

汪益民,李梦妮,马行聪,等. 厨余垃圾有机肥对玉米生理生化特性及土壤肥力的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(8):249-255.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.08.032

厨余垃圾有机肥对玉米生理生化特性 及土壤肥力的影响

汪益民¹, 李梦妮², 马行聪¹, 陈红金³, 彭丽媛¹, 秦 华¹

(1. 浙江农林大学环境与资源学院,浙江杭州 311300; 2. 浙江省乐清市农业农村局,浙江乐清 325699;

3. 浙江省耕地质量与肥料管理总站,浙江杭州 310000)

摘要:为评估厨余垃圾来源制成的有机肥(KOF)对植物生长和土壤肥力的影响,试验选用 KOF、普通商品有机肥(COF)和玉米为材料进行种子萌发和盆栽试验,研究了 2 种有机肥对玉米萌发和生长及土壤肥力的影响。结果表明,添加 COF 浸提液(EC)和 KOF 的浸提液(EK)对玉米种子萌发无显著影响,并增加了玉米幼苗鲜重、根长、株高;相同浓度下,EK 和 EC 处理的上述指标大多无显著差异,但 1 000 mg/L EK 处理的玉米根长显著高于 EC。与纯水浸种的玉米相比,用 EC 浸种后的玉米叶片丙二醛含量显著升高,过氧化氢酶和超氧化物歧化酶活性增强,但过氧化物酶活性降低;用 EK 浸种的玉米丙二醛含量、过氧化物酶和过氧化氢酶活性无显著变化,而超氧化物歧化酶活性显著增强。盆栽试验中,常规和 1.5 倍用量 KOF 均能显著提高玉米地径、株高、生物量、养分吸收量和叶绿素含量,增强根系活力;常规用量 COF 处理时有类似现象,但 1.5 倍用量 COF 处理会降低玉米根系活力和株高。施用 2 种有机肥后,土壤 pH 值、碱解氮含量、有效磷含量、电导率、可溶性盐含量以及多种水解酶活性均有不同程度提高;并且,同等用量下,COF 处理的电导率和可溶性盐含量均高于 KOF 处理。综上,KOF 对玉米的萌发及生长均无不良影响,且能促进玉米生长及养分吸收,并优于 COF;它还能提高土壤 pH 值和养分含量,增强碳、氮和磷转化的相关水解酶活性,与 COF 功能相似。

关键词:厨余垃圾;有机肥;土壤养分;玉米生长;生理指标

中图分类号:S158.3;S513.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)08-0249-07

易腐垃圾是一类含有机质、容易腐败的生活废弃物,主要由居民日常生活的厨房残余、餐饮业的餐厨垃圾以及农贸市场产生的生鲜废弃物等组成。据统计,2020 年我国易腐垃圾的产量超过 3 500 万 t,占生活垃圾总量的 15%^[1-2]。并且,经济和人口的相对增长会不断刺激易腐垃圾的产生^[3]。厨余垃圾是易腐垃圾的主要组成部分,包括剩饭剩菜、蔬菜瓜果垃圾、畜禽内脏、废弃食物、肉碎骨、水产品等,其处理不当不仅会污染环境,还可能会对人类健康造成危害。解决厨余垃圾的出路问题是破解城市垃圾治理的堵点和难点,是推进城市可持续发展、构建美丽中国的科技需求,是践行国家生态文明建设的一项重要任务。

厨余垃圾含有大量的氮素和碳水化合物,被视

为是一种适合发展肥料的良好材料^[4-5]。因此,近年来,国内外越来越多的研究把厨余垃圾的去向集中到肥料资源化处理上。在某些发达国家已经形成了较为完善的厨余垃圾堆肥处理系统,能持续利用厨余垃圾生产肥料。比如德国的厨余垃圾堆肥产物年产量能达 500 万 t^[6]。随着垃圾分类政策在我国各地区的广泛宣传和实施,利用厨余垃圾生产肥料制品也逐渐得以实现。当前,人们主要是利用好氧堆肥、厌氧消化和生物转化及其组合技术来开发厨余垃圾肥料产品。并且,已有相关肥料产品被施用在园林绿地或制成栽培基质,在农业种植上也有少量应用和探索研究^[7-9]。然而,厨余垃圾有机肥施用对农作物生长及土壤的影响效果还没有深入研究,在推广应用前,有必要充分评估其肥效和安全性。

通过测定肥料对作物种子萌发和作物生长,及其对土壤物理、化学和生物性质方面的影响是最直接的评估方法。焦玉洁等通过室内培养和作物种植试验,充分了解紫茎泽兰有机肥和烟末(梗)有机肥的肥效和安全性,为其无害化处理与肥料资源化利用提供了科学依据和切实可行的技术支持^[10-11]。

