

有机生活垃圾堆肥中物质组分减量差异及变化规律

夏芸^{1,2}, 林辉², 王强², 马军伟², 叶静², 符建荣^{2*}

(1.浙江师范大学化学与生命科学学院, 浙江 金华 321004; 2.浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021)

摘要:以农村有机生活垃圾的主要组成——餐厨垃圾和作物秸秆为处理对象, 分类表征不同好氧堆肥条件下餐厨-稻草总物质、干物质及主要组成元素的减量差异及其在不同时间的变化规律, 进一步借助冗余分析(Redundancy analysis, RDA)明确主要堆肥过程因子对物质组分代谢的影响程度。结果表明:本试验中4个堆肥处理的总物质减量效果为单一通风组>通风+菌剂组>对照组>通风+菌剂+纤维素降解菌组, 对于带有辅助通风设备的处理而言, 7~13 d是垃圾减量的主要时间区段。不同处理的水分去除方式不同, 菌剂接种可促进水分以蒸发形式去除。不同处理组下干物质的元素损耗具有倾向性, 通风+菌剂+纤维素降解菌组中碳素和氢素的损失量占干物质损失量的百分比依次高于通风+菌剂组、单一通风组和对照组, 氧素的损失量占干物质损失量的百分比则正好相反。菌剂接种处理的碳素消耗主要发生在0~13 d, 约占碳素总消耗量的60%以上。冗余分析结果指出温度和细菌数量是影响物质和元素去除的主导因素, 其中温度与不同时间区段垃圾减量能力和水分损失量呈最大正相关, 而细菌数量、放线菌数量和真菌数量分别与区段干物质损失、氢素损失及氧素损失呈最大正相关。以上研究结果可为有机垃圾堆肥过程中渗滤液排放、物质损失控制和垃圾生态代谢研究提供一定的指导。

关键词:堆肥; 物质元素; 减量机制; 冗余分析

中图分类号: X705 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)12-2463-09 doi:10.11654/jaes.2014.12.026

Differential Reduction of Different Components of Domestic Organic Wastes During Composting Process

XIA Yun^{1,2}, LIN Hui², WANG Qiang², MA Jun-wei², YE Jing², FU Jian-rong^{2*}

(1.College of Chemistry and Life Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China; 2.Institute of Environment, Resource, Soil & Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

Abstract: Kitchen wastes and straw represent major percentages in domestic wastes generated in the rural areas. A co-composting experiment of kitchen wastes and rice straw was performed under different conditions to investigate reduction behaviors of different components during composting and relationships between main composting factors and material consumption. The results indicated that the force aeration treatment without any exogenous inocula (T2) had the maximum reduction in the total fresh substance, followed by the force aeration treatment with one type of exogenous microbial inocula (T3), the treatment without any aeration or exogenous inocula (T1), and the force aeration treatment with two types of exogenous inocula (T4). For the force aeration treatments, the stage from 7 d to 13 d had the highest reduction of the fresh wastes throughout the composting. The decrease in the total weight of the fresh substances was attributed to the water loss in all treatments, but different treatments had different preferred ways of water removal. The addition of exogenous microbial inocula did reduce the leachates and increase the percentages of evaporated water. The consumption of the chemical elements of dry substances varied among different treatments. Both carbon loss/dry substance loss ratios and hydrogen loss/dry substance loss ratios were in order of T4>T3>T2>T1; the oxygen loss/dry substance loss ratios exhibited the opposite order among the treatments. In addition, the carbon consumption in all treatments mainly happened at the stage of 0~13 d, which accounted for more than 60% of the total carbon consumption. The RDA analysis indicated that temperature and bacteria had the most significant influences on the reduction behaviors of materials. The composting temperature associated highly with the reduction of the total fresh substance and water loss, while the population of bacteria, actinomycetes and fungi had the strongest relationship with the dry matter loss, the hydrogen element loss and the oxygen element loss, respectively. These results can provide some theoretical guidance for leachate discharge, element loss control and process improvement in the composting process.

Keywords: composting; elementary substance; reduction mechanism; redundancy analysis

收稿日期: 2014-07-14

基金项目: 国家科技支撑计划((2012BAC17B04))

作者简介: 夏芸(1990—), 女, 湖北荆州人, 硕士, 主要从事废弃物处理研究。E-mail: xia2011yun@163.com

* 通信作者: 符建荣 E-mail: fujr@mail.hz.zj.cn

堆肥是指在控制条件下,利用微生物作用将可被生物降解的有机物分解转化的生物化学过程。垃圾堆肥是生活垃圾处理的一项重要手段,可以实现减量化和资源化。研究指出,相对城市生活垃圾,农村生活垃圾中易腐性有机垃圾组分含量可占垃圾总量的50%~60%,主要由农家剩余饭菜、食物准备过程中产生的废弃物组成^[1],这种生活垃圾由于易腐烂发臭,营养物质丰富、可生化性强等特点特别适合生物堆肥法处理^[2]。经过堆肥处理后的生活垃圾可以实现无害化和减量化,从而减少填埋土地使用,减缓垃圾填埋污染。此外,堆肥还可以将生活垃圾转变成富含有机质和氮、磷、钾等营养元素的有机肥料,实现来自农田又回归农田的良性循环。

堆肥过程中的很多因素如通风、菌剂、C/N等都会对堆肥进程产生影响,而堆肥基本条件的控制是影响堆肥过程中无害化效果、减量化效率和资源化质量的关键。在堆肥过程中,通过改变通风^[3-4]、接种菌剂^[5]或者添加调理剂^[6]都可以改变可降解垃圾的处理效率和物料性质,是提高垃圾处理效率和资源化质量的重要方法。目前的研究大多关注堆肥系统中生活垃圾、粪便等物质的理化参数(如pH、EC、有机质、氮素等)的变化^[4-6]和堆肥过程中的微生物活动^[7]。从物料平衡的角度上看,更侧重堆肥前后的物料平衡,集中从量的角度阐明堆肥前后生物质组分的变化^[8],针对生活垃圾物质组分在不同代谢节点的动态过程及内部特性的相互影响研究相对较少^[9]。近年来,基于生态系统代谢思路的碳、能量和营养元素等生态代谢研究已成为生活垃圾研究领域的前沿课题,了解生活垃圾中不同物质组分在垃圾处理系统中的代谢、迁移和转化也是其中的重要内容之一^[10]。

