

不同配比园林绿化废弃物和蘑菇渣混合蚯蚓堆肥的效果

王 琳, 李素艳, 孙向阳, 龚小强, 余克非, 蔡琳琳

(北京林业大学 林学院, 北京 100083)

摘要: 为探究园林绿化废弃物和蘑菇渣混合堆肥最佳配比, 采用‘大平 2 号’蚯蚓 *Eisenia fetida* ‘Daping 2’ 对园林绿化废弃物和蘑菇渣进行混合堆肥处理, 以期对园林绿化废弃物和蘑菇渣的资源化利用提供理论基础。试验共设 5 个处理[园林废弃物+蘑菇渣(干质量比)]: $A_1(100\%+0\%)$, $A_2(75\%+25\%)$, $A_3(50\%+50\%)$, $A_4(25\%+75\%)$ 和 $A_5(0\%+100\%)$, 进行 11 周堆肥。对堆肥过程不同处理中, 成熟蚯蚓数量、成熟蚯蚓质量、蚯蚓幼苗数量以及蚯蚓卵数量和堆肥前后材料化学性质进行测定; 利用种子发芽实验研究堆肥效果。结果表明: A_2 和 A_3 处理的蚯蚓生长和繁殖优于其他处理; A_3 和 A_4 处理的堆肥养分(钾、铜和锌)增加率显著高于($P<0.05$)其他处理, A_3 和 A_4 钾质量分数为 (28.05 ± 6.13) 和 (28.32 ± 5.66) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, A_3 和 A_4 铜质量分数为 (21.91 ± 2.78) 和 (34.08 ± 3.34) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 锌质量分数为 (27.22 ± 1.51) 和 (32.76 ± 2.97) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 并且堆肥达到腐熟。蘑菇渣添加比例大于 50% 会导致电导率值偏高, 大于 75% 会限制蚯蚓卵的成长。综合各项指标表明: A_3 堆肥品质优于其他处理。同时, 建议在实际应用中将 A_3 堆肥用于低灵敏度植物的栽培基质或结合淋洗措施降低 A_3 堆肥产品的电导率值后使用。图 3 表 6 参 31

关键词: 园艺学; 园林绿化废弃物; 蘑菇渣; 蚯蚓堆肥; ‘大平 2 号’蚯蚓

中图分类号: S606

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2019)02-0326-09

Mixing garden wastes and spent mushroom compost of different ratios for vermicomposting

WANG Lin, LI Suyan, SUN Xiangyang, GONG Xiaoqiang, YU Kefei, CAI Linlin

(College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: To explore the best ratio of garden waste (GW) and spent mushroom compost (SMC), so as to provide a fundamental basis for resource utilization, *Eisenia fetida* ‘Daping 2’ (earthworms) were used for mixed composting. Five treatments (GW + SMC, dry weight ratio) were set, namely: $A_1(100\% + 0\%)$, $A_2(75\% + 25\%)$, $A_3(50\% + 50\%)$, $A_4(25\% + 75\%)$, and $A_5(0\% + 100\%)$ and 3 replications. The quantity and quality of mature earthworms as well as the quantity of juvenile earthworms and earthworm cocoons of *Eisenia fetida* ‘Daping 2’ for the different treatments were measured during the entire vermicomposting period of 11 weeks. Chemical properties of initial materials and final vermicomposts were also analyzed. Moreover, a germination experiment was conducted to estimate the maturity of the vermicompost. Results showed that growth and reproductive performance of earthworms treated by A_2 and A_3 were much higher than those of the other treatments ($P<0.05$). The nutrient increasing rates (for K, Cu, and Zn) in the compost for A_3 and A_4 treatments were much higher than those of other treatments ($P<0.05$), and vermicomposts reached maturity. The K content for A_3 was (28.05 ± 6.13) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and for A_4 was (28.32 ± 5.66) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cu content for A_3 was (21.91 ± 2.78) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and for A_4 was (34.08 ± 3.34) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and Zn content for A_3 was (27.22 ± 1.51) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and for A_4 was (32.76 ± 2.97) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Also, when 50% or more SMC was added, a high electrical conductivity(EC) value occurred, but with 75% or more SMC, growth of earthworm cocoons was limited. Thus, comprehensive fac-

收稿日期: 2018-04-10; 修回日期: 2018-09-07

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201504205)

作者简介: 王琳, 从事园林绿化废弃物资源化处理研究。E-mail: wanglin2016@bjfu.edu.cn。通信作者: 李素艳, 教授, 博士, 从事园林绿化废弃物资源化处理研究。E-mail: lisuyan@bjfu.edu.cn

tors indicated that, the quality of compost was best with A₃ meaning it application of cultivated substrates for low sensitivity plants was recommended or water leaching should be adopted to reduce the EC value of A₃ compost in actual production. [Ch, 3 fig. 6 tab. 31 ref.]

Key words: horticulture; green waste; spent mushroom compost; vermicomposting; *Eisenia fetida* ‘Daping 2’

