

好氧堆肥-蚯蚓堆肥结合法处理绿化废弃物与牛粪

蔡琳琳¹, 李素艳¹, 龚小强¹, 孙向阳¹, 张建伟², 于鑫¹, 魏乐¹

(1. 北京林业大学 林学院, 北京 100083; 2. 北京润泽鑫业生物工程有限公司, 北京 100083)

摘要:为促进绿化废弃物和牛粪的资源化利用, 采用赤子爱胜蚯蚓 *Eisenia fetida* 对绿化废弃物和牛粪的混合物进行好氧-蚯蚓结合堆肥处理。在绿化废弃物好氧堆肥 60 d 后, 按 0(T₁), 2%(T₂), 4%(T₃), 6%(T₄), 8%(T₅), 10%(T₆)的质量分数在绿化废弃物中添加牛粪, 并加入蚯蚓, 继续蚯蚓堆肥 60 d, 以无牛粪无蚯蚓的绿化废弃物堆肥作为对照(T₀), 最终将堆肥产品用作基质进行美丽竹芋 *Calathea veitchiana* 栽培试验。结果表明: 蚯蚓堆肥处理(T₁~T₆)产品在营养元素含量和美丽竹芋生长量上显著高于对照(T₀)。不同蚯蚓堆肥处理中, 绿化废弃物与牛粪混合处理在蚯蚓存活率、蚯蚓生长和繁殖速度、纤维素和木质素降解率、堆肥产品营养元素含量及细菌、真菌和放线菌数量, 以及美丽竹芋生长(株高、冠幅、叶片数、鲜质量)上均显著高于纯绿化废弃物处理(T₁)。在绿化废弃物与牛粪混合处理(T₂~T₆)中, 添加质量分数 8%(T₅)和 10%(T₆)牛粪的处理在蚯蚓生长量、繁殖率、产品质量指标和美丽竹芋生长指标上优于其他处理。可见, 利用好氧堆肥-蚯蚓堆肥结合处理方式可以有效应用于绿化废弃物处理, 其中以添加质量分数 8%(T₅)和 10%(T₆)牛粪的处理效果最佳。图 1 表 6 参 27

关键词: 园艺学; 好氧堆肥-蚯蚓堆肥结合; 蚯蚓堆肥; 绿化废弃物; 牛粪

中图分类号: S606; S317 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2018)02-0261-07

Composting-vermicomposting of green waste processing spiked with cow dung

CAI Linlin¹, LI Suyan¹, GONG Xiaoqiang¹, SUN Xiangyang¹, ZHANG Jianwei², YU Xin¹, WEI Le¹

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Beijing Runze-Xinye Biology Limited Company, Beijing 100083, China)

Abstract: To accelerate the resource utilization of green waste, this study considered the combination of composting disposed green waste mixed with cow dung by employing *Eisenia fetida*. After pre-composting green waste for 60 d, seven treatments were prepared for vermicomposting by mixing green waste (pre-composted materials) with cow dung at ratios (dry weight) of 0 (T₀, without earthworms as a control), 0 (T₁), 2%(T₂), 4%(T₃), 6%(T₄), 8%(T₅), and 10%(T₆). Growth and reproductive performance of *E. fetida* in different treatments were measured after 60 d of vermicomposting with a plant cultivation experiment (*Calathea veitchiana*) being conducted to estimate the quality and maturity of the final vermicompost. A complete random design with treatments of T₀, T₁, T₂, T₃, T₄, T₅, T₆ and 30 replications. At the end of cultivation, five plants were randomly selected from each treatment and were analyzed for the plant growth parameters. Results showed that final products of all treatments with earthworms (T₁~T₆) were significantly higher ($P<0.05$) in nutritional element content and plant growth parameters than T₀. Moreover, in comparison with pure green waste treatment (T₁), treatments with the addition of cow dung significantly ($P<0.05$) increased the rate of growth and reproduction of earthworms, significantly ($P<0.05$) accelerated the degradation rate of cellulose and lignin, and significantly ($P<0.05$) increased nutrient contents of the final vermicompost product. Moreover, with the addition of cow

收稿日期: 2017-03-08; 修回日期: 2017-05-24

基金项目: 林业公益性行业科研专项资助(201504205)

作者简介: 蔡琳琳, 从事土壤资源与环境研究。E-mail: cailinlin@bjfu.edu.cn。通信作者: 李素艳, 副教授, 博士, 从事农林废弃物资源化再利用和土壤生态环境研究。E-mail: lisuyan@bjfu.edu.cn

dung, significantly ($P < 0.05$) increased in microbial population (bacteria, fungi, and actinomycetes) in vermicomposts were recorded. Among treatments T_2 - T_6 , T_5 and T_6 had significantly ($P < 0.05$) higher fertilizer value for the final product as well as significantly ($P < 0.05$) higher growth and fecundity of *E. fetida*. Thus, the combination of both processes (composting + vermicomposting) could be suitable for disposing cow dung and green waste with the green waste mixed with cow dung treatments at rates of 8% (T_5) and 10% (T_6) improving the efficiency and quality of the vermicompost. [Ch, 1 fig. 6 tab. 27 ref.]