收稿日期:2024-03-23

基金项目:浙江省重点研发计划(编号:2021C03025-03)。

作者简介:汪益民(1999—),男,浙江衢州人,硕士研究生,从事耕地质量培育与提升研究。E-mail:wangyimin199911@163.com。

通信作者:彭丽媛,博士,讲师,从事植物营养与肥料研究。E-mail:ply9116@zafu.edu.cn。

前期,笔者所在课题组已探究了一种由好氧堆肥和黑水虻生物转化技术生产得来的厨余垃圾有机肥(KOF)对土壤微生物活性及功能的影响,初步确定该有机肥具有提高土壤肥力、水解酶活性、有益微生物数量以及抑制病菌生长的潜力^[12]。为进一步评估该 KOF 对植物生长和土壤肥力的改善效果及施用安全性,本研究以 KOF 和普通商品有机肥(COF)为供试有机肥,开展玉米种子萌发和温室盆栽试验,旨在明晰该 KOF 对作物种子萌发和生长及对土壤肥力的影响及机制,为大面积安全应用厨余垃圾肥料制品奠定基础,促进厨余垃圾资源化利用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试肥料:厨余垃圾有机肥(KOF)购自建德厨农农业科技开发有限公司,其主要原材料为厨余垃

圾,生产要点是将厨余垃圾进行三相分离,收集固体,然后利用黑水虻进行生物转化,消化后的生物质再进行好氧堆肥,最后将堆肥产物与木屑依照比例 7:3(质量比)混合最终制备成 KOF;常规商品有机肥(COF)由湖北鄂中生态工程股份有限公司生产,纯豆粕发酵制成,为本试验所在地推荐的商品有机肥产品,常用于农作物和蔬菜种植。其理化特性如表 1。

供试土壤:在浙江农林大学试验基地(119°73'E, 30°26'N)采集 0~20 cm 土壤,拣除石子、植物根系、枯枝落叶及其他杂物等,经自然风干后研磨、过筛(孔径 5.0 mm)。初始土壤的化学性质:pH 值为 4.56,含有机质 35.43 g/kg、碱解氮 68.63 mg/kg、有效磷 12.25 mg/kg、速效钾 105.50 mg/kg。

供试植物:玉米(*Zea mays* L.),为京科糯 928,购自宁波市江东甬苗种业。

表 1 有机肥特性

有机肥	pH 值	有机质含量 (%)	N 含量 (%)	P ₂ O ₅ 含量 (%)	K ₂ O 含量 (%)	水分含量 (%)
KOF	7.70	43.98	2.75	5.97	1.51	29.40
COF	6.30	45.00	6.72	1.96	1.00	3.30
有机肥国家标准 NY/T 525—2021	5.5~8.5	≥30	N + P ₂ O ₅ + K ₂ O ≥4.0			≤30

注:KOF 表示厨余垃圾有机肥;COF 表示商品有机肥。

1.2 试验设计

1.2.1 种子萌发试验 分别将 2 种有机肥置于恒温烘箱(DHG-9247A,上海精宏),(40±1)℃干燥 24 h 后,再各称取 10.00 g 放入 2 L 烧杯中,准确量取 1 L 蒸馏水并缓慢倒入烧杯中,利用玻璃棒搅拌均匀,放置在水浴锅中(37±0.5)℃浸泡 48 h 后抽滤,最终配制成 10 mg/mL 的母液。COF 和 KOF 的浸提液分别用 EC 和 EK 表示。用纯水稀释母液配制成浓度为 0.00 (CK)、1.00、10.0、100、1 000 mg/L 的 EC 和 EK 溶液备用。

选取均匀一致的玉米种子,于浓度为 1.0% 的过氧化氢溶液中浸泡消毒 1 min 后,用无菌纯水冲洗干净,再将种子分别置于装有不同浓度的 EC 和 EK 浸提液的烧杯中,于(25±0.5)℃恒温培养箱中进行 24 h 吸涨处理。在直径 12 cm 培养皿底部铺 3 层滤纸,加入 100 mL 不同浓度的浸提液,然后取 25 粒玉米种子放置在滤纸上,再放入气候箱中进行种子发芽和幼苗培养。培养期间每天光照时长和黑暗时长均为 12 h,光照度设置为 5 000 lx,温度为(25±1)℃。在玉米种子萌发和幼苗培养期间,每

天适量补充无菌去离子水、不同浓度 EC 和 EK 浸提液,保持溶液总体积 100 mL 不变,每个处理重复 4 次,试验周期为 3 周,各项指标在第 3 周试验结束后测定。

1.2.2 盆栽试验 试验于 2022 年在浙江农林大学温室大棚进行,在 5 月中旬开始播种,7 月中旬结束,周期为 60 d。称取“1.1”节中的供试土壤,每盆装 5.0 kg,均匀播种 4 粒,定植幼苗 2 株。试验设置包括:(1)CK(不施肥);(2)100% COF(常规用量商品有机肥);(3)100% KOF(常规用量厨余垃圾有机肥);(4)150% COF(1.5 倍常规用量商品有机肥);(5)150% KOF(1.5 倍常规用量厨余垃圾有机肥)。随机区组排列,每个处理 6 盆。常规用量根据当地田间玉米栽培的施肥习惯计算盆栽肥料施用量,100% KOF 和 100% COF 处理 1 kg 土壤施用肥料折纯 0.10 g N、0.05 g P₂O₅ 和 0.05 g K₂O;150% KOF 和 150% COF 处理 1 kg 土壤施用肥料折纯 0.15 g N、0.075 g P₂O₅ 和 0.075 g K₂O,不足的氮、磷、钾用化肥(尿素、过磷酸钙和硫酸钾)补足。施肥方法为播种前作基肥一次性施入。培养期间视