农林业的迅速发展，对用作栽培基质的草炭需求量急剧增加^[1]。作为不可再生的资源，草炭的过度开采会造成湿地生态环境的严重破坏。诸多国家已禁止开采草炭，并转而寻找其他可替代资源^[2]。前人研究表明：有机固体废弃物，例如蘑菇渣、园林绿化废弃物、城市污泥、牛粪、秸秆等，经过合适的堆肥处理，均能用作栽培基质替代草炭。如李燕等^[3]研究园林废弃物堆肥替代泥炭用于红掌 *Anthurium anaraeanum* 栽培中，添加园林废弃物堆肥体积为 60%对植株生长具有最佳效果；用于鸟巢蕨 *Asplenium nidus* 栽培中，添加园林废弃物堆肥体积为 60%~80%对植株生长具有良好效果。曾清华等^[4]研究 V(小麦秸秆):V(草炭):V(蛭石)=36:54:10 混配基质比较适合甜椒 *Capsicum annuum* var. *grossum* 幼苗生长发育。胡雨彤等^[5]研究牛粪代替泥炭体积的 60%时可以显著改善万寿菊 *Tagetes erecta* 生长状况。园林绿化废弃物是指由林木、花草等绿色植物在生长过程中所产生的自然凋落物或人工修剪所产生的植物残体^[6]，具有总量大、种类多、不易处理等特点。蘑菇渣是生产食用菌过程中产生的一种有机固体废弃物，蘑菇渣得不到较好的处理，会污染居住环境，并且影响蘑菇的规模化生产^[7]，同时蘑菇渣具有优良的多孔结构、较轻的容重并含有丰富的营养，因此，蘑菇渣经合理处理后是一种草炭替代物资源。蚯蚓 *Eisenia fetida* 堆肥处理是将传统的堆肥方法与生物处理相结合，利用蚯蚓吞食过腹消化和微生物的分解作用对有机废弃物进行处理，并以蚯蚓粪的形式排出^[8]。蚯蚓堆制技术已被广泛应用，如龚小强等^[9]研究了利用蚯蚓堆肥技术处理绿化废弃物，并将蚯蚓堆肥用作蔬菜育苗基质。园林绿化废弃物单独处理时降解慢，而蘑菇渣含有数量庞大的微生物群落，将两者结合起来进行堆肥具有显著的优越性。如陈广银等^[10]研究了添加蘑菇渣对落叶堆肥过程中有机物的影响。结果表明：添加蘑菇渣可以有效提高堆肥产品中的腐殖质、游离腐植酸等的含量，有效促进碳水化合物、脂肪族化合物和木质素等的分解。为解决园林绿化废弃物和蘑菇渣的处置难题，实现园林绿化废弃物和蘑菇渣减量化、无害化和资源化，本试验以园林绿化废弃物、蘑菇渣为原料，进行蚯蚓堆肥处理。通过对各处理的蚯蚓生长情况以及堆肥产品性质进行分析，筛选出最优的配比方式，为蘑菇渣和园林废弃物基质化利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试园林绿化废弃物：当季园林绿化废弃物(植物凋落物、树枝修剪物和草坪修剪物等)取自北京市海淀区香山植物园。供试蘑菇渣：取自北京市海淀区上庄蘑菇园。供试蚯蚓为‘大平 2 号’ *Eisenia fetida* ‘Daping 2’，取自中国农业大学蚯蚓生产基地。

粉碎后的园林绿化废弃物和蘑菇渣单独成堆后进行 21 d 预堆肥，处理后理化性质见表 1。

1.2 试验方案

堆肥试验于北京林业大学科技股份有限公司的温室大棚中进行。试验设计见表 2。

分别将经过好氧堆肥的园林废弃物和蘑菇渣物料按表 2 比例混合，将 2 kg 物料分置于 1 个塑料反

表 1 供试园林绿化废弃物和蘑菇渣理化性质(预堆肥 21 d 后)(平均值±标准误)

Table 1 Physicochemical properties of the green waste and spent mushroom compost (after 21 d pre-composting) used for vermicomposting (mean ± SD)

供试物	pH 值	电导率/(dS·m ⁻¹)	总有机碳/(g·kg ⁻¹)	腐植酸/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	碳氮比
园林绿化废弃物	8.24 ± 0.07	1.92 ± 0.02	284.4 ± 3.44	236.4 ± 9.8	15.99 ± 0.10	35.39 ± 3.45
蘑菇渣	8.62 ± 0.01	4.04 ± 0.03	347.4 ± 3.93	372.8 ± 23.1	19.09 ± 0.11	32.41 ± 4.09
供试物	全磷/(g·kg ⁻¹)	全钾/(g·kg ⁻¹)	铁/(mg·kg ⁻¹)	铜/(mg·kg ⁻¹)	锌/(mg·kg ⁻¹)	锰/(mg·kg ⁻¹)
园林绿化废弃物	2.99 ± 0.13	6.94 ± 0.12	2 693.00 ± 68.52	17.67 ± 0.22	118.9 ± 1.79	137.5 ± 2.95
蘑菇渣	9.50 ± 1.46	13.25 ± 0.36	1 643.00 ± 38.77	13.14 ± 0.03	99.38 ± 0.46	116.3 ± 0.31

应容器(长 40.5 cm, 宽 30.5 cm, 高 14.5 cm, 底部具有 4 个 1.0 mm 排水口)中, 各处理重复 3 次, 调节材料水分至 65%~70%, 之后各个反应容器中加入 20 条‘大平 2 号’蚯蚓(无生殖环, 总生物量约 4 g)进行蚯蚓堆肥。为防止蚯蚓逃逸, 用 1.0 mm 孔径的塑料网覆盖在各个容器上方及底部孔处, 并用橡皮条固定。整个堆制过程维持水分在 65%~70%, 100 d 后蚯蚓堆肥停止。除配比不同外, 其他因素均保持一致。

蚯蚓堆肥过程中, 隔 10 d 对反应容器中成熟蚯蚓数量、成熟蚯蚓质量、蚯蚓卵数量和幼年蚯蚓数量进行人工计数和称量。

分别于蚯蚓堆肥试验开始和结束时采集样品, 进行电导率值、pH 值、全氮、全钾、全磷、有机碳、腐殖酸、铜、锌、锰、铁测定。

种子发芽试验: 取饱满的白菜 *Brassica pekinensis* 种子, 均匀播种在园林废弃物和蘑菇渣混合堆肥基质花盆内, 播种深度 1.0 cm, 播种子 20 粒·盆⁻¹, 各处理设置 3 次重复, 放入人工气候培养箱内进行培养, 昼夜温度为 25 ℃/20 ℃, 昼夜时长为 16 h/8 h, 光强度 3 000 lx, 湿度为 70%, 并于播种第 2 天开始记录发芽种子数, 发芽以展开子叶为准, 第 7 天结束发芽, 测定发芽幼苗根长, 计算种子发芽指数。

1.3 测定方法

电导率值、pH 值的测定: 利用蒸馏水和物料以 10:1 比例震荡浸提 30 min, 过滤后, 分别用电导率仪和 pH 计测定。全氮的测定^[11]: 半微量凯氏定氮法。全钾的测定^[11]: 浓硫酸-过氧化氢消煮, 火焰光度计法。全磷的测定^[11]: 浓硫酸-过氧化氢消煮, 钒钼黄比色法。有机碳的测定^[11]: 重铬酸钾容量法-外加热法。腐殖酸的测定^[11]: 重铬酸钾氧化法。钙、镁、铜、锌、锰^[11]: 原子吸收分光光度法(AAS 法)。铁的测定^[11]: DTPA 溶液浸提-原子吸收光谱法。种子发芽指数(I_G)计算方式: $I_G = [(处理的种子发芽率 \times 处理的种子平均根长) / (对照的种子发芽率 \times 对照的种子平均根长)] / 100\%$ 。成熟蚯蚓平均质量=测定时成熟蚯蚓总质量/成熟蚯蚓数量。成熟蚯蚓死亡率=(初始时成熟蚯蚓数量-测定时成熟蚯蚓数量)/初始时成熟蚯蚓数量。

