

周欣, 熊传教, 李子东, 等. 厨余生化机产物的种子发芽指数及影响因素研究 [J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(2): 239-244.

ZHOU Xin, XIONG Chuanjiao, LI Zidong, et al. Seed germination index of the product of kitchen waste biochemical equipment and its influencing factors[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(2): 239-244.

厨余生化机产物的种子发芽指数及影响因素研究

周欣¹, 熊传教¹, 李子东¹, 张俊文², 刘可星¹

(1 华南农业大学 资源环境学院, 广东 广州 510642; 2 广州市城市管理技术研究中心, 广东 广州 510170)

摘要:【目的】确定厨余生化机产物腐熟度及 Na^+ 、小分子有机酸与种子发芽指数 (Seed germination index, GI) 的关系, 促进厨余生化机产物的资源化利用及推广, 同时, 开拓固碳于土壤达到碳中和目标的新技术途径。【方法】利用萝卜 *Raphanus sativus* 种子测定厨余生化机产物的 GI, 并模拟不同浓度 Na^+ 、小分子有机酸溶液, 分析其对 GI 的影响。【结果】厨余生化机产物的 GI 为 1.53%, 不满足堆肥基本腐熟的标准 ($\text{GI} \geq 50\%$), 厨余生化机产物浸提液稀释 10 倍时, 溶液中 Na^+ 质量浓度为 75.25 mg/L, GI 为 43.73%。模拟试验结果显示, 随着 Na^+ 浓度的升高, GI 呈下降趋势, 当 Na^+ 质量浓度为 1200 mg/L 时, GI 为 52.86%。随着小分子有机酸浓度的增加, GI 呈下降趋势, 当乙酸和乳酸质量浓度高于 100 mg/L、丙酸和丁酸质量浓度高于 50 mg/L 时, GI 小于 50%。丙酸、丁酸对 GI 的影响强于乙酸、乳酸。【结论】厨余生化机产物的 GI 未达到堆肥基本腐熟的标准, 制约其未达标的主要因素是厨余垃圾降解产生的小分子有机酸, 而非其含盐量。

关键词: 厨余垃圾; 资源利用; 种子发芽指数; Na^+ ; 小分子有机酸

中图分类号: X799

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2023)02-0239-06

Seed germination index of the product of kitchen waste biochemical equipment and its influencing factors

ZHOU Xin¹, XIONG Chuanjiao¹, LI Zidong¹, ZHANG Junwen², LIU Kexing¹

(1 College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2 Guangzhou Urban Management Technology Research Center, Guangzhou 510170, China)

Abstract: 【Objective】To determine the relationships between maturity, Na^+ , small molecular organic acids of product of kitchen waste biochemical equipment and germination index (GI), promote the resource utilization and popularization of the product of kitchen waste biochemical equipment, and at the same time, exploit the new technological way of carbon neutrality through soil carbon sequestration. 【Method】The GI of product of kitchen waste biochemical equipment was determined using radish (*Raphanus sativus*) seeds, and the effects of Na^+ and small molecular organic acid solutions on GI were analyzed by mimic experiments. 【Result】The GI of the kitchen waste biochemical equipment product was 1.53%, which did not reach the standard of basic maturity of compost ($\text{GI} \geq 50\%$). When the extract of kitchen waste biochemical equipment product was diluted for 10 times, the Na^+ content in the solution was 75.25 mg/L, and the GI value was 43.73%. With the increase of sodium concentration, the GI value showed a downward trend. When the Na^+ concentration was 1 200 mg/L, the

收稿日期: 2022-01-18 网络首发时间: 2022-12-23 14:25:23

首发网址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20221222.0956.001.html>

作者简介: 周欣, 硕士研究生, 主要从事固体废弃物资源化利用研究, E-mail: 1293624703@qq.com; 通信作者: 刘可星, 副教授, 博士, 主要从事固体废弃物资源化利用研究, E-mail: kxliu@scau.edu.cn

基金项目: 广州市科技计划 (202002020015)

GI value was 52.86%. With the increase of the concentration of small molecular organic acids, the GI value showed a downward trend. When the concentrations of acetic acid and lactic acid were higher than 100 mg/L, and while the concentrations of propionic acid and butyric acid were higher than 50 mg/L, the GI value was less than 50%. The inhibiting effect of propionic acid and butyric acid on GI was stronger than that of acetic acid and lactic acid. 【Conclusion】 The GI of product of kitchen waste biochemical equipment did not reach the maturity standard of composting, and the main restriction factor was the small molecular organic acids produced by the degradation of kitchen waste, rather than its salt content.