情况添加去离子水,保持土壤水分在田间最大持水量的 60% ~ 70%。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 肥料 分别采用微电极法以 10 : 1 的水肥比法测定有机肥 pH 值;氮、磷、钾和有机质含量参考 NY/T 525—2021《有机肥料》的方法测定;有机肥电导率采用电导率仪(S700-K,梅特勒托利多科技有限公司)测定;有机肥含盐量测定采用盐度计(型号同电导率仪)测定。

1.3.2 植株 (1)发芽率:以胚根长度达到 1 mm 为标准,每隔 24 h 统计 1 次萌发的种子数量,若连续 2 d 发芽的种子数量无增加则视为发芽完成。

种子发芽率 = (发芽的种子总数/供试种子总数) × 100%。

(2)植株生物量和生长性状:发芽试验在培养 21 d 时,用根扫描仪扫描记录根形态结构,幼苗洗净,滤纸吸附残留水分测定幼苗鲜重、最大根长和株高;盆栽培养结束时测定玉米地径、株高,然后收集玉米完整植株,105 °C 杀青,(80 ± 1) °C 烘干,称重,记录生物量。

(3)生理指标:采用便携式叶绿素仪(SPAD-502 Plus,柯尼卡美能达株式会社)直接测定叶绿素含量,氯化三苯基四氮唑(2,3,5-Triphenyl-2H-tetrazolium chloride, TTC)法^[13]测定根系活力,叶片丙二醛含量和过氧化氢酶、过氧化物酶、超氧化物歧化酶活性分别采用购自南京建成生物工程研究所的试剂盒测定。

(4)植株养分:植株干样磨碎后经 H₂SO₄ - H₂O₂ 消煮,分别采用半微量凯氏定氮仪法、钒钼酸铵比色法和火焰光度计法测定消煮液中的氮、磷和钾含量^[14]。

1.3.3 土壤 (1)土壤采集及前处理:植株采收后,用抖根法收集玉米根际土壤,拣去植物根系等杂物,将土壤样品分为 2 个部分,一部分在室温下风干、过筛,用于测定土壤常规理化;另一部分储存在 4 °C 冰箱,用于测定土壤酶活性。

(2)土壤化学指标测定:分别采用微电极法以 2.5 : 1 的水土比法、碱解扩散法、盐酸-氟化铵溶液浸提-钼锑抗比色法、醋酸铵浸提-火焰光度计法^[14]和重铬酸钾-浓硫酸氧化-硫酸亚铁滴定法^[15]测定土壤 pH 值、碱解氮、有效磷、速效钾和有机质含量;土壤电导率采用电导率仪测定;土壤含盐量测定参考 NY/T 1121.16—2006《土壤检测第

16 部分:土壤水溶性盐总量的测定》测定。

(3)土壤酶活性的测定:土壤酸性磷酸酶、α-葡萄糖苷酶、β-葡萄糖苷酶、亮氨酸氨基肽酶、纤维二糖水解酶、β-木聚糖苷酶和 N-乙酰-β-氨基葡萄糖苷酶的酶活性测定参照荧光微孔板检测技术,7 种酶活性单位均用 nmol/(g · h)表示^[16]。

1.4 数据分析

使用 Microsoft Excel 2019 软件对数据进行基础处理;利用 SPSS 24.0 统计分析软件分析数据,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)中的 Duncan's 检测法进行差异显著性检验(α=0.05);利用 Origin 2021 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 有机肥浸提液对种子发芽与幼苗生长的影响

由表 2 可知,各处理的发芽率变化范围为 90% ~ 94%,处理间无显著差异(P>0.05);随着浸提液浓度增加,玉米幼苗鲜重、最大根长以及株高均增加,较 CK 分别提高了 2.0% ~ 50.0% (EC)和 3.1% ~ 59.2% (EK)、16.4% ~ 42.0% (EC)和 21.8% ~ 116.8% (EK)、10.4% ~ 27.4% (EC)和 8.8% ~ 32.7% (EK);除 1000 mg/L 浓度 EK 处理的玉米根长显著高于 EC 外(P<0.05),在同浓度下,2 种有机肥浸提液处理的上述指标无显著差异(P>0.05)。

2.2 有机肥浸提液对玉米幼苗生理指标的影响

由表 3 可知,与 CK 相比,随着有机肥料浸提液浓度增加,玉米幼苗根系活力呈现先增后减的趋势,并在浓度达到 10.0、100 mg/L 时达到显著水平(P<0.05);叶片叶绿素和丙二醛含量及过氧化氢酶和超氧化物歧化酶活性(除 1.00 mg/L EC 处理外)分别提高了 9.0% ~ 26.2% (EC)和 31.1% ~ 42.6% (EK)、50.7% ~ 58.3% (EC)和 0.6% ~ 16.2% (EK)、2.5% ~ 11.8% (EC)和 2.3% ~ 7.2% (EK)、35.2% ~ 107.8% (EC)和 9.3% ~ 138.6% (EK),并且添加 EC 处理的丙二醛含量显著高于 CK 和含 EK 的处理(P<0.05);提高浸提液浓度,EC 处理过氧化物酶活性逐渐降低,当浓度升至 100 mg/L 后显著低于 CK 和含 EK 处理(P<0.05),而 CK 与含 EK 处理间无显著差异(P>0.05)。