1.4 数据处理方法

利用 Excel 2010 和 SPSS 20.0 进行试验数据处理与分析。

2 结果与讨论

2.1 不同处理蚯蚓堆肥对蚯蚓生长和繁殖的影响

蚯蚓存活率、蚯蚓质量及蚯蚓繁殖率是反映蚯蚓堆肥进程的重要指标^[12]。不同处理的成熟蚯蚓数量在堆肥过程变化如图 1A 所示。成熟蚯蚓数量在不同处理间变化趋势不同, A_1 , A_4 和 A_5 的成熟蚯蚓数量在整个周期内均呈下降趋势, A_2 在 1~7 和 8~9 周内呈下降趋势, 在 7~8 和 9~10 周内呈上升趋势。处理 A_3 在 1~7 和 9~10 周内呈下降趋势, 在 7~9 周内呈上升趋势。其中 A_2 和 A_3 呈上升趋势的原因可能是堆肥内环境良好, 蚯蚓卵孵化生长, 使得成熟蚯蚓数量上升, 这与唐健等^[13]的研究结果一致。

由表 3 可见: 各处理之间的成熟蚯蚓死亡率差异显著($P < 0.05$), 各处理最终成熟蚯蚓死亡率表现为: $A_1(56.7\% \pm 1.7\%) > A_5(53.3\% \pm 3.3\%) > A_4(36.7\% \pm 14.5\%) > A_3(1.7\% \pm 14.8\%) = A_2(1.7\% \pm 6.7\%)$ 。可见, A_2 和 A_3 较 A_1 , A_4 和 A_5 处理的蚯蚓存活率更高。甘洋洋^[14]研究表明: 随着有机物料碳氮比增加, 成年蚯蚓死亡率降低, 但本研究中, 碳氮比最大的 A_1 处理具有最高死亡率, 说明蚯蚓的生存状况不仅受到有机物料有机碳和氮素的影响, 还受其他因素的影响。

蚯蚓平均质量变化如图 1B 所示。5 个处理的蚯蚓质量在周期内均呈先上升后下降的趋势, 并且蚯蚓质量最大值出现在试验的第 20~40 天。这可能是由于培养前期, 蚯蚓处于生长期, 有机物料中营养和空间都充足, 使蚯蚓的生长加快^[15]。魏佳伦^[16]认为: 随着培养天数增加, 一方面蚯蚓达到成熟, 繁殖能力增强, 蚯蚓幼苗逐渐增多, 导致物料与空间资源逐渐减少, 蚯蚓存在种内竞争关系; 另一方面由于

表 2 试验设计

Table 2 Experiment design

处理	园林废弃物(干质量)/%	蘑菇渣(干质量)/%
A_1	100	0
A_2	75	25
A_3	50	50
A_4	25	75
A_5	0	100

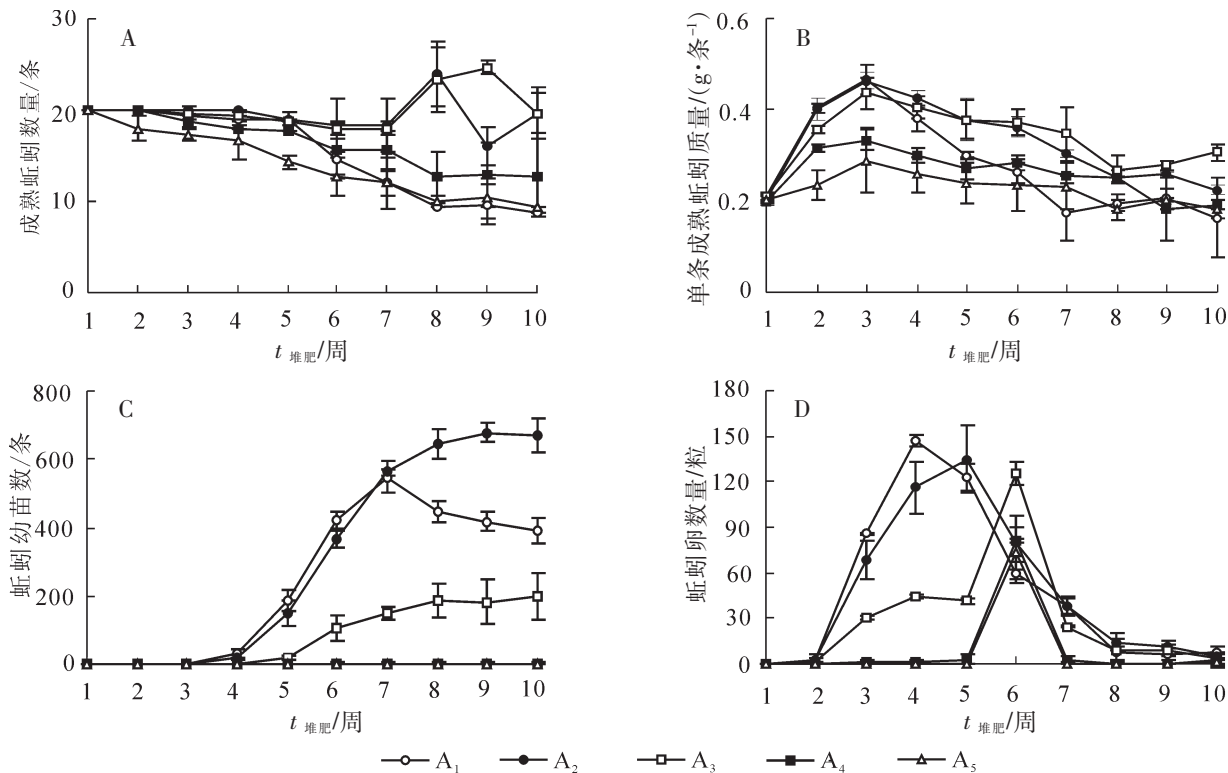


图 1 不同处理蚯蚓堆肥对单条成熟蚯蚓重量和成熟蚯蚓、蚯蚓幼苗、蚯蚓卵数量的变化影响
Figure 1 Effects of different treatments on number of mature earthworms, juveniles, cocoons and weight of single mature earthworm