Key words: horticulture; integrated thermophilic-vermicomposting process; vermicomposting; green waste; cow dung

绿化废弃物是指城市绿化养护中产生的修剪枝条、落叶、草坪修剪物和残花等^[1]。目前,广泛采用的绿化废弃物处理方法是好氧堆肥^[2]。但由于绿化废弃物含有较高的木质素和纤维素,好氧堆肥往往降解不充分且降解周期过长,产品质量较差^[3]。与此同时,现代畜牧业发展造成的牛粪产生量急剧加大^[4],牛粪好氧堆置往往因为牛粪中丰富的营养物质(氮、磷及有机物质等)、微生物和虫卵等的存在,使得堆置过程容易滋生蚊虫,导致病原菌繁殖,并产生臭味,且浸出液进入河流也易使水体富营养化。因此,牛粪资源化处理及利用也是目前中国畜牧业发展亟待解决的问题之一。蚯蚓堆肥是指蚯蚓在常温有氧条件下吞食有机物,通过肠道物理破碎及肠道微生物的协同作用对有机固体废弃物进行生物氧化和转化,形成富含腐殖质和营养元素产物的生物处理工艺^[5]。目前,蚯蚓堆肥处理技术已经广泛用于有机固体废弃物的处理,如周波等^[6]利用蚯蚓处理城市污泥,相对于无蚯蚓处理可显著降低污泥总有机碳含量,增强微生物活性与重金属活化作用,提高土壤肥力从而促进植物生长。王清威等^[7]研究表明,蚯蚓堆肥处理餐厨垃圾能够加速其有机物分解速率和蚯蚓生长繁殖率。于建光等^[8]研究蚯蚓堆制处理水稻 *Oryza sativa* 秸秆与畜禽粪便混合物,发现相比无蚯蚓添加,材料中微生物代谢熵、脱氢酶和碱性磷酸酶活性与全氮、全磷、全钾等含量增加,表明利用蚯蚓堆制水稻秸秆等混合物可减少堆肥时间并提高堆肥质量。目前利用好氧堆肥和蚯蚓堆肥结合技术处理园林绿化废弃物的研究还较少。牛粪与绿化废弃物混合蚯蚓堆肥,一方面,绿化废弃物可提高堆肥物料的孔隙度,增加氧气含量,有利于蚯蚓和微生物进行呼吸作用^[9];另一方面,牛粪的大量易降解的小分子有机物,可以为蚯蚓生长提供食物,有益微生物既能作为蚯蚓食物被摄食,又能自身参与降解活动,加速有机物的降解^[10-11]。因此,本研究拟利用好氧堆肥-蚯蚓堆肥结合技术对绿化废弃物与牛粪进行处理,以期筛选出适宜的绿化废弃物与牛粪的配比处理,为加快绿化废弃物与牛粪资源化处理提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

绿化废弃物取自北京市海淀区香山植物园,试验前粉碎至粒径小于 5 mm。风干牛粪取自北京市通州区潮县镇吉祥养牛场。赤子爱胜蚯蚓 *Eisenia fetida* 购自北京市顺义区北京大环顺鑫有机肥料厂。美丽竹芋 *Calathea veitchiana* 购自北京市丰台区花乡花木公司,为生长 3 个月的幼苗植株。绿化废弃物和牛粪的物理化学性质见表 1。

1.2 试验方法

试验于北京林业大学校内苗圃温室进行,控制温度 25.4~28.7 °C,湿度 60%~80%,自然光照。

1.2.1 好氧堆肥-蚯蚓堆肥结合方式处理绿化废弃物和牛粪 取粉碎后的绿化废弃物,调节含水量至 65%~70%,好氧堆肥 60 d^[12]。取未腐熟风干牛粪,按质量分数 0(T_1), 2%(T_2), 4%(T_3), 6%(T_4), 8%(T_5)和 10%(T_6)的比例与好氧堆肥产物混合。称取 40 kg(干质量)混合材料置于塑料反应容器中(0.60 m × 0.80 m × 0.65 m,底部具有 20 个直径 1 cm 孔),加入带有生殖环的赤子爱胜蚯蚓,1 600 条·容器⁻¹,平均质量为 202.2 mg·条⁻¹,维持水分 65%~70%。为防止蚯蚓逃逸,用 1 mm 孔径的塑料网覆盖容器。以无牛粪无蚯蚓的绿化废弃物为空白对照(T_0)。蚯蚓堆肥 60 d 后,取混合均匀的产品(干质量)1 kg,记录成年蚯蚓数量,蚯蚓卵数量,幼小蚯蚓数量和成年蚯蚓质量,测量并分析起始材料和堆肥产物的理化性质及生物指标。试验样品的物理化学性质[pH 值,电导率(EC),有机碳、全氮、全磷、全钾、钙、镁

表 1 供试绿化废弃物和牛粪理化性质

项目	pH 值	电导率/(dS·m ⁻¹)	有机碳/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	碳氮比	全磷/(g·kg ⁻¹)
绿化废弃物	8.31 ± 0.01	1.55 ± 0.01	337.00 ± 0.41	14.36 ± 0.01	23.5 ± 0.03	2.04 ± 0.05
牛粪	8.74 ± 0.02	3.06 ± 0.07	290.00 ± 0.96	15.38 ± 0.05	18.9 ± 0.11	7.36 ± 0.54
项目	全钾/(g·kg ⁻¹)	钙/(g·kg ⁻¹)	镁/(g·kg ⁻¹)	纤维素/%	木质素/%	
绿化废弃物	6.69 ± 0.01	119.00 ± 0.08	9.65 ± 0.00	30.30 ± 0.29	23.70 ± 0.10	
牛粪	9.07 ± 0.16	46.90 ± 0.67	10.40 ± 0.08	24.30 ± 0.47	12.00 ± 0.40	

