

不同来源农业废弃物堆肥进程与产品肥效研究

孙桂阳, 张国言, 董元杰

(山东农业大学资源与环境学院, 山东 泰安 271018)

摘要: 评价不同来源农业废弃物的堆肥效率与产品肥效, 为高品质有机肥生产提供依据。采用室外堆肥的试验方法, 选取 6 种动物源粪便与 7 种植物源农业废弃物为原料, 设置 13 个堆肥处理, 比较不同堆肥原料堆肥过程中温度、pH、C/N、腐殖酸、养分等指标差异及其堆肥产品对小白菜生长的影响。结果表明, 动物源和植物源材料质量比 7 : 3, C/N 为 25 : 1, 含水率 55%~60% 的条件下进行好氧发酵堆肥, 45 天后各处理均可达到腐熟要求。其中 TOP4(花生麸)和 TOM1(牛粪)处理在腐熟过程中温度上升最快, TOP1(豆粕)、TOP3(菜籽饼)、TOM1(牛粪)、TOM3(兔粪)处理 C/N 最低, 腐熟最彻底; TOP1、TOP4、TOM3、TOM5(鸡粪)处理全氮、碱解氮及硝铵态氮含量最高, 氮磷钾总养分含量达 8.9% 以上。不同堆肥产品的盆栽试验发现, P4、P5 和 M2、M3、M4 处理与 CF(等氮量化肥)处理相比均显著提升小白菜品质, 并降低硝酸盐含量, M5(鸡粪)在显著提升小白菜可溶性糖、可溶性蛋白、维生素 C 的同时大大增加植株中硝酸盐含量。综上, 花生麸和兔粪作为堆肥原料, 其腐熟效率快且养分含量高, 堆肥产品显著促进了小白菜的生长。

关键词: 农业废弃物; 堆肥; 腐熟; 肥效; 高品质有机肥

中图分类号: S141.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)04-0349-12

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2021.04.048

Composting Process of Agricultural Wastes from Different Sources and Fertilizer Efficiency of Their Products

SUN Guiyang, ZHANG Guoyan, DONG Yuanjie

(College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018)

Abstract: The purpose of this study was to evaluate the composting efficiency and product fertilizer efficiency of agricultural wastes from different sources and provide the basis for the production of high-quality organic fertilizer. Six kinds of animal manure and seven kinds of plant agricultural wastes were selected as raw materials, and 13 composting treatments were set up to compare the differences of temperature, pH, C/N, humic acid, nutrients and the effects of composting products on the growth of Pakchoi. The results showed that the aerobic fermentation composting could meet the requirements of maturity after 45 days under the conditions of animal and plant material mass ratio of 7 : 3, C/N ratio of 25 : 1, moisture content of 55%~60%. Among them, TOP4 (peanut bran) and TOM1 (cow dung) treatments had the fastest temperature rise in the process of maturity, TOP1 (soybean meal), TOP3 (rapeseed cake), TOM1 (cow dung) and TOM3 (rabbit dung) treatments had the lowest C/N ratio and the most thorough maturity; TOP1, TOP4, TOM3 and TOM5 (chicken dung) treatments had the highest total nitrogen, alkali hydrolyzable nitrogen and ammonium nitrate nitrogen, and the total nutrient content of nitrogen, phosphorus and potassium was more than 8.9%. The pot experiment of different compost products showed that P4, 5 and M2, 3, 4 treatments significantly improved the quality of pakchoi and reduced the nitrate content compared with CF (equal nitrogen fertilizer). M5 (chicken manure) significantly increased the soluble sugar, soluble protein and vitamin C of pakchoi, and significantly increased the nitrate content of Pakchoi. To sum up, the decomposition efficiency of peanut bran and rabbit manure, as composting materials, was fast, and their nutrients contents were high, composting products significantly promoted the growth of Pakchoi.

收稿日期: 2021-01-06

资助项目: 山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019ZZ021)

第一作者: 孙桂阳(1997—), 男, 山东高密人, 硕士研究生, 主要从事高品质有机肥研制与应用研究。E-mail: sgy18864806061@163.com

通信作者: 董元杰(1977—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事土壤生态与植物营养研究。E-mail: yuanjiedong@163.com

Keywords: agricultural waste; compost; maturity; fertilizer efficiency; high-quality organic fertilizer

改革开放 40 年来,我国的畜牧业规模化养殖迅速发展,但与之相伴的是每年产生的约 38 亿 t 畜禽粪污^[1],大量畜禽粪污得不到有效处理,不仅造成资源的浪费,而且严重污染周边的生态环境。与此同时,由于我国大部分地区种植业和养殖业分离,大量作物秸秆以及植物源的加工废弃物利用率不高,利用方式单一,反而成为环境的负担^[2]。

农业废弃物可以通过好氧堆肥的方式生产出有机肥,有机肥养分全面,除含有氮磷钾等大量元素,还含有丰富的氨基酸、蛋白质、腐殖质等有机态养分,一方面可以促进农业废弃物的资源化和无害化,减少污染物和有害气体的排放;另一方面,高品质有机肥能够改良土壤,提升养分的有效性^[3],提高瓜果蔬菜等经济作物的产量,从而提升经济效益。前人^[4]研究表明,不同堆肥原料的理化性质不同使得有机肥产品之间存在巨大差异,且目前有机肥生产存在生产设备和工艺落后,对不同原料的堆肥配比缺乏理论依据,腐熟效率低且发酵过程中养分损失多,产品养分含量低,经济效益差等现实问题。因此,筛选养分含量较高的发酵原料,明确不同原料的发酵组合的堆肥效率及其产品肥效,对高品质有机肥的生产与推广应用具有重要的意义。

本文以 6 种动物源粪便和 7 种植物源废弃物为堆肥原料,以有机质、总腐殖酸、C/N、种子发芽指数为腐熟指标,以氮、磷、钾的全量和有效含量为养分指标,同时监测堆肥过程中温度、pH、含水率等变化,结合盆栽试验研究不同来源农业废弃物的堆肥效率及其产品的肥效,以期高品质有机肥的生产与应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料取自山东省泰安市泰山区养殖户及当地农户。堆肥于 2019 年 11 月至 2020 年 1 月在山东农业大学资源与环境学院试验站进行,共堆肥 45 天。各原料理化性质见表 1。

1.2 试验设计

将植物源废弃物与牛粪按照 3 : 7 的质量比(干基)混匀,将动物源粪便和玉米秸秆按照 7 : 3 质量比混匀,分别制成植物源堆肥处理和动物源堆肥处理,加入木屑为辅料调节碳氮比为 25 : 1,调节含水率为 55%~60%,混合均匀后装入容积为 120 L 塑料发酵桶,同时在发酵桶下方铺 1 层 5~10 cm 厚的玉米秸秆。升温期和高温期每 2 天翻堆 1 次,降温期每 4 天翻堆 1 次,人工翻堆自然通风。具体试验处理见表 2。

表 1 不同堆肥原料的理化性状

原料	含水率/%	pH	总碳/%	全氮/%	P ₂ O ₅ /%	K ₂ O/%	C/N
豆粕	10.37	—	39.34	8.16	2.03	2.42	4.82
玉米秸秆	13.26	—	47.81	0.81	1.44	1.67	59.34
菜籽饼	5.33	—	50.88	6.57	2.58	0.72	7.74
花生麸	7.16	—	50.84	8.52	1.67	2.14	5.97
食用菌渣	64.57	—	33.70	1.84	1.46	0.59	18.36
豆渣	62.56	—	52.23	3.96	1.55	3.29	13.21
红薯藤	8.45	—	52.48	2.31	1.15	3.74	23.00
牛粪	48.83	8.80	34.78	1.81	0.71	1.70	19.25
羊粪	52.51	8.03	35.82	1.93	2.32	0.38	19.75
兔粪	62.30	7.67	33.40	2.08	1.54	2.36	16.52
猪粪	65.20	8.48	38.93	1.53	0.57	1.46	25.40
鸡粪	16.30	7.44	33.48	2.60	1.60	3.42	12.88
人粪	61.35	7.29	22.27	1.28	0.82	0.36	17.49

表 2 动物源粪便与植物源农业废弃物堆肥试验设计

处理	内容	各物料添加量/kg	
		动物源粪便	植物源废弃物
TOP1	牛粪+豆粕	68.39	16.74
TOP2	牛粪+玉米秸秆	68.39	29.02
TOP3	牛粪+菜籽饼	68.39	15.85
TOP4	牛粪+花生麸	68.39	16.16
TOP5	牛粪+食用菌渣	68.39	42.34
TOP7	牛粪+豆渣	68.39	40.06
TOP8	牛粪+红薯藤	68.39	16.38
TOM1	牛粪+玉米秸秆	68.39	29.02
TOM2	羊粪+玉米秸秆	73.69	29.02
TOM3	兔粪+玉米秸秆	92.85	29.02
TOM4	猪粪+玉米秸秆	100.59	29.02
TOM5	鸡粪+玉米秸秆	41.81	29.02
TOM6	人粪+玉米秸秆	90.55	29.02