因此,本研究以了解不同堆肥条件下垃圾减量机制及物质代谢过程为目标,选取农村生活垃圾的主要组成——餐厨垃圾与作物秸秆作为研究对象,进行混合好氧堆肥,分类表征不同好氧堆肥条件下餐厨-稻草总物质、干物质及主要组成元素的减量差异及其在不同时间的变化规律。此外,由于目前已有不少研究指出堆肥温度^[11]、微生物浓度^[12]等因素对堆肥进程起关键作用,本研究采用冗余分析(Redundancy analy-

sis, RDA)方法分析物质组分的减量化与过程因子(温度、微生物数量)的相关关系,以明确各堆肥过程因子对物质组分代谢的影响程度。

1 材料与方法

1.1 堆肥材料

餐厨垃圾取自浙江大学学生食堂,先将骨头、塑料袋、纸杯等杂物拣出,再沥去泔水,充分混匀。稻草秸秆取自浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所试验田,用植物粉碎机粉碎,粒径 ≤ 3 cm。各堆肥初始的垃圾量相同(4 kg,含3.2 kg餐厨垃圾,0.8 kg稻草秸秆),堆肥初始原料的理化特性见表1。

1.2 堆肥装置与方案

将稻草秸秆作垃圾堆肥的调理剂,进行混合堆肥,堆料体积占反应器体积的4/5左右,堆肥反应器选用泡沫塑料箱,容积16 L。考虑到通风、微生物菌剂对堆肥质量有重要影响,本试验设置了4个处理:处理1:不通风,不添加外源菌;处理2:通风,不添加外源菌;处理3:通风,按2%接种量(W/W)添加预培养土壤(750 g土壤加入20 mL牛肉膏培养液、40 mL蒸馏水混匀后30℃培养);处理4:通风,按2%接种量(W/W)添加预培养土壤和50 mL的棘孢木霉T1(按1%接种量在PDA培养基中接种孢子,培养3 d后待用),其中棘孢木霉T-1由浙江大学生命科学院环境微生物学实验分离得到,具有强烈的木质纤维素分解能力^[13]。

1.3 测定方法

采用精密温度计对堆体温度进行多点监测。分别在堆肥第7、13、20、27 d采集样品保存,在每次采样时用人工作翻堆。新鲜样本用于测定含水率、pH值、电导率(Electric conductivity, EC)、微生物数量指标,其余4℃储存备用;另一部分60℃烘干后粉碎,测定常规理化指标。各项指标测定方法:含水率采用烘箱干燥法测定;pH和EC按1:10固液比浸提,滤液分别用pH计和电导仪测定;总有机碳、总氮、总氢采用元素分析仪测定;总磷采用钒钼黄比色法测定;总钾采用火焰光度计法测定;纤维素用72%浓硫酸水解法测定;微生物数量用稀释平板计数法测

表1 堆肥初始原料的理化特性

Table 1 Physical and chemical properties of raw materials for composting

pH	EC/mS·cm ⁻¹	含水率/%	C/N	TN/%	TP/%	TK/%	总有机质/%
5.41±0.08	3.39±0.00	55.41±0.03	20.02±0.05	2.00±0.01	0.77±0.01	0.93±0.06	69.05±0.29

定^[14]。所有测定均重复3次。

1.4 数据统计分析

应用统计软件 SPSS17.0 对经过 27 d 堆肥处理后的各处理物料的理化特性进行显著性差异分析 (One-way ANOVA, 最小显著差异法 LSD); 采用 Origin8.6 软件作图; 采用 Canoco 4.5 软件对生物信息矩阵进行除趋势对应分析 (Detrended correspondence analysis, DCA)、冗余分析 (RDA), 同时利用 Monte Carlo permutation test 检验 RDA 排序轴特征值的显著性, 置换次数为 999, 将生成的数据文件应用 Canodraw 4.5 生成物种-环境排序图。

2 结果与讨论

2.1 不同处理的物料理化特性差异

表 2 为堆肥 27 d 后不同处理物料的理化特性。与初始相比, 4 个处理物料在第 27 d 的基本理化性质均遵循相似的变化: pH 值和 EC 上升, TN 和 TK 含量增加, 而含水率、C/N 和总有机质下降, 均与目前已知研究结论基本一致^[15-17]。统计分析结果也指出, 不同处理的 pH 值、含水率、C/N、TP、TK、总有机质、纤维素、木质素均存在显著差异。其中, 处理 2 的 pH 显著低于其他处理组 ($P < 0.05$), 呈弱酸性, 处理 2 中微生物活动比其他处理组强烈, 因此导致提供的氧气量不足, 产生了厌氧现象, 最终 pH 上升缓慢^[3]。此外, 氨气的挥发强烈, 堆体中的氨氮含量降低可能也是处理 2

表 2 堆肥处理后的物料理化特性

指标	处理 1	处理 2	处理 3	处理 4
pH	7.04±0.02b	6.52±0.04a	7.53±0.02c	7.69±0.03d
EC/mS·cm ⁻¹	3.84±0.09a	3.94±0.04a	3.78±0.03a	4.08±0.06a
含水率/%	45.20±0.54b	46.44±0.02c	41.69±0.02a	51.21±0.14d
C/N	11.28±0.14a	12.33±0.00a	15.66±0.13c	14.31±0.53b
TN/%	3.93±0.13a	3.37±0.19a	2.56±0.36a	2.72±0.23a
TP/%	0.76±0.00b	0.66±0.01a	0.65±0.02a	0.99±0.01c
TK/%	1.22±0.00a	1.57±0.02c	1.33±0.01b	1.58±0.03c
总有机质/%	61.26±0.10c	64.79±0.10d	59.49±0.19b	58.00±0.00a
纤维素/%	23.43±0.52ab	24.43±0.16b	26.99±0.22c	22.83±0.19a

