

古君禹,王秋君,孙 倩,等. 农林废弃物堆肥产物复配黄瓜育苗基质配方筛选[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(5): 1238-1247.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2022.05.010

农林废弃物堆肥产物复配黄瓜育苗基质配方筛选

古君禹^{1,2}, 王秋君^{1,3,4}, 孙 倩^{1,3,4}, 张 晶^{1,3,4}, 陈 豹^{1,2}, 成 立⁵, 曹 云^{1,2,3,4},
黄红英^{1,3,4}

(1.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所,江苏 南京 210014; 2.南京农业大学资源与环境科学学院,江苏 南京 210095;
3.江苏省有机固体废物资源化协同创新中心,江苏 南京 210095; 4.农业农村部种养结合重点实验室,江苏 南京 210014;
5.镇江贝思特有机活性肥料有限公司,江苏 镇江 212416)

摘要: 以农林废弃物为主要堆肥原料,设置正常通气量[10.0 L/(m³·min)]和低通气量[2.5 L/(m³·min)] 2种方式,进行为期5个月的堆肥试验,并将发酵4个月和5个月的堆肥产物分别用于复配制备育苗基质进行黄瓜育苗试验。结果表明,正常通气量堆体最高温度和高温时间均大于低通气量堆体,有机质降解程度更高。发酵5个月后,低通气量堆肥产物中铵态氮、硝态氮、总钾含量分别比正常通气堆肥高68.7%、8.2%、38.3%,总氮、总磷含量分别比正常通气量堆肥低6.7%、15.6%。堆肥产物复配菜园土后的基质pH、电导率(EC值)、总养分含量和速效养分含量比单纯堆肥低,但容重增加。主成分分析结果表明,复配基质中堆肥产物添加比例越高,基质综合性能越好;发酵5个月的堆肥产物复配基质优于发酵4个月堆肥产物复配基质。好氧发酵产物与菜园土按3:1体积比比对黄瓜育苗效果较好,可作为其穴盘育苗的推荐配方。降低堆肥通风量制备的堆肥产物可以获得与正常通风水平下的堆肥产物及商品基质同等育苗效果。

关键词: 农林废弃物;堆肥;基质配比;茄果类蔬菜;

中图分类号: S642.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2022)05-1238-10

Screening of agricultural and forestry wastes compost products based cultivation substrate formula for cucumber seedling culture

GU Jun-yu^{1,2}, WANG Qiu-jun^{1,3,4}, SUN Qian^{1,3,4}, ZHANG Jing^{1,3,4}, CHEN Bao^{1,2}, CHENG Li⁵,
CAO Yun^{1,2,3,4}, HUANG Hong-ying^{1,3,4}

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. School of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 3. Jiangsu Provincial Organic Solid Waste Recycling Collaborative Innovation Center, Nanjing 210095, China; 4. Key Laboratory of Combination of Planting and Breeding, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China; 5. Zhenjiang BEST Organic Active Fertilizer Co. Ltd., Zhenjiang 212416, China)

Abstract: Agricultural and forestry wastes were used as the main raw materials for composting, and two ventilation rates of normal [10.0 L/(m³·min)] and low [2.5 L/(m³·min)] were set for a five-month composting experiment. After composting for four months and five months, the compost products were mixed with soil at different ratios separately to prepare seedling substrate for cucumber seedling experiment. The results showed that, the maximum temperature and high temperature duration of normal ventilation compost was higher than that of low ventilation compost, and the degradation degree of organic matter was

收稿日期:2022-02-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(420771100);镇江市重点研发计划——现代农业项目(NY2020007);江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(19)2003]

作者简介: 古君禹(1998-),男,河北唐山人,硕士研究生,从事农业资源废弃物资源化利用研究。(E-mail) 1056685844@qq.com

通讯作者: 曹 云, (E-mail) yun.cao@jaas.ac.cn

relatively higher in normal ventilation compost. After fermentation for five months, contents of ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and total potassium in the products of low ventilation compost were 68.7%, 8.2% and 38.3% higher than those in normal ventilation compost, and contents of total nitrogen and total phosphorus in the products of low ventilation compost were 6.7% and 15.6% lower than those in normal ventilation compost. pH value, electric conductivity (EC), total nutrient content and available nutrient content of the substrate made of compost product and vegetable soil were lower than those made of pure compost product, but the volumetric weight increased. Results of principal component analysis showed that, the higher the compost product proportion in the compound substrate, the better the comprehensive performance of the matrix was. The compound substrate composed of compost products fermented for five months was better than that of compost products fermented for four months. The cucumber seedling growth showed the best trend by using the substrate composed of aerobic fermentation products and vegetable soil, with the volume ratio of 3:1, and the ratio of two components can be used as the recommended formula for cucumber plug seedling nursery. The compost products prepared by low ventilation compost can get the same effect on seedling growth as the compost products prepared by normal ventilation compost and commercial seedling substrates.

Key words: agricultural and forestry wastes; compost; ratio of the substrate; solanaceous vegetables

育苗基质是穴盘育苗幼苗生长的载体,泥炭(草炭)和蛭石混合基质是穴盘育苗的常用基质^[1],泥炭虽然是一种优质的穴盘育苗基质,但泥炭是一种不可再生资源,并且价格较高,因此寻找其替代材料一直是育苗基质研究的一个重要问题。椰壳纤维的水分特征和泥炭较为相似,被认为是一种较好的泥炭替代品^[2]。但木材纤维保水性较差,需要频繁浇水,操作繁杂^[3]。蘑菇渣是种植蘑菇后剩下的废料,含有碳氮磷钾等多种营养元素和微量元素,并且在栽培蘑菇的过程中经过了蘑菇的分解,结构较为稳定,呈现出类似土壤的团粒结构,是一种优良的代替泥炭的基质材料,但蘑菇渣盐分含量过高^[4-5],因此并不适合用于对盐分较为敏感的作物育苗,实际应用面不广。而堆肥产物不仅能提供大量所需养分,同时也能为作物根系生长发育提供合适的孔隙和物理结构,是一种综合性能较好的育苗基质^[6]。