1.3 采样与测定

1.3.1 样品的采集与保存 堆肥过程中分别于第 0, 10, 25, 45 天取样,取样方法参照文献^[4],即将堆体分成多段,在每段选取 3 个高度采集等量样品,混匀后采用四分法取样,每个时期获得 3 个重复,以保证取样的代表性。样品分为 2 份,一份进行风干、研磨,另一份保存于-80 °C 冰箱待测。

1.3.2 温度、含水率、pH 的测定 每天 14:00 使用水银温度计,将堆体分成 3 段,每段随机选取 3 个点测定温度,取其平均值作为堆体的实际温度。采用铝盒称取新鲜样品在 105 °C 下烘干至恒重测定含水率。新鲜样品和去离子水以 1 : 10(W/V)混合,置于水平摇床振荡 1 h,静置 30 min 后用 pH 计测定。

1.3.3 全碳和有机质的测定 将风干后的样品粉碎、过 0.15 mm 筛后,用锡箔纸包被,使用元素分析仪(Vario EL)测定全碳。有机质含量参照有机肥料行业标准^[5],采用重铬酸钾容量法测定。

1.3.4 总腐殖酸的测定 将风干后的样品粉碎、过筛(0.15 mm),用15 g 焦磷酸钠和7 g 氢氧化钠溶于1 000 mL 水配置成焦磷酸钠浸提液在沸水浴条件下浸提1 h,冷却后过滤、定容,取适量滤液加入5 mL 0.8 mol/L 的重铬酸钾溶液和15 mL 浓硫酸,带上小漏斗置于沸水浴中氧化30 min,冷却至室温转移到锥形瓶,加水至150 mL 左右,加入3滴邻菲罗啉指示剂,用0.2 mol/L 的硫酸亚铁滴定。

1.3.5 全氮、全磷、全钾的测定 将风干后的样品粉碎、过0.85 mm 筛,准确称取0.1~0.2 g(精确到0.000 1 g),用硫酸和过氧化氢消煮后,定容并过滤。采用凯氏全自动定氮仪测定全氮含量;用钒钼黄比色法测定全磷含量;用火焰光度法测定全钾含量。

1.3.6 硝态氮和铵态氮含量测定 新鲜样品和1 mol/L KCL 以1:10(W/V)混合,置于水平摇床振荡2 h后,在4 ℃下10 000 r/min 离心20 min,将上清液用0.45 μm 水系微孔滤膜过滤。用连续流动分析仪测定硝态氮和铵态氮含量。每个样品设3次重复。

1.3.7 碱解氮和有效磷、有效钾的测定 碱解氮含量参照土壤碱解扩散法测定,有效磷和有效钾含量参照农业行业标准 NY/T 300—1995^[6]测定。

1.3.8 种子发芽指数的测定 堆肥样品与蒸馏水按1:10 比例充分混合,摇床振荡2 h,取10 mL 滤液3 000 r/min 离心10 min,吸取5 mL 上清液于铺有滤纸的培养皿中,在滤纸上放置30粒小白菜种子,同时设对照组,即在另一个铺有滤纸的培养皿中加入5 mL 蒸馏水后同样放置30粒种子。25 ℃条件下培养箱中培养2天,计算种子的发芽率,并测量种子的根长。每个处理设3次重复。

1.4 盆栽试验

为验证不同原料发酵组合的堆肥产品对作物产量和品质的影响,于山东农业大学资源与环境学院土肥资源高效利用实验室进行室内盆栽试验。供试作物为小白菜,栽培时间为45天。盆栽设置16个处理,空白处理中不添加任何肥料,有机肥处理按照300 mg/kg 土的施氮量,以全氮计算加入等氮量的有机肥,同时设置添加等氮量的化肥处理作为对照。各处理具体内容见表3。

每个处理设置3个重复,每盆播20粒种子,15天后间苗至每盆6株,45天后测定植株生物量(鲜干重)、农艺性状(株高、叶柄长、叶面积)和品质指标(可溶性糖、可溶性蛋白、Vc、硝酸盐含量)。

1.5 数据处理

所得试验数据采用Excel 2016 和 SPSS 22 软件进行处理和统计分析,采用Duncan 法来比较处理间的差异,显著性水平设置为 $P<0.05$ 。

表3 盆栽试验设计

处理	试验内容	施肥量/g
CK	不施肥	0
CF	施用等氮量的化肥	1.63
P1	施用堆肥产品 TOP1	25.67
P2	施用堆肥产品 TOP2	37.33
P3	施用堆肥产品 TOP3	30.09
P4	施用堆肥产品 TOP4	25.57
P5	施用堆肥产品 TOP5	35.65
P6	施用堆肥产品 TOP6	29.39
P7	施用堆肥产品 TOP7	41.26
M1	施用堆肥产品 TOM1	37.33
M2	施用堆肥产品 TOM2	36.39
M3	施用堆肥产品 TOM3	36.76
M4	施用堆肥产品 TOM4	38.52
M5	施用堆肥产品 TOM5	34.12
M6	施用堆肥产品 TOM6	46.47

2 结果与分析

2.1 堆肥过程中温度、含水率、pH 的变化

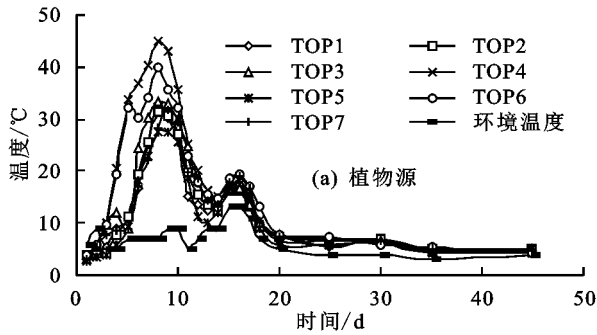
2.1.1 温度 从图1a可以看出,各处理均在堆体完成后第1天开始升温, TOP4 和 TOP6 处理升温最快,均在第8天升至最高温度,其余处理则在大约第10天达到最高温度,其中 TOP4 处理温度最高达到44.9 ℃。由于环境温度较低,各处理高温期持续时间较短,在第10天前后达到最高温度后开始降温,其中 TOP4 处理高温期持续时间最长,35 ℃以上时间为5天,说明 TOP4 处理的微生物最为活跃,发酵速率最快,且有更长的高温期。

从图1b可以看出,各处理在堆体完成后迅速进入升温阶段,相比于植物源堆肥处理,动物源堆肥处理升温速度更快,但最高温度较低,说明植物源堆肥处理更加有利于微生物分解放热。各处理最高温度大小顺序为 TOM1>TOM5>TOM4>TOM3>TOM6>TOM2,其中 TOM1 处理温度上升速度最快,且温度最高为39.9 ℃,说明 TOM1 处理发酵启动最快,微生物活跃程度最高。堆肥进行到12天时经历连续3天的阴雨天气,温度迅速下降,15天温度有所回升,20天进入低温腐熟阶段,至堆肥结束,各处理最终温度无显著差异,说明环境温度对堆肥过程影响较大,低温环境会减少堆肥高温期的持续时间,使堆体提早进入低温腐熟阶段。

2.1.2 含水率和 pH 从表4可以看出,由于温度较低,且受天气影响,至堆肥结束各处理的含水率均未下降至30%以下,含水率大小顺序为 TOP7>TOP3>TOP6>TOP1>TOP2>TOP4>TOP5、TOM3>TOM5>TOM2>TOM4>TOM1>TOM6。

堆肥过程中 pH 整体呈现上升趋势,且动物源堆

肥处理的 pH 变化幅度大于植物源堆肥处理,至堆肥结束各处理 pH 大小顺序为 TOP6>TOP2>TOP1>TOP7>TOP3>TOP4>TOP5、TOM4>TOM5>TOM1>TOM2>TOM6>TOM3。不同来源堆肥处理中 pH 变化最大的分别为 TOP2 和 TOM5,分



别为 0.66 和 1.94,说明 TOP2 和 TOM5 处理在堆肥过程中由氨挥发带来的 pH 提升最为明显。pH 变化较小的是 TOP4 和 TOM3,分别为 0.08 和 0.47,说明二者在堆肥过程中的 pH 变化较为缓和,堆体环境最稳定。