赤子爱胜蚓 *Eisenia foetida* 具有母子两代不愿同居的习惯，所以个体质量逐渐下降。

由表 3 可见：各处理之间单条成熟蚯蚓最大质量和单条成熟蚯蚓最终质量差异显著($P<0.05$)，各处理单条成熟蚯蚓最大质量表现为： $A_1(465.7 \pm 12.8) \text{ mg} \cdot \text{条}^{-1} > A_2(463.8 \pm 20.5) \text{ mg} \cdot \text{条}^{-1} > A_3(435.7 \pm 23.2) \text{ mg} \cdot \text{条}^{-1} > A_4(334.5 \pm 9.1) \text{ mg} \cdot \text{条}^{-1} > A_5(286.0 \pm 34.7) \text{ mg} \cdot \text{条}^{-1}$ ，有机物料碳氮比为 $A_1 > A_2 > A_3 > A_4 > A_5$ 。这一结果与甘洋洋^[14]的研究结果相一致：成熟蚯蚓最大质量与有机物料碳氮比之间存在显著正相关关系。单条成熟蚯蚓最终质量表现为： $A_3(306.4 \pm 8.5) \text{ mg} \cdot \text{条}^{-1} > A_2(224.5 \pm 15.1) \text{ mg} \cdot \text{条}^{-1} > A_4(195.8 \pm 15.8) \text{ mg} \cdot \text{条}^{-1} > A_5(186.2 \pm 22.1) \text{ mg} \cdot \text{条}^{-1} > A_1(166.2 \pm 46.1) \text{ mg} \cdot \text{条}^{-1}$ 。综上可知： A_1 、 A_2 和 A_3 较 A_4 和 A_5 的蚯蚓生长量大，更适合蚯蚓生长。

表 3 不同处理对蚯蚓生长和繁殖的影响

Table 3 Effects of different treatments on growth and reproductive performance of earthworm						
处理	堆肥结束成熟蚯蚓 数量/条	成熟蚯蚓最大质 量/(mg·条 ⁻¹)	堆肥结束成熟蚯蚓 质量/(mg·条 ⁻¹)	成年蚯蚓死亡率/%	蚯蚓卵最大数量/ 粒	蚯蚓幼苗最大数 量/条
A ₁	8.7 ± 0.3 b	465.7 ± 12.8 a	166.2 ± 46.1 b	56.7 ± 1.7 a	147.0 ± 3.5 a	548.0 ± 22.5 b
A ₂	19.7 ± 1.3 a	463.8 ± 20.5 a	224.5 ± 15.1 b	1.7 ± 6.7 b	135.0 ± 11.0 a	677.7 ± 11.9 a
A ₃	19.7 ± 2.9 a	435.7 ± 23.2 a	306.4 ± 8.5 a	1.7 ± 14.8 b	125.3 ± 4.5 a	199.3 ± 42.9 c
A ₄	12.7 ± 2.9 b	334.5 ± 9.1 b	195.8 ± 15.8 b	36.7 ± 14.5 a	81.0 ± 13.0 b	2.7 ± 1.5 d
A ₅	9.3 ± 0.7 b	286.0 ± 34.7 b	186.2 ± 22.1 b	53.3 ± 3.3 a	73.3 ± 14.4 b	1.7 ± 0.8 d

说明：同列不同字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。表中数据为平均值±标准误

蚯蚓幼苗变化如图 1C 所示。 A_1 、 A_2 和 A_3 的蚯蚓幼苗从第 4 周开始出现，并且 A_2 和 A_3 的蚯蚓数量在整个周期内呈上升趋势， A_1 在 7 周前呈上升趋势，在 7 周后呈下降趋势， A_4 和 A_5 的蚯蚓幼苗数量在整个周期内基本为 0，AIRA 等^[17]的研究发现：高碳氮比对蚯蚓的繁殖更有利，所以 A_4 和 A_5 为幼苗数量为 0 的原因可能是 A_4 和 A_5 的碳氮比较低，不利于蚯蚓卵的生长和孵化。

由表 3 可见：各处理之间蚯蚓幼苗最大数量存在显著差异($P<0.05$)，各处理蚯蚓幼苗最大数量表现为： $A_2(677.7 \pm 11.9) \text{ 条} > A_1(548.0 \pm 22.5) \text{ 条} > A_3(199.3 \pm 42.9) \text{ 条} > A_4(2.7 \pm 1.5) \text{ 条} > A_5(1.7 \pm 0.8) \text{ 条}$ 。

综上可知： A_4 和 A_5 不适合蚯蚓幼苗的存活； A_1 、 A_2 和 A_3 均适合蚯蚓幼苗存活，其中 A_2 最佳。

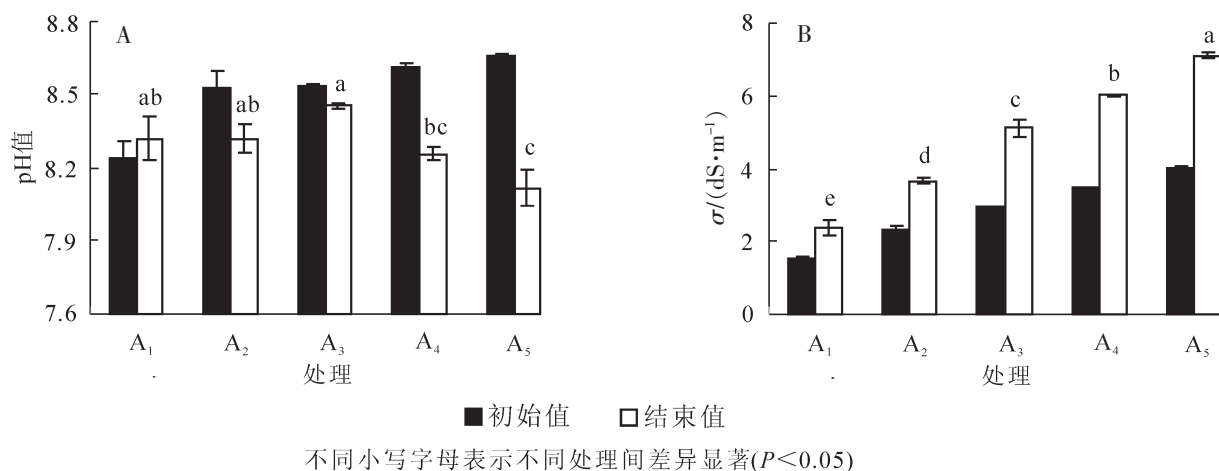
从图 1D 可知：试验中所有处理蚯蚓卵数呈现先增加后减少的趋势。在整个周期内 A_1 、 A_2 和 A_3 处理的蚯蚓卵从第 2 周开始出现， A_4 和 A_5 处理从第 5 周开始出现，并且各处理蚯蚓卵数形成 1 个峰值后在末期回归至 0，这与袁嘉铭^[15]的研究结果相一致。 A_1 于第 4 周最先达到最大值， A_2 于第 5 周达到最大值， A_3 、 A_4 和 A_5 于第 6 周达到最大值。