随着城市化的推进,农林废弃物的产生量逐渐增加,相对于传统的焚烧和填埋,堆肥化处理不仅可满足可持续发展的要求,并且成本低、效果好,是目前农林废弃物资源化、无害化处理的重要途径^[7]。用农林废弃物代替泥炭作为育苗基质,不仅能缓解泥炭开采时造成的环境和生态破坏,也能降低育苗成本^[8]。吉向平等^[9]将园林废弃物堆肥与土壤混合作为育苗基质培育万寿菊得到了较好的成果。但是农林废弃物富含纤维素、半纤维素、木质素,传统好氧堆肥处理能耗高,碳氮损失严重,干物质损失高。适当降低通风量,可以在保证产品质量的基础上,降低能耗,减少人力成本,提高堆肥产物得率。但在低通风条件下制备的堆肥产物育苗基质的性能

尚缺乏细致的研究。本研究采用正常通气和低通气2种堆肥工艺对菇渣、醋糟、水稻秸秆、枯枝落叶等农林废弃物进行堆肥处理,并分别将发酵4个月、5个月的堆肥产物以不同比例与菜园土复配制备基质进行育苗试验,筛选出适合育苗的最佳基质配比,以期开发出一种以农林废弃物堆肥为主要原料的、在无需添加草炭以及无机养分的前提下制备蔬菜栽培基质的方法,为农林废弃物的资源化利用提供依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试黄瓜品种为露丰。通用型有机基质由淮安中禾农业有限公司生产,主要成分为腐熟秸秆、珍珠岩、泥炭、蛭石粉。

1.2 试验方法

1.2.1 农林废弃物好氧发酵 农林废弃物堆肥试验在句容贝思特有机活性肥料有限公司堆肥场进行,发酵时间为2021年3-9月。发酵原料为蘑菇渣、醋糟、水稻秸秆、枯枝落叶,总体积为260 m³。农林废弃物(堆肥原料)基本理化性质:有机碳含量61.40%,总氮含量1.97%,碳氮比(C/N)28.37,含水率53.28%,pH 7.2,电导率796 μS/cm。将农林废弃物粉碎至粒径为2~4 cm,充分混合,添加少许自来水,使得初始含水率为60%左右。用铲车将发酵原料平均分成2堆,建成梯形堆。每个梯形堆长13.5 m,底部宽4.5 m,堆高2.1 m。建堆后,在堆体表面覆上1层无纺布。设置2个通气量处理,分别为正常通气量[10 L/(m³·min)]和低通气量[2.5 L/(m³·min)],每天通气12 h。每2个月用铲车翻

堆 1 次。每天测定堆体的温度,发酵 4 个月和 5 个月时采集堆体上层、中层、下层的若干样品,混合均匀,用于堆体理化性质测定以及后续育苗试验。

1.2.2 堆肥产物的黄瓜育苗基质研发 堆肥产物育苗试验于 2021 年 8–10 月在江苏省农业科学院资源与环境研究所塑料大棚内进行。试验设 8 个基质配方处理(表 1),对照为通用型商品有机基质(CK1)和菜园土(CK2)。育苗试验分为 2 个批次,第 1 批次为发酵 4 个月堆肥育苗试验,时间为 2021 年 8 月 1 日–8 月 10 日。第 2 批次为发酵 5 个月堆肥育苗试验,时间为 2021 年 10 月 1 日–10 月 20 日,待黄瓜苗长至两叶一心时收获。由于 10 月份气温较低,黄瓜生长变慢,培养时间略长。育苗采用的穴盘规格为 72 孔(6×12)黑色聚乙烯穴盘,黄瓜种子经过催芽至露白后播种,每穴 1 粒,每个处理 18 穴,重复 3 次。整个试验过程中统一浇水,不施肥。

表 1 不同基质配方处理

Table 1 Different substrate matrix formula treatments

处理	基质配方
T1	正常通气量,100%堆肥产物
T2	正常通气量,75%堆肥产物+25%菜园土
T3	正常通气量,50%堆肥产物+50%菜园土
T4	正常通气量,25%堆肥产物+75%菜园土
T5	低通气量,100%堆肥产物
T6	低通气量,75%堆肥产物+25%菜园土
T7	低通气量,50%堆肥产物+50%菜园土
T8	低通气量,25%堆肥产物+75%菜园土
CK1	100%商品基质
CK2	100%菜园土

1.3 测定项目和方法

1.3.1 堆肥温度、理化性质的测定 堆肥温度的测定:在每个堆体中央埋置 1 个温度传感器,每 1 h 记录 1 次温度。堆肥孔隙度和容重的测定:取已知体积(V)和质量($W1$)的容器,加满风干样品后称质量($W2$),用滤网盖住容器口,在超纯水中浸泡 24 h 后取出,去掉滤网后称质量($W3$)^[10]。容重(g/cm^3)= $(W2-W1)/V$,孔隙度= $(W3-W2)/V \times 100\%$ 。样品与超纯水按照 1:10(质量:体积)的比例混合,在摇床上于 150 r/min 振荡 30 min 后静置,得到堆肥浸提液,用 pH 计和电导率仪测定浸提液的 pH 和电导率

(EC)值。样品与超纯水按照 1:50(质量:体积)的比例混合,得到的浸提液用 TOC 仪测定可溶性有机质(DOM)含量,有机质含量测定采用重铬酸钾容量法-水浴法。总氮(TN)含量采用凯氏定氮仪测定,总磷(TP)含量采用钼锑抗比色法测定,总钾(TK)含量采用火焰分光光度法测定。铵态氮、硝态氮、速效磷(AP)、速效钾(AK)含量测定方法参考《土壤农化分析》^[11]。种子发芽率=发芽种子数/种子总数 $\times 100\%$ 。发芽指数(GI)=(堆肥浸提液处理的种子发芽率 \times 种子根长)/(蒸馏水处理的种子发芽率 \times 种子根长) $\times 100\%$ 。腐殖质含量测定采用焦磷酸钠-氢氧化钠浸提法,用 TOC 仪测定碳含量,腐殖化指数=胡敏酸含量/富里酸含量。

1.3.2 幼苗生长指标的测定 在播种后第 3 d 开始统计不同基质配比处理的出苗率,在黄瓜生长到两叶一心时期取样。用直尺测量株高(从基质到生长点的长度),用游标卡尺测量茎粗(茎基部以上 1 cm 处)。离体选取 6 株幼苗测定地上部鲜质量、地上部干质量。