Key words: Kitchen waste; Resource utilization; Seed germination index; Sodium ion; Small molecular organic acids

我国厨余垃圾产量居世界第一，随着垃圾分类政策实施，分出量剧增的厨余垃圾急需高效、合理的处理方式^[1-2]。厨余生化机采用好氧堆肥原理，通过添加菌种，控制温度、湿度等堆肥优化条件^[3]，可将厨余垃圾处理时间缩至 24 h，促进厨余垃圾就地处理，减少运输过程中产生的二次污染^[4]，已在国内城市中得到广泛应用。相较于周期为 14~60 d 的常规有机废弃物堆肥^[5-8]，厨余生化机处理时间大幅缩短，其产物是否达到堆肥基本腐熟标准鲜见报道。种子发芽指数 (Seed germination index, GI) 既考虑了种子的发芽率，也考虑了毒性物质对种子生根的影响^[9]，是检验和评价腐熟度的综合性生物学指标。同时，种子发芽指数是最新修订的有机肥标准《有机肥料 NY/T 525—2021》新增指标之一，也是有机废弃物资源化利用的前提^[10-12]。因此，研究厨余生化机产物的 GI 具有十分重要的意义。

厨余垃圾因食盐 (NaCl) 的添加而含有较高的盐分，有别于其他有机废弃物，其盐分易在堆肥降解过程中积累^[13]。利用 NaCl 模拟盐碱地的盐分浓度，通过种子发芽试验和育苗栽培试验发现，在 NaCl 胁迫下，不同种子的发芽和根系的生长均受到影响^[14-17]，当 Na⁺浓度过高时，直接抑制植物发芽阶段的生长和分化^[18-19]，但目前研究中，对于厨余垃圾中盐分是否直接限制 GI 的研究鲜见报道。此外，厨余垃圾中易生物降解性有机质 (如蛋白质、淀粉和脂肪等) 在堆肥前期被迅速降解，导致堆体中的小分子有机酸 (乙酸、丙酸、丁酸和乳酸) 大量积累^[20-21]。小分子有机酸通常对种子发芽有抑制作用，Levi-Minzi 等^[22]的研究表明，经不同有机酸 (挥发性脂肪酸、酚酸等) 处理的小麦种子，其种子发芽率均受到不同程度的抑制。秸秆厌氧发酵产物 (乙酸、丙酸、丁酸等)^[23] 和植物根系分泌的小分子有机酸^[24] 也对种子发芽和根系的生长具有显著抑制作用。

厨余生化机快速堆肥研究多集中于工艺改善，

而对其产物腐熟效果鲜有关注。因此，本试验以厨余生化机产物为研究对象，测定其种子发芽指数，评估腐熟程度。在此基础上，通过模拟试验，分析不同浓度 Na⁺、小分子有机酸对 GI 的影响，为厨余生化机产物后续资源化利用提供理论依据，开拓固碳于土达到碳中和目标的新技术途径。

1 材料与方法

1.1 材料

供试萝卜 *Raphanus sativus* 种子的品种为 ‘翡翠二号’，购于兴宁市庆丰盈科种子有限公司。厨余生化机产物取自广州市番禺区大石镇，由某餐厨降解设备有限公司提供。厨余生化机产物的基本理化性质：有机质质量分数为 62.56%，pH 为 6.05，含水率 (w) 为 13.63%，电导率为 5 767 μS/cm，总氮 (Total nitrogen, TN) 质量分数为 4.26%，P₂O₅ 质量分数为 2.59%，K₂O 质量分数为 0.68%，GI 为 1.53%，As、Hg、Cr、Cd 和 Pb 的质量分数分别为 0.17、0.01、6.76、0.25 和 2.03 mg/kg，每千克杂草种子活性为 0 株，蛔虫卵死亡率为 100%，每克粪大肠菌群数为 0 个。

氯化钠 (NaCl)，分析纯，广州化学试剂厂生产；小分子有机酸：乙酸 (CH₃COOH)、丙酸 (CH₃CH₂COOH)、丁酸 (C₄H₈O₂) 和乳酸 (C₃H₅O₃)，分析纯，天津市科密欧化学试剂有限公司生产。