注: 不同字母表示各处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

中 pH 较低的原因之一^[18]。处理 4 中纤维素的含量显著低于处理 3 ($P < 0.05$), 表明处理 4 中棘孢木霉 T-1 的添加促进了垃圾中纤维素的降解。总体上看, 菌剂接种组的有机物和各类养分含量低于无菌剂组。邹德勋等^[19]研究也发现, 添加了外源菌糠的堆肥组的有机质分解快于无菌糠组, 外源菌剂的接种可以加速垃圾降解。从垃圾降解的角度看, 有机物的分解有利于垃圾降解。但从有机肥料的角度, 有机质和养分的流失是资源化利用中的一种损失。因此, 可根据垃圾处理目标, 有针对性地设计堆肥工艺。

2.2 不同处理的物料组分减量差异

2.2.1 物料平衡分析

对垃圾堆肥后的物料平衡进行分析 (表 3) 可以

表 3 堆肥过程中的物料平衡

Table 3 Mass balance of materials during composting

处理		1	2	3	4
原料总质量	堆前/kg	4.216	4.170	4.298	4.236
	堆后/kg	2.200	1.774	2.050	2.428
	损失/kg	2.016(47.82)	2.396(57.46)	2.248(52.30)	1.808(42.68)
总干物质质量	堆前/kg	1.925	1.925	1.925	1.925
	堆后/kg	1.206	0.950	1.195	1.184
	损失/kg	0.719(17.05)	0.975(23.38)	0.730(16.98)	0.741(17.49)
	损失率 */%	35.65	40.69	32.47	40.98
水分	堆前/kg	2.291	2.245	2.373	2.311
	堆后/kg	0.994	0.824	0.855	1.243
	损失/kg	1.297(30.76)	1.421(34.08)	1.518(35.32)	1.068(25.21)
	损失率 */%	64.32	59.31	67.53	59.07
渗滤液/kg		0.679(16.11)	0.699(16.76)	0.567(13.19)	0.345(8.14)
渗滤液损失率 **/%		52.37	49.18	37.34	32.29
蒸发水/kg		0.618(14.66)	0.722(17.31)	0.951(22.13)	0.723(17.07)
蒸发水损失率 **/%		47.64	50.79	62.66	67.71

注: 括号内数据为堆肥后物料损失质量占堆肥前原料湿基质量的百分率, %; * 数据为物料损失质量占堆肥后原料湿基损失质量的百分率; ** 数据为流失水质量占堆肥后水分损失质量的百分率。

定量化堆肥过程中不同物质组分的损失和渗滤液产生情况,明确不同处理下垃圾减量化的主要方式。从垃圾总质量损失上看,各处理的减量化效果依次为处理2>处理3>处理1>处理4,表明通风加速垃圾总物质损失。但菌剂接种不利于本试验中物料整体的减量,并且外源菌剂的类型越复杂,越可能产生拮抗作用,对堆肥产生负面影响。这可能是因为外源菌剂的介入引发了内外源菌群的竞争,降低了总微生物活性,导致物料的减量化效率降低^[20]。事实上,这种外源菌群与土著菌群的竞争所带来的负面影响在实际生产和以往的研究报道中均有发现^[21-22]。因此,在堆肥菌剂接种的应用方面,可能会由于不同物料中土著菌群活性差异引起微生物适应的问题,应根据实际情况选择是否接种菌剂。

从水分损失占总物质损失的比例上看,4个堆肥处理的水分总损失率均在59%以上,水分损失量与垃圾总物质损失呈显著($P<0.05$)正相关,表明垃圾中水分的流失是垃圾减量的主要方式。进一步从干物质损失占总物质损失的百分比可知,各处理的干物质损失占总物质损失的百分比分别为35.65%、40.69%、32.47%、40.98%。对比处理2和处理1发现通风有利于垃圾中的有机物代谢,与Bari等^[23]的研究结论相一致。对比处理3和处理4发现,处理4的垃圾总物质

损失大大低于处理3,但其干物质损失高于处理3,表明棘孢木霉 T-1 的添加增加了堆肥中有机物的分解转化,但不利于水分的去除。另外,从表3中可以看出,不同处理的水分流失途径不同,处理3和处理4中的水分多以蒸发的形式损失,分别占堆肥水分总损失量的62.66%和67.71%,表明接种外源菌可控制堆肥过程中渗滤液的产生。这可能是因为菌剂添加增强了垃圾中微生物的呼吸作用,促进更多水分随气体交换进入空气。此外,接种外源菌对物质迁移途径的改变也可能是产生这一结果的原因,具体机制有待进一步研究。渗滤液是餐厨垃圾堆肥过程中臭气释放的一个重要来源,也是堆肥地点附近水环境污染的一个典型因素。本研究结果对于控制堆肥过程中渗滤液排放具有一定的参考价值。

2.2.2 垃圾减量的主要时间区段

对不同处理组中垃圾减量的主要时间进行分析(图1)。从图1可以看出,对于带有辅助通风设备的处理2、3、4而言,第7~13d是垃圾减量化的主要时间区段,且主要以水分流失实现减量;而对于无通风处理的处理1而言,第7~13d和第13~20d这两个阶段的垃圾减量化效果基本一致,而且同样主要来自水分流失。综上可知,在本堆肥系统中,第7~13d是垃圾减量的主要时间区段,且以水分流失为主要的减量