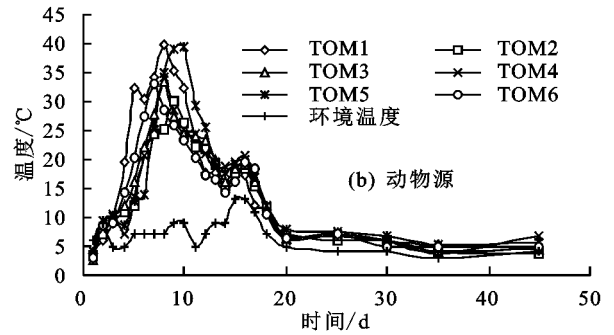


图 1 植物源发酵组合和动物源发酵组合温度

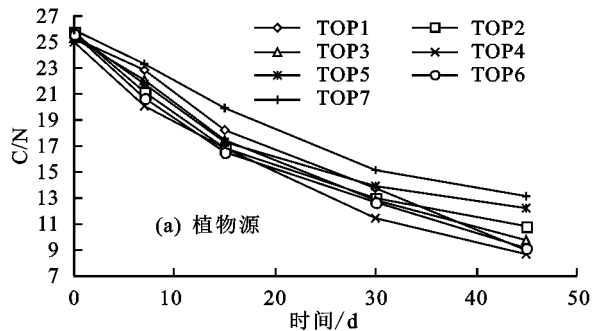
表 4 不同来源农业废弃物发酵组合含水率和 pH

来源	处理	含水率/% (45 d)	pH	
			0 d	45 d
植物源	TOP1	0.36cd	8.09a	8.15b
	TOP2	0.35d	7.74bcd	8.40a
	TOP3	0.40b	7.86abc	8.09b
	TOP4	0.33e	7.98ab	8.06bc
	TOP5	0.30f	7.72cd	7.90c
	TOP6	0.38bc	7.80bc	8.41a
	TOP7	0.42a	7.55d	8.14b
动物源	TOM1	0.35c	7.74ab	8.40b
	TOM2	0.41ab	7.38b	8.33bc
	TOM3	0.42a	7.63ab	8.11d
	TOM4	0.39b	7.98a	8.68a
	TOM5	0.41ab	6.48c	8.42b
	TOM6	0.33d	7.55b	8.23c

注:同列不同字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2 堆肥产品腐熟指标比较

2.2.1 C/N 从图 2a 可以看出,随着堆肥腐熟,各处理 C/N 逐渐下降,至堆肥结束各处理 C/N 大小顺序



为 TOP7>TOP5>TOP2>TOP3>TOP6>TOP1>TOP4,其中 C/N 变化最大的 3 个处理为 TOP6>TOP4>TOP1,C/N 均下降 60% 以上,最终 TOP4 处理 C/N 最低为 8.67,说明 TOP4 处理的微生物活跃程度最高,碳素消耗最快,腐熟彻底。

从图 2b 可以看出,C/N 随堆肥腐熟而呈现下降的趋势,至堆肥结束各处理 C/N 大小顺序为 TOM2>TOM4>TOM5>TOM6>TOM1>TOM3,其中 C/N 变化最大的 3 个处理为 TOM3>TOM1>TOM6,C/N 均下降 55% 以上,说明 TOM3 处理在动物源处理中腐熟效率最高,但总体而言,相比于动物源堆肥处理,植物源堆肥处理的 C/N 降低幅度更大,最终 C/N 更低,腐熟效果更好。

Morel 等^[7]提出的使用 $T = (\text{最终 C/N}) / (\text{初始 C/N})$ 来表征腐熟度的计算方法,各处理 T 值为 0.35~0.58,说明堆肥结束各处理均满足腐熟标准($T < 0.60$),其中 TOP4 和 TOM3 处理的 T 值最低,分别为 0.35 和 0.39,同样说明 TOP4 和 TOM3 处理腐熟程度最高。

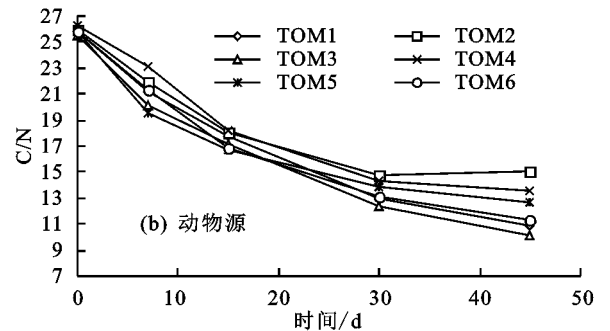


图 2 植物源发酵组合和动物源发酵组合 C/N

2.2.2 有机质和总腐殖酸 从表 5 可以看出,有机碳含量随堆肥腐熟而逐渐降低,至堆肥结束各处理有机质含量差异性显著,其大小顺序为 TOP6>TOP1>TOP4>TOP5>TOP2>TOP3>TOP7、TOM5>

TOM1>TOM4>TOM6>TOM3>TOM2,各处理有机碳含量较初始分别下降 18.5%,32.93%,38.78%,17.54%,18.75%,10.94%,43.61%及 32.93%,50.36%,42.32%,36.78%,28.95%,28.52%,其中 TOP1、TOP4、

TOP6 处理有机碳含量下降幅度较小,说明不同原料的有机质分解速率差异巨大,豆粕、豆渣这类有机碳含量较高的原料有机质分解需要较长时间。

总腐殖酸含量大小顺序为 TOP1 > TOP7 > TOP6 > TOP3 > TOP4 > TOP5 > TOP2、TOM5 > TOM3 > TOM2 > TOM4 > TOM6 > TOM1。总体而言,植物源堆肥处理的腐殖酸含量高于动物源堆肥处理,说明适量添加植物源废弃物能提升堆肥产品中腐殖酸的含量,其中 TOM5 处理腐殖酸含量显著高于其余所有处理,说明相比于其他粪便,鸡粪作为堆肥原料更有利于腐殖酸的形成。

表 5 不同来源农业废弃物发酵组合有机质和腐殖酸
单位: %

来源	处理	有机碳		有机质	总腐殖酸
		0 d	45 d	45 d	45 d
植物源	TOP1	49.06b	39.98b	68.93b	4.15a
	TOP2	44.95e	30.15d	51.98d	3.64d
	TOP3	46.84cd	28.68d	49.44d	4.02b
	TOP4	47.52bc	39.19b	67.56b	3.99b
	TOP5	39.52f	32.11c	55.36c	3.74c
	TOP6	51.10a	45.51a	78.46a	4.05b
	TOP7	45.62de	25.73e	44.36e	4.14a
动物源	TOM1	44.95c	30.15b	51.98b	3.64c
	TOM2	42.77d	21.23d	36.60d	3.93bc
	TOM3	45.69bc	25.89c	44.64c	4.04b
	TOM4	47.49ab	30.02b	51.76b	3.80bc
	TOM5	48.51a	34.46a	59.42a	5.57a
	TOM6	36.25e	25.91c	44.67c	3.78bc

表 6 不同来源农业废弃物发酵组合种子发芽势

来源	处理	发芽率/%		根长/cm		种子发芽指数	
		30 d	45 d	30 d	45 d	30 d	45 d
植物源	空白	91.00ab	87.00bc	1.18bc	1.89de	—	—
	TOP1	93.33a	95.67a	1.80a	2.91b	1.56a	1.70b
	TOP2	86.67abc	90.00abc	1.34bc	2.13cd	1.07cd	1.17d
	TOP3	88.00abc	87.67bc	1.53ab	2.34c	1.24b	1.26d
	TOP4	91.00ab	94.33ab	1.33bc	3.22a	1.12abc	1.86a
	TOP5	81.33bcd	87.67bc	1.34bc	2.22c	1.01d	1.19d
	TOP6	91.00ab	87.67bc	1.40bc	2.71b	1.18bc	1.46c
动物源	空白	91.00a	87.00a	1.18a	1.89c	—	—
	TOM1	86.67ab	90.00a	1.34a	2.13bc	1.07a	1.17b
	TOM2	90.33a	86.67a	1.16a	2.43b	0.97b	1.29b
	TOM3	79.00bc	93.33a	1.29a	3.48a	0.94b	1.98a
	TOM4	88.67ab	86.33a	1.06ab	1.90c	0.87b	1.01c
	TOM5	74.67c	90.00a	0.79bc	3.37a	0.55c	1.85a
	TOM6	86.67ab	86.67a	0.58c	1.66c	0.47c	0.88c