1.2 方法

1.2.1 厨余生化机产物的种子发芽指数试验 将 10.00 g 厨余生化机产物 (鲜样) 置于 250 mL 的塑料瓶中，按固、液质量比为 1:10 添加 100 mL 蒸馏水，于振荡器以 150 r/min 振荡 1 h 后过滤，过滤所得即为浸提液。将该浸提液稀释 5、10 和 50 倍，测定各稀释液的 GI，测定方法参见文献 [25]。

同时，测定上述溶液的电导率和 Na⁺浓度。Na⁺浓度采用火焰光度计 (FP6410 型) 测定，电导率

用电导率仪(雷磁 DDS-11C 型)测定。

1.2.2 钠离子的种子发芽指数试验 根据“1.2.1”试验所得厨余生化机产物的 Na^+ 浓度, 设置 Na^+ 溶液浓度梯度水平。本试验中 Na^+ 质量浓度梯度设为 400、800、1 200、1 600 和 2 000 mg/L, 测定不同浓度下的 GI。

1.2.3 小分子有机酸的种子发芽指数试验 参照丁杰等^[21] 的研究, 试验选用乙酸、丙酸、丁酸、乳酸 4 种小分子有机酸, 每种小分子有机酸质量浓度梯度均设定为 10、50、100、500 和 1 000 mg/L, 测定不同浓度小分子有机酸条件下的 GI。

1.3 种子发芽指数测定方法^[25]

种子发芽指数的测定步骤: 吸取 5 mL 浸提液或试验溶液于垫有 2 张滤纸(直径 70 mm)的培养皿(直径 90 mm)中, 均匀地放入籽粒饱满、大小一致的 10 颗萝卜种子, 并以加去离子水为对照(CK), 每个处理重复 3 次。在 $(25\pm 2)^\circ\text{C}$ 的培养箱中避光培养 48 h, 记录种子发芽(以胚芽突破种皮 2 mm 为准)的个数, 并测定根长。

种子发芽指数 GI 的计算公式:

$$GI = X_1 X_2 / Y_1 Y_2 \times 100\%,$$

式中: X_1 为浸提液或试验溶液的种子发芽率, %; X_2 为浸提液或试验溶液的种子根长, mm; Y_1 为去离子水的种子发芽率, %; Y_2 为去离子水的种子根长, mm。

1.4 数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2019 软件进行处理, SPSS26.0 软件进行数据间多重比较, Origin pro 2021 进行作图。

2 结果与分析

2.1 厨余生化机产物的种子发芽指数

目前用于堆肥腐熟评价的种子发芽指数(GI), 已有了可参考的量化标准, 一般认为: 当 $GI \geq 50\%$ 时, 堆肥达到基本腐熟的标准; $GI \geq 80\%$, 则堆肥完全腐熟^[10]。最新版修订的有机肥标准中新增了 GI 指标, 首次规定堆肥产物 $GI \geq 70\%$ 的安全施用标准。由表 1 可知, 厨余生化机产物的 GI 为 1.53%, 既未达到有机肥新标准, 也不满足堆肥基本腐熟的标准。

表 1 厨余生化机产物浸提液的种子发芽指数 (GI)

Table 1 Seed germination index (GI) of extract of kitchen waste biochemical machine product

浸提液稀释倍数 Dilution times of extract	$\rho(\text{Na}^+)/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	电导率 ¹⁾ /($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) Electrical conductivity	GI ¹⁾ /%
0	752.44	5 800.00±200.00a	1.53±0.04d
5	150.49	1 300.00±50.00b	30.43±2.69c
10	75.25	697.67±68.07c	43.73±2.88b
50	15.05	161.33±17.21d	76.95±4.75a

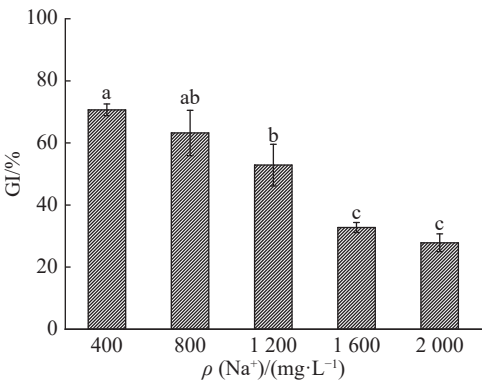
1)表中数据为平均值±标准误, $n=3$; 同列数据后的不同小写字母表示差异显著($P<0.05$, Duncan's 法)
1) The data in the table were mean ± standard error, $n=3$; Different lowercase letters after the data in the same column indicated significant differences ($P<0.05$, Duncan's method)