质量分数]参照鲍士旦^[13]方法测定；木质素与纤维素质量分数参照刘书钗^[14]方法测定；真菌、细菌、放线菌数量参照 PRAKASH 等^[15]方法测定。

1.2.2 堆肥产品对美丽竹芋生长的影响 取各处理堆肥产品作为基质，选取株高 14~15 cm，叶片生长健壮、根系完整且无病害的美丽竹芋幼苗进行栽培，30 株·处理⁻¹，隔 3 d 浇水 1 次，整个栽培周期不施加其他营养。栽培 180 d 后，随机选取 5 株·处理⁻¹，测定株高、冠幅、叶片数，并测量鲜质量。冠幅测定先测量成株纵向和横向的冠幅直径(d)，计算冠幅面积 $S=\pi\times(d/2)^2$ 。

1.3 数据处理

实验数据采用 Microsoft Office Excel 2010 和 SPSS 20.0 处理，进行方差分析和多重比较。

2 结果与讨论

2.1 不同处理对蚯蚓生长和繁殖的影响

由表 2 可以看出：绿化废弃物添加牛粪的处理(T₂~T₆)成年蚯蚓数量和单条蚯蚓质量均显著高于不添加牛粪处理(T₁)；就牛粪添加量而言，T₂处理显著低于 T₃~T₆处理。可见牛粪添加可以提高蚯蚓的存活率和生长量，其最优质量分数为 4%~10%。

堆肥结束时各处理蚯蚓幼体数量、蚯蚓卵数量随着牛粪添加量的增加而增加，其中 T₃~T₆处理显著高于 T₁和 T₂处理，但 T₃~T₆处理间差异不显著。结果表明：牛粪添加促进了蚯蚓繁殖数量，以质量分数 4%~10%最佳。

2.2 不同处理对产品理化性质的影响

如表 3 所示：堆肥初始原料 pH 值为 pH 8.31~8.42，符合赤子爱胜蚯蚓生长范围(pH 5~9)^[16]；堆肥试验结束后，各产品 pH 值为 pH 7.96~8.20，达到农业应用要求 pH 7.0~8.5 范围^[17]。堆肥产品 pH 值降低，可能是堆肥后期氮化合物经过硝化、分解及微生物繁殖分泌有机酸类物质导致。

堆肥初始原料电导率为 1.55~1.80，堆肥结束后，各产品的电导率为 1.73~2.62 dS·m⁻¹，符合农业生产中堆肥产品应用植物栽培基质范围。电导率增率在不同处理间差异显著，其中，蚯蚓堆肥产品(T₁~T₆)增率显著高于好氧堆肥处理(T₀)；不同蚯蚓堆肥处理，电导率增率随着牛粪添加比例提高而增加，其中 T₆处理的电导率增率显著高于其他处理。与初始材料相比，堆肥产品电导率均增大，可能由于堆肥使有机物降解释放大量可溶性矿质元素^[18]所致，添加牛粪可提高蚯蚓活性，促进蚯蚓取食和消化有机物，使可溶性物质释放量增大，电导率显著增加。

相比于初始材料有机碳质量分数为 331.25~337.78 g·kg⁻¹，堆肥结束后各堆肥产品有机碳质量分数均降低，有机碳质量分数介于 258.86~322.1 g·kg⁻¹。其中，蚯蚓堆肥产品(T₁~T₆)有机碳降解率显著高于好氧堆肥处理(T₀)。不同蚯蚓堆肥处理中，产品有机碳降解率顺序为 T₆>T₅>T₄>T₃>T₂>T₁，可见，有机碳降解量随着牛粪添加比例提高而增加。有机碳质量分数降解率与牛粪添加量的正比例关系，可能是牛粪促进了蚯蚓和微生物生长繁殖，加速了有机物的分解^[11]。

表 2 牛粪添加对蚯蚓生长和繁殖的影响

Table 2 Effects of cow dung addition on growth and reproductive performance of earthworm

组别	成年蚯蚓数量/(条·kg ⁻¹)	单条成熟蚯蚓质量/(g·条 ⁻¹)	蚯蚓幼体数/(条·kg ⁻¹)	卵数/(个·kg ⁻¹)
T ₁	12.67 ± 0.67 c	0.25 ± 0.00 c	417.00 ± 14.18 c	40.67 ± 3.93 b
T ₂	16.33 ± 0.33 b	0.27 ± 0.00 b	672.33 ± 15.98 b	43.00 ± 2.31 b
T ₃	19.33 ± 0.33 a	0.28 ± 0.00 a	780.67 ± 14.50 a	63.67 ± 2.40 a
T ₄	19.33 ± 0.67 a	0.29 ± 0.00 a	793.00 ± 28.92 a	70.33 ± 3.93 a
T ₅	20.00 ± 0.00 a	0.29 ± 0.00 a	780.67 ± 9.96 a	69.00 ± 1.00 a
T ₆	19.67 ± 0.33 a	0.29 ± 0.00 a	821.67 ± 24.36 a	71.67 ± 2.40 a