2.3 堆肥产品养分含量变化

2.3.1 不同来源农业废弃物堆肥全氮、碱解氮、硝铵态氮

(1)全氮含量。由图 3a 可知,各处理全氮含量随着堆肥进行总体呈上升趋势,至堆肥结束各处理全氮

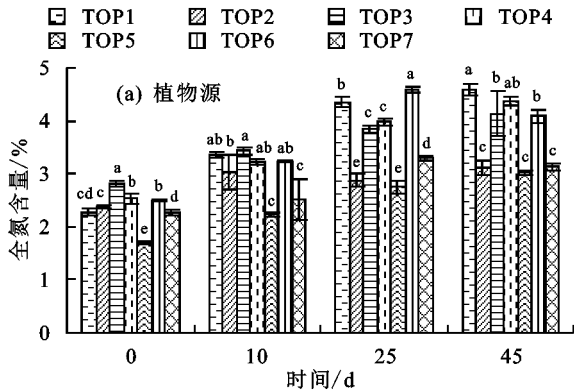
2.2.3 种子发芽势(GI) 从表 6 可以看出,植物源堆肥处理在堆肥 30 天已经基本腐熟,各处理发芽率达 80% 以上,种子发芽指数均超过 0.8,至堆肥结束各处理发芽率略有升高,但差异性并不显著,说明不同植物源堆肥原料在后熟期的腐熟效率仍存在显著差异;根长较 30 天提升明显,总体呈现 TOP4 > TOP1 > TOP6 > TOP3 > TOP5 > TOP2 > TOP7,其中 TOP4 处理的根最长,为 3.22 cm;发芽指数随堆肥腐熟进行进一步提升,其大小顺序为 TOP4 > TOP1 > TOP6 > TOP3 > TOP5 > TOP2 > TOP7,其中 TOP4 处理的发芽指数为 1.86,显著高于其他处理,说明 TOP4 处理对小白菜的促生效果最好。

堆肥 30 天时,动物源堆肥发芽指数显著低于植物源堆肥处理,说明在粪便中添加植物源废弃物能提高堆肥腐熟效率,提升堆肥产品的促生效果,除 TOM5 和 TOM6 处理外,其余处理种子发芽指数均高于 0.8。堆肥 45 天后,动物源堆肥处理发芽率除 TOM3 和 TOM5 处理较 30 天有显著提升外,其余处理变化不大;但根长较 30 天显著提升,总体呈现为 TOM3 > TOM5 > TOM2 > TOM1 > TOM4 > TOM6,其中 TOM3 处理根长和变化幅度均最大分别为 3.48 cm 和提升 170%;各处理种子发芽指数均超过 0.8,其大小顺序为 TOM3 > TOM5 > TOM2 > TOM1 > TOM4 > TOM6,均达到腐熟标准^[8-9],其中 TOM3 处理为 1.98,显著高于其他处理,说明 TOM3 处理的促生效果最好。

含量大小顺序为 TOP1 > TOP4 > TOP3 > TOP6 > TOP7 > TOP2 > TOP5。与初始堆体相比,各处理全氮含量提升比例依次为 TOP1 > TOP5 > TOP4 > TOP6 > TOP3 > TOP7 > TOP2,其中提升最大的为

TOP1 处理,较初始提升 101%,说明豆粕作为原料最有利于提升堆肥氮含量。

从图 3b 可以看出,与植物源堆肥处理相同,堆体全氮含量随堆肥腐熟逐渐上升。堆肥结束后,各处理全氮含量为 TOM5>TOM3>TOM2>TOM4>TOM1>TOM6,与初始堆体相比,各处理的养分含



量提升幅度较植物源堆肥处理相对缓和,依次为 TOM6>TOM2>TOM3>TOM5>TOM1>TOM4,其中 TOM6 处理增幅最大,较初始提升 66%,说明人粪具有良好的腐熟特性,但受初始养分含量制约,最终产品的氮含量最低,鸡粪腐熟效率并不突出,但产品的氮含量较高。

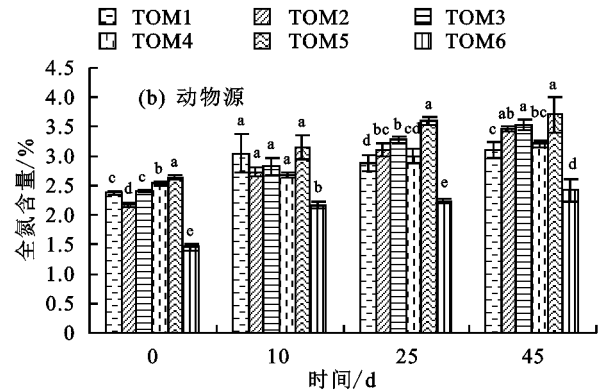
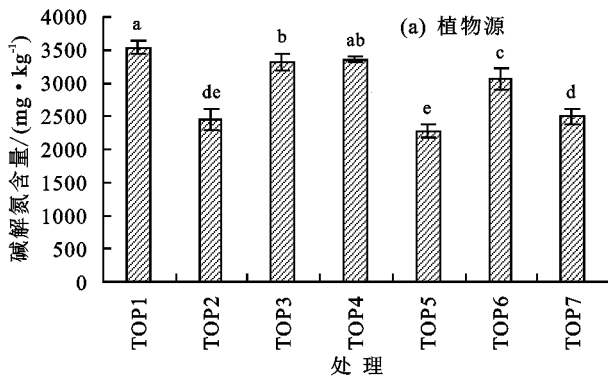


图 3 植物源发酵组合和动物源发酵组合全氮含量

(2)碱解氮含量。从图 4a 可以看出,堆肥结束时各处理碱解氮含量差异显著,其大小顺序为 TOP1>TOP4>TOP3>TOP6>TOP7>TOP2>TOP5,说明添加豆粕、花生麸等有机态氮较高的物料能提升堆肥产品中有效氮含量。



从图 4b 可以看出,动物源堆肥处理的碱解氮含量总体低于植物源堆肥处理,各处理间差异也达到显著水平,整体呈现 TOM5>TOM3>TOM2>TOM4>TOM1>TOM6,说明兔粪和鸡粪的堆肥产品中有效氮最高。

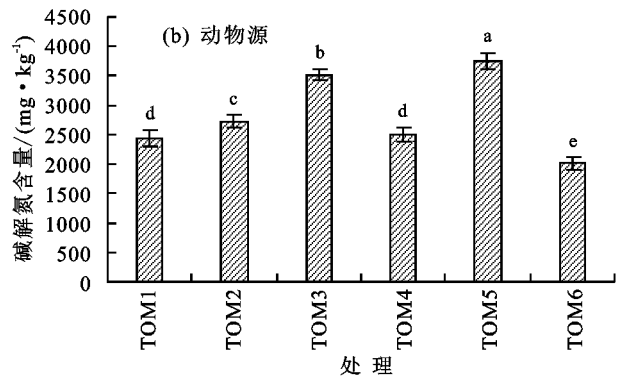


图 4 植物源发酵组合和动物源发酵组合碱解氮含量

(3)硝态氮、铵态氮含量。从图 5a 可以看出,植物源堆肥处理初始硝态氮含量较低,约为 100 mg/kg,随着堆肥腐熟,硝态氮含量逐渐升高,在堆肥前 10 天,硝态氮增长速率最快,至堆肥结束,各处理硝态氮含量依次为 TOP4>TOP6>TOP1>TOP3>TOP2>TOP5>TOP7,其中增幅最大的为 TOP4 处理,较初始硝态氮含量提升 659.7mg/kg。

从图 5b 可以发现,动物源堆肥处理的初始硝态氮略高于植物源堆肥处理,约为 150 mg/kg,堆肥前 10 天增长速率最快,45 天堆肥完成时,各处理硝态氮含量呈现 TOM3>TOM5>TOM1>TOM2>TOM4>TOM6,TOM3 处理硝态氮含量显著高于其余处理且增幅最大,为 606.1 mg/kg。

铵态氮含量均呈现先升高后降低的趋势,动物源堆肥处理的铵态氮含量总体高于植物源堆肥处理。堆肥结束后不同来源堆肥处理铵态氮含量的大小顺序为 TOP4>TOP6>TOP1>TOP3>TOP2>TOP5>TOP7,TOM3>TOM5>TOM2>TOM1>TOM4>TOM6,其中降低幅度最小的为 TOP4 和 TOM5 处理,较初始降低 33.5%和 36.2%。

2.3.2 堆体全磷、有效磷 从表 7 可以看出,堆肥结束后各处理全磷含量大小顺序为 TOP7>TOP3>TOP4>TOP1>TOP6>TOP2>TOP5、TOM2>TOM3>TOM5>TOM6>TOM1>TOM4,但由于植物源堆肥处理均使用牛粪,因而磷含量并未出现较大差异,但不同处理间全磷含量增幅差异显著,至堆肥结束全磷含量增幅均超过 110%,最大的为 TOP7 处理较

