

厨余垃圾厌氧发酵沼渣制备栽培基质研究

Study on the Preparation of Culture Substrate from Food Waste Anaerobic Fermentation Biogas Residue

马 想

MA Xiang

(上海市园林科学规划研究院, 城市困难立地生态园林国家林业和草原局重点实验室, 国家林业和草原局城市困难立地绿化造林国家创新联盟, 上海城市困难立地绿化工程技术研究中心, 上海 200232)

(Shanghai Academy of Landscape Architecture Science and Planning, Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecological Landscaping of Challenging Urban Sites, National Innovation Alliance of National Forestry and Grassland Administration on Afforestation and Landscaping of Challenging Urban Sites, Shanghai Engineering Research Center of Landscaping on Challenging Urban Sites, Shanghai, China, 200232)

文章编号: 1000-0283(2023)05-0127-06

DOI: 10. 12193 /j. laing. 2023. 05. 0127. 017

中图分类号: TU986

文献标志码: A

收稿日期: 2022-09-22

修回日期: 2022-10-27

摘 要

目前国内厨余垃圾的主要处理方式为厌氧发酵, 发酵后有机化合物所含有的大部分营养元素残留于其发酵沼渣中, 厨余垃圾厌氧发酵沼渣(以下简称厨余沼渣)脱水干燥后养分含量高、物理性质良好, 可用于制备植物栽培基质, 以增强其资源再利用价值。将厨余沼渣与草炭按照不同的比例进行混合, 待栽培基质充分混匀、稳定后, 对栽培基质的发芽指数、养分含量、pH值和EC值进行测定, 基于发芽指数确定厨余沼渣最优添加比例。结果表明, 厨余沼渣添加对发芽指数有明显的低剂量刺激效应, 根据Log-logistic模型预测了厨余沼渣的毒害阈值 EC_{20} 为26.7%。厨余沼渣添加能有效提高栽培基质的全氮、全磷和全钾含量, 在厨余沼渣添加比例为26.7%时, 栽培基质全氮增量为1.67%、全磷增量为3.92%、全钾增量为0.81%。厨余沼渣添加会显著提高栽培基质pH值和EC值, 表现为低配比即迅速提高, 之后提升速率变缓。当厨余沼渣添加比例为26.7%时, 栽培基质pH值增量为1.83、EC值增量为3.46 mS/cm。本研究分析了厨余沼渣作为栽培基质原料的适用性, 为厨余沼渣的直接利用提供了合理的研发思路。

关键词

厨余垃圾; 沼渣; 发芽指数; 毒性阈值; 预测模型

Abstract

At present, the main treatment method for food waste in China is anaerobic fermentation. After fermentation, most of the nutrient elements contained in the organic compounds remain in the fermented biogas residue. After dehydration and drying, the anaerobic fermentation biogas residue of food waste (biogas residue) is rich in nutrients and has good physical properties, which can be used to prepare culture substrate to enhance its resource reuse value. Mix biogas residue and peat according to different proportions. After the cultivation substrate is fully mixed and stabilized, determine the germination index, nutrient content, pH and EC of the cultivation substrate. It is proposed to determine the optimal addition proportion of biogas residue based on the germination index. The results showed that the addition of biogas residue had an obvious hormesis effect on the germination index. According to the Log logistic model, the toxicity threshold EC_{20} of biogas residue was predicted to be 26.7%. The addition of biogas residue can effectively increase the total nitrogen, total phosphorus and total potassium content of the cultivation substrate. When the proportion of biogas residue added is 26.7%, the total nitrogen increment of the cultivation substrate is 1.67%, the total phosphorus increment is 3.92%, and the total potassium increment is 0.81%. The addition of biogas residue can significantly increase the pH and EC of the cultivation substrate, which is shown by the rapid increase in low proportion, and then the increase rate becomes slower. When the proportion of biogas residue was 26.7%, the pH increment of the cultivation substrate was 1.83, and the EC increment was 3.46 mS/cm. This study analyzed the applicability of biogas residue as a raw material for cultivation and provided a reasonable research and development idea for the direct utilization of biogas residue.