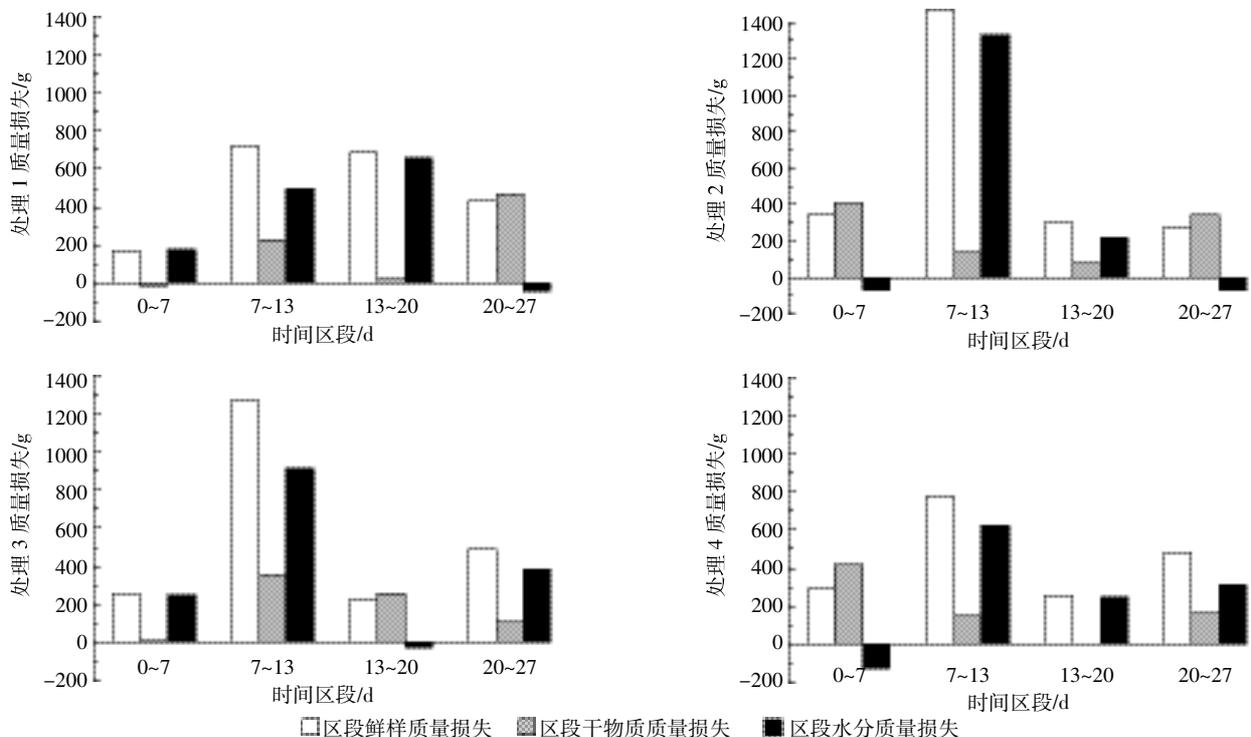


图1 堆肥过程中不同时间区段的物料质量损失

Figure 1 Mass loss of substances at different stages of composting

方式。另外,从图1可以看出,物料中干物质的降解消耗与垃圾减量化趋势不完全一致,不同处理间的干物质损失趋势完全不同。相比于处理1,处理2在前7d的起始阶段具有较高的干物质分解,这表明通风促进起始阶段微生物的活动。和处理4相比,处理3在前7d的起始阶段并没有较高的干物质消耗,这可能是由于处理4中棘孢木霉 T-1 的活动。

2.3 不同处理下干物质中主要元素组成的质量变化差异

2.3.1 元素质量损失

对堆肥前后物料干物质中的主要元素组成进行测定,分析不同处理干物质中各类元素的质量损失比(表4)。从表4可以看出,不同处理下干物质中元素损失具有倾向性。其中干物质中碳素的质量损失百分比大小为处理4>处理3>处理2>处理1,占干物质损失的30%以上,表明碳素分解是干物质损失的重要原因。碳源是微生物生长代谢的主要物质,堆肥化过程中,微生物通过呼吸作用将堆料中不稳定有机质分解转化为CO₂、H₂O和矿物质是垃圾中碳素损失的主要途径^[24]。显然,通风和接种菌剂改变了物料中微生物活力,增强了呼吸作用,提高了CO₂的释放,从而导致通风和菌剂组的碳消耗提高。堆料中,氢素的质量损失百分比与其完全一致,而干物质中氧素(通过计算得到的预测值)正好相反。供氧不足可能是处理1中微生物对干物质中氧素消耗增加的一个原因。从养分流失上看,处理2和处理3的养分流失都高于处理1和处理4,与垃圾水分损失趋势一致。这说明处理2和处理3中养分可能主要随着水分流失而损失。

2.3.2 元素损失的主要时间区段

从碳素的质量损失过程看(图2),处理3和处理4在第0~13d的碳素损失占总碳素损失比例高于处理1和处理2,处理1中第0~20d的碳素损失占总碳素损失比例为20.80%,第0~13d的碳素损失占总碳素损失比例仅为5.52%;处理2第0~13d的碳素损

约占总损失的48.49%,但处理2在整个堆肥阶段均具有较高的碳损耗;处理3和处理4第0~13d的碳损耗分别是总损失的67.19%和67.88%。以上结果表明,菌剂和通风处理对于碳损耗的促进主要发生在前13d,即增强了堆肥早期的碳消耗,加快碳的利用。这主要是由于引入的外来微生物通常在堆肥前期的优势比较显著^[20],缩短了堆体的起爆时间^[25]。从干物质中氧元素的消耗上看,处理1和处理2在第20~27d仍然有强烈的氧损耗,而处理3和处理4在这个阶段的氧损耗非常少。这可能是外来菌剂的接种改变了土著微生物的群落结构^[26],致使部分能在堆肥腐熟期活动的菌种活性降低。

2.4 堆肥的主要过程因子与物质消耗的RDA分析

2.4.1 堆体温度

对于堆肥系统而言,温度变化是表征微生物活动情况的一个重要标志,在一定程度上反映堆肥系统中的微生物活性,同时也对其中微生物活性产生影响,是堆肥化反应进程的直观表现,它是堆肥过程控制的一个重要指标。图3描述了不同时间区段温度的总体变化趋势。可以看出通风处理组(处理2、3、4)的主要高温时间区段是第7~13d,无通风处理组(处理1)的主要高温时间区段是第13~20d。处理1、2、3、4达到50℃以上高温的时间分别为2、5、4d和2d,高温期的平均温度分别为53.4、53.2、54.6、48.2℃。处理3和处理4的高温持续时间均低于处理2。不同处理堆体温度趋势基本与垃圾减量效果相一致。