(4)铵态氮含量。从图 6 可以看出,堆肥过程中

原来提升 247%,说明红薯藤中磷含量丰富。速效磷含量呈现 TOP4 > TOP3 > TOP1 > TOP2 > TOP7 > TOP6 > TOP5, TOM5 > TOM3 > TOM4 > TOM2 > TOM1 > TOM6,动物源堆肥处理速效磷含量显著高于

植物源堆肥处理,其中速效磷含量 TOM5 处理的速效磷含量在 0 天和 45 天均显著高于其余处理,但速效磷在全磷中所占比例随堆肥腐熟而呈现降低趋势,说明堆肥过程中速效磷的增长速率与全磷并不一致。

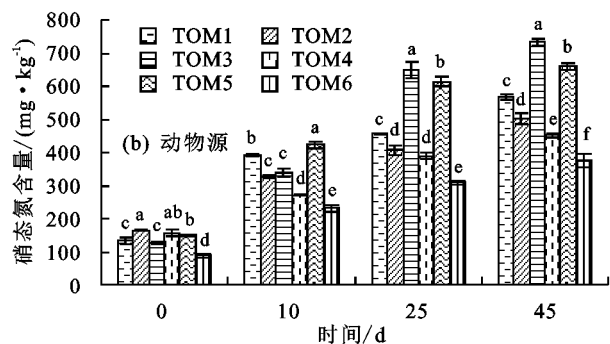
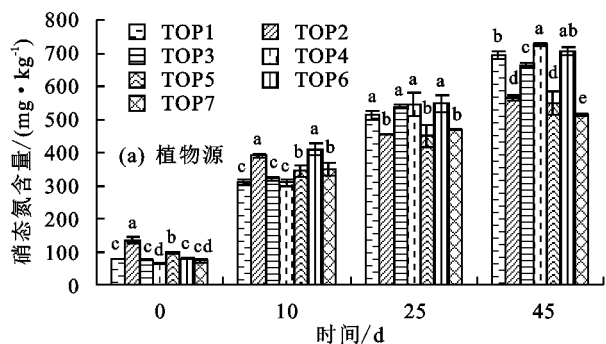


图 5 植物源发酵组合和动物源发酵组合硝态氮含量

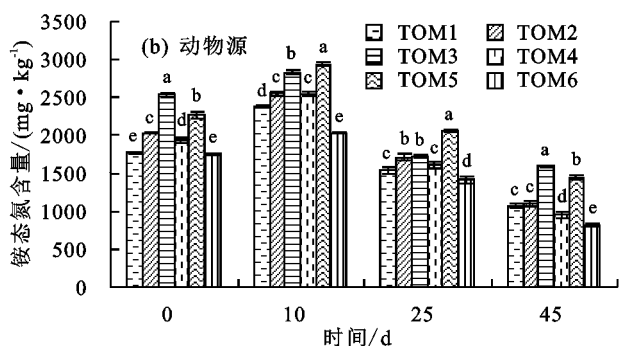
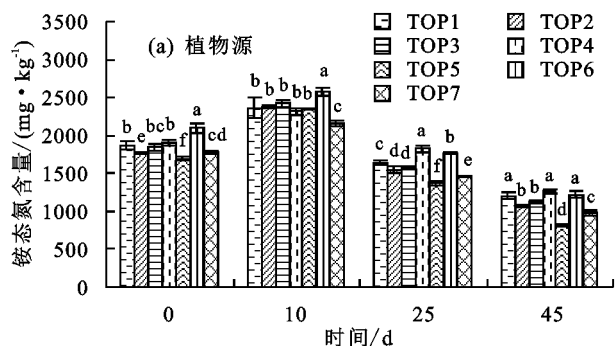


图 6 植物源发酵组合和动物源发酵组合铵态氮含量

表 7 不同来源农业废弃物发酵组合全磷、速效磷含量

来源	处理	全磷/%		速效磷/(mg·kg ⁻¹)		速效磷在全磷中所占比例/%	
		0 d	45 d	0 d	45 d	0 d	45 d
植物源	TOP1	0.89b	2.10b	2694.59c	4953.92ab	30.43b	23.62a
	TOP2	0.91b	1.93c	2274.55e	4597.52bc	25.10d	23.86a
	TOP3	1.02a	2.49a	2610.58c	5218.68a	25.55d	20.98b
	TOP4	1.09a	2.44a	2908.44b	5249.23a	26.72cd	21.46b
	TOP5	0.62d	1.84c	1701.75f	3131.16d	27.34bcd	17.03c
	TOP6	0.83b	2.08b	2485.84d	4196.98c	29.84bc	20.24b
	TOP7	0.74c	2.56a	4293.33a	4597.52bc	58.32a	17.96c
动物源	TOM1	0.91d	1.93d	2274.55e	5517.02d	25.10d	28.63b
	TOM2	1.53a	3.54a	5250.53b	5908.05bc	34.38c	16.69d
	TOM3	1.38b	2.71b	4766.84c	6571.98b	34.68c	24.27c
	TOM4	0.77e	1.78e	2198.17e	6115.78c	28.70d	34.51a
	TOM5	1.26c	2.54c	6559.04a	8111.65a	52.30a	31.97a
	TOM6	0.75e	2.42c	2944.08d	4233.96e	39.37b	17.55d

注:表中全磷、速效磷含量均为 P₂O₅ 含量。

2.3.3 堆体全钾、有效钾 从表 8 可以看出,随着堆肥进行,各处理全钾含量均有不同程度的增长,至堆肥结束全钾含量总体呈现 TOP2 > TOP1 > TOP4 > TOP3 > TOP6 > TOP7 > TOP5, TOM3 > TOM5 > TOM1 > TOM4 > TOM6 > TOM2,其中动物源堆肥处理腐熟前后全钾含量顺序基本一致,可见堆肥产品钾含量主要由堆肥原料决定,腐熟过程对不同堆肥处

理全钾含量的影响不大。45 天速效钾含量的大小顺序为 TOP4 > TOP1 > TOP2 > TOP3 > TOP7 > TOP6 > TOP5, TOM3 > TOM5 > TOM1 > TOM6 > TOM4 > TOM2,其中 TOM3 和 TOM5 处理的速效钾含量均显著高于其他处理,但速效钾在全钾中所占比例均表现为逐渐下降,说明速效钾含量主要受全钾含量影响,但变化幅度与全钾并不一致。

表 8 不同来源农业废弃物发酵组合全钾、速效钾含量

来源	处理	全钾/%		速效钾/(mg·kg ⁻¹)		速效钾在全钾中所占比例/%	
		0 d	45 d	0 d	45 d	0 d	45 d
植物源	TOP1	1.45d	2.23ab	5159.26b	5507.41b	35.33b	24.67b
	TOP2	1.55c	2.34a	4100.00d	4785.19c	26.00d	20.67de
	TOP3	1.66b	1.98c	3581.48e	4418.52d	21.67e	22.33cd
	TOP4	2.00a	2.12b	5425.93a	5751.85a	27.33c	27.00a
	TOP5	1.23e	1.68d	2088.89g	3392.59g	17.00g	20.33e
	TOP6	1.67b	1.81d	3285.19f	3959.26f	19.67f	22.00de
	TOP7	1.23e	1.77d	4714.81c	4240.74e	38.33a	24.00bc
动物源	TOM1	1.55c	2.34b	3884.21d	4785.19c	25.00b	20.67b
	TOM2	1.27d	1.96c	3203.51e	3700.00e	25.33b	19.00c
	TOM3	2.11b	2.80a	6831.58a	7225.93a	32.33a	26.00a
	TOM4	1.55c	2.32b	2926.32f	4207.41d	19.00c	18.33c
	TOM5	2.38a	2.73a	6249.12b	7029.63b	26.67b	25.67a
	TOM6	1.66c	2.42b	4298.25c	4729.63c	26.00b	19.33bc

注:文中全钾、速效钾含量均为 K₂O 含量。

2.4 堆肥产品对盆栽小白菜生长的影响

2.4.1 不同来源有机肥对小白菜农艺性状和产量的影响 小白菜盆栽的农艺性状结果见表 9。各处理株高和叶柄长的大小顺序基本一致,3 项指标均显著高于 CK,其中 P4 处理株高、叶柄长和叶面积均高于同类其余处理,3 项指标较 CK 分别提升 76%,34%,100%,说明 TOP4 处理堆肥产品对小白菜生长的促进效果最好;M5 处理的株高和叶柄长均显著高于同类其余处理,较 CK 分别提升 66%,27%,但最终叶面积小于 M3 处理,这可能是由于 P4 和 M5 处理硝态氮含量均为同类最高,小白菜对硝态氮的吸收利用能力高于其他形态的氮素。