Keywords

restaurant garbage; biogas residue; germination index; toxicity thresholds; predicted models

马 想

1992年生/男/湖北武汉人/硕士/助理工

程师/研究方向为城市土壤培肥与改良

基金项目:

上海市科委科技创新行动计划科技支撑碳达峰碳中和专项“沼渣低碳高值化产品标准研制、安全性评价与应用示范”(编号: 21DZ1209403);

上海市绿化和市容管理局科学技术项目“湿垃圾处置固态残余物资源化利用途径研究”(编号: G200202)

“垃圾围城”已成为社会经济高质量发展的制约因素，实施垃圾分类、对垃圾资源进行资源化利用是解决当前环境压力的有力措施^[1]。国内厨余垃圾占城市生活垃圾的30% ~ 50%，且呈逐步增加的趋势^[2-3]。2019年7月1日《上海市生活垃圾管理条例》正式实施，2020年上海市厨余垃圾（也称湿垃圾）分出量为9 504 t/d，相比于2019年增长27.5%^[1]。2020年5月1日《北京市生活垃圾管理条例》（修订稿）实施，2020年12月北京市厨余垃圾分出量为4 246 t/d，相比条例实施前增长了13倍^[4-5]。中国厨余垃圾处置方案主要有4种，其中以厌氧发酵为主流，占比达83%，其余快速好氧发酵、好氧堆肥、固体堆肥+液体发酵的占比分别约9%、5%、3%。厨余垃圾厌氧发酵沼渣（以下简称厨余沼渣）由于原始物料特性、厌氧反应器类型以及工艺参数控制等因素的差异，其厌氧发酵残余物中含固率会表现出一定范围的波动，整体而言含固率小于10%，约为3%^[6-8]。据统计仅上海市每日厨余沼渣量就高达723 t^[9]。厨余沼渣有机含量高，各种大、中、微量元素丰富，如果不加以妥善处置就会产生二次污染^[10]。当前国内厨余沼渣大多采用焚烧和填埋处理，厨余沼渣焚烧处理不仅会产生CO₂排放，还会浪费优质的有机资源。因此，开展厨余垃圾沼渣资源化利用研究具有必要性，也是完成垃圾分类资源化利用闭环的关键。

德国90%的农业废弃物沼渣不经处理，储存后直接回田利用^[11]。代红翠等^[12]研究表明施用沼渣可显著提高土壤总有机碳、可溶性有机碳和颗粒有机碳，能有效提高土壤肥力。王洋等^[13]研究表明沼渣施用较不施肥处理可提高白菜发芽率约12%，并可有效提高白菜株高和生物量。然而沼渣一般盐分含量较高，若直接施用于土壤，其氯

离子和钠离子会在土壤中累积进而导致土壤发生次生盐渍化。沼渣氮、磷、钾养分含量丰富，质地疏松多孔，以沼渣为原料配制育苗基质，能够满足育苗所需营养条件，有效防止蔬菜立枯病、猝倒病等多种病害^[14-15]，且不会对土壤质量造成危害。伍梦起等^[16]研究表明育苗基质中添加适宜比例的沼渣可显著促进种子发芽率和幼苗生长，玉米、黄瓜、水稻育苗基质的沼渣适宜施用比例分别为22.3% ~ 32.4%、20.0% ~ 24.0%、10.2% ~ 19.2%。宋成军等^[17]研究表明添加沼渣能显著提高高羊茅草的地上生物量，基质的沼渣适宜比例为60%。相关研究表明，上海厨余沼渣有机质含量为31.86% ~ 92.64%，氮、磷、钾总养分含量（以N+P₂O₅+K₂O计）为5.71%~10.26%^[9]。《有机肥料》（NY525-2021）标准规定，有机质含量要求为>45%，总养分含量≥5%^[18]。厨余沼渣在有机质和总养分含量上均符合标准的使用要求，具有较大的栽培基质资源化利用潜力。

目前，厨余沼渣生成量日益增加，然而对于厨余沼渣用作栽培基质可行性和适用量研究仍较少。为了探究厨余沼渣制备栽培基质的安全控制值，以优质草炭作为辅助材料，将草炭与厨余沼渣进行不同比例的混