1.4 数据分析

采用 SPSS 20.0 软件进行数据处理和统计分析,利用 Origin 2018 软件绘图。同一批次育苗试验不同处理间的差异显著性采用单因素方差分析,采用最小显著性差异法(LSD)进行比较。选取不同复配处理的孔隙度、有机质、养分等 18 个理化指标与幼苗出苗率、总鲜质量、总干质量、生长函数(G 值)、壮苗指数等 5 个生长指标作为评价基质综合性能的主要影响因素,采用主成分分析法进行综合评价,筛选出最佳的黄瓜育苗基质配方。主成分分析用 SPSS 20.0 软件进行。

2 结果和分析

2.1 农林废弃物堆肥过程中温度的变化

由于堆肥原料种类多、体积大,正式建堆前,堆肥原料在预处理间存放了 3 d 左右,温度已经开始升高。建堆后,由于物料碳氮比、含水率调控适宜,微生物活动剧烈,低通风、正常通风的堆体堆肥第 1 d 的温度就分别达到 60.1 $^{\circ}C$ 、62.5 $^{\circ}C$,进入高温期(图 1),之后仅在翻堆时温度出现短暂的回落。翻堆之后温度迅速上升至 55 $^{\circ}C$ 以上。整体而言,堆肥过程中正常通风下堆体的温度略高于低通风处理。堆肥 5 个月内低通风、正常通风堆体最高温度分别

达 80.4 ℃、81.6 ℃,70 ℃ 以上的高温分别持续 42 d、83 d,符合高温堆肥卫生标准中关于温度的规定,即堆体温度在 55 ℃ 以上要维持 3 d,或 50 ℃ 以上维持 5~7 d。说明 2 种通风条件下,堆体中的病原微生物、杂草种子等无害化已满足技术指标要求。

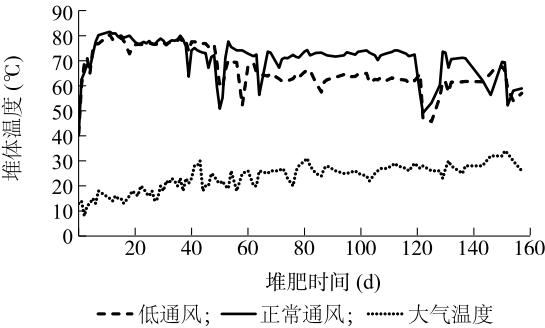


图 1 农林废弃物堆肥过程中温度的变化
Fig.1 Change of temperature during composting process of agricultural and forestry wastes

表 2 堆肥产物部分腐熟度指标
Table 2 Partial maturity indices of compost products

堆肥阶段	堆肥处理	碳氮比	硝铵比 ($\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{NO}_3^-\text{-N}$)	种子发芽指数 (%)	腐殖酸含量 (g/kg)	腐殖化指数 (HI)
发酵 4 个月	正常通气量	19.59	0.68	104.66	112.58	1.69
	低通气量	19.88	0.33	72.18	108.18	1.68
发酵 5 个月	正常通气量	15.37	15.48	133.65	112.21	1.67
	低通气量	16.71	9.72	161.39	106.18	1.63

2.2 不同堆肥产物配比黄瓜育苗基质的理化性质

育苗基质的物理性质包括孔隙度和容重。从表 3 可以看出,不同处理育苗基质的容重、孔隙度、电导率(EC)都有很大差别。可以看出菜园土所占比例越高,容重就越高,孔隙度和 EC 越低。除纯菜园土(CK2)外,其他处理和对照的容重均在适合的范围内。从孔隙度方面看,堆肥与菜园土的体积比≥ 3 : 1 的 T1、T2、T5、T6 处理育苗基质的孔隙度整体上大于 60%,拥有较好的透气性,较适宜植物生长,若体积比大于此值孔隙度会在适宜范围外。2 个育苗批次之间规律性一致。从 EC 看,混有菜园土的比例越高,EC 越低,但包括对照组在内所有处理的 EC 都在适宜范围内。

由表 3 还可以看出,本试验各配方基质的 pH 均高于 7.0,第 1 批次不同配方基质的 pH 为 7.2~8.5,第 2 批次 pH 为 7.6~8.6,菜园土 pH 最低,为 6.6。2 个批次试验中,100% 农林废弃物基质(T1、

堆肥固相 C/N、种子发芽指数(GI)、腐殖质含量是常用的堆肥腐熟度判定指标。从堆肥固相碳氮比来看,一般认为 C/N 从最初的 25~30 或更高下降至 15~20,表示堆肥腐熟^[12]。发酵 5 个月后堆体 C/N 下降至 15 左右。从种子发芽指数来看,堆肥时间越长,种子发芽指数越高,说明腐熟程度越高。发芽 4 个月后,2 个堆体种子发芽指数均≥ 70%,符合《有机肥料》(NY/T 525-2021)。堆体硝铵比是评价堆肥腐熟的另一个重要指标,一般认为硝铵比大于 2.0 表示堆肥腐熟。从表 2 还可以看出,堆肥发酵 5 个月时,正常通风与低通风处理堆肥均达到腐熟。本研究中,农林废弃物发酵 4~5 个月时,腐殖化指数为 1.63~1.69。从堆体的碳氮比、种子发芽指数、腐殖化指数来看,发酵 4 个月堆肥产物达到了基本腐熟的条件,发酵 5 个月堆肥产物腐熟程度更高,正常通气堆肥处理的腐熟度高于低通气量堆肥处理的腐熟度。

T5 处理)的有机质(OM)、可溶性有机质(DOM)、总氮(TN)含量均显著高于商品基质(CK1),且随着农林废弃物堆肥比例的增大,复配基质有机质、可溶性有机质、总氮、总磷、速效磷、速效钾含量也增加。2 个批次中 T5 处理铵态氮含量都显著高于其他处理,第 1 批次中同一堆肥产物不同添加比例(I-T5 处理除外)之间铵态氮含量差异不显著,第 2 批次中 II-CK1 铵态氮含量最高。2 个批次试验中,硝态氮含量均以 CK1 最高,并显著高于其他处理。第 1 批次中对照(I-CK1)速效磷含量显著高于其他处理,第 2 批次 II-T1 处理速效磷含量最高,但与 II-T5 处理差异不显著,II-T1、II-T5 速效磷含量均显著高于 II-CK1,II-CK2 速效磷含量最低。2 个批次中,速效钾含量均以 100% 农林废弃物处理(T1、T5)较高,并显著高于 CK1,2 个批次中 CK2 速效钾含量都显著低于其他处理。整体上看,随着堆肥添加比例的降低,复配基质中交换性 Ca、交换性 Mg、交换性 Fe