各处理 SPAD 值较 CK 提升并不显著,动物源堆肥处理的 SPAD 值略高于植物源堆肥处理,M5 的 SPAD 值最高,较 CK 和 CF 分别提升 58%和 31%,

各处理地上部鲜干重差异显著,鲜重的大小顺序为 P1>P4>P6>P3>CF>P2>P7>P5>CK, M5>M3>M2>CF>M1>M4>M6>CK,P1 和 P4 处理鲜干重均显著高于其余处理,较 CK 分别提升 307%和 291%,动物源堆肥处理的鲜干重略低于植物源堆肥处理,其中 M3 和 M5 处理增产效果显著高于其余处理,鲜重较 CK 分别提升 219%和 276%,说明 TOP1 和 TOM5 堆肥产品对小白菜的增产效果较好。

表 9 不同来源农业废弃物发酵组合对小白菜农艺性状和产量的影响

来源	处理	株高/cm	叶柄长/cm	叶面积/cm ²	SPAD	地上部生物量/(g·株 ⁻¹)	
						鲜重	干重
植物源	CK	15.70f	10.41de	44.60f	23.57d	6.31i	0.19h
	CF	22.57b	13.09b	65.04d	28.40bc	11.96e	0.82e
	P1	27.77a	14.20a	83.37b	30.57a	25.66a	1.28b
	P2	20.73c	11.03d	68.62d	27.03c	10.19f	0.87de
	P3	22.70b	11.90c	74.85c	27.63bc	14.29d	0.92d
	P4	27.57a	13.93a	89.11a	29.67ab	24.65b	1.40a
	P5	17.20e	9.53f	53.47e	24.13d	7.93h	0.43g
动物源	P6	23.23b	12.07c	73.24c	27.70bc	15.13c	1.09c
	P7	18.20d	9.97ef	57.29e	26.30c	9.46g	0.70f
	CK	15.70g	10.41cd	44.60f	23.57e	6.31f	0.19e
	CF	22.57c	13.09ab	65.04d	28.40cd	11.96c	0.82bcd
	M1	20.73d	11.03c	68.62c	27.03d	10.19d	0.87bc
	M2	21.33d	11.17c	71.29c	30.23c	12.40c	0.94b
	M3	23.93b	12.27b	87.93a	34.20b	20.11b	1.65a
	M4	19.50e	10.67c	62.67d	29.43c	10.15d	0.79cd
	M5	26.07a	13.23a	78.98b	37.30a	23.72a	1.53a
M6	17.63f	9.67d	55.20e	29.83c	9.37e	0.70d	

2.4.2 不同来源有机肥对小白菜品质指标的影响

由表 10 可以看出,各堆肥产品较 CK 对小白菜可溶性糖、可溶性蛋白以及维生素 C 含量提升显著,但相同施氮量(300 mg/kg)条件下,与 CF 处理(施用化肥)相比,单独施用堆肥产品对品质的提升效果差异较大。各处理可溶性糖含量为 10~31 mg/kg,与 CK 相比,各处理均显著提高可溶性糖含量,其中 P1、P4、M2、M3、M5 处理显著高于 CF 处理,P4 和 M3 处理较 CF 提升 65% 和 105%。各处理间可溶性蛋白含量均达到显著水平,在所有堆肥处理中,P4 和 M5 处理较 CF 分别提升 112% 和 56%。各处理堆肥产品的维生素 C 含量为 155~394 mg/kg,除 P5 和 P7 外,均高于 CK 和 CF 处理,其中 P1 和 M5 处理较 CF 提升 115% 和 60%,维生素 C、可溶性糖和可溶性蛋白三者含量变化基本一致,说明 TOP1 和 TOM5 堆肥产品对小白菜品质提升效果较好。各处理硝酸盐含量变化幅度较大,其大小顺序为 P6>CF>P7>P1>P2>CK>P3>P5>P4,M5>CF>M1>M6>CK>M4>M2>M3,说明不同来源堆肥产品对硝酸盐的降低效果差异显著;P3、P4、P5 及 M2、M3、M4 处理的小白菜硝酸盐含量低于 CK,其中 P4、M3 含量最低,分别为 433.54,327.38 mg/kg,二者硝酸盐含量较 CK 分别降低 39% 和 54%,说明 TOP4 和 TOM3 堆肥产品能显著降低小白菜硝酸盐含量。

表 10 不同来源农业废弃物发酵组合对小白菜品质的影响

		单位:mg/kg			
来源	处理	可溶性糖	可溶性蛋白	维生素 C	硝酸盐
植物源	CK	10.58e	1.37f	134.29e	712.21de
	CF	15.12c	3.37d	182.87cd	934.17b
	P1	16.97b	5.63b	394.31a	811.12c
	P2	15.72bc	3.30d	215.73bc	779.76cd
	P3	14.62c	3.77c	241.44b	704.97de
	P4	24.89a	7.15a	381.45a	433.54f
	P5	12.49d	2.49e	155.72de	682.05e
动物源	P6	14.09cd	5.67b	247.16b	1048.77a
	P7	15.23c	3.38d	174.30de	824.39c
	M1	15.72c	3.30c	215.73cd	779.76c
	M2	18.13b	3.54c	228.59bcd	403.38e
	M3	31.04a	4.07b	240.02bc	327.38e
	M4	13.55de	2.77d	210.01de	590.37d
	M5	17.91b	5.25a	292.88a	1188.71a
	M6	12.58e	3.29c	254.30b	729.09c

3 讨论

3.1 堆肥过程中腐熟指标的变化

pH 是影响堆体微生物活动的重要环境指标,是反映堆肥腐熟进程以及衡量堆肥是否腐熟的基本指标。胡雨彤等^[10]研究发现,牛粪堆肥过程中 pH 呈

现升—降—升—降的趋势,最终稳定在 7.5~8.5;张建华等^[11]用猪粪进行堆肥发现,最终堆肥 pH 稳定在 8~9。本研究结果表明,由于堆肥原料不同,各处理间 pH 始终存在差异,但最终大致维持在 7.5~8.5,其中 TOM5 处理(鸡粪)pH 变化最大从 6.48 上升至 8.42,这可能是由于鸡粪中全氮含量较高,腐熟过程中有机态氮经微生物作用产生大量氨气,从而使堆体 pH 大幅升高,鸡粪处理的铵态氮含量显著高于其他处理也可以说明这一点。

C/N 对发酵过程中微生物的繁殖和活跃有关键作用,碳素为微生物提供能量,氮素则被用于原生质的合成,微生物每转化利用 1 份氮,需要消耗 25 份碳^[12-13]。前人^[14]研究表明,堆肥过程中 C/N 呈下降趋势,堆肥最适的 C/N 为 25 左右,C/N 降到 20 以下时堆肥达到腐熟。本研究结果表明,各处理 C/N 均随堆体腐熟而逐渐下降,但植物源堆肥处理 C/N 下降速度更快,且最终产品的 C/N 较动物源堆肥处理更低,其中 TOP1(豆粕)和 TOP4(花生麸)处理 C/N 显著低于其余处理,分别为 9.01 和 8.67。这可能是由于花生麸和豆粕等原料中含有大量的淀粉、脂肪、蛋白质等,而纤维素和木质素含量较少,其碳氮的存在形式更易被微生物利用,因而发酵速率更快,纤维素含量较高的 TOP7(红薯藤)处理最终 C/N 显著高于其他处理,也从侧面解释了这一点。

种子发芽试验是评价不同原料堆肥腐熟程度的可靠指标^[15]。Zucconi 等^[8]研究认为,种子发芽势>0.5 时堆肥已经腐熟;吴银宝等^[9]研究表明,种子发芽指数>0.7 可认为堆肥腐熟。本研究结果表明,堆肥 30 天,植物源堆肥处理的种子发芽率显著高于动物源堆肥处理,说明在粪便中适当添加豆粕、花生麸等有机态氮含量较高的农业废弃物可以加快堆肥腐熟,提升堆肥产品的促生效果;至 45 天各处理种子发芽数均高于 0.8,说明各堆肥均已达到腐熟。各处理间种子发芽率差异不大,这可能是由于试验用的小白菜种子发芽率较高。TOP4、TOM3、TOM5 处理的根长和 GI 显著高于其余处理,说明三者对小白菜具有很强的促生效果。