由表 3 可见：各处理之间蚯蚓卵最大数量差异显著($P < 0.05$)，各处理蚯蚓卵最大数量表现为： A_1 (147.0 ± 3.5)粒 $> A_2$ (135.0 ± 11.0)粒 $> A_3$ (125.3 ± 4.5)粒 $> A_4$ (81.0 ± 13.0)粒 $> A_5$ (73.3 ± 14.4)粒。研究表明：蚯蚓卵数量与有机物料碳氮比呈正相关关系，这一结果与 LOEHR 等^[18]研究结果相一致。综上可知： A_1 、 A_2 和 A_3 较 A_4 和 A_5 更适合蚯蚓卵的存活。

上述结果表明：园林废弃物能促进蚯蚓生长繁殖， A_1 、 A_2 和 A_3 蚯蚓生长和繁殖的较好， A_2 最优。

2.2 不同处理蚯蚓堆肥对 pH 值和电导率值的影响

从图 2A 可知：堆肥结束时各处理的 pH 值与堆肥初始时相比有增有减。pH 值降低有两方面原因，一是氮、磷矿化成亚硝酸盐/硝酸盐和正磷酸盐；二是由于有机质通过微生物作用转化成了有机酸中间产物^[19]。pH 值上升可能是由于微生物没有将有机氮降解完全，而以铵盐的形式释放^[20]，也可能是堆肥过程中蚯蚓释放出了碱性分泌物，从而提高了堆肥的 pH 值。其中 A_5 降低的幅度最大，为 6.24%， A_4 次之，为 4.10%， A_2 再次，为 2.24%。由此可见：随着蘑菇渣比例的增加，蚯蚓堆肥的 pH 值降低幅度增大。堆肥初始时的 pH 值为 8.24~8.66，均在最适合蚯蚓生长的 pH 范围(pH 8.00~9.00)内^[21]，堆肥结束后 pH 值为 8.12~8.45，均在农业应用要求范围 pH 7.00~8.05 内^[22]。



不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$)

图 2 蚯蚓堆肥处理前后物料 pH 值、电导率的变化

Figure 2 Variation of pH and EC of the materials before and after vermicomposting treatment

电导率值是基质浸提液中可溶性盐浓度指标，反映基质当中可溶性养分总量。电导率过高会构成渗透逆境，导致植物盐害，电导率过低会导致营养不足，难以维持植物正常生长^[19]。从图 2B 可知：在蚯蚓堆肥处理后，所有处理的电导率值均升高。电导率值升高很大一部分原因是有机质的降解导致可溶性盐浓度升高，还有部分原因是蚯蚓活动加快了降解过程中磷酸盐、铵盐、钾盐及其他矿物离子的释放^[23]。由图 2B 可知：随着蘑菇渣比例的增大电导率值越大，且上升幅度越大，其中 A_5 的电导率值增加幅度最大，为 75.93%，其次 A_3 为 73.25%， A_4 再次，为 71.60%。这也是与蘑菇渣自身电导率值高直接相关的。农业生产上栽培基质对中等灵敏度植物的电导率耐受水平的上限值为 $4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ ^[24]，可见 A_1 和 A_2 均在理想水平内。 A_3 、 A_4 和 A_5 处理偏高。

2.3 不同处理蚯蚓堆肥对有机碳、腐植酸的影响

由表 4 可知：堆肥结束后所有处理的有机碳质量分数均下降， $A_1 \sim A_5$ 的下降百分率为 8.76%~16.72%，其中 A_4 和 A_5 的降率最高。堆制过程是有机质的矿质化和腐殖化过程，在此过程中微生物将有机质作为主要碳源，产生二氧化碳和水，导致部分有机碳的损失。同时蚯蚓的存在能够通过蚯蚓肠道分泌一些酶、肠道黏液和抗生素等加快和强化对大分子有机物的分解作用，使其成为小颗粒物质，从而增

加了微生物降解的表面积，导致更多的有机碳损失^[25]。这与李燕等^[26]的研究结果一致。

表 4 不同处理蚯蚓堆肥对有机碳、腐植酸的影响

Table 4 Effects of different treatments on organic carbon and humic acid contents of vermicomposted material

处理	$w_{\text{有机碳}}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$			$w_{\text{腐植酸}}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$		
	初始	结束	降率/%	初始	结束	降率/%
A ₁	284.39 ± 3.44	258.70 ± 1.59	9.00 ± 1.47 b	223.5 ± 2.5	234.7 ± 2.3	5.02 ± 0.73 b
A ₂	296.75 ± 7.27	270.35 ± 1.84	8.76 ± 2.80 b	232.4 ± 12.9	283.9 ± 1.1	22.93 ± 6.87 a
A ₃	307.63 ± 1.99	274.79 ± 3.92	10.67 ± 1.42 ab	289.1 ± 02.7	33.51 ± 3.1	15.97 ± 2.19 ab
A ₄	328.27 ± 9.17	281.57 ± 5.17	14.08 ± 3.09 ab	313.3 ± 20.2	336.9 ± 14.3	8.07 ± 5.79 b
A ₅	347.35 ± 3.93	289.18 ± 0.82	16.72 ± 1.08 a	363.2 ± 17.1	395.1 ± 12.4	9.02 ± 3.53 ab

说明：降率中同列不同字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。表中数据为平均值±标准误

腐植酸质量分数反映了栽培基质的保肥供肥能力。由表 4 可知：在堆肥初期，随着蘑菇渣的增加堆肥中腐植酸质量分数也增加，这与陈广银等^[27]的研究结果相同。堆肥结束后所有处理的腐植酸质量分数均升高，A₁~A₅ 增加的百分率为 5.02%~22.93%。不同处理中 A₂ 的腐植酸增率最高，与 A₁ 和 A₄ 有显著差异($P<0.05$)，表明利用蚯蚓堆肥可以显著提高 A₂ 的保肥供肥能力。A₃ 的增率次之，A₅ 再次。

2.4 不同处理蚯蚓堆肥对氮、磷、钾和碳氮比的影响

由表 5 可知：堆肥结束后，所有处理的全氮质量分数均升高。A₁~A₅ 的全氮质量分数依次递增，增加百分率也依次递增，增加的范围为 0.53%~21.91%，其中 A₃、A₄ 和 A₅ 增率显著高于 A₁ 和 A₂。SUB-RAMAMAN 等^[28]研究表明：全氮含量上升的原因可能是堆肥过程中非氮有机物矿化分解引起的干物质减少，蚯蚓分泌的黏液、酶和排放的含氮粪便，及堆制后期固氮菌的固氮作用。