合，在混合物达到稳态后测定栽培基质的发芽指数、总养分含量、pH值和EC值。结合有害化学物质在环境中生物毒性测试的剂量—效应关系及对数—逻辑斯蒂克（Log-logistic distribution）分布模型，测定在栽培基质配比中厨余沼渣的添加阈值，以期为厨余沼渣的直接、高效和无害化利用提供科学指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

厨余沼渣由上海市生物能源再利用中心提供，其pH值为8.6，有机碳含量为280 g/kg，全氮含量为27.7 g/kg，全磷含量为57.7 g/kg，全钾含量为7.3 g/kg。供试草炭pH值为6.3，有机碳含量为464 g/kg，全氮含量为5.1 g/kg，全磷含量为6.3 g/kg，全钾含量为1.3 g/kg。

1.2 研究方法

试验于2021年10月开展，试验周期为1个月，栽培基质按表1的比例进行配制，配制好的材料置于1 000 ml花盆中。利用环刀吸水法测定各处理混合材料的饱和含水率，换算出各处理达到饱和含水率所需水分，缓慢添加直至所有水分均被吸收。利用称重法每天补充蒸发的水分，使栽培基质保持湿润。

表 1 各处理厨余沼渣和草炭添加比例
Tab.1 Proportion of food waste biogas residue and peat added to each treatment

处理 Treatments	草炭/ml Peat	厨余沼渣/ml Food waste biogas residue	厨余沼渣比例/% Proportion of food waste biogas residue
T1	800	0	0
T2	700	100	12.5
T3	600	200	25.0
T4	500	300	37.5
T5	400	400	50.0
T6	300	500	62.5
T7	200	600	75.5
T8	100	700	87.5
T9	0	800	100.0

1.3 指标分析

试验结束后将各处理栽培基质倒入托盘中, 风干后测定各处理材料有机碳、全氮、全磷、全钾、pH值、EC值和发芽指数。具体方法参照NY 525/2021^[18]测定方法, 其中有机碳采用重铬酸钾容量法测定; 全氮采用硫酸—过氧化氢消煮, 硼酸滴定法测定; 全磷采用“分光光度法”测定; 全钾采用“火焰光度法”测定; pH值采用“pH酸度计”测定。样品: 蒸馏水=1 : 10; 发芽指数测定种子为白菜种子, 发芽时间为48 h。种子发芽指数(GI), 以%表示, 按公式(1)计算。式中: A_1 为栽培基质的浸提液培养的种子中发芽粒数占放入总粒数的百分比(%); A_2 为栽培基质的浸提液培养的全部种子的平均根长数值(mm); B_1 为水培养的种子中发芽粒数占放入总粒数的百分比(%); B_2 为水培养的全部种子的平均根长数值(mm)。

$$GI = \frac{A_1 * A_2}{B_1 * B_2} * 100 \quad (1)$$

1.4 数据处理与统计分析

种子发芽指数采用剂量效应曲线进行研究, 剂量效应曲线根据逻辑斯蒂克分布模型(Log-logistic distribution)^[19]进行拟合。各处理水平下的相对发芽指数(y)计算见公式(2)。式中: x 为厨余沼渣的添加比例(%); y_0 、 b 为拟合参数; M 为 EC_x ($x=20$ 、50和80)的对数。所拟合的曲线来测定不同评价终点所得的毒性阈值(EC_{20} 、 EC_{50} 和 EC_{80})。 EC_{20} 即为发芽指数降低至未添加厨余沼渣处理的80%时厨余沼渣的添加比例。

$$y = \frac{y_0}{1 + e^{(b(x-M))}} \quad (2)$$

厨余沼渣添加对pH值、EC值、全氮、全磷、全钾、有机碳等化学指标的影响, 增量效应根据公式(3)的绝对变化量进行计算。式中: INC 为厨余沼渣添加后土壤化学指标的