分析添加浸提液处理发现,仅在处理浓度为 100 mg/L 时,EC 处理玉米幼苗根系活力和过氧化氢酶活性显著高于 EK(P<0.05)。同浓度下,EK 处理的叶绿素含量均高于 EC 处理,并且浓度达到

表 2 有机肥浸提液对种子发芽及幼苗生长的影响

处理	浓度 (mg/L)	发芽率 (%)	鲜重 (g/株)	最大根长 (cm)	株高 (cm)
CK	0	90.00 ± 3.16a	0.98 ± 0.03d	15.58 ± 0.53d	15.90 ± 0.19d
EC	1.00	90.00 ± 4.47a	1.00 ± 0.06d	18.13 ± 0.78cd	17.55 ± 0.38c
	10.0	92.00 ± 3.74a	1.26 ± 0.05bc	21.03 ± 1.84c	17.88 ± 0.29c
	100	94.00 ± 4.00a	1.40 ± 0.05ab	22.13 ± 1.38bc	19.95 ± 0.56ab
	1000	92.00 ± 3.74a	1.47 ± 0.03a	19.45 ± 0.66cd	20.25 ± 0.48ab
EK	1.00	94.00 ± 4.00a	1.01 ± 0.03d	18.98 ± 1.19cd	17.30 ± 0.39c
	10.0	92.00 ± 4.90a	1.16 ± 0.07cd	22.15 ± 1.28bc	17.55 ± 0.31c
	100	90.00 ± 3.16a	1.48 ± 0.12a	25.03 ± 1.86b	19.58 ± 0.18b
	1000	90.00 ± 4.47a	1.56 ± 0.06a	33.78 ± 0.88a	21.10 ± 0.74a

注:EC 表示商品有机肥的浸提液;EK 表示厨余垃圾有机肥的浸提液。同列不同小写字母者表示差异显著($P < 0.05$)。下同。

表 3 有机肥浸提液对幼苗生理指标的影响

处理	浓度 (mg/L)	根系活力 [$\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$]	叶绿素含量 (SPAD 值)	丙二醛含量 (nmol/g)	过氧化氢酶活性 (U/g)	过氧化物酶活性 (U/g)	超氧化物歧化酶活性 (U/g)
CK	0	72.09 ± 11.21bcd	23.45 ± 2.51c	109.20 ± 23.06b	487.05 ± 30.88c	640.99 ± 47.47a	253.43 ± 52.87de
EC	1.00	70.62 ± 21.74bcd	29.60 ± 1.71b	166.04 ± 11.09a	499.08 ± 33.57c	642.37 ± 20.49a	206.28 ± 86.99e
	10.0	97.63 ± 15.96a	29.23 ± 0.64bc	168.82 ± 14.13a	502.71 ± 31.82bc	611.12 ± 52.50a	342.63 ± 35.79cd
	100	95.28 ± 3.33a	25.55 ± 0.83c	172.91 ± 34.79a	538.20 ± 21.45ab	524.67 ± 48.36b	461.14 ± 89.91bc
	1 000	66.70 ± 19.23cd	26.10 ± 1.80c	164.61 ± 18.24a	544.33 ± 11.46a	505.66 ± 57.89b	526.67 ± 102.55ab
EK	1.00	88.36 ± 10.94abc	31.30 ± 4.68ab	122.03 ± 20.23b	500.21 ± 26.93c	626.49 ± 35.56a	276.99 ± 13.51de
	10.0	91.23 ± 23.96a	33.45 ± 2.58a	109.88 ± 6.05b	505.04 ± 8.31bc	608.74 ± 83.27a	425.83 ± 114.78bc
	100	64.64 ± 4.03d	32.70 ± 0.84ab	126.89 ± 22.51b	498.45 ± 14.26c	636.72 ± 35.90a	500.52 ± 108.72ab
	1 000	58.35 ± 3.23d	30.75 ± 1.33ab	119.99 ± 23.83b	522.33 ± 15.72abc	628.63 ± 50.00a	604.75 ± 35.98a

注:单位 $\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 为 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 换算而来。

10.0 mg/L 后,处理间差异显著($P < 0.05$);含 EK 的处理丙二醛含量均显著低于 EC 处理($P < 0.05$);超氧化物歧化酶活性无显著差异($P > 0.05$)。

2.3 施肥对盆栽种植玉米植株生长和养分吸收的影响

由表 4 可知,与未施肥处理(CK)相比,施肥处理(100% COF、100% KOF、150% COF、150% KOF)玉米植株地径、株高、生物量以及 N、P、K 养分吸收量分别增加 17.9% ~ 30.4%、19.1% ~ 54.9%、6.6% ~ 116.9%、137.0% ~ 278.1%、