说明：同列不同字母表示各组间差异显著($P<0.05$)

表3 添加牛粪对蚯蚓堆肥中pH值、电导率和有机碳的影响

Table 3 Effects of cow dung addition on pH, EC and organic carbon of vermicomposting

处理	pH值			电导率/(dS·m ⁻¹)			有机碳/(g·kg ⁻¹)		
	初始	结束	降率/%	初始	结束	增率/%	初始	结束	降率/%
T ₀	8.31 ± 0.01	8.27 ± 0.01	0.48 ± 0.18 g	1.55 ± 0.01	1.73 ± 0.01	11.60 ± 0.70 f	337.78 ± 0.41	322.10 ± 1.77	4.64 ± 0.62 g
T ₁	8.31 ± 0.01	8.20 ± 0.01	1.28 ± 0.22 f	1.55 ± 0.01	1.95 ± 0.01	25.76 ± 1.11 e	337.78 ± 0.41	306.44 ± 0.41	9.28 ± 0.13 f
T ₂	8.33 ± 0.01	8.16 ± 0.00	2.04 ± 0.07 e	1.59 ± 0.01	2.09 ± 0.03	31.19 ± 2.24 d	336.19 ± 0.62	292.74 ± 1.44	12.93 ± 0.27 e
T ₃	8.36 ± 0.01	8.12 ± 0.00	2.79 ± 0.08 d	1.66 ± 0.01	2.24 ± 0.02	35.14 ± 0.84 c	335.01 ± 0.43	280.55 ± 0.56	16.26 ± 0.11 d
T ₄	8.38 ± 0.01	8.08 ± 0.01	3.58 ± 0.18 c	1.69 ± 0.01	2.36 ± 0.02	39.19 ± 1.64 b	333.58 ± 0.54	274.76 ± 0.69	17.63 ± 0.27 c
T ₅	8.40 ± 0.01	8.04 ± 0.01	4.25 ± 0.18 b	1.76 ± 0.01	2.47 ± 0.01	40.61 ± 0.55 b	332.96 ± 0.36	270.15 ± 0.54	18.86 ± 0.09 b
T ₆	8.42 ± 0.00	7.96 ± 0.01	5.54 ± 0.08 a	1.80 ± 0.00	2.62 ± 0.01	45.11 ± 0.75 a	331.25 ± 0.34	258.86 ± 0.97	21.85 ± 0.21 a

说明：同列不同字母表示各组间差异显著($P < 0.05$)

如表4所示：初始材料全氮质量分数为14.36~14.52 g·kg⁻¹，堆肥结束时全氮质量分数为12.62~20.75 g·kg⁻¹，可见堆肥产品全氮质量分数增加，增率达8.07%~41.29%，其中蚯蚓堆肥处理全氮增率显著高于好氧堆肥处理。研究认为，好氧堆肥全氮质量分数提高是有机物降解、堆肥体积降低造成的，而蚯蚓堆肥中蚯蚓排泄物、黏液分泌等还会增加全氮质量分数^[19]。蚯蚓堆肥处理中，T₆产品全氮质量分数增率显著高于T₁~T₄处理，可能是牛粪添加提高了蚯蚓存活率和繁殖率，同时牛粪含有的大量氮元素和固氮微生物，也使得产物全氮质量分数增加。碳氮比(C/N)反映堆肥过程中材料有机物的降解程度。本试验中，堆肥结束后，各组产物C/N均下降，其中蚯蚓堆肥处理(T₁~T₆)C/N降率显著高于好氧处理(T₀)；不同蚯蚓堆肥处理中，T₂~T₆处理C/N降率显著高于T₁处理。Van HEERDEN等^[20]提出，堆肥C/N低于20表明堆肥腐熟，低于15适宜于农业应用。本研究中，除T₀处理外，其他处理的最终C/N均小于20，T₄~T₆处理C/N小于15。表明在绿化废弃物中添加质量分数6%~10%牛粪可提高堆肥质量，并应用于农业生产。最终堆肥产品的全磷质量分数为2.25~4.32 g·kg⁻¹，与初始产品相比，增率达10.56%~59.51%；全钾质量分数为7.14~8.97 g·kg⁻¹，增率达6.77%~28.65%；钙质量分数为124.61~129.63 g·kg⁻¹，增率达3.92%~16.87%。其中，蚯蚓处理(T₁~T₆)全磷、全钾及钙质量分数增率显著高于好氧堆肥处理(T₀)。蚯蚓堆肥处理中，T₄~T₆处理全磷、全钾及钙的增率显著高于T₁~T₃，但T₄、T₅、T₆处理间差异不显著。姜宇蛟等^[21]研究亦表明，添加牛粪能增加蚯蚓处理污泥中全磷质量分数，污泥中全磷量随着牛粪