增量; T_n 为厨余沼渣添加处理土壤指标数值; T_0 为未添加厨余沼渣处理土壤指标数值。

$$INC = |T_n - T_0| \quad (3)$$

数据经Excel 2016整理后, 采用IBM SPSS 22进行单因素方差分析, 多重比较采用Duncan法。

2 结果与分析

2.1 基于种子发芽指数的厨余沼渣用量阈值

本研究参考污染物毒性阈值研究方法, 探讨了厨余沼渣制备栽培基质的用量阈值。污染物毒性阈值 EC_x 通常通过Log-normal、Log-logistic、Weibull等函数拟合出的“S型”剂量—效应曲线获得。在众多拟合剂量—效应曲线的函数中, Log-logistic函数因为能较好拟合实际生物效应而被广泛应用^[20-21]。根据白菜种子发芽指数测试结果, 利用逻辑斯蒂克分布模型拟合厨余沼渣添加比例对白菜发芽指数的

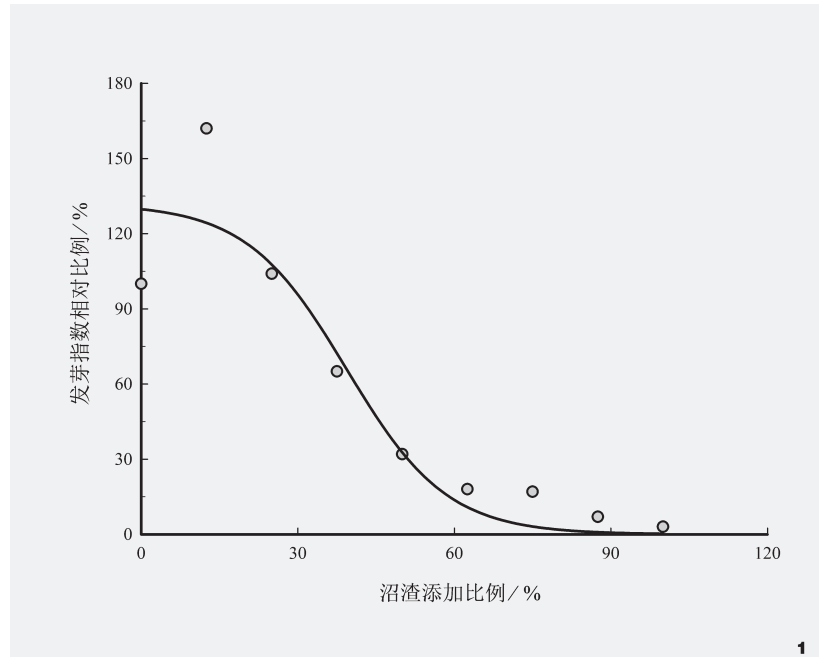


图1 基于种子发芽指数的厨余沼渣比例—效应拟合曲线

Fig. 1 Proportion effect fitting curve of food waste biogas residue based on seed germination index

剂量—效应关系。由图1可知, 厨余沼渣添加比例为0 ~ 12.5%时, 随着厨余沼渣比例的增加, 厨余沼渣剂量效应逐渐增强, 最大剂量效应为162%, 此时种子发芽指数为100%。当厨余沼渣比例大于12.5%时, 随着厨余沼渣比例的增加, 厨余沼渣剂量效应逐渐降低。厨余沼渣添加对种子发芽指数产生了低剂量刺激效应, 低剂量刺激效应厨余沼渣添加比例在0 ~ 25.2%。根据湿垃圾厨余沼渣比例—效应曲线, 可得到厨余沼渣的添加比例阈值 EC_{20} 、 EC_{50} 和 EC_{80} 分别为26.7%、37.0%和51.3%。

2.2 厨余沼渣添加的养分增量效应

由图2可知, 随着厨余沼渣添加比例的增加, 栽培基质全氮在前期迅速增加; 当厨余沼渣添加比例大于62.5%时, 栽培基质全氮增量基本保持稳定, 约为2.3%。随着厨余沼渣添加比例的增加, 栽培基质全磷含量逐