含量降低。

对单纯的堆肥产物处理(T1、T5 处理)而言,同一种发酵工艺的不同发酵时间之间相比,发酵 5 个月堆肥产物的有机质含量比发酵 4 个月时的有机质含量平均下降了 6.1%,可溶性有机质含量下降了 48.5%,铵态氮含量下降了 57%,硝态氮含量提高了 9.2 倍。说明随着堆肥时间的增加,堆体中不稳定的易降解有机质逐步被微生物利用,总有机碳含量降低;同时随着硝化作用的进行,堆体中的铵态氮逐步转化为硝态氮,堆体腐熟程度增加。伴随着发酵的进行和有机质含量的下降,与发酵 4 个月的堆肥产物相比,发酵 5 个月的堆肥产物中 TN、TP、TK 含量平均分别提高了 28.1%、55.5%、13.2%。

对于单纯的堆肥产物处理(T1、T5 处理)而言,同一发酵时间、不同发酵工艺之间相比,低通气量堆肥产物的可溶性有机质含量均高于正常通气量堆肥处理,其中发酵 5 个月有机质含量比正常通气处理的高 8.8%,差异达显著水平;可溶性有机质含量比正常通气量堆肥处理的高 39.4%。发酵 5 个月后,低通气量堆肥产物中的铵态氮、硝氮、总钾含量分别比正常通气量堆肥产物低 68.7%、8.2%、38.3%,但总氮、总磷含量分别比正常通气量堆肥产物低 6.7%、15.6%,差异达显著水平,说明正常通气量堆肥由于发酵温度较高,有机质损耗多,“浓缩”效应更加显著,因而正常通气量堆肥产物中的 TN、TP 含量更高。

表 3 不同配比处理的黄瓜育苗基质理化性质

Table 3 Physical and chemical properties of different formulas of cultivation substrate for cucumber

处理	容重 (g/cm ³)	孔隙度 (%)	电导率 (μS/cm)	pH	有机质 含量 (%)	可溶性 有机质 含量 (g/kg)	总氮 含量 (g/kg)	铵态氮 含量 (mg/kg)	硝态氮 含量 (g/kg)	总磷 含量 (g/kg)	速效磷 含量 (mg/kg)	总钾 含量 (%)	速效钾 含量 (mg/kg)	交换性 Ca 含量 (mg/kg)	交换性 Mg 含量 (mg/kg)	交换性 Fe 含量 (mg/kg)
I-CK1	0.28e	65.6a	1 783a	7.6c	30.22b	4.79c	13.40c	70.0b	0.95a	9.42a	878a	1.69b	7 623c	702.50ab	168.80a	0.97b
I-CK2	0.81a	37.0f	60j	6.6g	3.15g	0.70j	0.10h	30.0b	0.07b	1.03i	100f	3.02a	430i	216.50d	60.30c	0.35d
I-T1	0.22f	65.5a	1 153c	8.5a	52.30a	16.65b	20.13a	10.0c	0.04bcd	8.65b	750b	1.12cd	9 223a	808.70a	189.40a	1.23a
I-T2	0.46d	61.0b	690d	7.6c	10.17d	2.59h	6.41d	20.0c	0.04bcd	5.06d	231d	1.01d	2 000e	319.80d	65.50c	0.50cd
I-T3	0.59c	54.6c	406f	7.3e	7.16e	1.81f	2.99f	10.0c	0.02d	2.27f	203de	0.94d	1 267f	249.30d	49.90c	0.44cd
I-T4	0.74b	48.1e	234i	7.2f	3.44g	0.88h	1.64g	10.0c	0.03cd	1.94g	125ef	0.96d	563h	223.20d	46.20c	0.38d
I-T5	0.22f	66.5a	1 315b	8.4a	52.18a	16.81a	17.93b	190.0a	0.06bc	5.95c	746b	1.68b	8 217b	532.60bc	119.40b	1.03b
I-T6	0.41d	63.0b	651e	7.8b	17.55c	4.23d	4.45e	10.0c	0.02d	2.83e	325c	1.43bc	3 393d	380.10cd	80.30bc	0.57c
I-T7	0.59c	56.4c	368g	7.5c	5.11f	1.40g	2.58f	10.0c	0.02d	2.29f	146ef	1.26cd	1 120g	231.80d	51.80c	0.36d
I-T8	0.74b	50.6d	336h	7.5d	3.66g	0.78i	1.25g	10.0c	0.02d	1.57h	112f	1.40bc	510h	207.10d	45.50c	0.36d
II-CK1	0.28e	65.6a	1 783a	7.6f	30.22c	4.79c	13.40c	66.0a	0.95a	9.42b	878b	1.69cd	7 623c	702.52b	168.80b	0.97a
II-CK2	0.81a	37.0f	60i	6.6g	3.15h	0.70j	0.10i	17.0d	0.07h	1.03f	100f	3.02a	403i	216.58d	60.30c	0.35c
II-T1	0.26e	66.1a	1 107c	8.6a	47.27b	7.20b	25.23a	32.0c	0.49c	12.31a	1 138a	1.33e	8 073b	751.13b	173.79a	0.95a
II-T2	0.44d	59.6b	351e	7.8d	15.94e	2.08e	8.50d	6.3f	0.15ef	6.28cd	477c	2.05b	3 873d	311.16c	72.92c	0.38c
II-T3	0.62c	48.2cd	251f	7.6e	5.93g	1.26f	4.52f	7.2f	0.11g	6.27cd	297d	1.83bc	1 677g	273.02c	67.64c	0.34c
II-T4	0.76b	37.2f	131h	7.6f	3.97h	1.08h	2.89h	5.6f	0.32d	4.46e	185ef	1.82bc	900h	291.17c	66.52c	0.41bc
II-T5	0.23f	67.2a	1 239b	8.4b	51.43a	10.04a	23.54b	54.0b	0.53b	10.39b	1 077a	1.84bc	8 573a	851.60a	168.05b	0.88a
II-T6	0.44d	60.5b	589d	8.0c	17.78d	2.78d	9.20d	14.0d	0.17e	7.28c	524c	1.68cd	3 573e	353.06c	70.98c	0.45b
II-T7	0.61c	46.2d	257f	7.7e	8.36f	1.14gh	5.56e	5.4f	0.13f	5.90d	301d	1.59cd	1 897f	331.42c	73.81c	0.50b
II-T8	0.76b	45.0e	177g	7.6f	5.41g	0.87i	3.72g	10.0e	0.31d	1.57h	200e	1.47de	923h	244.47c	61.17c	0.41bc