表4 牛粪添加对蚯蚓堆肥中无机元素的影响

Table 4 Effects of cow dung addition on mineral elements of vermicomposting

处 理	全氮/(g·kg ⁻¹)			碳氮比			全磷/(g·kg ⁻¹)		
	初始	结束	增率/%	初始	结束	降率/%	初始	结束	增率/%
T ₀	14.36 ± 0.01	15.52 ± 0.41	8.07 ± 0.33 e	23.52 ± 0.03	20.75 ± 0.17	11.75 ± 0.84 f	2.04 ± 0.05	2.25 ± 0.01	10.56 ± 2.66 c
T ₁	14.36 ± 0.01	16.63 ± 0.02	15.79 ± 0.18 d	23.52 ± 0.03	18.43 ± 0.04	21.65 ± 0.23 e	2.04 ± 0.05	2.67 ± 0.01	31.38 ± 3.15 b
T ₂	14.40 ± 0.00	17.55 ± 0.15	21.88 ± 1.05 c	23.35 ± 0.04	16.68 ± 0.06	28.55 ± 0.40 d	2.16 ± 0.02	2.86 ± 0.06	32.57 ± 3.40 b
T ₃	14.44 ± 0.00	17.83 ± 0.15	23.46 ± 1.00 c	23.20 ± 0.03	15.74 ± 0.11	32.16 ± 0.55 cd	2.30 ± 0.01	3.17 ± 0.07	37.70 ± 3.69 b
T ₄	14.46 ± 0.00	18.92 ± 0.76	30.82 ± 5.29 bc	23.07 ± 0.04	14.57 ± 0.60	36.83 ± 2.64 bc	2.51 ± 0.02	3.91 ± 0.15	55.92 ± 4.69 a
T ₅	14.50 ± 0.01	19.63 ± 0.94	35.35 ± 6.39 ab	22.96 ± 0.03	13.83 ± 0.65	39.79 ± 2.80 ab	2.65 ± 0.02	4.32 ± 0.08	59.51 ± 2.75 a
T ₆	14.52 ± 0.01	20.52 ± 0.19	41.29 ± 1.24 a	22.81 ± 0.02	12.62 ± 0.12	44.68 ± 0.50 a	2.75 ± 0.01	4.13 ± 0.04	50.33 ± 1.69 a
处 理	全钾/(g·kg ⁻¹)			钙/(g·kg ⁻¹)			镁/(g·kg ⁻¹)		
	初始	结束	增率/%	初始	结束	增率/%	初始	结束	增率/%
T ₀	6.69 ± 0.01	7.14 ± 0.01	6.77 ± 0.04 e	119.91 ± 0.08	124.61 ± 0.79	3.92 ± 0.60 e	9.65 ± 0.00	9.73 ± 0.01	0.87 ± 0.11 c
T ₁	6.69 ± 0.01	7.44 ± 0.08	11.26 ± 1.13 cd	119.91 ± 0.08	129.46 ± 0.63	7.9 ± 0.58 d	9.65 ± 0.00	9.85 ± 0.00	2.11 ± 0.77 bc
T ₂	6.74 ± 0.00	7.62 ± 0.09	13.16 ± 1.32 cd	118.88 ± 0.32	131.57 ± 0.52	10.68 ± 0.60 c	9.70 ± 0.00	9.97 ± 0.04	2.78 ± 0.43 b
T ₃	6.80 ± 0.01	7.91 ± 0.05	16.39 ± 0.55 bc	117.83 ± 0.12	134.53 ± 0.21	14.17 ± 0.25 b	9.72 ± 0.01	10.34 ± 0.07	6.32 ± 0.78 a
T ₄	6.85 ± 0.01	8.47 ± 0.15	23.59 ± 2.18 a	116.70 ± 0.12	135.86 ± 0.92	16.42 ± 0.84 a	9.75 ± 0.00	10.36 ± 0.05	6.18 ± 0.52 a
T ₅	6.89 ± 0.01	8.45 ± 0.08	22.57 ± 1.15ab	115.02 ± 0.39	133.66 ± 0.50	16.20 ± 0.61 a	9.79 ± 0.01	10.41 ± 0.05	6.31 ± 0.56 a
T ₆	6.97 ± 0.02	8.97 ± 0.34	28.65 ± 5.08a	110.92 ± 0.36	129.63 ± 0.64	16.87 ± 0.36 a	9.84 ± 0.01	10.54 ± 0.03	7.10 ± 0.19 a

说明：同列不同字母表示各组间差异显著($P < 0.05$)

添加量的增加而增大。张振都^[22]研究发现，牛粪添加苜蓿 *Medicago sativa* 等堆肥，可加速有机物分解，并使全钾质量分数增加 15% 以上。堆肥产品镁质量分数为 9.73~10.54 g·kg⁻¹，相对于初始产品增率为 0.87%~7.10%，其中，T₂~T₆ 蚯蚓处理镁质量分数增率显著高于好氧堆肥处理 T₀。蚯蚓堆肥处理 T₃~T₆ 增率显著高于 T₁ 和 T₂ 处理，但 T₃~T₆ 处理间差异不显著。FERNÁNDEZ-GÓMEZ 等^[23]提出，堆肥养分含量的提高，可能由于有机物的分解造成最终堆肥产品质量和体积的减少造成，而牛粪的添加有利于提高有机物的降解率，因此牛粪处理产品含有更高的营养元素含量。

