧消化),才有可能实现该流域种植业有机固体废物非点源污染的有效控制.

参考文献:

- Vallini G, Pera A. Green compost production from vegetable waste separately collected in metropolitan garden produce markets[J]. *Biological wastes*, 1989, **29**: 33 ~ 41.
- 张相锋,王洪涛,聂永丰等.高水分蔬菜废物和花卉、鸡舍废物联合堆肥的中试研究. *环境科学*, 2003, **24**(2): 147 ~ 151.
- Fraser B S, Lau A K. The effects of process control strategies on composting rate and odor emission[J]. *Compost Science & Utilization*, 2000, **8**(4): 274 ~ 292.
- Finstein M, Miller F, Strom P, McGreger S et al. Management of the composting microbial ecosystem for waste treatment[J]. *Bio/Technology*, 1983, **1**: 347 ~ 353.

- Stentiford E I. Composting control: principles and practice. In: De Bertoldi M, Sequi P, Lemmes B, Papi T editors. *The science of composting. Part I*. London: Chapman and Hall, 1996: 49 ~ 59.
- Trello Beffa, Michel Blanc, Laurent Marilley et al. Taxonomic and metabolic microbial diversity during composting. In: De Bertoldi M, Sequi P, Lemmes B, Papi T, editors. *The science of composting. Part I*. London: Chapman and Hall, 1996: 149 ~ 161.
- Haug R T. *The Practical Handbook of Compost Engineering* [M]. USA: Lewis Publishers, 1993.
- Tiquia S M, Tam N F Y, Hodgkiss I J. Changes in chemical properties during composting of spent pig litter at different moisture contents[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1998, **67**: 79 ~ 89.
- Katia E. Lasaridi, ED I Stentiford. A simple respirometric technique for assessing compost stability[J]. *Wat. Res.*, 1998, **32**(12): 3717 ~ 3723.
- 中国土壤学会农业化学专业委员会. *土壤农业化学常规分析方法* [M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- USEPA530-R-94-003. *Composting: yard and municipal solid waste*. 1994, 78.
- Jeris J S, Regan R W. Controlling environmental parameters for optimum composting: moisture, free air space and recycle [J]. *Compost Science*, 1973, **14**(2): 8 ~ 15.
- Nakasaki K, H Yaguchi, Y Sasaki et al. Effects of pH control on composting of garbage[J]. *Waste management & research*, 1993, **11**: 117 ~ 125.
- Roletto E, Renzo Barberis, Michele Consiglio et al. Chemical parameters for evaluating compost maturity[J]. *Biocycle*, 1985, **26**(2): 46 ~ 47.
- [15] 周辉宇,王洪涛,张相锋等.滇池流域面源污染控制技术研究报告:示范区固体废物产生量调查报告[R]. 北京:清华大学, 2001.