各处理及对照见表 1, I、II 分别表示第 1 批、第 2 批育苗试验。同一批次内,不同处理间标有不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.3 不同基质比对黄瓜种子出苗和幼苗生长指标的影响

由表 4 可知,播种 6 d 后,发酵 4 个月产物复配基质黄瓜出苗率均在 80% 以上,且整体上看基质比例越高,出苗率越高。堆肥产物占比 50% 处理的出

苗率均较菜园土高。菜园土处理出苗率最低,可能是由于土壤容重大,孔隙度低,透气性差。从发酵批次看,发酵 5 个月复配基质黄瓜出苗率略低于发酵 4 个月复配基质,这可能与育苗期间连续阴雨、气温较低有关。

株高和茎粗是植物长势强弱的重要指标,尤其是茎粗在一定程度上反映了幼苗的健壮程度。从表4可以看出,2个批次育苗试验中,菜园土 CK2 对照的幼苗茎粗最小,T1 和 T6 处理的茎粗较大,与 CK1 无显著差异。第2批次中 CK1 的茎粗最大,Ⅱ-T4 处理的茎粗最小,与除Ⅱ-CK2、Ⅱ-T2、Ⅱ-T8 处理外的其他处理间差异显著。第1批次中株高 I-T3 以处理最高,与除 I-T6 处理外的其他处理有显著性差异;CK2 最低,与除 CK1、I-T5 处理外的其他处理差异显著。第2批次中Ⅱ-T5 处理的株高最高,Ⅱ-T4 处理最低。

从生物量来看,第1批次中 I-T1 处理的鲜质量最高,与除 I-T4、I-CK1 外的其他处理差异显著, I-T8 处理鲜质量最低。第2批次中Ⅱ-T6 处理鲜质量最高,但与Ⅱ-CK1、Ⅱ-CK2、Ⅱ-T1、Ⅱ-T2、Ⅱ-T3、Ⅱ-T5、Ⅱ-T7 处理差异不显著,Ⅱ-T4 处理鲜质量最低。幼苗总干质量第1批次中 I-T5 处理最高,比 I-CK2 高 40.9%,并与除 I-T1 处理外的其他处理有显著性差异, I-T8 处理最低。第2批次中Ⅱ-T6 处理总干质量最高,比Ⅱ-CK2 高出

46.3%,并显著高于其他处理,Ⅱ-T4 处理总干质量最低,并且与除Ⅱ-CK2 外的其他处理差异显著。地上部干质量在第1批次中 I-T1 处理最高,与除 I-T5 处理外的其他处理差异显著; I-T3 处理最低,与除 I-T8 处理外的其他处理差异显著。第2批次中地上部干质量 T6 处理显著高于其他处理,Ⅱ-T4 处理最低。地下部干质量第1、2批次中分别以 I-T5、Ⅱ-T1 处理最高, I-T8、Ⅱ-CK1 最低,并与其他复配处理差异显著。可见,从生物量看,菜园土添加比例超过 50%不利于黄瓜幼苗生长(表4)。

生长函数(G 值)和壮苗指数是反映幼苗质量的2个重要指标。由表4还可以看出,第1批次中 G 值 I-T5 处理最高,显著高于除 I-T1 处理外的其他处理; I-T3、I-T8 处理最低,显著低于其他处理。第2批次中Ⅱ-T6 处理最高,显著高于除Ⅱ-T1、Ⅱ-T2 处理外的其他处理;Ⅱ-T4 处理最低,显著低于其他复配处理。壮苗指数第1批次中 I-T5 处理显著高于其他处理, I-T8 处理显著低于其他处理。第2批次中Ⅱ-T2 处理的壮苗指数最高,显著高于除Ⅱ-T1、Ⅱ-T6 处理外的其他处理,Ⅱ-CK2 壮苗指数最低。

表4 不同基质配方对黄瓜幼苗生长指标的影响

Table 4 Effects of different substrate formulations on growth indices of cucumber seedlings

处理	出苗率 (%)	总鲜质量 (g, 1株)	茎粗 (cm)	株高 (cm)	总干质量 (g)	地上部干质量 (g)	地下部干质量 (g)	生长函数 (G 值)	壮苗指数
I-CK1	88.89c	1.85ab	2.79a	7.62d	0.144b	0.117b	0.027c	0.014 0b	0.086d
I-CK2	83.33d	1.52cd	2.07e	7.34d	0.144b	0.115b	0.029c	0.014 0b	0.077e
I-T1	100.00a	1.97a	2.82a	9.91bc	0.195a	0.158a	0.037b	0.019 0a	0.100c
I-T2	88.89c	1.75abc	2.48bcd	11.02b	0.154b	0.120b	0.034b	0.015 0b	0.079e
I-T3	86.11cd	1.66bcd	2.70ab	12.65a	0.123c	0.098c	0.025d	0.012 0c	0.058g
I-T4	88.89c	1.84ab	2.87a	10.40bc	0.162b	0.117b	0.045a	0.016 0b	0.110b
I-T5	94.44b	1.62bcd	2.39cd	7.89d	0.203a	0.156a	0.047a	0.020 0a	0.120a
I-T6	86.11cd	1.65bcd	2.60abc	11.31ab	0.141b	0.116b	0.025d	0.014 0b	0.063f
I-T7	91.67bc	1.49cd	2.76ab	9.35c	0.141b	0.112b	0.029b	0.014 0b	0.078e
I-T8	83.33d	1.37d	2.29de	10.13bc	0.120c	0.099c	0.021e	0.012 0c	0.053h
Ⅱ-CK1	68.52c	2.24a	3.15a	6.47ab	0.135d	0.109bc	0.026c	0.006 7b	0.108cde
Ⅱ-CK2	57.41d	1.76abc	2.69cd	5.26bc	0.123e	0.094c	0.029c	0.006 1c	0.105e
Ⅱ-T1	92.59a	2.26a	3.09ab	7.58a	0.163b	0.111b	0.053a	0.008 2a	0.146ab
Ⅱ-T2	90.74a	1.99ab	2.74bcd	6.38ab	0.165b	0.112b	0.053a	0.008 3a	0.153a
Ⅱ-T3	70.37c	1.79abc	2.78abc	5.20bc	0.134d	0.092c	0.042b	0.006 7b	0.133bc
Ⅱ-T4	55.56d	1.24c	2.38d	3.94c	0.109ef	0.080d	0.029c	0.005 4c	0.106de
Ⅱ-T5	88.89b	2.12ab	2.88abc	7.80a	0.156c	0.110b	0.046ab	0.007 8b	0.124c
Ⅱ-T6	81.48b	2.30a	3.14a	6.59ab	0.180a	0.143a	0.037b	0.009 0a	0.138abc
Ⅱ-T7	66.67c	1.79abc	2.96abc	5.73b	0.147cd	0.112b	0.035bc	0.007 3b	0.125cd
Ⅱ-T8	67.00c	1.58bc	2.71bcd	5.56b	0.137d	0.098c	0.040b	0.006 9b	0.128bc