表 5 不同处理蚯蚓堆肥对氮、磷、钾和碳氮比的影响

Table 5 Effects of different treatments on N, P, K and C/N of vermicomposted material

处理	$w_{\text{全氮}}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$			碳氮比		
	初始	结束	增率/%	初始	结束	增率/%
A ₁	15.99 ± 0.10	16.08 ± 0.13	0.53 ± 0.25 b	17.78 ± 0.12	16.10 ± 0.23	9.47 ± 1.68 b
A ₂	16.36 ± 0.63	17.31 ± 0.47	6.07 ± 3.69 b	18.23 ± 1.16	15.63 ± 0.32	13.70 ± 4.70 b
A ₃	17.57 ± 0.51	20.72 ± 0.76	18.21 ± 6.66 a	17.54 ± 0.62	13.29 ± 0.31	24.02 ± 3.74 a
A ₄	17.95 ± 0.28	21.77 ± 0.28	21.33 ± 2.95 a	18.28 ± 0.23	12.93 ± 0.07	29.22 ± 0.86 a
A ₅	19.09 ± 0.11	23.27 ± 0.61	21.91 ± 2.63 a	18.20 ± 0.21	12.44 ± 0.33	31.60 ± 2.18 a

处理	$w_{\text{全磷}}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$			$w_{\text{全钾}}/(\text{g}\cdot\text{kg}^{-1})$		
	初始	结束	增率/%	初始	结束	增率/%
A ₁	2.99 ± 0.13	3.62 ± 0.29	20.70 ± 5.50 a	6.94 ± 0.12	8.14 ± 0.22	17.24 ± 3.13 a
A ₂	5.34 ± 0.54	6.24 ± 0.13	18.94 ± 10.30 a	8.36 ± 0.30	10.21 ± 0.39	22.69 ± 8.50 a
A ₃	7.66 ± 0.12	9.15 ± 0.74	19.58 ± 9.35 a	10.17 ± 0.09	13.02 ± 0.57	28.05 ± 6.13 a
A ₄	8.66 ± 0.28	11.44 ± 0.10	32.45 ± 5.19 a	11.28 ± 0.24	14.45 ± 0.41	28.32 ± 5.66 a
A ₅	9.51 ± 1.47	12.50 ± 0.32	40.56 ± 29.31 a	13.25 ± 0.36	16.02 ± 0.48	20.99 ± 4.32 a

说明：降率和增率中同列不同字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。表中数据为平均值±标准误

有机碳的减少和总氮量的增加导致碳氮比的降低。PADMAVATHIAMMA 等^[29]提出碳氮比小于 20 时的堆肥产品腐熟度是可以接受的，但是小于 15 更佳且适宜于农业应用。由表 5 可知：本试验中堆肥结束后所有处理碳氮比均降低，降幅为 9.47%~31.60%。A₃、A₄ 和 A₅ 的碳氮比均小于 15，且降幅最高，相比 A₁ 和 A₂ 有差异显著($P<0.05$)。

由表 5 可知：经蚯蚓堆肥后，各处理全磷、全钾质量分数都增加。全磷、全钾质量分数的增加主要是由于有机质的矿化而使得磷、钾浓缩。这一结果与魏佳伦^[16]的研究结果相一致。起始的全磷质量分数为 2.99~9.51 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，堆肥结束后的全磷质量分数为 3.62~12.50 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，增加的百分率为 18.94%~40.56%。全磷增加百分率为 A₅ 最大，A₄ 次之，A₁~A₅ 间全磷增加百分率无显著性差异。各处理堆肥起始的全钾质量分数为 6.94~13.25 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，堆肥结束后的全钾质量分数为 8.14~16.02 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，增加的百分率为

17.24%~28.32%，A₄ 的增加率最高，A₃ 次之。各处理间的增率无显著性差异。

2.5 不同处理蚯蚓堆肥对铁、铜、锌和锰的影响

由表 6 可知：蚯蚓堆肥结束后各处理铁、铜、锌和锰的质量分数均增加。与全磷相同，各元素质量分数增加的原因主要是有机质的矿化，而使得堆肥的质量和体积下降，导致养分质量分数增加。

表 6 不同处理蚯蚓堆肥对铁、铜、锌和锰的影响

Table 6 Effects of different treatments on Fe, Cu, Zn and Mn concentrations of vermicomposted material						
处理	$w_{\text{铁}}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$			$w_{\text{铜}}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$		
	初始	结束	增率/%	初始	结束	增率/%
A ₁	3 732.00 ± 16.55	3 750.03 ± 14.27	0.48 ± 0.30 c	27.59 ± 0.11	32.18 ± 0.16	16.65 ± 0.73 b
A ₂	3 452.17 ± 19.63	3 585.34 ± 29.45	3.86 ± 0.87 bc	25.34 ± 1.08	29.80 ± 0.62	18.19 ± 7.02 b
A ₃	3 216.38 ± 45.22	3 436.70 ± 43.46	6.93 ± 2.81 abc	22.65 ± 0.47	27.58 ± 0.18	21.91 ± 2.78 b
A ₄	2 793.50 ± 29.07	3 152.60 ± 46.17	12.89 ± 2.41 a	19.75 ± 0.39	26.46 ± 0.15	34.08 ± 3.34 a
A ₅	2 526.59 ± 97.54	2 783.08 ± 10.46	10.53 ± 4.84 ab	19.75 ± 0.22	23.49 ± 0.34	18.96 ± 1.45 b

处理	$w_{\text{锌}}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$			$w_{\text{锰}}/(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$		
	初始	结束	增率/%	初始	结束	增率/%
A ₁	199.58 ± 3.68	230.90 ± 3.31	15.76 ± 2.53 c	221.98 ± 9.05	236.41 ± 5.15	6.69 ± 2.52 b
A ₂	181.84 ± 3.04	221.05 ± 6.12	21.70 ± 4.81 bc	196.42 ± 6.24	227.52 ± 4.11	16.15 ± 5.10 a
A ₃	177.77 ± 1.79	226.12 ± 1.44	27.22 ± 1.51 ab	188.88 ± 2.52	216.43 ± 2.55	14.59 ± 0.44 ab
A ₄	169.32 ± 1.43	224.72 ± 3.20	32.76 ± 2.97 a	180.43 ± 1.45	216.42 ± 4.12	19.93 ± 1.61 a
A ₅	169.04 ± 2.80	214.68 ± 1.92	27.07 ± 2.42 ab	176.17 ± 3.38	196.97 ± 0.43	11.90 ± 2.35 ab