2.4.2 微生物活动

好氧堆肥主要是通过堆体内部的微生物来分解有机物,微生物在整个堆肥过程中起着十分重要的作用。因此,了解堆肥过程中微生物变化情况是十分必要的。表5描述了堆肥过程中细菌、真菌、放线菌数量的变化情况。从堆肥阶段细菌的总数量上看,处理3>处理2>处理1>处理4;从真菌的总数量上看,处理1>处理3>处理2>处理4;从放线菌的总数量上看,处

表4 总干物质中不同元素的质量损失

Table 4 Mass loss of various chemical elements in dry matters

处理	堆肥27d后各类元素的质量损失/g					
	TC	TN	TP	TK	TH	其他元素(主要是氧元素)
1	235.86(32.80)	0(0)	5.73(0.80)	3.13(0.44)	38.51(5.35)	444.71(61.85)
2	375.84(38.56)	6.46(0.66)	8.64(0.89)	2.68(0.28)	62.23(6.39)	518.71(53.22)
3	292.30(40.08)	7.93(1.09)	10.97(1.50)	1.96(0.27)	48.43(6.64)	367.68(50.42)
4	310.25(41.92)	6.30(0.85)	3.11(0.42)	0(0)	51.50(6.96)	369.76(49.96)

注:括号内数据为各元素的质量损失占干物质质量损失的百分比, %。

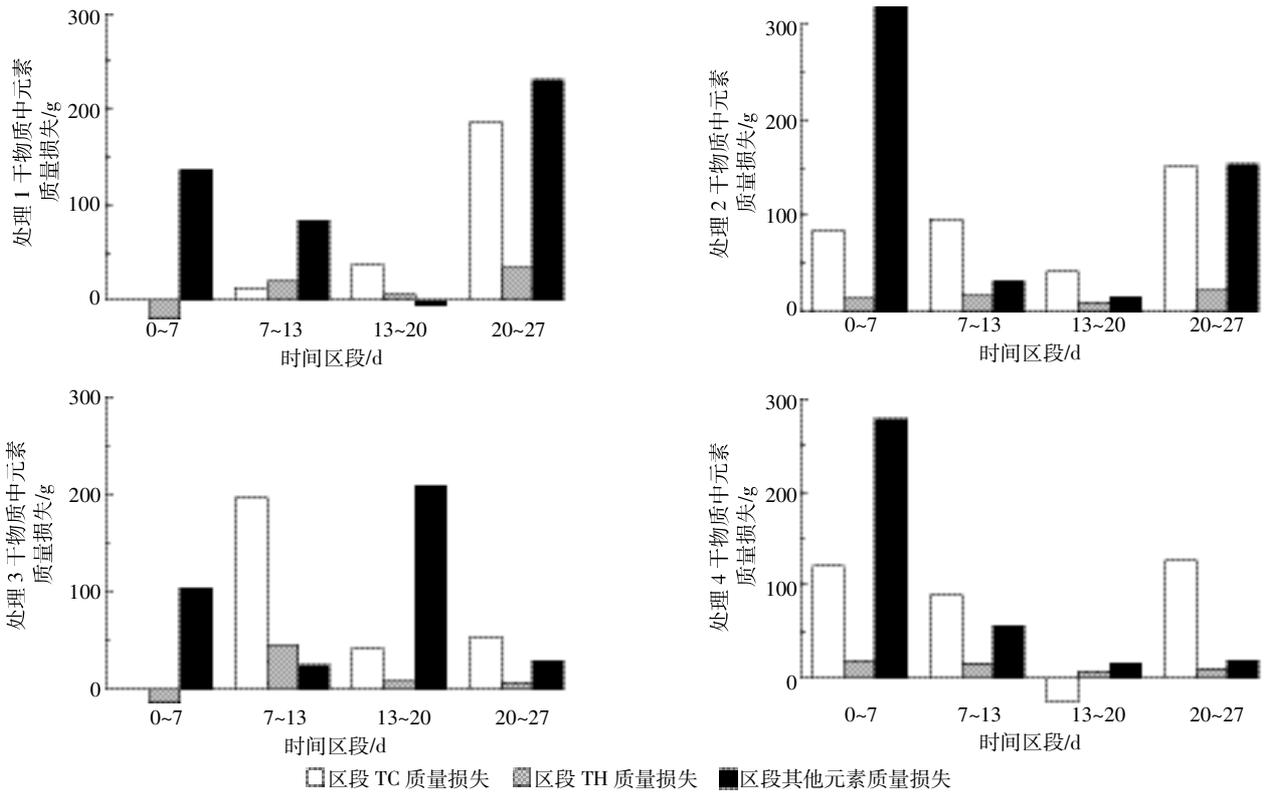


图 2 堆肥过程中不同元素组成的去除过程

Figure 2 Removal processes of different chemical elements during composting

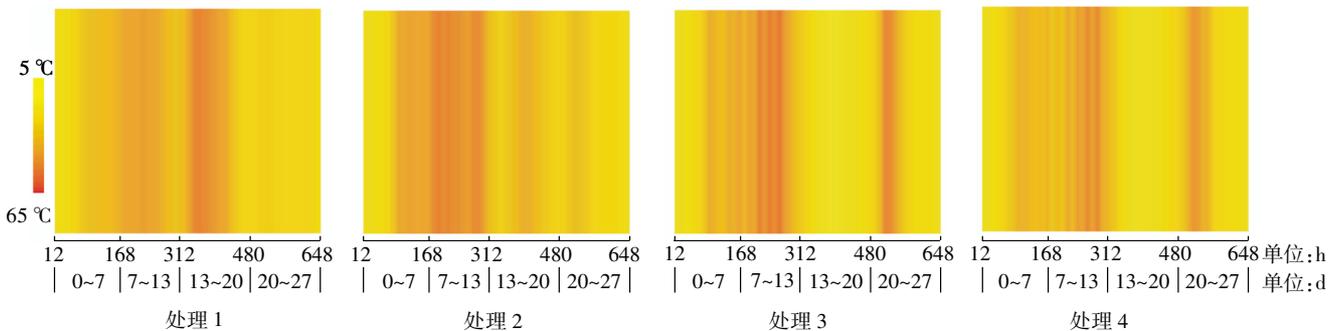


图 3 温度变化趋势

Figure 3 Temperature profiles of different treatments during composting

理 4>处理 2>处理 1>处理 3。总体上看,细菌是堆肥过程的主要菌群,其数量比真菌、放线菌高 2~3 个数量级。

2.4.3 RDA 分析

RDA 分析是基于排序技术的线性分析方法,不仅可以结合多个环境因子一起分析,而且能够独立保持每一个环境因子对物种变化的贡献率。越来越多的研究者将这个分析方法应用到堆肥研究中^[27-28]。为了明确温度和微生物因子与堆肥过程中区段物质损失的关系,对鲜样损失量(TS)、水分损失量(W)、干物质损失量(DS)、氧素损失量(TO)、碳素损失量(TC)、氢

素损失量(TH)数据与主要过程因子(区段平均温度、细菌数量、真菌数量、放线菌数量)进行冗余分析。首先通过 DCA 分析得出属种的梯度长度 SD,SD 为 0.296, 小于 3, 适合选择线性模型, 说明可以进行 RDA 分析。

RDA 分析结果见表 6, 前两个排序轴分别解释了 36.3%和 13.0%的区段物质损失变化, 分别对应 91.5%和 56.2%的区段物质损失与堆肥过程因子之间的关系, 4 个排序轴共解释了 51.0%的区段物质损失变化和 100%的物种-环境因子的关系。所选的 4 个过程因子解释了 51.0%的总特征值, 说明这 4

表5 堆肥过程中微生物数量的变化

Table 5 Changes of microbial community during composting