将测定种子发芽指数的浸提液进行稀释, 分析不同稀释倍数浸提液的 Na^+ 浓度和对应的 GI 变化。由表 1 可以看出, 随着稀释倍数的升高, 溶液中 Na^+ 含量下降, 而 GI 呈上升趋势, 且各处理间的 GI 均有显著性差异。浸提液稀释 10 倍时, Na^+ 质量浓度为 75.25 mg/L, GI 为 43.73%, 仍小于 50%, 3 个稀释倍数的 GI 中, 仅稀释 50 倍的 GI 大于 50%。

依据厨余生化机产物浸提液 Na^+ 质量浓度为 752.44 mg/L, 由此可得, 厨余生化机产物的含盐量(w) 为 1.66%。随着稀释倍数的增加, 电导率呈下降趋势, Na^+ 浓度与电导率正相关。

2.2 不同浓度钠离子的种子发芽指数

图 1 为不同浓度 Na^+ 的 GI 结果, 由图 1 可知, 随着 Na^+ 浓度的升高, GI 呈下降趋势。与 400 mg/L



柱子上的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)
Different lowercase letters on the columns indicated significant differences ($P<0.05$, Duncan's method)

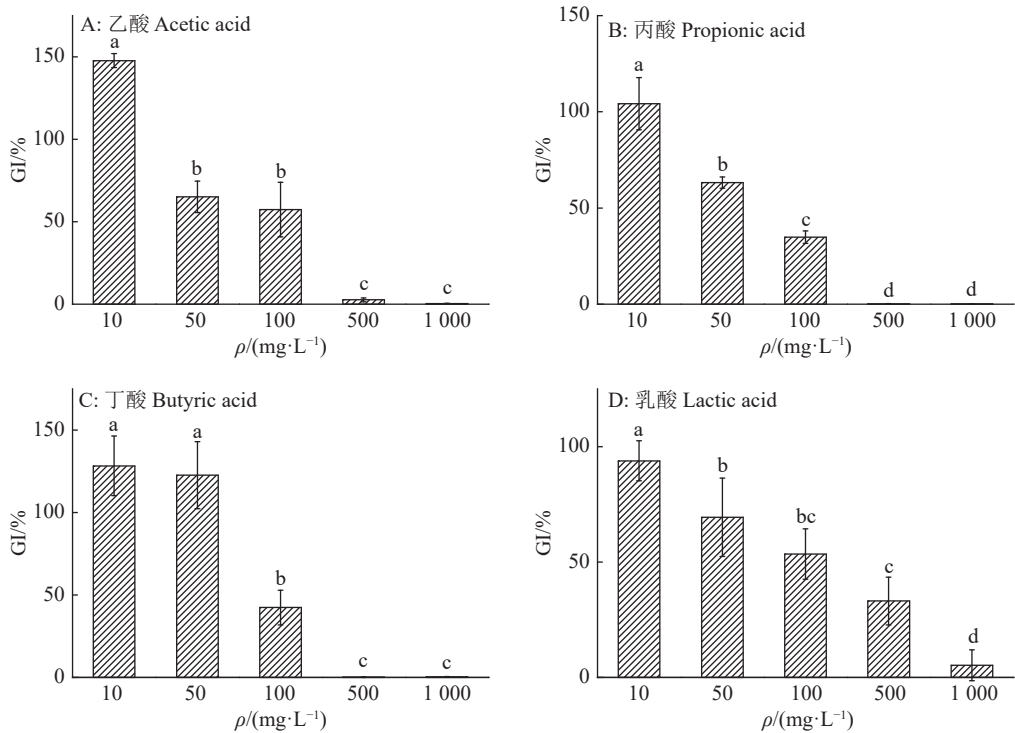
图 1 不同浓度钠离子的种子发芽指数
Fig. 1 Seed germination index(GI)of different concentrations of sodium ions