说明：增率中同列不同字母表示各处理间差异显著($P<0.05$)。表中数据为平均值±标准误

各处理起始的铁质量分数为 2 526.59~3 732.00 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，堆肥结束后的铁质量分数为 2 783.08~3 750.03 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，增加的百分率为 0.48%~12.89%，其中 A₄ 的铁增加量最高，与 A₁ 和 A₂ 相比差异显著。各处理起始的铜质量分数为 19.75~27.59 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，堆肥结束后的铜质量分数为 23.49~32.18 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，增加的百分率为 16.65%~34.08%，A₄ 的铜增加量显著高于其他处理。A₃ 的铜增加量次之。各处理起始的锌质量分数为 169.04~199.58 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，堆肥结束后的锌为 214.68~230.90 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，增加的百分率为 15.76%~32.76%，其中 A₄ 的锌增加量最大，显著高于 A₁ 和 A₂。A₃ 的锌增加量次之。各处理起始的锰质量分数为 176.17~221.98 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，堆肥结束后的锰质量分数为 196.97~236.41 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，增加的百分率为 6.69%~19.93%，其中 A₄ 锰的增加量显著高于 A₁，A₂ 次之。可能是由于处理后 pH 值的降低使得铁、铜、锌、锰元素有效性增加或微生物的活动加快了有机物的降解进而提高了微量元素质量分数，FERNÁNDEZ-GÓMEZ 等^[30]的研究结果也表明可能是由于有机物矿化导致干物质减少从而提高了各元素质量分数。

2.6 不同处理蚯蚓堆肥对种子发芽指数的影响

发芽指数(I_c)是判断堆肥腐熟程度的指标之一。ZUCCONI 等^[31]研究表明： I_c 值大于 50% 时表明堆肥已基本腐熟，堆肥对种子基本无毒性。由图 3 可知，蚯蚓堆肥结束后，处理 A₃ 和 A₄ 的 I_c 值大于 50%，已基本腐熟。因此，适当配比的园林废弃物和蘑菇渣堆肥能够提高蚯蚓堆肥腐熟度。

3 结论

利用‘大平 2 号’蚯蚓对园林绿化废弃物和蘑菇渣进行堆肥处理[园林废弃物+蘑菇渣(干质量比)]: A₂ (75%+25%) 和 A₃ (50%+50%) 配比的堆肥蚯蚓生长和繁殖的最好，但蘑菇渣质量分数过高的 A₄ (25%+75%) 和 A₅ (0%+100%) 堆肥限制蚯蚓的生长，不利于蚯蚓卵的成长。

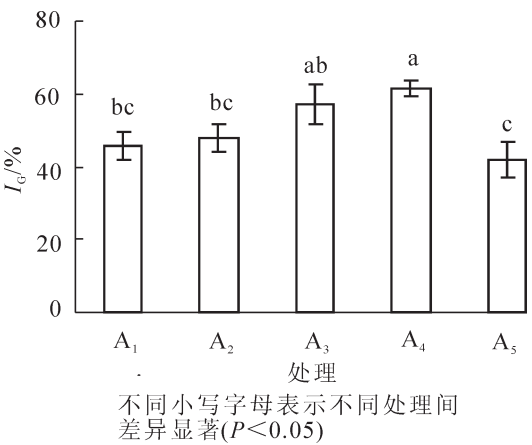


图 3 不同处理蚯蚓堆肥对种子发芽指数影响
Figure 3 Effects of different treatments on germination index

经过蚯蚓堆肥处理后, 有机物料的养分质量分数均有显著变化。蚯蚓能显著提高 A₃, A₄ 和 A₅ 配比堆肥的氮素质量分数, 因而显著降低 A₃, A₄ 和 A₅ 配比堆肥的碳氮比, A₃ 和 A₄ 的养分(全钾、铜、锌)增加率最大, 达到了腐熟标准, 因此混合堆肥比园林绿化废弃物或蘑菇渣单一堆肥产品品质更好。

本试验中, 蘑菇渣添加的比例过高可能会造成堆肥内电导率值偏高, 所以实际生产中建议采取园林废弃物与蘑菇渣 50%+50% 的方式进行混合堆肥, 并且将该堆肥产品用于低灵敏度植物的栽培基质, 或者采用淋洗措施降低该堆肥产品基质的电导率后使用。

4 参考文献

- [1] 郭世荣. 固体栽培基质研究、开发现状及发展趋势[J]. 农业工程学报, 2005, **21**(增刊): 1 – 4.
GUO Shirong. Research progress, current exploitations and developing trends of solid cultivation medium [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2005, **21**(suppl): 1 – 4.
- [2] 田赞, 王海燕, 孙向阳, 等. 农林废弃物环保型基质再利用研究进展与展望[J]. 土壤通报, 2011, **42**(2): 497 – 502.
TIAN Yun, WANG Haiyan, SUN Xiangyang, *et al.* The progress and prospects of agricultural and forest residue substrate [J]. *Chin J Soil Sci*, 2011, **42**(2): 497 – 502.
- [3] 李燕, 孙向阳, 龚小强. 园林废弃物堆肥替代泥炭用于红掌和鸟巢蕨栽培[J]. 浙江农林大学学报, 2015, **32**(5): 736 – 742.
LI Yan, SUN Xiangyang, GONG Xiaoqiang. Use of green waste compost as a peat surrogate in substrates for *Anthurium andraeanum* and *Asplenium nidus* cultivation [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2015, **32**(5): 736 – 742.
- [4] 曾清华, 孙锦, 郭世荣, 等. 小麦秸秆混配基质对甜椒幼苗生长和光合参数的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012(1): 89 – 94.
ZENG Qinghua, SUN Jin, GUO Shirong, *et al.* Wheat straw residue substrate as component of mixed substrate for sweet pepper growth and photosynthesis [J]. *Soil Fert Sci*, 2012(1): 89 – 94.
- [5] 胡雨彤, 时连辉, 刘登民, 等. 牛粪代替泥炭作栽培基质对万寿菊生长的影响[J]. 北方园艺, 2013(20): 60 – 63.
HU Yutong, SHI Lianhui, LIU Dengmin, *et al.* Effects of different ratios of decomposed cattle dung as peat substitute on substrate properties and growth of *Tagetes erecta* [J]. *Northern Hortic*, 2013(20): 60 – 63.
- [6] 梁晶, 马光军, 郝冠军, 等. 绿化植物废弃物对土壤中 Cu/Zn/Pb 和 Cd 形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(3): 492 – 499.
LIANG Jing, MA Guangjun, HAO Guanjuan, *et al.* Effect of greenery waste incorporation on the speciation of Cu, Zn, Pb and Cd in the soils [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2010, **29**(3): 492 – 499.
- [7] 赵庆祥. 污泥资源化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [8] 仓龙, 李辉信, 胡锋, 等. 蚯蚓堆制处理牛粪的腐熟度指标初步研究[J]. 农村生态环境, 2003, **19**(4): 35 – 49.
CANG Long, LI Huixin, HU Feng, *et al.* Maturity indices of vermicomposted cattle manure [J]. *Rural Eco-Environ*, 2003, **19**(4): 35 – 49.
- [9] 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 Xiaoqiao, 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.
- [10] 陈广银, 王德汉, 吴艳, 等. 添加蘑菇渣对落叶堆肥过程中有机物的影响[J]. 环境化学, 2008, **27**(5): 629 – 633.
CHEN Guangyin, WANG Dehan, WU Yan, *et al.* Effect on organic matters during litter composting process by spent mushroom compost [J]. *Environ Chem*, 2008, **27**(5): 629 – 633.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] BHAT S A, SINGH J, VIG A P. Vermiremediation of dyeing sludge from textile mill with the help of exotic earthworm *Eisenia fetida* Savigny [J]. *Environ Sci Poll Res*, 2013, **20**(9): 5975 – 5982.
- [13] 唐健, 宋贤冲, 雷定战, 等. 不同接种基质对蚯蚓繁殖的影响[J]. 农业研究与应用, 2012(1): 8 – 11.
TANG Jian, SONG Xianchong, LEI Dingzhan, *et al.* Effect of different inoculation matrix on the propagation of earthworm [J]. *Agric Res Appl*, 2012(1): 8 – 11.