如表 5 所示，各处理纤维素、木质素的初始质量分数为 29.70%~30.32% 和 22.58%~23.75%，堆肥结束时都出现显著下降，质量分数为 9.15%~25.36% 和 14.09%~17.67%。蚯蚓处理(T₁~T₆)木质素、纤维素降解率显著高于好氧堆肥处理 T₀。蚯蚓堆肥中，添加牛粪处理(T₂~T₆)的纤维素和木质素的降解率显著高于未添加处理(T₁)，且 T₅ 和 T₆ 处理效果显著高于 T₂~T₄ 处理，但 T₅ 和 T₆ 处理间差异不显著。本结果与 KUMAR 等^[24]的研究结果相似，可能是牛粪含有大量的营养元素，促进了蚯蚓和微生物活动，因此加快了纤维素和木质素的分解^[11]。

表 5 牛粪添加对蚯蚓堆肥中纤维素和木质素的影响

Table 5 Effects of cow dung addition on cellulose and lignin of vermicomposting

处理	纤维素			木质素		
	初始/%	结束/%	降解率/%	初始/%	结束/%	降解率/%
T ₀	30.32 ± 0.29	27.54 ± 0.06	9.15 ± 0.88 e	23.75 ± 0.10	17.67 ± 0.05	25.60 ± 0.37 d
T ₁	30.32 ± 0.29	24.66 ± 0.16	18.66 ± 0.41 d	23.75 ± 0.10	15.77 ± 0.05	33.60 ± 0.34 c
T ₂	30.19 ± 0.26	23.97 ± 0.06	20.57 ± 0.85 c	23.50 ± 0.02	15.30 ± 0.08	34.90 ± 0.36 b
T ₃	30.10 ± 0.04	23.65 ± 0.06	21.43 ± 0.22 bc	23.26 ± 0.04	15.18 ± 0.05	34.72 ± 0.15 b
T ₄	29.91 ± 0.02	23.17 ± 0.02	22.55 ± 0.13 bc	22.95 ± 0.06	14.83 ± 0.06	35.39 ± 0.40 b
T ₅	29.81 ± 0.07	22.26 ± 0.16	25.33 ± 0.39 a	22.82 ± 0.03	14.09 ± 0.04	38.25 ± 0.23 a
T ₆	29.70 ± 0.02	22.17 ± 0.06	25.36 ± 0.18 a	22.58 ± 0.03	14.10 ± 0.04	37.58 ± 0.20 a

说明：同列不同字母表示各组间差异显著(P<0.05)

2.3 不同处理堆肥产品中微生物数量变化

堆肥后微生物富集是堆肥材料腐熟的质量指标。李碧洁^[25]研究蚯蚓堆肥处理城市污泥结果发现，蚯蚓的活动提高了微生物活性，细菌、放线菌、真菌数量均增加。如图 1 所示，堆肥结束后，堆肥产品中细菌、放线菌、真菌数量均高于初始材料；同时，蚯蚓堆肥处理(T₁~T₆)的细菌、放线菌、真菌数量均高于好氧堆肥(T₀)。添加牛粪的蚯蚓堆肥处理中，细菌、放线菌、真菌数量在 T₂~T₆ 处理中显著高于无牛粪处理 T₁。牛粪添加处理(T₂~T₆)之间，T₆ 处理产品中细菌数量和真菌数量显著高于其他处理，但与 T₅ 处理差异不显著；放线菌数量在 T₆ 处理时显著高于其他处理，但与 T₅ 和 T₄ 处理差异不显著。由此认为，添加牛粪能提高蚯蚓的活性，促进有机物质分解，使堆肥材料营养物质增加，从而促进微生物生长繁殖。

2.4 堆肥产品对美丽竹芋生长的影响

以堆肥产品作为基质栽培美丽竹芋，其生长状况如表 6 所示。蚯蚓堆肥处理(T₁~T₆)植株在株高、冠幅、叶片数、鲜质量上均显著高于好氧堆肥处理(T₀)。这一结果的产生可以解释为，相对于好氧堆

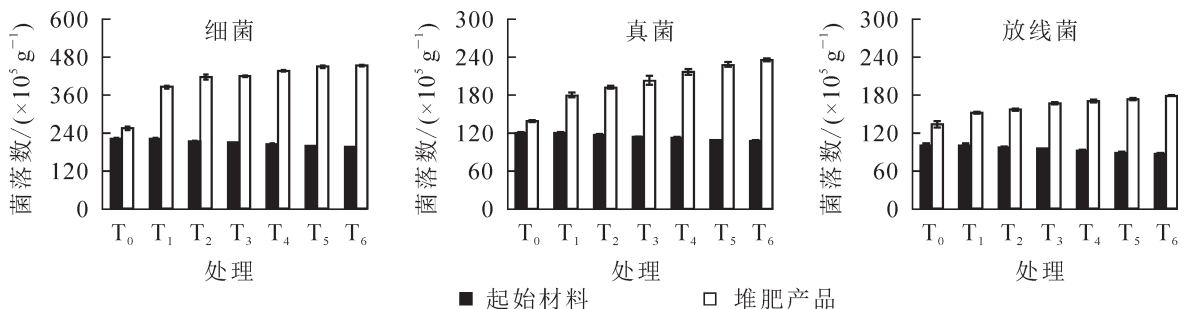


图 1 牛粪添加对蚯蚓堆肥微生物数量的影响

Figure 1 Effects of cow dung addition on numbers of bacteria, fungi and actinomycetes of vermicomposts