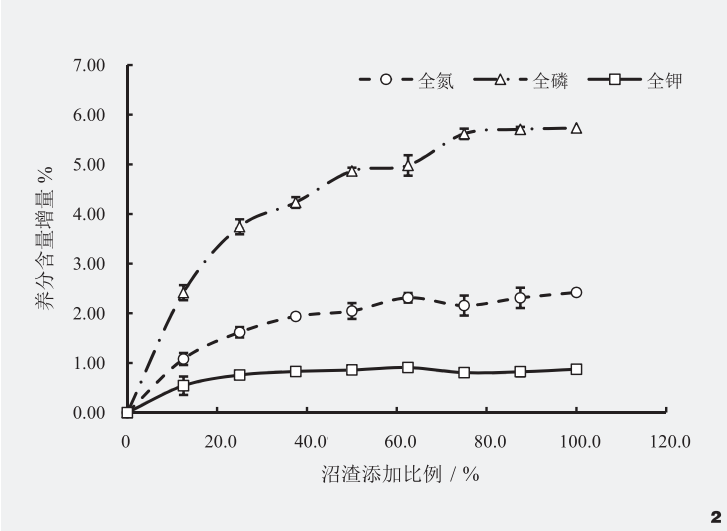


图2 厨余沼渣添加比例对养分含量的影响
Fig. 2 Effect of the proportion of food waste biogas residue on nutrient content

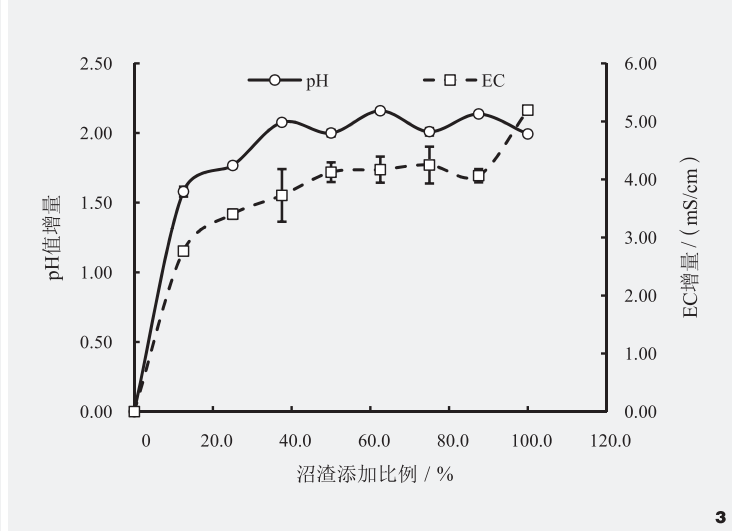


图3 厨余沼渣添加比例对pH和EC的影响
Fig. 3 Effect of the proportion of food waste biogas residue on pH and EC

渐增加，厨余沼渣添加比例由0增加至25%时，全磷增加了3.74%；厨余沼渣添加比例由25%增加至75%时，全磷增加了1.87%；当厨余沼渣添加比例大于75%时，栽培基质全磷增量基本保持稳定，约为5.7%。随着厨余沼渣添加比例的增加，栽培基质全钾含量逐渐增加，厨余沼渣添加比例由0增加至25%时，全钾增加了0.76%；当厨余沼渣添加比例在25%~100%时，栽培基质全钾增量基本保持稳定，约为0.8%。当厨余沼渣添加比例为12.5%时，种子发芽指数为100%，此时栽培基质全氮增量为1.08%，全磷增量为2.42%、全钾增量为0.54%。相比于100%厨余沼渣基质，此比例下厨余沼渣的全氮、全磷和全钾的增量效应分别为44.6%、42.2%和62.1%。基于发芽指数剂量效应阈值 EC_{20} 的厨余沼渣添加比例为26.7%，当厨余沼渣添加比例为26.7%时，栽培基质全氮增量为1.67%、全磷增量为3.92%、全钾增量为0.81%。相比于100%厨余沼渣基质，此阈值下厨余沼渣的

全氮、全磷和全钾的增量效应分别为69.0%、68.4%和93.1%。

2.3 厨余沼渣添加的pH值和EC值增量效应

由图3可知，厨余沼渣添加后栽培基质pH值迅速增加，当厨余沼渣添加量由0增加至12.5%时，栽培基质pH值增量为1.58；当厨余沼渣添加比例由12.5%增加至37.5%时，栽培基质pH值增量为0.5；当厨余沼渣添加比例大于37.5%时，栽培基质pH值增量保持稳定，约为2%。与栽培基质pH值变化类似，当厨余沼渣添加量由0%增至12.5%时，栽培基质EC值迅速提升了2.77 mS/cm；当厨余沼渣添加比例由12.5%增加至37.5%时，栽培基质EC值增量为0.96 mS/cm；当厨余沼渣添加比例在37.5%~87.5%时，栽培基质EC值增量保持稳定，约为4.1 mS/cm；当厨余沼渣添加比例由87.5%增加至100%时，栽培基质EC值增量为1.13 mS/cm。当厨余沼渣添加比例为12.5%时，种子发芽指数为100%，此时栽培基质pH