有机碳是微生物生命活动的能量来源,一定程度上反映堆肥腐熟情况。腐殖酸含量是评价堆肥腐熟度和产品肥效的重要指标^[16],主要来源于堆体中微生物的分解转化作用,其腐殖化形成与矿质化分解过程共同存在^[17]。任静^[18]研究发现,堆肥前期温度变化较大,腐殖酸的存在并不稳定,高温期过后腐殖酸结构和含量趋于稳定;Zhao 等^[16]研究表明,高半纤

纤维素堆肥原料和较低的碳氮比更有利于腐殖酸的形成;李恕艳等^[17]研究认为,堆肥后期易降解物质减少,微生物利用木质素、纤维素等物质作为碳源,同时生成结构复杂的腐殖质;王亚飞^[14]通过多种粪便堆肥证明微生物数量与腐殖酸含量具有显著相关性。本研究结果表明, TOP7 处理(红薯藤)和 TOM5 处理(鸡粪)腐殖酸含量最高,可能是由于红薯藤中含有大量纤维素和木质素,有利于堆肥后期微生物分解利用形成腐殖质;而鸡粪中微生物量往往高于其他粪便^[14],这可能是鸡粪堆肥后期腐殖酸含量高于其余粪便处理的原因。综上,有机质含量随堆肥腐熟而逐渐降低,且由于堆肥原料不同而有机碳分解速率差异显著;堆体腐殖酸的产生与有机质分解并不同步,可能与堆体微生物量和纤维素含量有关;腐殖酸含量与 C/N 和 T 值以及种子发芽势趋势相近,在一定程度上可反映堆肥的腐熟程度,但由于不同物料腐殖酸含量存在较大差异,因而并不适合作为不同物料的腐熟评价指标。

3.2 堆肥过程中养分指标的变化

氮素是在堆肥过程中的活跃因素,也是评价堆肥产品养分的重要指标,主要以蛋白质、氨基酸等有机态氮和硝、铵态氮等无机氮的形式存在。无机氮在全氮中所占比例也能反映堆肥腐熟情况^[19]。前人^[20]研究表明,堆肥前期随着温度升高,有机态氮的矿化作用以及微生物的氨化作用增强,使得铵态氮含量增加,其中一部分被微生物应用于自身生命体合成并部分转化为腐殖质,一部分经硝化作用转化为硝态氮,还有一部分以氨气的形式挥发损失,总体呈现先升高后降低的趋势,而硝态氮则随着堆肥进行而不断增加。本研究结果表明,堆肥 25 天, TOP6 处理全氮含量显著高于其他处理,但最终低于 TOP1 和 TOP4 处理,这可能是由于 TOP6 处理的氨化作用较为剧烈,在短时间内大量有机态氮经微生物作用转化为氨气而损失,说明豆渣作为堆肥原料有机态氮含量丰富,但堆肥过程中氮素损失较为严重。45 天植物源堆肥处理全氮含量较初始的增幅整体高于动物源堆肥处理,碱解氮含量则相反。各处理铵态氮含量大致呈先增加后减少的趋势,在堆肥前 10 天铵态氮含量迅速上升,其中 TOP5 和 TOM1 处理增幅较大,分别为 38% 和 34%,这可能是由于:一方面这 2 个处理的初始 pH 适宜,且变化幅度较小,为微生物分解有机氮提供稳定环境;另一方面,二者的氮含量较低,氨化作用相对缓和,氨气的损失量较少。而 TOM4 (猪粪)处理在堆肥前 10 天和堆肥结束时铵态氮的减少

量均显著高于其余处理,分别为 30% 和 51%,这可能与 TOM4 处理初始 pH 较高有关,而其余处理的 pH 均低于 8。徐路魏^[21]用猪粪和蔬菜废弃物堆肥发现,较高的 pH 加剧氨气的挥发损失。因此,当堆肥原料初始 pH 高于 8 时氮素损失量较大,应当适当添加调理剂降低 pH。各处理硝态氮含量随堆肥腐熟而逐渐增加,且最终硝态氮含量大小顺序与铵态氮含量大小顺序基本一致。至堆肥结束, TOP1、TOP5 处理全氮含量显著高于相同来源的其余处理,以及所有动物源堆肥处理,而 TOM3 和 TOM5 碱解氮含量和硝铵态氮含量显著高于相同来源的其余处理,以及所有植物源堆肥处理,说明选取植物源发酵原料,豆粕、花生麸等更有利于提升堆肥产品的全氮含量,选取动物源发酵材料,鸡粪、兔粪更有利于提升堆肥产品的有效养分含量。

堆肥中的磷主要由以正磷酸盐为主的无机磷和以核酸类、植素类、磷脂类为主的有机磷构成,有机磷所占比例可达 70% 以上^[22]。前人^[23]研究表明,堆肥过程中产生的有机酸有利于将堆肥中难以被植物吸收利用的磷转化为易被吸收的磷,堆肥原料的粒径越小,更有利于提升堆体有效磷含量。章永松等^[24]用不同有机酸对磷酸盐进行溶磷试验发现,有机酸浓度越高,溶磷效果越强;赵素芬等^[25]通过猪粪堆肥证明堆肥中的有机酸可以溶解部分磷,提升磷的有效性。本试验结果表明,经堆肥腐熟后,各处理全磷含量均较原来提升超过 1 倍,植物源堆肥处理的增幅略高于动物源堆肥处理,其中 TOP7 和 TOM2 处理全磷含量最高,这可能是一方面由于红薯藤和羊粪中本身富含大量有机态磷,堆肥腐熟的浓缩效应使其含量提高;另一方面,二者中含有较多纤维素,纤维素含量较高的原料更利于堆肥后期分解产生腐殖酸增强溶磷效果,从而提升速效磷含量。堆肥结束时,各处理的全磷和有效磷含量均有提升,但速效磷在全磷中的比例较最初反而下降,这可能一方面是由于堆体中有机磷和无机磷处于动态的相互转化,而非单向的有机态向无机态转化,因此腐熟后期部分无机磷会被重新固定。有研究^[26]表明,堆肥 15 天后无机磷开始向有机磷转化,有机磷含量开始迅速增加;另一方面,堆肥腐熟过程中产生大量腐殖质,腐殖质的胶体特性会吸附一部分磷酸盐,从而使速效磷无法被完全浸提出来,使得测定值较实际偏小,这与贾程^[22]的研究结果相一致。因此,在堆肥原料中添加红薯藤、菜籽饼、花生麸以及羊粪、兔粪等物料对于提升堆肥磷含量,改善土壤缺磷状况有良好效果。

钾在堆肥中的存在形态较为稳定,随着微生物分解有机质带来的浓缩效应而不断增加。本研究结果表明,虽然堆肥原料不同,但各处理堆肥产品钾含量差异并不显著,至堆肥结束,各处理钾含量约为2%左右,动物源堆肥处理全钾含量高于植物源堆肥处理,其中 TOM3(兔粪)和 TOM5(鸡粪)全钾含量显著高于其余处理,因此,选择畜禽粪便尤其是兔粪和鸡粪做为堆肥原料更有利于提升堆肥产品中钾含量。随着堆肥进行,全钾和速效钾含量均不断提升,但最终速效钾在全钾中所占比例却较最初有所下降,这可能与堆肥后期大量腐殖质的形成有关。刘秀梅等^[27]通过研究腐殖酸对氮磷钾的吸附特性发现,腐殖酸在中性和弱碱性条件下对钾的吸附作用较强。堆肥后期 pH 稳定在 7.0~8.5,堆体呈弱碱性,促进腐殖质胶体对钾的吸附及腐殖酸对钾的螯合作用,从而降低速效钾在全钾中的比例。

3.3 不同来源堆肥产品对小白菜产量及品质的影响

小白菜盆栽试验表明,与 CK 相比,各堆肥处理均显著提升小白菜农艺性状和产量。各处理堆肥产品均促进小白菜生长,P1、P3、P4、P6 和 M2、M3、M5 处理的产量均显著高于 CF(等氮量化肥)处理,P1 处理鲜重最高,为 25.66 g/株,M3 处理干重最高,为 1.65 g/株,这可能是由于小白菜为叶菜,其对水的需求量较大,浇水会加剧化肥在土壤中的淋溶作用,降低肥效,同时也影响土壤的通气能力,而有机肥处理能改良土壤结构,提升土壤的养分利用效率。植物源堆肥处理与 CF 相比,除养分含量较低 P5 和 P7 处理外,其余处理均能显著提升小白菜鲜重,其中 P1 和 P4 处理鲜重较 CK 分别提升 115%和 106%,干重较 CK 分别增长 56%和 71%,这可能是由于:一方面, TOP1 和 TOP4 堆肥处理的全量养分和速效养分均高于其余处理,较高含量的速效养分满足前期小白菜生长需求,而有机态养分缓慢释放保证小白菜生长后期养分供应充足;另一方面,有机肥中大量的腐殖质能够改善土壤理化性质,提高土壤的通气透水性,提升土壤的保水保肥能力,为小白菜生长提供充足水分。动物源堆肥处理较 CK 也显著提升小白菜的农艺性状和产量,但提升效果略低于植物源堆肥处理,其中提升效果较好的为 M3 和 M5 处理,二者鲜重较 CF 分别提升 68%和 98%,低于 P1 和 P4 处理,但二者干重显著高于 P1 和 P4 处理,通过测定其 SPAD 值和叶面积发现,这 2 个指标均显著高于其余处理,说明这 2 种堆肥产品能够显著促进小白菜叶片生长,并提升叶片中叶绿素含量,进而促进小白菜干