各处理及对照见表1, I、Ⅱ分别表示第1批、第2批次育苗试验。同一批次内,不同处理间标有不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。壮苗指数=(茎粗/株高)×全株干质量,生长函数(G 值)=全株干质量/育苗天数。

2.4 基质特性与黄瓜生长指标的关系

从表 5 可以看出,黄瓜茎粗与基质孔隙度、有机质含量以及除铵态氮含量以外的养分含量呈正相关,其中与基质硝态氮和速效磷含量呈显著正相关;鲜质量与基质除容重外的所有理化指标呈正相关,其中与总氮、速效钾、速效磷、交换性 Ca、交换性 Mg 含量呈极显著正相关关系,与孔隙度、电导率、有机质含量、硝态氮含量、交换性 Fe 含量呈显著正相关关系。干质量与孔隙度、pH、有机质含量、可溶性有机质含量、总氮含量、铵态氮含量、速效钾含量呈极显著正相关关系,与电导率、速效磷含量、交换性钙含量、交换性镁含量、交换性铁含量呈显著正相关关系,与容重呈极显著负相关关系,壮苗指数与基质 pH 呈显著正相关关系。从黄瓜的生长状况来看,其生长指标与基质孔隙度、有机质含量、可溶性有机质含量、总氮含量以及速效养分含量的相关性较好。

表 5 基质理化性质与黄瓜幼苗生长指标之间的相关性

Table 5 Correlation between physical and chemical properties of substrate and growth indices of cucumber seedlings

理化指标	茎粗	鲜质量	干质量	壮苗指数
孔隙度	0.209	0.484 *	0.604 **	0.121
容重	-0.343	-0.634 **	-0.664 **	-0.273
pH	0.194	0.405	0.604 **	0.513 *
电导率	0.329	0.569 *	0.494 *	0.079
有机质含量	0.269	0.544 *	0.695 **	0.345
可溶性有机质含量	0.013	0.289	0.747 **	0.194
总氮含量	0.391	0.632 **	0.614 **	0.458
铵态氮含量	-0.131	0.109	0.611 **	0.144
硝态氮含量	0.517 *	0.506 *	-0.101	0.265
速效钾含量	0.327	0.600 **	0.660 **	0.356
速效磷含量	0.478 *	0.699 **	0.530 *	0.458
交换性钙含量	0.421	0.623 **	0.496 *	0.281
交换性镁含量	0.432	0.616 **	0.490 *	0.287
交换性铁含量	0.260	0.471 *	0.610 *	0.167

* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关,** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

2.5 不同黄瓜育苗基质配方综合评价

为进一步分析 2 个试验批次中 8 个复配基质配方的优劣,采用主成分分析法计算不同基质的综合得分,并据此对各个配方进行排序。根据主成分分析结果,从 22 个成分中选取 5 个主成分,5 个主成分的方差累积贡献率为 90.14%(>85.00%),表明

这 5 个主成分基本能涵盖评价指标的所有信息,可以较好地反映基质的综合状况。根据主成分综合模型计算各个基质配方的综合主成分值,并对其进行排序,结果如表 6 所示。基质得分越高,排名越前,表明该基质各项综合性能表现越好。本研究 2 个批次试验不同配方的优劣排序为 II-T1>II-T5>I-T1>I-T5>CK1>II-T6>II-T2>II-T7>II-T3>I-T6>II-T8>II-T4>I-T2>I-T7>CK2>I-T4>I-T3>I-T8。说明复配基质中堆肥添加比例越高,基质综合性能越好。100%堆肥产物复配基质性能优于商品基质,发酵 5 个月的堆肥产物复配基质优于发酵 4 个月的。在不添加菜园土等配料的情况下,正常通气量堆肥的产物复配基质略好于低通气量堆肥复配基质,但添加菜园土后,低通气量堆肥产物复配基质整体要优于正常通气量堆肥基质。

3 讨论

3.1 不同通气量对农林废弃物堆肥腐熟的影响

低通气量堆肥与正常通气量堆肥的温度在前 50 d 差异不大,在 50 d 之后开始逐渐低于正常通气量堆肥,与其他学者的研究结果一致^[13-14],但可能因为堆肥原料全采用植物类园林废弃物,纤维素、木质素含量较高,难以降解,所以高温阶段持续时间较长。一般对于初始 C/N \geq 25 的堆肥来说,C/N 下降到 20 以下时便可以认为已经腐熟^[15],从本研究结果可以看出,2 种通气量发酵 4 个月和 5 个月的堆肥均已达到腐熟标准。从 C/N 方面分析,正常通气量的堆肥在发酵 4 个月和 5 个月均拥有相对较低的 C/N,说明正常通气量的堆肥腐熟程度更好。由于低通气量堆肥随空气挥发的氨气较少,因此铵态氮含量较高,并且含水率较低,随渗滤液流失的硝态氮较少,因此硝态氮含量较高。但由于低通气量堆肥的总有机碳(TOC)含量更高,有机质降解较少,因此由于有机质含量较高导致总氮含量相对较低。种子发芽率也是能够评价堆肥腐熟程度的重要指标之一^[16],第 1 批次的种子发芽指数均超过 70%,而第 2 批次的种子发芽指数均超过 100%,说明 2 个批次堆肥均已达到腐熟指标,第 2 批次对植物的毒害作用更小,并且对植物生长的促进作用大于毒害作用。随着腐殖化的推进,胡敏酸含量会因为生物合成逐渐增加,而富里酸含量会因为矿化和腐殖化 2 个过程的平衡产生波动^[17],因此很多学者用胡敏酸和富