值增量为1.58，EC增量为2.77 mS/cm。相比于100%厨余沼渣基质，此比例下厨余沼渣的pH值和EC值的增量效应分别为79.4%和53.3%。基于发芽指数剂量效应阈值 EC_{20} 的厨余沼渣添加比例为26.7%，当厨余沼渣添加比例为26.7%时，栽培基质pH值增量为1.83、EC值增量为3.46 mS/cm。相比于100%厨余沼渣基质，此阈值下厨余沼渣的pH值和EC值增量效应分别为92.0%和66.5%。

2.4 厨余沼渣添加的有机碳增量效应

由图4可知，随着厨余沼渣添加比例的提高，栽培基质有机碳变化量也逐渐增大。根据有机碳含量的变化速率，整个过程可分为两个阶段，在厨余沼渣添加比例为由0增加至37.5%时，栽培基质有机碳含量迅速变化，变化量约为13.4%；当厨余沼渣添加量由37.5%增加至100%时，栽培基质有机碳含量变化速率相对平缓，变化量约为3.7%。当厨余沼渣添加比例为12.5%时，种子发芽指数为

100%，此时栽培基质有机碳变化量为6.96%。基于发芽指数剂量效应阈值 EC_{20} 的厨余沼渣添加比例为26.7%，当厨余沼渣添加比例为26.7%时，栽培基质有机碳变化量为10.7%。

3 讨论

厨余沼渣无论是直接施用于土壤还是作为栽培基质，其效应最终评价指标为对植物生长状况的影响作用。种子发芽指数作为重要的生物学指标，是衡量有机肥料和栽培基质植物毒性的重要参数^[22]。本研究表明合理添加厨余沼渣，可有效提高栽培基质的种子发芽指数，有利于植物生长，这与王洋^[13]、JIA等^[23]的研究结果一致。然而，当厨余沼渣的添加比例大于12.5%后，随着添加比例逐渐增加，种子发芽指数逐渐降低，这与伍梦起等^[16]的研究结果一致。这可能与厨余沼渣盐分含量较高有关，因此将厨余沼渣直接用于土壤施肥，由于盐分含量过高，需要采用大量稀释剂对厨余沼渣进行稀释，方能缓解盐分毒害作用^[10]。厨余沼渣添加对pH值和EC值的影响效应表明，当厨余沼渣添加比例 $\leq 12.5\%$ 时，栽培基质的pH值和EC值分别在6.4 ~ 8.0和0.5 ~ 3.3不会对植物生长产生胁迫。同时，栽培基质中养分含量丰富，因此种子发芽指标表现为低剂量刺激效应。当厨余沼渣添加比例 $\geq 25\%$ 时，栽培基质pH值大于8.2，EC值大于4.0，尽管此时栽培基质养分含量丰富，但盐碱胁迫开始影响种子萌发率。王琳琳等^[24]的研究表明，蛭石、沸石等多孔性矿物的添加能有效降低植物对滨海盐碱土中盐分的吸收，因此厨余沼渣栽培基质中可以添加一定比例的多孔性矿物材料，以增强植物对厨余沼渣盐分的抗性。