- [14] 甘洋洋. 不同有机物料养分特征对蚯蚓生长繁殖的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
GAN Yangyang. *Nutrient Characteristics of Different Organic Material Influence on Earthworms Growth and Reproduction* [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
- [15] 袁嘉铭. 有机物料碳氮比调控对赤子爱胜蚓生长繁殖影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
YUAN Jiaming. *Effect on Growth and Fecundity of Earthworms by Controlling C/N with Different Means in Organic Material* [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
- [16] 魏佳伦. 利用蚯蚓堆肥处理羊粪和菇渣及蚓粪肥效的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
WEI Jialun. *Study on the Conversion of Sheep Manure and Mushroom Residue by Earthworms and the Application of Vermicompost as an Organic Fertilizer* [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.
- [17] AIRA M, MONROY F, DOMÍNGUEZ J. C to N ratio strongly affects population structure of *Eisenia fetida* in vermicomposting systems [J]. *Eur J Soil Biol*, 2006, **42**(11): S127 – S131.
- [18] LOEHR R C, NEUHAUSER E F, MAIECKI M R. Factor affecting the vermistabilization process: temperature, moisture content and polyculture [J]. *Water Res*, 1985, **19**(10): 1311 – 1317.
- [19] NDEGWA P M, THOMPSON S A, DAS K. Effects of stocking density and feeding rate on vermicomposting of biosolids [J]. *Bioresour Technol*, 2005, **71**(1): 5 – 12.
- [20] VIG A P, SINGH J, WANI S H, *et al.* Vermicomposting of tannery sludge mixed with cattle dung into valuable manure using earthworm *Eisenia fetida* (Savigny) [J]. *Bioresour Technol*, 2011, **102**(17): 7941 – 7945.
- [21] 孙振军, 刘玉庆, 李文立. 温度、湿度和酸碱度对蚯蚓生长与繁殖的影响[J]. 莱阳农学院学报, 1993(4): 297 – 300.
SUN Zhenjun, LIU Yuqing, LI Wenli. Effects of temperature moisture and acidity on the growth and reproduction in *Eisemia foelida* [J]. *J Laiyang Agric Coll*, 1993(4): 297 – 300.
- [22] AULINAS M M, BONMATÍ B A. Evaluation of composting as a strategy for managing organic wastes from a municipal market in Nicaragua [J]. *Bioresour Technol*, 2008, **99**(11): 5120 – 5124.
- [23] SHARMA S. Municipal solid waste management through vermicomposting employing exotic and local species of earthworms [J]. *Bioresour Technol*, 2003, **90**(2): 169 – 173.
- [24] LASARIDI K, PROTOPAPA I, KOTSOU M, *et al.* Quality assessment of composts in the Greek market: the need for standards and quality assurance [J]. *J Environ Manage*, 2006, **80**(1): 58 – 65.
- [25] DOMÍNGUEZ J, AIRA M, GOMEZ-BRANDON M. Vermicomposting: earthworms enhance the work of microbes[C]//INSAM H, FRANKE-WHITTLE I, GOBENA M. *Microbes at Work*, [s. l.]: Springer, 2010: 93 – 114.
- [26] 李燕, 孙向阳, 龚小强, 等. 蚯蚓堆肥替代草炭作为甘蓝和西葫芦育苗基质研究[J]. 吉林农业大学学报, 2015, **37**(5): 549 – 554.
LI Yan, SUN Xiangyang, GONG Xiaoqiang, *et al.* Substitution of vermicompost for peat as *Brassica oleracea* L. and *Cucurbita pepo* L. seedling substrates [J]. *J Jilin Agric Univ*, 2015, **37**(5): 549 – 554.
- [27] 陈广银, 王德汉, 吴艳, 等. 不同时期添加蘑菇渣对落叶堆肥过程的影响[J]. 环境化学, 2008, **27**(1): 81 – 86.
CHEN Guangyin, WANG Dehan, WU Yan, *et al.* Effects of addition spent mushroom compost in different stage on litter composting [J]. *Environ Chem*, 2008, **27**(1): 81 – 86.
- [28] SUBRAMAMAN S, SIVARAJAN M, SARAVANAPRIYA S. Chemical changes during vermicomposting of sago industry solid wastes [J]. *J Hazardous Mat*, 2010, **179**(1/2/3): 318 – 322.
- [29] PADMAVATHIAMMA P K, LI L Y, KUMARI U R. An experimental study of vermi-biowaste composting for agricultural soil improvement [J]. *Bioresour Technol*, 2008, **99**(6): 1672 – 1681.
- [30] FERNÁNDEZ-GÓMEZ M J, ROMERO E, NOGALES R. Feasibility of vermicomposting for vegetable greenhouse waste recycling [J]. *Bioresour Technol*, 2010, **101**(24): 9654 – 9660.
- [31] ZUCCONI F, FORTE M, MONAC A, *et al.* Biological evolution of compost maturity [J]. *Biocycle*, 1981, **22**(4): 27 – 29.