里酸含量的比值(腐殖化指数, HA/FA)来表示堆肥的腐熟程度,一般认为评价堆肥腐熟度的腐殖化指数最小值是 1.4^[18]。2 个批次堆肥的腐殖酸含量和腐殖化指数没有太大差异,正常通气量堆肥腐殖酸含量更高,腐殖化指数则表现为正常通气量堆肥略微高于低通气量堆肥,但都已经达到了腐熟。

表 6 主成分分析得出的各处理综合得分

Table 6 Comprehensive score of each treatment obtained by principal component analysis

处理	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	综合得分	综合得分排名
CK1	1.846	0.086	0.389	-0.355	1.965	5
CK2	-2.022	-0.309	0.409	0.249	-1.673	15
I -T1	2.791	-0.454	-0.144	0.030	2.223	3
I -T2	-0.402	-0.318	-0.176	-0.131	-1.027	13
I -T3	-1.224	-0.214	-0.134	-0.217	-1.790	17
I -T4	-1.129	-0.175	-0.366	-0.020	-1.690	16
I -T5	2.344	-0.781	0.146	0.350	2.060	4
I -T6	-0.260	-0.326	-0.055	-0.137	-0.777	10
I -T7	-1.077	-0.270	-0.184	-0.110	-1.641	14
I -T8	-1.694	-0.341	0.090	-0.143	-2.089	18
II -T1	2.667	0.524	-0.077	-0.071	3.043	1
II -T2	0.007	0.302	-0.134	0.209	0.384	7
II -T3	-1.078	0.448	0.030	0.147	-0.453	9
II -T4	-1.620	0.303	0.371	-0.026	-0.972	12
II -T5	2.554	0.358	0.174	-0.045	3.041	2
II -T6	0.401	0.432	-0.321	0.146	0.657	6
II -T7	-0.763	0.427	-0.064	0.080	-0.321	8
II -T8	-1.341	0.308	0.047	0.047	-0.940	11

各处理及对照见表 2, I、II 分别表示第 1 批、第 2 批次育苗试验。

3.2 基质的理化性质对黄瓜幼苗的影响

基质的理化性质会影响透气性、排水性、养分含量等多种指标。其中影响较大的指标便是基质的容重、孔隙度、pH 值、电导率和养分含量。魏敏芝等^[19]指出,影响出苗率的主要因素是基质的物理性质,出苗率与孔隙度呈强相关关系。本研究结果表明,不管是正常通气量还是低通气量的堆肥,其孔隙度都远大于菜园土,容重远小于菜园土。所以在各个处理中混入的堆肥越多,孔隙度越大、容重越小,透气性越好,有利于幼苗生长。电导率能够反映出样品中含有的可溶性盐分,苏淑钗^[20]指出,育苗基质适合的容重应该为 0.1~0.8 g/cm³。高丽红^[21]指出,育苗基质的孔隙度最好保持在 60%~90%,最有利于作物生长。程斐等^[22]指出,植物生长的安全电导率应≤2.6 mS/cm。因为各处理的电导率都在适宜范围内,所以电导率对本试验的影响不大。

植物幼苗对 pH 很敏感,一般来说育苗基质的适宜 pH 应为 5.8~7.0^[23]。本试验中除菜园土以外所有处理包括商品基质的 pH 均超出此范围,同一种堆肥中加入菜园土体积分数越大,pH 越低。同时各种养分的含量也对幼苗的生长有着重要影响^[24],其中速效 N、速效 P、速效 K 被认为有较大的影响^[25]。N 是植物生长的必要元素,与植物生长、壮苗程度、光合作用息息相关^[26]。P 能提高植物的适应力,对提高幼苗的抗性有着促进作用。K 能够平衡其他营养元素,增强光合作用,促进碳水化合物合成。在植物生长的前期对 N 的需求量较大^[27],基质中 N、P 含量高则有利于对 N 的吸收和利用,有利于幼苗的茁壮成长^[28]。堆肥中 TN、TP、铵态 N、硝态 N、速效 P、速效 K 的含量都显著高于菜园土对照,处理中堆肥所占比例越高,这几种养分的含量也越高。此外,可溶性有机质(DOM)也对植物生物量

的积累有着显著的促进作用^[29],而 DOM 随着堆肥时间的延长逐渐被微生物消耗,使其含量降低,但在低通气量下,堆肥微生物对 DOM 的利用能力弱于正常通气量,说明低通气量有利于 DOM 的保留,相关性分析结果也表明,DOM 的含量与植物干物质积累量有着极显著的正相关关系。

能表示植物生长发育的指标有很多,如出苗率、茎粗、苗长、地上部质量、地下部质量、根冠比等^[30-33],但能最全面综合表示幼苗生长的指标还是 G 值和壮苗指数。本研究结果表明,黄瓜幼苗的出苗率与基质孔隙度有着很大相关性,孔隙度最低的菜园土对照的出苗率也较低。在壮苗指数和 G 值方面,Ⅰ-T1、Ⅰ-T5、Ⅱ-T1、Ⅱ-T2、Ⅱ-T6 处理的 G 值较高,Ⅰ-T5、Ⅱ-T2 处理壮苗指数较高并且明显高于其他处理和 2 个对照组。

综上所述,所用堆肥比例越高,出苗率越高,出苗整齐度越高。全部采用正常通气量堆肥、正常通气量堆肥产物与菜园土按 3:1 体积比混合、低通气量堆肥产物与菜园土按 3:1 体积比混合处理的黄瓜幼苗能积累较多的干物质,幼苗也较为强壮。其原因可能是堆肥虽然养分充足但 pH 较高,与菜园土混合后有效降低了其 pH,而堆肥与菜园土 3:1 的比例混合在养分与 pH 间取得了较好的平衡。100% 正常通气量堆肥产物基质综合性能略优于 100% 低通气量堆肥产物基质,且两者均优于商品通用基质。复配菜园土基质中低通气量堆肥产物表现更佳。实际基质制备过程中为协调好基质 pH、养分和孔隙度,往往复配菜园土、珍珠岩、蛭石等辅料,低通气量堆肥产物制备过程中能耗低,有机质损耗少,制备成本更低,复配基质实际应用潜力更大。