本研究中厨余沼渣养分含量丰富，其全氮、全磷和全钾含量分别是草炭的54、92和

5.6倍，因此在添加厨余沼渣后，栽培基质养分含量显著提高，这与宋成军等^[17]、董志新等^[25]的研究相似。同时，由于厨余沼渣对基质pH值和EC值的提升作用，会对植物生长产生一定的毒害作用。Log-logistic函数因为能较好地拟合实际生物效应而被广泛应用^[19-20]。本研究中通过模型预测得到厨余沼渣添加的阈值分别为 EC_{20} 阈值为26.7%， EC_{50} 阈值为37.0%， EC_{90} 阈值为51.3%。参考《有机肥料》(NY 525-2021)^[18]对有机肥料的要求，种子发芽指数需大于80%。可选取 EC_{20} 阈值作为厨余沼渣添加的参考比例。基于发芽指数剂量效应阈值 EC_{20} 的厨余沼渣添加比例为26.7%，当厨余沼渣添加比例为26.7%时，栽培基质全氮增量为1.67%、全磷增量为3.92%、全钾增量为0.81%。相比于厨余沼渣单独施用，此阈值下厨余沼渣的全氮、全磷和全钾的增量效应分别为69.0%、68.4%和93.1%。由于厨余沼渣添加后基质养分含量较高，栽培植物可充分吸收营养，王洋等^[13]的研究表明厨余沼渣

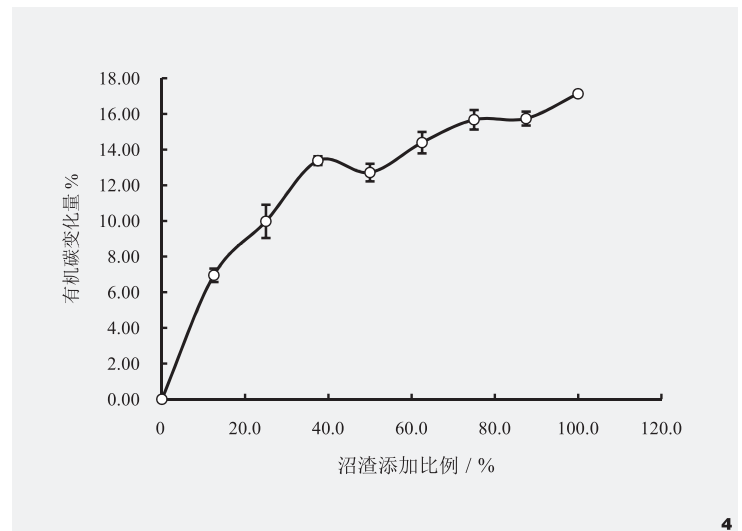


图4 厨余沼渣添加比例对有机碳含量的影响
Fig. 4 Effect of the proportion of food waste biogas residue on organic carbon content

施用可有效提高白菜叶片叶绿素含量，白菜叶片的硝酸盐含量也显著提高。硝酸盐含量过高可能会影响蔬菜品质，但园林植物主要以观赏为主，叶片硝酸盐不会进入人类食物链。因此建议厨余沼渣制备栽培基质可主要用于园林植物的栽培和育苗。由于本研究只选取了种子发芽指数这一个关键的植物生理指标进行厨余沼渣适用量评估，在研究结果上可能存在一定的局限性。同时不同植物的厨余沼渣栽培基质中，厨余沼渣的适宜添加比例也有显著差异^[16-17]，因此针对特定植物的栽培基质中厨余沼渣适用比例还需充分考虑植物生长发育的多项指标进行综合判断。

4 结论

厨余沼渣适量添加可有效提高栽培基质的种子发芽指数，表现为低剂量刺激效应。基于发芽指数的草炭最佳添加比例为12.5%，此时发芽指数为100.1%，剂量效应为162%。过量的厨余沼渣会增加栽培基质的pH值和

EC值,降低种子发芽指数。基于种子发芽指数的厨余沼渣比例一效应拟合曲线结果表明EC₂₀阈值为26.7%,EC₅₀阈值为37.0%,EC₈₀阈值为51.3%。厨余沼渣的加入可以有效提高栽培基质氮、磷、钾养分含量。在EC₂₀阈值下,栽培基质全氮、全磷和全钾养分增量分别为:1.67%、3.92%和0.81%。

注:文中图表均由作者自绘。

参考文献

[1] 杜欢政, 聂雨晴, 陆莎, 等. 上海垃圾分类资源化利用的现状、问题与实践路径[J]. 中国环境管理, 2022,14(02): 13-18.

[2] 任亮, 马琳. 垃圾分类背景下我国餐厨垃圾处理现状及发展趋势[J]. 造纸装备及材料, 2020,49(02): 38.