Na⁺相比, 800 和 1 200 mg/L Na⁺的 GI 分别下降了 10.54% 和 25.20%, 但 400 和 800 mg/L Na⁺的 GI 无显著差异, 而 1 200 mg/L Na⁺的 GI 则显著低于 400 mg/L Na⁺的 GI; 1 600 mg/L Na⁺与 2 000 mg/L Na⁺的 GI 无显著性差异, 且均显著低于其他 Na⁺浓度的 GI, GI 小于 50%。整体来看, Na⁺浓度水平与 GI 负相关 ($r=-0.912, P<0.05$)。当 Na⁺质量浓度为 1 200 mg/L 时, 其 GI 为 52.86%, 高于堆肥基本腐熟标准 (GI $\geq$ 50%)。假定厨余垃圾的 Na⁺质量浓度为 1 200 mg/L, 由此, 可推算厨余垃圾的含盐量 (w) 应为 2.66%。

2.3 不同浓度小分子有机酸的种子发芽指数

小分子有机酸的 GI 测定结果见图 2, 随着小分子有机酸浓度的增加, GI 整体变化趋势大致相同, 均呈下降趋势。不同浓度乙酸的 GI 结果见图 2A, 10 mg/L 乙酸的 GI 显著高于其他浓度乙酸的 GI,

50 和 100 mg/L 乙酸的 GI 无显著性差异, 但两者的 GI 均大于 50%, 500 和 1 000 mg/L 乙酸的 GI 之间无显著性差异, 且 GI 均小于 50%。不同浓度丙酸的 GI 测定结果见图 2B, 除 500 和 1 000 mg/L 丙酸的 GI 之间无显著差异以外, 10、50、100 和 500 mg/L 丙酸的 GI 之间均有显著性差异; 与 10 mg/L 丙酸相比, 50 mg/L 丙酸的 GI 下降了 39.34%, 但 GI 大于 50%。图 2C 结果显示, 10 和 50 mg/L 丁酸的 GI 大于 100%, 两者之间无显著差异, 但显著高于其他 3 个丁酸浓度的 GI。不同浓度乳酸的 GI 测定结果见图 2D, 10 mg/L 乳酸的 GI 显著高于其他浓度乳酸的 GI, 与 10 mg/L 乳酸相比, 50 和 100 mg/L 乳酸的 GI 分别下降了 26.02% 和 43.04%, 但两者之间差异不显著, 仅 500 和 1 000 mg/L 乳酸的 GI 小于 50%。



各图中, 柱子上方的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)
In each figure, different lowercase letters on the columns indicated significant differences ($P<0.05$, Duncan's method)

图 2 4 种小分子有机酸不同浓度下的种子发芽指数

Fig. 2 The seed germination index of four kinds of small molecular organic acids under different concentrations

乙酸、乳酸质量浓度高于 100 mg/L 时, GI 小于 50%, 而丙酸、丁酸质量浓度高于 50 mg/L 时, 其 GI 小于 50%。可见, 丙酸、丁酸对 GI 的影响强于乙酸、乳酸。

3 讨论与结论

Na⁺通过渗透效应、离子毒性或两者结合影响种子发芽, 在较高盐度的环境中, 水势的下降和

Na⁺的积累可以构成限制种子发芽和幼苗形成的胁迫因子, 细胞内高浓度的 Na⁺可抑制细胞分裂和新陈代谢, 阻碍种子发芽 [26-27]。本研究模拟试验及不同稀释倍数浸提液试验中, Na⁺浓度均与种子发芽率呈负相关。不同 Na⁺浓度的模拟试验结果表明, 当 Na⁺质量浓度为 1 200 mg/L 时, GI 为 52.86%。浸提液稀释 10 倍的 GI 为 43.73%, 其 Na⁺质量浓度为 75.25 mg/L。厨余生化机产物浸提液是含有多种成

分(Na^+ 、小分子有机酸和 NH_4^+ 等)的混合液,与单一 Na^+ 模拟试验相比,在GI相近的情况下,浸提液的 Na^+ 浓度远低于模拟试验,这表明,制约厨余生化机产物GI的主要影响因子不是 Na^+ ,而是其他因子。本研究供试厨余生化机产物含盐量(w)为1.66%,文献中报道的厨余垃圾含盐量一般在0.24%~1.34%^[19,28-30],两者均低于模拟试验条件下达到基本腐熟标准($\text{GI} \geq 50\%$)的含盐量(w 为2.66%)。由此可知,厨余垃圾的含盐量不是制约厨余生化机产物腐熟的主要影响因子。