指标	处理	取样时间			
		第7 d	第13 d	第20 d	第27 d
细菌/ $\times 10^{10}$ CFU·g ⁻¹	1	0.16	0.25	0.34	1.06
	2	0.54	0.07	0.41	1.35
	3	0.10	0.44	0.22	2.98
	4	0.27	0.41	0.17	0.65
真菌/ $\times 10^8$ CFU·g ⁻¹	1	8.33	10.10	5.25	5.67
	2	0.30	1.40	0.15	5.79
	3	7.33	0.25	0.28	0.07
	4	4.63	0.60	0.28	1.07
放线菌/ $\times 10^7$ CFU·g ⁻¹	1	0.00	0.50	1.34	1.46
	2	0.03	0.29	0.90	2.82
	3	0.00	1.23	1.22	0.58
	4	0.00	0.75	2.75	2.49

这个过程因子对堆肥不同时间区段的物质和元素减重量变化有重要影响。同时, MonteCaHo 检验测得的显著值表明, 这4个过程因子的变化是与各区段物质和元素减重量相关的主要特征参数 ($F=2.860, P<0.05$)。

为了进一步研究主要过程因子与各区段物质和元素减重量之间的相关关系, 将研究中的各区段物质和元素减重量作为物种, 利用 RDA 分析得到物种-环境的二维排序图(图4)。图4直观地显示了它们之间的关系, 红色箭头连线的长度代表某个过程因子对物种影响的大小, 连线越长, 代表这个过程因子对物种的影响越大, 可以看出各过程因子对物种影响大小依次为每个时间区段的平均温度>细菌数量>放线菌数量>真菌数量。

各箭头之间的夹角小于90°, 表示物种与物种、物种与过程因子正相关, 相反则表示负相关。从图4可以看出各过程因子与物种之间相关性关系如下:

(1) 区段平均温度与区段鲜样和水分损失量有较

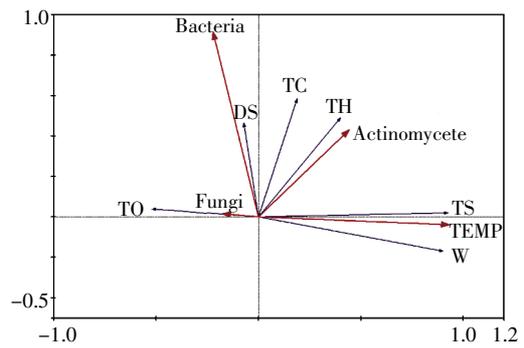


图4 各区段物质和元素减重量与主要过程因子的二维排序图
Figure 4 RDA biplot of weight loss of substances(fresh substances and chemical elements in dry matter) and main composting factors

大的正相关关系, 表明堆肥温度越高, 水分流失越多, 垃圾减量效果也越好。这也是处理2、3、4的最大水分损失量出现在第7~13 d, 而处理1的最大水分损失出现在第13~20 d的原因。综上可知, 通过高温促使垃圾中水分流失是垃圾减量的主要途径, 其主要机制类似于“烘干”。此外, 温度与干物质损失、细菌数量和真菌数量均呈负相关, 表明堆体中高温抑制了细菌和真菌活动, 从而减弱了垃圾中有机物分解^[29]。

(2) 细菌与区段干物质损失量有最大的正相关关系, 其次分别是区段碳素、氢素和氧素损失量, 说明细菌数量越多干物质消耗越强。放线菌与区段氢素损失量有最大正相关关系, 其次是区段碳素和干物质损失量, 但与细菌相比, 放线菌数量对区段碳素损失量的影响较小。这可能是因为细菌是本堆肥系统中优势菌群, 而放线菌数量较少。这也是处理3和处理4在前13 d具有较高的碳素损耗的主要原因。另外, 放线菌也与温度呈正相关, 因此增加耐高温的放线菌数量可以提高高温期干物质消耗, 尤其是碳素和氢素的去除。李秀艳等^[30]研究表明高温菌剂的接种可以提高堆肥高温阶段有机质的降解速率, 缩短生活垃圾的处理周期。对于垃圾减量化而言, 同时