67.5% ~ 242.2%、87.0% ~ 154.7% (150% COF 处理株高除外),除 100% COF 株高和 150% COF 生物量外达到差异显著水平($P < 0.05$)。施用常规用量时,100% KOF 处理玉米株高显著高于 100% COF 处理($P < 0.05$),其他指标无显著差异($P > 0.05$);在 1.5 倍用量有机肥处理中,150% KOF 处理玉米的株高、生物量、养分吸收量均显著高于 150% COF 处理($P < 0.05$)。

2.4 施肥对盆栽种植玉米植株生理指标的影响

由表 5 可知,与对照相比,施肥玉米叶片叶绿素

表 4 施肥对玉米植株生长和养分吸收的影响

处理	地径 (cm)	株高 (cm)	生物量 (g/株)	N 吸收量 (mg/株)	P 吸收量 (mg/株)	K 吸收量 (mg/株)
CK	7.66 ± 0.38b	70.70 ± 8.55b	11.03 ± 1.59c	121.21 ± 8.07d	15.60 ± 0.71d	224.40 ± 17.75c
100% COF	9.64 ± 0.27a	84.20 ± 13.41b	18.48 ± 3.12b	319.77 ± 33.34bc	44.14 ± 3.99b	501.10 ± 51.21ab
100% KOF	9.03 ± 0.42a	109.51 ± 13.32a	19.48 ± 3.70b	361.78 ± 22.34b	40.06 ± 1.56b	441.58 ± 28.48b
150% COF	9.16 ± 0.34a	45.80 ± 7.22c	11.76 ± 3.02c	287.22 ± 30.94c	26.13 ± 2.57c	419.72 ± 59.83b
150% KOF	9.99 ± 0.39a	107.66 ± 9.71a	23.92 ± 1.96a	458.18 ± 15.64a	53.38 ± 2.62a	571.61 ± 34.00a

含量显著提高 25.0% ~ 52.3% ($P < 0.05$), 并且在 1.5 倍用量 KOF 时达到最高水平; 施用 COF 对玉米根系活力无显著影响 ($P > 0.05$), 但施用 KOF 处理的根系活力显著增加 ($P < 0.05$)。同等用量下, 施用 KOF 处理的叶绿素含量和根系活力均高于施用 COF 处理, 并且在 1.5 倍用量时差异显著 ($P < 0.05$)。

2.5 施肥对土壤理化性质的影响

由表 6 可知, 与 CK 相比, 施用 2 种有机肥后, 土壤 pH 值显著增加 2.6% ~ 17.0% ($P < 0.05$); 各处理的有机质和速效钾含量无显著差异 ($P > 0.05$)。施用常规用量时, 土壤碱解氮、有效磷和电导率表现为 100% COF > 100% KOF > CK, 水溶性

表 5 施肥对玉米植株叶绿素含量和根系活力的影响

处理	叶绿素含量 (SPAD 值)	根系活力 [$\mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$]
CK	$22.28 \pm 1.63\text{c}$	$119.80 \pm 16.22\text{b}$
100% COF	$29.79 \pm 0.84\text{b}$	$157.70 \pm 20.65\text{ab}$
100% KOF	$31.58 \pm 1.29\text{ab}$	$218.90 \pm 24.64\text{a}$
150% COF	$27.86 \pm 1.23\text{b}$	$101.00 \pm 24.30\text{b}$
150% KOF	$33.93 \pm 0.80\text{a}$	$202.10 \pm 25.22\text{a}$

盐含量为 100% KOF > 100% COF > CK。在同等施用量情况下, 施用 KOF 处理的碱解氮、有效磷、速效钾含量和电导率均低于施用 COF 处理 (除 100% KOF 处理的速效钾含量外), 并与 CK 无显著差异 ($P > 0.05$)。

表 6 不同处理下的土壤理化性质

处理	pH 值	有机质含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	有效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	电导率 ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	水溶性盐含量 (g/kg)
CK	$4.58 \pm 0.02\text{d}$	$22.96 \pm 0.33\text{a}$	$100.75 \pm 1.41\text{d}$	$14.78 \pm 0.25\text{c}$	$78.20 \pm 2.71\text{a}$	$13.29 \pm 0.79\text{c}$	$0.21 \pm 0.07\text{c}$
100% COF	$4.70 \pm 0.02\text{c}$	$23.50 \pm 0.15\text{a}$	$115.80 \pm 3.23\text{b}$	$17.81 \pm 0.67\text{ab}$	$71.00 \pm 5.09\text{a}$	$67.62 \pm 5.16\text{b}$	$0.25 \pm 0.11\text{bc}$
100% KOF	$5.33 \pm 0.01\text{a}$	$23.46 \pm 0.62\text{a}$	$105.27 \pm 1.19\text{cd}$	$14.91 \pm 0.80\text{c}$	$75.20 \pm 5.89\text{a}$	$17.66 \pm 0.50\text{c}$	$0.46 \pm 0.14\text{b}$
150% COF	$5.11 \pm 0.02\text{b}$	$23.36 \pm 0.38\text{a}$	$131.59 \pm 5.04\text{a}$	$18.99 \pm 0.94\text{a}$	$79.10 \pm 4.72\text{a}$	$125.90 \pm 11.74\text{a}$	$0.93 \pm 0.10\text{a}$
150% KOF	$5.36 \pm 0.01\text{a}$	$24.08 \pm 0.37\text{a}$	$109.78 \pm 1.41\text{bc}$	$16.57 \pm 0.29\text{bc}$	$70.40 \pm 3.63\text{a}$	$21.41 \pm 1.00\text{c}$	$0.86 \pm 0.35\text{a}$