物质积累。通过种子发芽试验发现,二者种子发芽指数最高,也说明其促生效果较优。

前人^[28]研究表明,绿叶菜类蔬菜比瓜果类更易富集硝酸盐,而施用有机肥能提升小白菜品质,降低其硝酸盐含量。本试验研究表明,与 CK 相比,所有有机肥处理均能显著提升小白菜的品质,这可能是由于有机肥中含有大量氨基酸、核酸等有机态养分,植物能够直接吸收氨基酸等小分子有机氮,以及一些多肽、蛋白质等大分子有机氮,丁双双等^[29]对小白菜施用氨基酸发现,氨基酸可以显著提升小白菜品质;付瀚思^[30]通过对芹菜施用核酸微肥发现,核酸能够显著提升芹菜的产量和品质;但同时 P6 和 M5 处理也大大增加小白菜中的硝酸盐含量,这可能是由于堆肥结束时二者全氮和有效氮含量均较高,腐熟不够彻底,施入土壤后发生进一步腐熟,使土壤硝态氮含量提升,促进硝酸盐在小白菜上的累积。虽然充足的磷钾有助于降低作物硝酸盐含量,但此过程氮素应起主导作用,肖辉等^[31]在研究中也得出相同结论。P1、P4、P6 处理对小白菜可溶性蛋白含量的提升效果显著高于其他处理,这可能是由于豆粕、花生麸、豆渣堆肥中含有较多可被植物直接吸收利用的有机态氮。前人^[32]研究表明,钾能显著提升蔬菜维生素 C 的含量,P1、P4 处理的速效钾含量显著高于其他处理,可能是二者维生素 C 含量较高的原因。综合来看,花生麸和兔粪做为堆肥原料对小白菜的增产提质效果最优。

4 结论

以不同来源农业废弃物为原料在动物源和植物源材料质量比 7:3、C/N 为 25、含水率 55%~60%的条件下进行好氧发酵堆肥,45 天后各处理均可达到腐熟要求。TOP4(花生麸堆肥)和 TOM1(牛粪堆肥)处理在腐熟过程中温度上升较快, TOP1(豆粕堆肥)、TOP3(菜籽饼堆肥)、TOM1、TOM3(兔粪堆肥)处理 C/N 较低,腐熟最彻底; TOP4、TOM3 处理氮磷钾总养分含量最高。

堆肥产品的盆栽试验结果表明, M3 和 M5 处理能显著促进小白菜叶片生长,提升其干物质积累能力, P4、P5 和 M2、M3、M4 处理与 CF(等氮量化肥)处理相比均显著提升小白菜品质,并降低硝酸盐含量, M5 处理在显著提升小白菜可溶性糖、可溶性蛋白、维生素 C 的同时会大大增加植株中硝酸盐含量。

参考文献:

- [1] 吴浩玮,孙小洪,梁博文,等.我国畜禽粪便污染现状及处理与资源化利用分析[J].农业环境科学学报,2020,39(6):1168-1176.

- [2] 刘晓燕,金继运,任天志,等.中国有机肥料养分资源潜力和环境风险分析[J].应用生态学报,2010,21(8):2092-2098.
- [3] 付文杰.不同施肥处理对小白菜生长、产量和品质的影响[D].武汉:华中农业大学,2019.
- [4] 王若斐,刘超,操一凡,等.不同碳氮比猪粪堆肥及其产品肥效[J].中国土壤与肥料,2017(6):127-134,154.
- [5] 农业部.NY 525—2012,有机肥料[S].北京:全国农业技术推广服务中心,2012.
- [6] 农业部.NY/T 300—1995,有机肥料[S].北京:全国土壤肥料总站,1995.
- [7] Morel T L, Conlin F, Germon J, et al. Methods for the evaluation of the maturity of municipal refuse compost [C]//Gasser J K Red. Composting of Agricultural and Other Wastes. London & New York: Elsevier Applied Science Publishers,1985:56-72.
- [8] Zucconi F, Pera A, Forte M, et al. Evaluating toxicity of immature compost[J].Biocycle,1981,22(1):54-57.
- [9] 吴银宝,汪植三,廖新,等.猪粪堆肥腐熟指标的研究[J].农业环境科学学报,2003,22(2):189-193.
- [10] 胡雨彤,时连辉,刘登民,等.添加硫酸对牛粪堆肥过程及其养分变化的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(3):718-725.
- [11] 张建华,田光明,姚静华,等.不同调理剂对猪粪好氧堆肥效果的影响[J].水土保持学报,2012,26(3):131-135.
- [12] Barrington S F, Moueddeb K E, Porter B. Improving small-scale composting of apple waste [J]. Canadian Agricultural Engineering,1997,39(1):9-16.
- [13] Martin A M. Bioconversion of waste materials to industrial products[M].Springer U S,1998.
- [14] 王亚飞.不同畜禽粪便堆肥过程中可培养微生物数量及腐殖质含量和酶活性的变化[D].甘肃 白银:甘肃农业大学,2016.
- [15] 黄国锋,钟流举,张振钿,等.有机固体废弃物堆肥的物质变化及腐熟度评价[J].应用生态学报,2003,22(5):813-818.
- [16] Zhao X, Li B Q, Ni J P, et al. Effect of four crop straws on transformation of organic matter during sewage sludge composting[J].Journal of Integrative Agriculture,2016,15(1):232-240.
- [17] 李怨艳,李吉进,张邦喜,等.菌剂对鸡粪堆肥腐殖质含量品质的影响[J].农业工程学报,2016,32(增刊 2):268-274.
- [18] 任静.接种菌剂对牛粪堆肥过程中微生物、酶活性及腐殖质的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2013.
- [19] 鲍艳宇,周启星,颜丽,等.畜禽粪便堆肥过程中各种氮化合物的动态变化及腐熟度评价指标[J].应用生态学报,2008,19(2):374-380.
- [20] 李忠徽,王旭东.不同发酵辅料下牛粪腐解过程温度和养分的变化规律[J].农业环境科学学报,2014,33(3):471-477.
- [21] 徐路魏.蔬菜废弃物堆肥化过程中碳氮转化规律[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [22] 贾程.污泥与秸秆堆肥过程中氮、磷形态变化研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [23] Mkel M, Galkin S, Hatakka A, et al. Production of organic acids and oxalate decarboxylase in lignin-degrading white rot fungi [J]. Enzyme and Microbial Technology,2002,30(4):542-549.
- [24] 章永松,林咸永,罗安程.有机肥(物)对土壤中磷的活化作用及机理研究:Ⅱ.有机肥(物)分解产生的有机酸及其对不同形态磷的活化作用[J].植物营养与肥料学报,1998,4(2):151-155.
- [25] 赵素芬,刘建新,倪姆娣.畜禽废弃物高温好氧堆肥过程中磷素的变化研究[J].农业环境科学学报,2005,24(2):384-386.
- [26] 李国学,张福锁.固体废物堆肥化与有机复混肥生产[M].北京:化学工业出版社,2000.
- [27] 刘秀梅,张夫道,冯兆滨,等.风化煤腐殖酸对氮、磷、钾的吸附和解吸特性[J].植物营养与肥料学报,2005,11(5):641-646.
- [28] 崔亚男,张旭辉,刘晓雨,等.不同猪粪施用方式对小白菜生长、产量及品质的影响[J].南京农业大学学报,2017,40(2):281-286.
- [29] 丁双双,李燕婷,袁亮,等.糖醇和氨基酸对小白菜钙营养及生长、品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(3):744-751.
- [30] 付瀚思.核酸微肥处理对芹菜生长与品质的影响[D].河南 洛阳:河南科技大学,2015.
- [31] 肖辉,程文娟,王立艳,等.不同有机肥对日光温室土壤剖面硝态氮含量动态变化的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(1):106-114.
- [32] 熊国华.钾与尿素和有机肥配施对菜园土壤环境质量及蔬菜品质的影响[D].杭州:浙江大学,2004.