肥, 蚯蚓堆肥腐熟后基质 pH 值较低, 有利于植物对必须营养元素的吸收; 同时, 蚯蚓堆肥产品中有效营养元素含量更高, 且含有植物生长调节剂^[26]; 龚小强等^[27]研究表明, 蚯蚓堆肥与好氧堆肥产品可作为蔬菜育苗基质, 且在蚯蚓堆肥基质中生长的甘蓝 *Brassica oleracea* 株高、叶片数、鲜质量等显著优于好氧堆肥栽培基质。本试验发现, 不同蚯蚓堆肥处理 ($T_1 \sim T_6$) 产品对美丽竹芋植株生长影响不同。 $T_2 \sim T_6$ 处理下的植株株高显著高于 T_1 处理; T_5 和 T_6 处理显著高于其他处理, 但 T_5 和 T_6 之间差异不显著。除 T_2 处理外, 其他牛粪添加处理 ($T_3 \sim T_6$) 植株冠幅均显著高于无牛粪添加处理 (T_1)。 $T_2 \sim T_6$ 处理下的植株鲜质量显著高于 T_1 处理, $T_2 \sim T_4$ 处理显著低于 T_6 处理。 $T_4 \sim T_6$ 处理下植株叶片数显著高于 T_1 。以上结果表明: 在绿化废弃物中添加质量分数 8%~10% 牛粪进行蚯蚓堆肥, 其产物中木质素、纤维素等有机物质降解较完全, 释放更高含量的有效营养元素, 因此促进了植物生长^[1]。

3 结论

蚯蚓堆肥产品的营养元素质量分数及美丽竹芋生长指标均显著高于无蚯蚓添加好氧堆肥, 说明好氧堆肥-蚯蚓堆肥结合处理方式优于单独好氧堆肥。

牛粪添加可促进堆肥过程中蚯蚓的生长和繁殖, 加速堆肥过程中有机物的降解, 提高堆肥产品质量, 并且能够促进美丽竹芋的生长, 其中以 $m(\text{绿化废弃物}):m(\text{牛粪})=92:8$ 或 $90:10$ 为最优配比。

4 参考文献

- [1] 张璐, 孙向阳, 田赟. 园林废弃物堆肥用于青苹果竹芋栽培研究[J]. 北京林业大学学报, 2011, **33**(5): 109 - 114.
ZHANG Lu, SUN Xiangyang, TIAN Yun. Application of green waste compost for *Calathea rotundifolia* cv. Fasciata cultivation [J]. *J Beijing For Univ*, 2011, **33**(5): 109 - 114.
- [2] 张璐. 园林绿化废弃物堆肥化的过程控制及其产品改良与应用研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
ZHANG Lu. *The Process Control of Green Waste Composting and the Improvement and Application of Compost Product* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.
- [3] 于鑫. 北京市园林绿化废弃物再利用调查及堆肥实验[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
YU Xin. *Survey on the Recycling Status of Beijing garden Waste and Study on Garden Waste Composting* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [4] 张振都, 吴景贵, 石峰, 等. 不同绿肥与牛粪混合堆腐过程中有机组分的动态变化[J]. 土壤通报, 2012, **43**(1): 87 - 92.
ZHANG Zhendu, WU Jinggui, SHI Feng, et al. Dynamics of organic components during decomposition of cow manure mixed with different green manures [J]. *Chin J Soil Sci*, 2012, **43**(1): 87 - 92.
- [5] 张志剑, 刘萌, 朱军. 蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展[J]. 环境科学, 2013, **34**(5): 1679 - 1686.
ZHANG Zhijian, LIU Meng, ZHU Jun. Organic waste treatment by earthworm vermicomposting and larvae bioconversion: review and perspective [J]. *Environ Sci*, 2013, **34**(5): 1679 - 1686.
- [6] 周波, 唐晶磊, 代金君, 等. 蚯蚓作用下污泥重金属形态变化及其与化学生物学性质变化的关系[J]. 生态学报, 2015, **35**(19): 6269 - 6279.
ZHOU Bo, TANG Jinglei, DAI Jinjun, et al. Remediating effluent sludge with earthworms: changes in heavy metal speciation and associated chemical and biological properties [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, **35**(19): 6269 - 6279.
- [7] 王清威, 张松林, 臧兰兰, 等. 餐厨垃圾堆肥处理的蚯蚓适应性研究[J]. 环境工程, 2014, **32**(9): 119 - 124.

表 6 添加牛粪的蚯蚓堆肥产品对美丽竹芋的生长影响

Table 6 Effects of cow dung addition on the growth of *Calathea veitchiana*

组别	株高/cm	冠幅/cm ²	叶片数/(片·株 ⁻¹)	鲜质量/(g·株 ⁻¹)
T ₀	11.06 ± 0.33 e	172.30 ± 6.10 e	2.80 ± 0.20 d	7.25 ± 0.83 e
T ₁	12.56 ± 0.12 d	242.40 ± 3.70 d	4.80 ± 0.20 c	10.32 ± 0.54 d
T ₂	13.34 ± 0.22 c	274.76 ± 4.68 cd	5.06 ± 0.40b c	12.32 ± 0.76 c
T ₃	13.54 ± 0.07 c	300.67 ± 14.78 bc	5.60 ± 0.40 bc	12.93 ± 0.57 c
T ₄	14.32 ± 0.16 b	322.37 ± 22.55 abc	7.00 ± 0.30 a	13.91 ± 0.50 bc
T ₅	15.50 ± 0.40 a	336.18 ± 21.59 ab	6.60 ± 0.50 ab	15.64 ± 0.66 ab
T ₆	16.08 ± 0.24 a	360.12 ± 26.41 a	7.20 ± 0.40 a	17.17 ± 0.53 a