4 结 论

本试验结果表明,正常通气量堆肥发酵温度更高,有机质降解更多,因而发酵 5 个月低通气量堆肥有机质、可溶性有机质含量分别比正常通气堆肥高出 8.8%、39.4%,但低通气量堆肥总氮、总磷含量分别比正常通气量堆肥低 6.7%、15.6%。2 种堆肥工艺下,发酵 5 个月的堆肥产物腐熟度比发酵 4 个月的更高。

相关性分析结果表明,黄瓜幼苗生长指标与基质孔隙度、容重、有机质含量、可溶性有机质含量、总氮含量、铵态氮含量、速效磷含量、速效钾含量含量

相关性较好。复配基质中堆肥添加比例越高,基质综合性能越好。发酵 5 个月的堆肥产物复配基质优于发酵 4 个月的堆肥产物复配基质。

参考文献:

- [1] 郭世荣. 无土栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [2] PETERSEN F H, REED D W, PETERSEN F, et al. Water media, and nutrition for greenhouse crops[J]. A Growers Guide to Water Media & Nutrition for Greenhouse Crops, 1996, 27(23): 22-26.
- [3] BOHNE, H. Growth of nursery crops in peat-reduced and in peat-free substrates[J]. Acta Horticulturae, 2004, 644: 103-106.
- [4] GONANI Z, RIAHI H, SHARIFI K. Impact of using leached spent mushroom compost as a partial growing media for horticultural plants[J]. Journal of Plant Nutrition, 2011, 34(3): 337-344.
- [5] 时连辉, 张志国, 刘登民, 等. 菇渣和泥炭基质理化特性比较及其调节[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 5.
- [6] RAVIV M. The use of compost in growing media as suppressive agent against soil borne diseases[J]. Acta Horticulture, 2008, 799(2): 39-49.
- [7] 徐 智, 汤 利, 毛昆明, 等. 牛粪对西番莲果渣高温堆肥腐熟进程的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2): 507-511.
- [8] 田 赞. 园林废弃物堆肥化处理及其产品的应用研究[D]. 北京: 北京林业大学.
- [9] 吉向平, 孙乐帆, 邓新兵, 等. 应用堆肥产品调配育苗基质的性状及花卉育苗试验[J]. 海南热带海洋学院学报, 2017, 24(2): 85-90.
- [10] 连兆煌. 无土栽培原理与技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] INBAR Y, HADAR Y, CHEN Y. Recycling of cattle manure: the composting process and characterization of maturity[J]. Journal of Environmental Quality, 1993, 22(4): 31-46.
- [13] 沈玉君, 李国学, 任丽梅, 等. 不同通风速率对堆肥腐熟度和含氮气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(9): 1814-1819.
- [14] 张红玉. 通风量对厨余垃圾堆肥腐熟度和氨气排放的影响[J]. 环境工程, 2013(S1): 483-486.
- [15] HIRAI M F, CHANYASAK V, KUBOTA H. Standard measurement for compost maturity[J]. Biocycle, 1983, 24(6): 54-56.
- [16] ZUCCONI F, FORTE M, MONACO A, et al. Biological evaluation of compost maturity[J]. Biocycle, 1982, 22(4): 27-29.
- [17] ZHAO X L, 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.
- [18] HUE N V, LIU J. Predicting compost stability[J]. Compost Science & Utilization, 1995, 3(2): 8-15.
- [19] 魏敏芝, 张 凯, 高丽红, 等. 不同育苗基质对黄瓜穴盘苗质量

- 的影响[J]. 华中农业大学学报, 2004, 23(z2): 245-249.
- [20] 苏淑钗. 庭院果树无土栽培[M]. 北京: 海洋出版社, 2000.
- [21] 高丽红. 无土栽培固体基质的种类与理化特性[J]. 农业工程技术: 温室园艺, 2004(2): 28-30.
- [22] 程 斐, 孙朝晖, 赵玉国, 等. 芦苇末有机栽培基质的基本理化性能分析[J]. 南京农业大学学报, 2001, 24(3): 19-22.
- [23] 岳天敬. 茄子穴盘育苗基质及其育苗效果的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2005.
- [24] 佟小刚, 蒋卫杰, 尹明安, 等. 不同基质和施肥类型对无土栽培生菜生长发育的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(10): 245-247.
- [25] 刘艳鹏, 蒋卫杰, 余宏军. 无土栽培中应用有机肥料的研究进展[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2007, 28(3): 260-263.
- [26] 任 杰, 崔世茂, 刘杰才, 等. 不同基质配比对黄瓜穴盘育苗质量的影响[J]. 华北农学报, 2013, 28(2): 128-132.
- [27] 孙军利. NPK 肥对有机生态型无土栽培黄瓜生长发育的影响[D]. 郑州: 河南农业大学, 2003.
- [28] 王朝辉. 不同氮肥用量对蔬菜硝态氮累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1998, 4(1): 22-28.
- [29] GONG B, ZHONG X, XIAN C, et al. Manipulation of composting oxygen supply to facilitate dissolved organic matter (DOM) accumulation which can enhance maize growth [J]. Chemosphere, 2021, 273(6): 129729.1-129729.10.
- [30] 邓家欣, 韦继光, 於 虹, 等. 不同施肥处理对高丛越橘幼苗生长和生理指标及土壤理化性质的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(2): 28-34.
- [31] 孙操稳, 仲文雯, 泖香香, 等. 青钱柳幼林地上部分生物量生长模型研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(1): 138-144.
- [32] 连裕雯, 朱成立, 黄明逸, 等. 不同盐渍土中生物炭对玉米生理生长的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(4): 426-432.
- [33] 张迎颖, 宋雪飞, 徐佳兵, 等. 不同氮质量浓度对凤眼蓝生长和生理指标尤其是氮代谢关键酶活性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2021, 30(6): 39-46.

(责任编辑: 张震林)