表6 垃圾堆肥各区段物质和元素的减重量与主要过程因子的 RDA 排序结果

Table 6 Redundancy analysis of weight loss of substances(fresh substances and chemical elements in dry matter) and main composting factors

结果	排序轴 1	排序轴 2	排序轴 3	排序轴 4
特征值	0.363	0.130	0.017	0.000
种群-环境因子相关系数	0.915	0.562	0.445	0.062
种群数据变化累积百分比/%	36.3	49.3	51.0	51.0
种群-环境因子关系变化的累积百分比/%	71.1	96.7	100.0	100.0
特征值总和		1.000		
典范特征值总和		0.510		

达到最大水分流失和干物质去除可以实现垃圾的最大减量效率。

(3)真菌数量与温度和水分损失有极大的负相关,表明高温对真菌生长有明显的抑制效应。此外,真菌与区段氧元素损失量呈最大正相关,说明真菌可能更倾向于氧元素的消耗。这也是处理1和处理2在堆肥第27d具有远高于处理3和处理4的氧素消耗的主要原因,同时也表明真菌可能在堆肥化后期发挥较大的作用。基于本试验的研究可知,温度和不同微生物群落对物质消耗的影响是有一定针对性的,而且不同堆肥过程因子对不同物质和元素组分消耗影响程度不同,在实际应用中可以根据实际需求有针对性地改变堆肥条件,实现资源最大化。

3 结论

垃圾中水分的流失是垃圾减量的主要方式,水分的去除能力决定了垃圾减量化效果。温度是影响垃圾总量降低的重要因素,温度与垃圾减量和水分损失呈最大正相关。堆肥高温期是垃圾减量的主要时间区段。另外,通风可以促进垃圾减量,本试验中菌剂的接种不利于高温的形成,对垃圾减量产生负面影响,但改变了水分损失途径,可在一定程度上控制堆肥渗滤液的产生。因此,在堆肥菌剂的应用中应根据实际情况选择菌剂接种。

干物质的分解消耗与垃圾减量化趋势不完全一致。干物质中元素的消耗具有倾向性,其中菌剂和通风处理增强了堆肥早期(前13d)的碳消耗。不同堆肥处理中微生物数量的不同是引起以上物质元素减量差异的重要原因之一,其中细菌和放线菌倾向于消耗有机质中的碳素和氢素,而真菌则倾向于促进堆肥后期氧素的消耗。本试验中,细菌对垃圾中有机物的分解影响较大。总体而言,不同微生物对堆肥中不同物质组成的消耗影响程度不同,在实际应用中可以根据需求有针对性的改变堆肥条件。

参考文献:

[1] 王英. 新型农村生活垃圾耦合太阳能好氧堆肥处理技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011.
WANG Ying. Research on a new aerobic composting of rural living garbage integrated with solar technology[D]. Changchun: Jilin University, 2011.

[2] 刘永德, 何晶晶, 邵立明, 等. 太湖地区农村生活垃圾管理模式与处理技术方式探讨[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1221-1225.
LIU Yong-de, HE Pin-jing, SHAO Li-ming, et al. Management and

treatment of rural refuse in Tai Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6): 1221-1225.

[3] 沈洪艳, 李敏, 杨金迪, 等. 餐厨垃圾和绿化废弃物换向通风好氧堆肥[J]. 环境工程学报, 2014, 8(3): 1179-1184.
SHEN Hong-yan, LI Min, YANG Jin-di, et al. Aerobic composting of commutation ventilation of kitchen waste and greening waste[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(3): 1179-1184.

[4] 杨延梅. 通风量对厨余堆肥氮素转化及氮素损失的影响[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(12): 1-4.
YANG Yan-mei. Influence of ventilation on nitrogen transformation and loss during composting of kitchen waste[J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 33(12): 1-4.

[5] 葛春辉, 徐万里, 马彦茹, 等. 添加外源微生物对城市生活垃圾堆肥腐熟的影响[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(8): 150-155.
GE Chun-hui, XU Wan-li, MA Yan-ru, et al. Effect of inoculating microorganism on compost maturity of municipal solid waste[J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, 34(8): 150-155.

[6] 袁巧霞, 田纯焱, 陈钢, 等. 调理料对猪粪好氧堆肥特性的影响试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(1): 108-113.
YUAN Qiao-xia, TIAN Chun-yan, CHEN Gang, et al. Effect of different materials addition on the aerobic composting[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(1): 108-113.

[7] 张俊华, 刘希凤, 毕江涛, 等. 不同处理条件下生猪屠宰场废弃物堆肥基本性质及微生物区系变化研究[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(2): 100-105.
ZHANG Jun-hua, LIU Xi-feng, BI Jiang-tao, et al. Basic properties and microbial characteristic during the composting process of pig slaughterhouse waste[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(2): 100-105.

[8] 张红玉, 路鹏, 李国学, 等. 秸秆对厨余垃圾堆肥臭气和渗滤液减排的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 248-254.
ZHANG Hong-yu, LU Peng, LI Guo-xue, et al. Effect of corn stalks addition on odors and leachate reduction during kitchen waste composting[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(9): 248-254.

[9] 李兵, 王英, 董志颖. 餐厨垃圾与水葫芦联合好氧堆肥生物物质组分分类表征[J]. 环境科学学报, 2013, 33(9): 2531-2538.
LI Bing, WANG Ying, DONG Zhi-ying. Biomass components characterization during composting of kitchen waste combined with water hyacinth[J]. *Acta Scientiae Circumstance*, 2013, 33(9): 2531-2538.

[10] 周传斌, 徐琬莹, 曹爱新. 城市生活垃圾代谢的研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(1): 33-40.
ZHOU Chuan-bin, XU Wan-ying, CAO Ai-xin. Urban ecological metabolism of municipal solid waste: A review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(1): 33-40.