本研究中不同种类小分子有机酸的GI变化趋势大致相同,随着小分子有机酸浓度的增加,GI均呈下降趋势,但不同浓度的小分子有机酸对GI的影响不同,乙酸、乳酸质量浓度高于100 mg/L和丙酸、丁酸质量浓度高于50 mg/L的GI均小于50%。其他研究也表明,低浓度小分子有机酸对种子发芽率具有抑制作用,当乙酸、丙酸和丁酸质量浓度分别高于60、37和144 mg/L时,滇水金凤*Brassica oleracea*种子发芽率受到抑制,随着浓度的增加而抑制作用逐渐加强^[24],这与本研究模拟试验GI变化趋势一致,且开始抑制滇水金凤种子发芽率的小分子有机酸浓度与达到基本腐熟的小分子有机酸浓度相近。当有机酸浓度过高时,甘蓝*Impatiens uliginosa*种子仅经过丙酸、乳酸浸泡0.5 h,复水后,其发芽率明显下降^[31]。丁杰等^[21]研究了厨余垃圾堆肥过程中小分子有机酸含量的变化,堆肥第1天,产生的乙酸、丙酸、丁酸和乳酸质量浓度分别为1 709、1 371、1 405和1 703 mg/L,至堆肥第17天结束时,乙酸、丙酸、丁酸和乳酸质量浓度仍分别高达760、656、788和880 mg/L,然而该试验仅研究小分子有机酸的变化,未对GI的变化进一步研究。本研究通过小分子有机酸的种子发芽指数模拟试验发现,乙酸、丙酸、丁酸和乳酸质量浓度100 mg/L的GI分别为57.37%、34.90%、42.38%和53.45%,厨余生化机堆肥降解产生的各小分子有机酸易达到模拟试验条件下基本腐熟的小分子有机酸浓度,因此,小分子有机酸是抑制厨余生化机产物腐熟的主要影响因子。

本试验研究表明,厨余生化机产物的GI仅为1.53%,未达有机肥新标准($\text{GI} \geq 70\%$),也不满足堆肥基本腐熟标准($\text{GI} \geq 50\%$),而未腐熟的厨余生化机产物施到土壤中会对植物生长产生不良影响,因此,当前工艺条件下的厨余生化机产物,其资源化利用途径受限。本研究供试厨余生化机产物除腐熟指标GI外,其他指标均满足有机肥新标准。模拟试

验结果表明,小分子有机酸是制约厨余生化机产物腐熟的主要影响因素。为促进厨余生化机产物小分子有机酸降解,后续可通过适当延长厨余生化机处理时间、添加菌种加速小分子有机酸降解等工艺的研究,或者对厨余生化机产物进行常规好氧堆肥,进而消除小分子有机酸对GI的影响,以此使厨余生化机产物满足有机肥标准。本研究的模拟试验仅考虑单一因素的影响,而厨余生化机产物含有有机酸、 Na^+ 、油脂等有害物质,后续的研究中,应考虑多种有害物质的叠加抑制作用对种子发芽指数的影响,这对于促进厨余生化机产物腐熟更有实际意义。将厨余生化机产物以有机肥的形式施入土壤中,可增强土壤固碳能力,提高土壤有机质含量,解决我国土壤有机质含量普遍不高的问题^[32],从而开拓固碳于土的碳中和新技术途径,促进土壤健康,实现农业绿色发展。

参考文献:

[1] WANG Y, ZANG B, LIU Y, et al. Classification and management of kitchen waste: Disposals and proposals in Chaoyang district, Beijing, China[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2018, 20(1): 461-468.

[2] 靳晨曦, 孙士强, 盛维杰, 等. 中国厨余垃圾处理技术及资源化方案选择[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(3): 1240-1251.

[3] 顾明, 姜同舟, 赵启超. 垃圾生化处理装置行业标准化现状及发展趋势分析[J]. *质量与认证*, 2018(8): 74-75.

[4] 朱梦姗, 李大勇. 厨余垃圾分类处理的路径研究: 以H市为例[J]. *河北环境工程学院学报*, 2021, 31(4): 81-84.

[5] YUAN J, YANG Q, ZHANG Z, et al. Use of additive and pretreatment to control odors in municipal kitchen waste during aerobic composting[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 37: 83-90.

[6] 杨佳, 李国学, 马若男, 等. 腐熟堆肥回流对猪粪堆肥含硫臭气排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(11): 2456-2464.

[7] 沈根祥, 尉良, 钱晓雍, 等. 微生物菌剂对农牧业废弃物堆肥快速腐熟的效果及其经济性评价[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(5): 1048-1052.

[8] 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): 857-863.