说明: 同列不同字母表示各组间差异显著 ($P < 0.05$)

- WANG Qingwei, ZHANG Songlin, ZANG Lanlan, *et al.* The adaptability of earthworm *Eisenia foetida* during composting treatment of kitchen waste [J]. *Environ Eng*, 2014, **32**(9): 119 – 124.
- [8] 于建光, 常志州, 沈磊, 等. 稻秸蚯蚓堆制后的物理、化学及微生物特性变化[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, **16**(6): 1503 – 1508.
- YU Jianguang, CHANG Zhizhou, SHEN Lei, *et al.* Change in physical-chemical and microbial properties of rice straw through vermicomposting [J]. *Plant Nutri Fert Sci*, 2010, **16**(6): 1503 – 1508.
- [9] ZHANG Lu, SUN Xiangyang. Effects of rhamnolipid and initial compost particle size on the two-stage composting of green waste [J]. *Bioresour Technol*, 2014, **163**(7): 112 – 122.
- [10] SUTHAR S. Recycling of agro-industrial sludge through vermitechnology [J]. *Ecol Eng*, 2010, **36**(8): 1028 – 1036.
- [11] FLEGEL M, SCHRADER S. Importance of food quality on selected enzyme activities in earthworm casts (*Dendrobaena octaedra*, Lumbricidae) [J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, **32**(8/9): 1191 – 1196.
- [12] YADAV A, GARG V K. Effect of poultry waste on vermicomposting of anaerobically digested cattle dung slurry [J]. *Int J Environ Tech Manage*, 2014, **17**(2/3/4): 154 – 164.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [14] 刘书钗. 制浆造纸分析与检测[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [15] PRAKASH M, KARMEGAM N. Vermistabilization of pressmud using *Perionyx ceylanensis* Mich. [J]. *Bioresour Technol*, 2010, **101**(21): 8464 – 8468.
- [16] TRIPATHI G, BHARDWAJ P. Comparative studies on biomass production, life cycles and composting efficiency of *Eisenia fetida* (Savigny) and *Lampito mauritii* (Kinberg) [J]. *Bioresour Technol*, 2004, **92**(3): 275 – 283.
- [17] MASÓ M A, BLASI A B. Evaluation of composting as a strategy for managing organic wastes from a municipal market in Nicaragua [J]. *Bioresour Technol*, 2008, **99**(11): 5120 – 5124.
- [18] YADAV A, GARG V K. Vermicomposting: an effective tool for the management of invasive weed *Parthenium hysterophorus* [J]. *Bioresour Technol*, 2011, **102**(10): 5891 – 5895.
- [19] SUTHAR S. Vermicomposting potential of *Perionyx sansibaricus* (Perrier) in different waste materials [J]. *Bioresour Technol*, 2007, **98**(6): 1231 – 1237.
- [20] Van HEERDEN I, CRONJÉ C, SWART S H, *et al.* Microbial, chemical and physical aspects of citrus waste composting [J]. *Bioresour Technol*, 2002, **81**(1): 71 – 76.
- [21] 姜宇蛟, 朱静平. 添加牛粪对蚯蚓处理污泥的影响[J]. 环境工程学报, 2014, **8**(5): 2079 – 2084.
- JIANG Yujiao, ZHU Jingping. Influence of cow dung addition on sewage sludge treatment by earthworms [J]. *Chin J Environ Eng*, 2014, **8**(5): 2079 – 2084.
- [22] 张振都. 添加绿肥改性牛粪腐解过程中组分变化及培肥研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2011.
- ZHANG Zhendu. *Research on Soil Fertilization and Changes of Components during Decomposition of Cow Manure Mixed with Green Manure* [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2011.
- [23] FERNÁNDEZ-GÓMEZ M J, ROMERO E, NOGALES R. Feasibility of vermicomposting for vegetable greenhouse waste recycling [J]. *Bioresour Technol*, 2010, **101**(24): 9654 – 9660.
- [24] KUMAR R, SHWATA. Enhancement of wood waste decomposition by microbial inoculation prior to vermicomposting [J]. *Bioresour Technol*, 2011, **102**(2): 1475 – 1480.
- [25] 李碧洁. 城市污泥蚯蚓堆肥过程中的营养元素、酶活性及微生物动态研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2013.
- LI Bijie. *The Changes of Nutrient Elements, Enzymatic Activity and Microbes during Vermicomposting for Sewage Sludge* [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2013.
- [26] IEVINSH G. Vermicompost treatment differentially affects seed germination, seedling growth and physiological status of vegetable crop species [J]. *Plant Growth Regul*, 2011, **65**(1): 169 – 181.
- [27] 龚小强, 李素艳, 李燕, 等. 绿化废弃物好氧堆肥和蚯蚓堆肥作为蔬菜育苗基质研究[J]. 浙江农林大学学报, 2016, **33**(2): 280 – 287.
- GONG Xiaoqiang, LI Suyan, LI Yan, *et al.* Compost and vermicompost from green wastes as substrates for vegetable seedlings cultivation [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2016, **33**(2): 280 – 287.