[11] 张相锋, 王洪涛, 聂永丰. 温度控制对蔬菜废物和花卉秸秆共堆肥的影响[J]. 环境科学, 2006, 27(1): 171-174.
ZHANG Xiang-feng, WANG Hong-tao, NIE Yong-feng. Effect of temperature control on vegetable wastes and flower straw co-compost[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(1): 171-174.

[12] Xi B, Zhang G, Liu H. Process kinetics of inoculation composting of municipal solid waste[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 124

- (1):165-172.
- [13] Lin H, Wang B, Zhuang R, et al. Artificial construction and characterization of a fungal consortium that produces cellulolytic enzyme system with strong wheat straw saccharification[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(22):10569-10576.
- [14] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤微生物研究法[M]. 北京:科学出版社, 1985.
Institute of Soil of Chinese Academy of Sciences in Nanjing. The research of microorganism in soil[M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [15] 张玉成, 朱建林, 李兵. 太阳能-生物反应器处理厨余垃圾的研究[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(1):588-590.
ZHANG Yu-cheng, ZHU Jian-lin, LI Bing. The research of solar energy-bioreactor for kitchen waste disposal[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(1):588-590.
- [16] 宋彩红, 贾璇, 李鸣晓, 等. 沼渣与畜禽粪便混合堆肥发酵效果的综合评价[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(24):227-234.
SONG Cai-hong, JIA Xuan, LI Ming-xiao, et al. Comprehensive evaluation of co-composting fermentation effect of biogas residue mixed with livestock manure[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(24):227-234.
- [17] An C J, Huang G H, Yao Y, et al. Performance of in-vessel composting of food waste in the presence of coal ash and uric acid[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 203:38-45.
- [18] 江滔, Frank Schuchardt, 李国学. 冬季堆肥中翻堆和覆盖对温室气体和氨气排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(10):212-217.
JIANG Tao, Frank Schuchardt, LI Guo-xue. Effect of turning and covering on greenhouse gas and ammonia emissions during the winter composting[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(10):212-217.
- [19] 邹德勋, 汪群慧, 隋克俭, 等. 餐厨垃圾与菌糠混合好氧堆肥效果[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(11):269-273.
ZOU De-xun, WANG Qun-hui, SUI Ke-jian, et al. Aerobic composting effect of kitchen garbage and spent mushroom substrate[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(11):269-273.
- [20] 商平, 李芳然. 加速垃圾脱水组合菌的筛选及接种堆肥初步研究[J]. *天津科技大学学报*, 2013, 28(3):15-19.
SHANG Ping, LI Fang-ran. Selection of combined strains for accelerate the dehydration rate of garbage and preliminary study of inoculated fermentation[J]. *Journal of Tianjin University of Science and Technology*, 2013, 28(3):15-19.
- [21] 党秋玲, 李鸣晓, 席北斗, 等. 堆肥过程多阶段强化接种对细菌群落多样性的影响[J]. *环境科学*, 2011, 32(9):2689-2695.
DANG Qiu-ling, LI Ming-xiao, XI Bei-dou, et al. Effects of multi-stage strengthening inoculation on bacterial community diversity during composting[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(9):2689-2695.
- [22] 徐智, 张隲利, 张发宝, 等. 接种内外源微生物菌剂对堆肥效果的影响[J]. *中国环境科学*, 2009, 29(8):856-860.
XU Zhi, ZHANG Long-li, ZHANG Fa-bao, et al. Effects of indigenous and exogenous microbial inocula on composting in a bioreactor[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(8):856-860.
- [23] Bari Q H, Koenig A. Application of a simplified mathematical model to estimate the effect of forced aeration on composting in a closed system[J]. *Waste Manag*, 2012, 32(11):2037-2045.
- [24] 牛俊玲, 郑宾国, 梁丽珍. 餐厨垃圾与麦秸混合堆肥中碳素物质变化规律研究[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(3):626-630.
NIU Jun-ling, ZHENG Bin-guo, LIANG Li-zhen. Change of carbon substance characteristics during the composting of kitchen wastes and wheat straw[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(3):626-630.
- [25] 席北斗, 党秋玲, 魏自民, 等. 生活垃圾微生物强化堆肥对放线菌群落的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(增刊1):227-232.
XI Bei-dou, DANG Qiu-ling, WEI Zi-min, et al. Effects of microbial inoculants on actinomycetes communities diversity during municipal solid waste composting [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(Suppl1):227-232.
- [26] 解开治, 徐培智, 张发宝, 等. 接种微生物菌剂对猪粪堆肥过程中细菌群落多样性的影响[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(8):2012-2018.
XIE Kai-zhi, XU Pei-zhi, ZHANG Fa-bao, et al. Effects of microbial agent inoculation on bacterial community diversity in the process of pig manure composting[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(8):2012-2018.
- [27] Šmilauer P, Lepš J. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO 5[M]. Cambridge University Press, 2014.
- [28] 胡春晓, 陈耀宁, 张嘉超, 等. 农业废物好氧堆肥中环境因子对 nirK, nirS 和 nosZ 数量的影响[J]. *环境科学*, 2013, 34(3):1196-1203.
HU Chun-xiao, CHEN Yao-ning, ZHANG Jia-chao, et al. Effects of physico-chemical parameters on the abundance of the denitrification-associated genes nirK, nirS and nosZ during agricultural waste composting[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(3):1196-1203.
- [29] 蓝俞静, 刘玉德, 张媛, 等. 餐厨垃圾生物好氧堆肥的影响因素研究[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(6L):30-33.
LAN Yu-jing, LIU Yu-de, ZHANG Yuan, et al. Study on influencing factors of food waste biological aerobic composting[J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, 36(6L):30-33.
- [30] 李秀艳, 吴星五, 高廷耀, 等. 接种高温菌剂的生活垃圾好氧堆肥处理[J]. *同济大学学报*, 2004, 32(3):367-371.
LI Xiu-yan, WU Xing-wu, GAO Ting-yao, et al. Domestic waste composting with complex thermophilic microbial inoculation[J]. *Journal of Tongji University*, 2004, 32(3):367-371.