[9] 任胜男, 刘玲, 郭小平, 等. 不同调理剂对2种沉水植物好氧堆肥腐熟效果的影响[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(11): 3660-3668.

[10] ZUCCOIN F, MONACO A, DEBERTOLDI M. Biological evaluation of compost maturity[J]. *Biocycle*, 1981, 22(4): 27-29.

[11] 汤江武. 猪粪好氧堆肥高效菌筛选、工艺优化及应用

研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.

[12] 王国英, 袁京, 孔艺霖, 等. 堆肥种子发芽指数测定方法与敏感性种子筛选[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(19): 220-227.

[13] 童琳, 徐长勇, 宋薇. 厨余垃圾堆肥产物的非农业土地应用研究[J]. *天津科技*, 2021, 48(8): 51-54.

[14] LIOPA-TSAKALIDI A, BAROUCHAS P E. Salinity, chitin and GA3 effects on seed germination of chervil (*‘Anthriscus cerefolium’*)[J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2011, 5(8): 973-978.

[15] HOOKS T N, PICCHIONI G A, SCHUTTE B J, et al. Sodium chloride effects on seed germination, growth, and water use of *Lepidium alyssoides*, *L. draba*, and *L. latifolium*: Traits of resistance and implications for invasiveness on saline soils[J]. *Rangeland Ecology & Management*, 2018, 71(4): 433-442.

[16] 廖建良, 何坤锡, 郭友明. 营养液中添加低浓度氯化钠对大白菜生长的影响[J]. *北方园艺*, 2018(16): 70-75.

[17] 郑忠标, 王澍. NaCl 对玛咖种子发芽及幼苗生长的影响[J]. *种子*, 2020, 39(8): 91-93.

[18] 宋苗苗. NaCl 胁迫下 4 个紫花苜蓿品种种子萌发及幼苗生长的差异研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.

[19] 张娇, 张大治, 马艳, 等. 氯化钠模拟盐胁迫对沙冬青种子萌发和幼苗生长的影响[J]. *北方园艺*, 2014(14): 65-72.

[20] SUNDBERG C, JÖNSSON H. Process inhibition due to organic acids in fed-batch composting of food waste-influence of starting culture[J]. *Biodegradation*, 2005, 16(3): 205-213.

[21] 丁杰, 郝艳, 侯佳奇, 等. 接种抗酸化复合菌对餐厨废弃物堆肥酸化缓解及腐殖化的影响[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(12): 1887-1894.

[22] LEVI-MINZI R, SAVIOZZI A, RIFFALDI R. Organic acids as seed germination inhibitors[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Environmental Science and Engineering and Toxicology*, 1994, 29(10): 2203-2217.

[23] LYNCH J M. Phytotoxicity of acetic acid produced in the anaerobic decomposition of wheat straw[J]. *Journal of Applied Bacteriology*, 1977, 42(1): 81-87.

[24] 朱佳鹏, 闻永惠, 季文丽, 等. 滇水金凤根系分泌物对其种子萌发的影响[J]. *种子*, 2020, 39(5): 41-46.

[25] 李国学. 固体废物处理与资源化[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2005: 105-122.

[26] 贾娜尔·阿汗, 杨春武, 石德成, 等. 盐生植物碱地肤对盐碱胁迫的生理响应特点[J]. *西北植物学报*, 2007, 27(1): 79-84.

[27] 武小霞, 郭雪田, 王港庆, 等. 大豆染色体片段代换系群体苗期耐盐性鉴定及评价[J]. *东北农业大学学报*, 2022, 53(1): 1-7.

[28] 符瞰, 任小玉, 符芳欢. 沿海旅游城市餐厨垃圾特性及处理方法分析[J]. *中国沼气*, 2013, 31(2): 11-14.

[29] 农传江, 徐智, 汤利, 等. 餐厨垃圾特性及处理技术分析[J]. *环境工程*, 2014, 32(S1): 626-629.

[30] 潘丽爱. 生物降解法餐厨垃圾处理技术的试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.

[31] VAN DER WOLF J M, BIRNBAUM Y, VAN DER ZOUWEN P S, et al. Disinfection of vegetable seed by treatment with essential oils, organic acids and plant extracts[J]. *Seed Science and Technology*, 2008, 36(1): 76-88.

[32] ZHANG W J, WANG X J, XU M G, et al. Soil organic carbon dynamics under long-term fertilizations in arable land of Northern China[J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(2): 409-425.

【责任编辑 李晓卉】