2.6 施肥对土壤酶活性的影响

盆栽试验不同处理土壤 7 种水解酶活性如图 1 所示, 随着施肥量增加, 土壤 α -葡萄糖苷酶、纤维二糖水解酶和亮氨酸氨基肽酶活性无显著变化 ($P > 0.05$), β -葡萄糖苷酶、 β -木聚糖苷酶、 N -乙酰- β -氨基葡萄糖苷酶和酸性磷酸酶活性增强, 并且同等施用量情况下, 2 种有机肥处理的土壤酶活性无显著差异 ($P > 0.05$)。

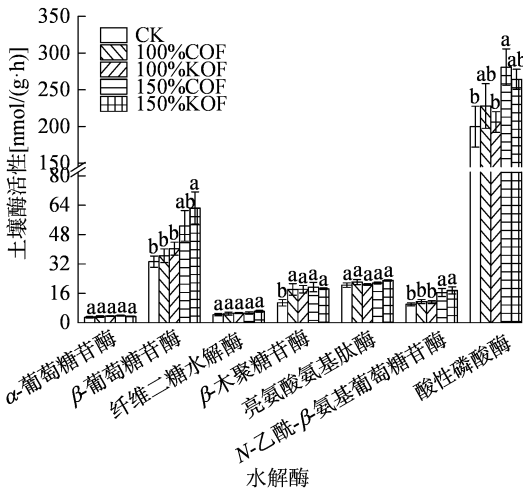


图1 不同处理土壤中的水解酶活性变化

3 讨论与结论

3.1 厨余垃圾有机肥对玉米生理生化特性的影响

种子发芽试验能快速检测外源因子对植株造成的影响^[17]。本研究中, 随着有机肥浸提液浓度的增加, 玉米种子发芽率无显著变化, 反而幼苗的鲜重、根长和株高增加。说明 KOF 不会抑制种子发芽和幼苗生长, 并且还能促进幼苗生长。逆境胁迫会破坏生物体内活性氧产生与消除之间的平衡, 当活性氧增多, 细胞膜发生过氧化作用形成丙二醛, 进而导致细胞膜的破坏; 丙二醛含量越高, 说明细胞受损程度愈深^[18]。植物体内的抗氧化酶, 如过氧化氢酶、超氧化物歧化酶和过氧化物酶等, 具有保护植物细胞膜质膜作用, 其活性的高低是衡量植物抗逆性强弱的重要指标^[19]。本研究中与 CK 相比, 添加 EC 后, 玉米幼苗丙二醛含量显著增加, 而用 EK 浸泡过的幼苗无显著变化; 进一步分析抗氧化酶活性, 发现添加 2 种有机肥浸提液均刺激玉米叶片过氧化氢酶和超氧化物歧化酶活性增强, 但添加 EC 显著抑制过氧化物酶活性, 而 EK 对过氧化物酶活性无显著影响。进一步证明, 添加 EK 不会对玉米

幼苗造成伤害。

植物根部的生长状况和活力水平会直接影响其地上部分的生长速度、养分吸收能力以及最终的产量和品质^[20],同时根系环境是植物遭受逆境胁迫时优先作出响应的区域^[21]。叶片叶绿素含量与植物光合作用及氮素营养密切相关^[22-23]。发芽试验中,添加一定浓度 EK 或者 EC 会提高玉米幼苗根系活力和叶绿素含量,类似的处理在盆栽试验也有同样效果。因此,玉米植株生长性状和养分吸收量均有不同程度提高。值得注意的是,同等用量时,施用 KOF 处理的玉米株高显著高于 COF 处理;并且 150% KOF 处理玉米的生长性状和养分吸收量均显著优于和对照处理,而 150% COF 呈现相反变化,可见常规施用 2 种有机肥对玉米生长均有促进作用,但过多施用 COF 明显抑制了玉米生长。这可能是因为 COF 原料主要为豆粕,易吸水,导致土壤透气性降低,对植物造成负面影响;而 KOF 的生成原料不仅种类丰富,它还经历了常规发酵罐发酵处理和黑水虻肠道二次发酵,腐熟程度高,肥效更佳,物理属性更优^[12,24]。因此,1.5 倍施用量 KOF 不仅没有抑制玉米生长,反而提高了其生理活性,刺激生长和养分吸收。由此推测,短期内适当增加 KOF 施用量或长期施用 KOF 造成一定量肥料累积,也不会影响植株的生长,但其施用阈值以及长期影响还需进一步探究。