[3] 谢炜平, 梁彦杰, 何德文, 等. 餐厨垃圾资源化技术现状及研究进展[J]. 环境卫生工程, 2008, 16(2): 43-46.

[4] 本刊特约评论员. 垃圾分类是一场持久战[J]. 前线, 2021(01): 53.

[5] 黄芳, 楚德军, 李芳, 等. 北京市餐厨垃圾处置现状及资源化利用前景分析[J]. 中国资源综合利用, 2020,38(12): 83-86.

[6] PENG W, PIVATO A. Sustainable Management of Digestate from the Organic Fraction of Municipal Solid Waste and Food Waste Under the Concepts of Back to Earth Alternatives and Circular Economy[J]. Springer Netherlands, 2019,10(2): 465-481.

[7] 邹振江, 颜成, 杨德坤, 等. 大型餐厨垃圾处理厂沼液处理工艺的运行效果分析[J]. 南京农业大学学报, 2020,43(03): 485-491.

[8] 胡鑫鑫, 屈阳. 餐厨垃圾厌氧沼液离心脱水效果分析[J]. 广东化工, 2018, 45(06): 85-87.

[9] 李刚, 卢明, 吴春强, 等. 上海湿垃圾沼渣特性及资源化利用探索[J]. 园林, 2020(06): 25-29.

[10] 马换梅, 高波, 郑苇, 等. 餐厨垃圾厌氧消化残余物土壤利用现状调研分析[J]. 中国沼气, 2021, 39(03): 27-34.

[11] LAMOLINARA B, PÉREZ-MARTÍNEZ A, GUARDADO-YORDI E, et al. Anaerobic Digestate Management, Environmental Impacts, and Techno-economic Challenges[J]. Waste Management,

2022(140): 14-30.

[12] 代红翠, 陈源泉, 赵影星, 等. 不同有机物料还田对华北农田土壤固碳的影响及原因分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 103-110.

[13] 王洋. 餐厨垃圾厌氧发酵及沼渣资源化利用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.

[14] 屈安安, 郑鑫, 王阳, 等. 基于文献计量的沼渣沼液处理利用技术研究态势分析[J]. 中国沼气, 2020, 38(06): 86-94.

[15] 张小燕. 沼气、沼液和沼渣在设施蔬菜生产中的综合应用[J]. 农业科技与信息, 2020(02): 25-27.

[16] 伍梦起, 秦文婧, 陈晓芬, 等. 猪粪沼渣用作育苗基质的效果研究[J]. 中国土壤与肥料, 2022(03): 119-125.

[17] 宋成军, 田宜水, 罗娟, 等. 厌氧发酵固体剩余物建植高羊茅草皮的生态特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 254-260.

[18] 中华人民共和国农业农村部. NY/T 525-2021 有机肥料[S]. 北京: 中国农业出版社, 2021.

[19] SCHABENBERGER O, THARP B E, KELLS J J, et al. Statistical Tests for Hormesis and Effective Dosages in Herbicide Dose Response[J]. Agronomy Journal, 1999, 91(4), 713-721.

[20] HAANSTRA L, DOELMAN P, VOSHAAR J. The Use of Sigmoidal dose Response Curves in Soil Ecotoxicological Research[J]. Plant & Soil, 1985, 84(2): 293-297.

[21] CHRISTENSEN E R, NYHOLM N. Ecotoxicological Assays with Algae: Weibull Dose-response Curves[J]. Environmental Science Technology, 1984, 18(9): 713-718.

[22] 黄光群, 黄晶, 张阳, 等. 沼渣好氧堆肥种子发芽指数快速预测可行性分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(05): 177-182.

[23] JIA C, JTEL B, JWL B, et al. Closing the Food Waste Loop: Food Waste Anaerobic Digestate as Fertilizer for the Cultivation of the Leafy Vegetable, Xiao Bai Cai (Brassica rapa)[J]. Science of The Total Environment, 2020: 715.

[24] 王琳琳. 天津滨海盐土隔盐修复、有机改良及造林效果评估[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.

[25] 董志新, 卜玉山, 续珍, 等. 沼气肥养分物质和重金属含量差异及安全农用分析[J]. 中国土壤与肥料, 2015(03): 105-110.