3.2 厨余垃圾有机肥对土壤养分和酶活性的影响

腐熟的有机肥富含腐殖质,能提高土壤缓冲性,吸附 H^+ 和 Al^{3+} ,改良酸化土壤;其所富含的碱性物质可以中和土壤中过多的酸性物质,减少硝化产酸,以此有效阻控土壤酸化^[25]。本研究发现,与 CK 相比,施用有机肥后,土壤 pH 值有不同程度的提高,尤其是施用 KOF 后,达到显著水平。Lee 等也发现在旱地土壤和稻田中施用垃圾堆肥产品均能够提高土壤 pH 值,缓解土壤酸化^[26],KOF 也有类似功效。有机肥中的有机质成分可补充、更新土壤中的有机物料,刺激微生物生长,增强土壤生物活性;其还富含有益物质,能为农作物提供丰富的矿物质元素和生长因子;并且有机肥肥效较化肥长,能持续供肥^[27-29]。王站付等研究发现,施用厨余垃圾有机肥后,土壤有机质和速效钾等养分含量均显著增加^[8]。本试验中,施用 KOF 和 COF 后,土壤碱解氮和有效磷含量均有不同程度增加,尽管处理间有机质和速效钾含量未达到显著水平,考虑到施肥

处理植株 N、P、K 吸收量总和较 CK 增加了 2.3 ~ 3.0 倍(KOF)和 2.0 ~ 2.4 倍(COF),推测 2 种有机肥都能快速分解并被植物吸收,并且施用 KOF 时,植株养分吸收效率更高。当土壤可溶性盐含量处于较高水平时,植物根系呼吸困难、吸水能力下降,造成植物体内缺水,影响植物生长发育甚至致死。因此,其含量对评估土地肥力、预测土地盐渍化等方面都有较大的实际意义^[30]。本试验采用了 2 种方法评估土壤盐分水平,结果表明施肥后土壤电导率(17.66 ~ 67.62 $\mu S/cm$)低于 2.0 mS/cm,含盐量(0.25 ~ 0.93 g/kg)小于 2 g/kg,属于低盐土;并且同等肥力下,施用 KOF 的电导率显著低于 COF,土壤水溶性盐含量无显著差异。由此可见,施用供试 KOF 能改善土壤肥力,对土壤盐含量的影响同普通商品有机肥,然而本研究试验周期较短,后期应该开展长期监测试验。

土壤酶作为土壤环境中生物化学反应的催化剂,是土壤生物过程的主要调节者,对土壤有机物质分解、养分循环等起着关键作用,其活性强弱直接影响物质转化循环速率^[31]。例如,N-乙酰- β -氨基葡萄糖苷酶参与土壤中氮转化,磷酸酶与土壤磷素循环有关^[32]。大量研究表明,以土壤酶活性高低来评价土壤肥力是完全可行的,并且酶活性变化比土壤其他理化特性反应更灵敏^[33]。姚丽娟等通过检测土壤过氧化氢酶、磷酸酶和脲酶活性来剖析设施连作西瓜土壤微生态环境变化,明晰设施西瓜连作障碍成因^[34];吴金平等通过测定土壤酶活性,发现了湖北地区甘蓝生产的推荐施肥模式^[35]。本研究中施用 KOF 后,土壤 β -葡萄糖苷酶、 β -木聚糖苷酶、N-乙酰- β -氨基葡萄糖苷酶和酸性磷酸酶活性增强,并且同等施用量下,2 种有机肥处理间无显著差异。由此可知,KOF 与普通商品有机肥具有相似功能,施用 KOF 能在短时间内补充土壤有机物,加快微生物繁殖、加速代谢,促进各种酶促反应发生,这与之前的土壤培养研究结果^[12]一致。

综上,厨余垃圾有机肥能改善土壤肥力,提高了碳、氮和磷转化的相关水解酶活性,增加玉米的根系活力和叶绿素含量,有利于作物光合作用,最终促进玉米植株生长和吸收养分,与常规商品有机肥功效相似,有望发展为优质商品有机肥。然而,由于本试验为盆栽试验,周期短,玉米未结穗,后期还需继续开展小区、大田试验,完善种植试验、扩大种植面积,并对种植区产量、作物品质和土壤肥力

进行长期观察监测,以此进一步验证该有机肥的肥效和安全性,为厨余垃圾有机肥的推广应用和商品化提供理论依据和应用基础。

参考文献:

- [1] 2020 年大中型城市固体废物环境污染防治年度报告[R]. 北京:中华人民共和国生态环境部,2020.
- [2] Liu M, Ogunmoroti A, Liu W, et al. Assessment and projection of environmental impacts of food waste treatment in China from life cycle perspectives[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 807: 150751.
- [3] Du C Y, Abdullah J J, Greetham D, et al. Valorization of food waste into biofertiliser and its field application[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 187: 273–284.
- [4] 蓝俞静,刘玉德,张媛,等. 餐厨垃圾生物好氧堆肥的影响因素研究[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(增刊1): 30–33.
- [5] 李鹏昊,姜铭北,姚燕来,等. 易腐垃圾的特点及资源化利用技术[J]. *浙江农业科学*, 2021, 62(10): 2095–2098, 2102.
- [6] Pazera A, Slezak R, Krzystek L, et al. Biogas in Europe: food and beverage (FAB) waste potential for biogas production[J]. *Energy & Fuels*, 2015, 29(7): 4011–4021.
- [7] 罗珈柠,郑思俊,王妍婷,等. 原料对餐厨垃圾堆肥产品的影响及其绿地应用适宜性分析[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(11): 4977–4983.
- [8] 王站付,邱韩英,陆利民,等. 餐厨垃圾堆肥产品施用对水稻产量及土壤环境的影响[J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(23): 93–97.
- [9] 朱琳,安立超,戴昕,等. 餐厨垃圾生物有机肥对贫瘠黄褐土改良的研究[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(8): 1954–1963.
- [10] 焦玉洁. 紫茎泽兰的野外就近无害化处理与肥料资源化利用[D]. 重庆:西南大学,2021: 25–28.
- [11] 王亚麒,魏立本,易忠经,等. 烟末(梗)有机肥对 3 种不同类型作物土壤养分及产量和品质的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2019(5): 96–103.
- [12] 刘美灵,汪益民,金文豪,等. 厨余垃圾有机肥对土壤微生物活性及功能的影响[J]. *环境科学*, 2024, 45(1): 530–542.
- [13] 张志良,瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社,2003: 114–115.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京:中国农业出版社,2000: 263–270.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2000: 431–472.
- [16] Chen J H, Chen D, Xu Q F, et al. Organic carbon quality, composition of main microbial groups, enzyme activities, and temperature sensitivity of soil respiration of an acid paddy soil treated with biochar[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2019, 55(2): 185–197.
- [17] 焦玉洁,桑宇杰,杨磊,等. 新鲜和腐熟紫茎泽兰对三种茄科蔬菜生理和辣椒产量品质的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(5): 874–884.
- [18] 李强,靳书滨,陈晶,等. 刺五加注射液预处理在大鼠缺血血再灌注损伤中的抗氧化作用及其对肿瘤坏死因子- α 的影响[J]. *海南医学*, 2015, 26(7): 941–943.
- [19] Gill S S, Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2010, 48(12): 909–930.
- [20] 毛齐正,杨喜田,苗蕾. 植物根系构型的生态功能及其影响因素[J]. *河南科学*, 2008, 26(2): 172–176.
- [21] 马献发,宋凤斌,张继舟. 根系对土壤环境胁迫响应的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(5): 44–48.
- [22] Zuo L H, Zhang S, Liu Y C, et al. The reason for growth inhibition of *Ulmus pumila* ‘jinye’: lower resistance and abnormal development of chloroplasts slow down the accumulation of energy[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, 20(17): 4227.
- [23] 张丽梅,陈志峰,王彬,等. 莲雾遮光期叶片 SPAD 值和 C、N、P、K 含量的变化及其规律[J]. *热带作物学报*, 2013, 34(10): 1977–1981.
- [24] 尹靖凯,龚小燕,孙丽娜,等. 黑水虻对餐厨垃圾养分转化研究[J]. *中国农业科技导报*, 2021, 23(6): 154–159.
- [25] Cai Z J, Wang B R, Zhang L, et al. Striking a balance between N sources: mitigating soil acidification and accumulation of phosphorous and heavy metals from manure[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 754: 142189.
- [26] Lee C H, Park S J, Hwang H Y, et al. Effects of food waste compost on the shift of microbial community in water saturated and unsaturated soil condition[J]. *Applied Biological Chemistry*, 2019, 62(1): 36.
- [27] Canali S, Di Bartolomeo E, Trinchera A, et al. Effect of different management strategies on soil quality of *Citrus* orchards in Southern Italy[J]. *Soil Use and Management*, 2009, 25(1): 34–42.
- [28] Kuziemska B, Wysokiński A, Trbicka J. The effect of different copper doses and organic fertilisation on soil's enzymatic activity[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2020, 66(2): 93–98.
- [29] Tabaxi I, Kakabouki I, Zisi C, et al. Effect of organic fertilization on soil characteristics, yield and quality of *Virginia* tobacco in Mediterranean area[J]. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 2020: 610.
- [30] 张海欧. 浅析中国盐渍土分布及演变特征[J]. *农业与技术*, 2022, 42(5): 104–107.
- [31] 邱莉萍,刘军,王益权,等. 土壤酶活性与土壤肥力的关系研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(3): 277–280.
- [32] 魏哈梅,郑粉莉,赵苗苗,等. CO₂ 浓度升高、增温和冬小麦种植对土壤酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(11): 2971–2978.
- [33] Alkorta I, Aizpurua A, Riga P, et al. Soil enzyme activities as biological indicators of soil health[J]. *Reviews on Environmental Health*, 2003, 18(1): 65–73.
- [34] 姚丽娟,田春丽,王立河,等. 设施西瓜连作土壤生化性质及微生物群落变化[J]. *中国土壤与肥料*, 2024(3): 70–78.
- [35] 吴金平,周洁,矫振彪,等. 不同施肥方式对甘蓝生长、产量、品质及土壤酶活性的影响[J]. *中国瓜菜*, 2023, 36(9): 75–79.