

生活垃圾热水解产物对土壤养分和酶活性的影响

王振华, 吴娟, 宋建国, 白洁

引用本文:

王振华, 吴娟, 宋建国, 等. 生活垃圾热水解产物对土壤养分和酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(7): 1584-1590.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1399>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

施肥处理对黄土丘陵区农田土壤酶活性和水溶性有机碳、氮的影响

丁少男, 薛蕙, 刘国彬

农业环境科学学报. 2015, 34(11): 2146-2154 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.11.016>

生物炭折流湿地对生活污水的净化效果

王若凡, 汪文飞, 王煜钧, 孙鹤洲, 刘傲展

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 2001-2007 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0258>

不同麦秸还田模式对稻田土壤微生物活性和微生物群落组成的影响

王宁, 罗佳琳, 赵亚慧, 李勇, 于建光

农业环境科学学报. 2020, 39(1): 125-133 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0956>

纳米银对四种不同性质土壤微生物量及酶活性的影响

舒昆慧, 张丽, 伍玲丽, 司友斌, 刘沁雪

农业环境科学学报. 2018, 37(5): 907-914 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1325>

高效氟吡甲禾灵对潮土微生物呼吸及酶活性的影响

程亚南, 王振东, 任秀娟, 郭彦玲, 刘根源

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 1026-1033 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1096>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王振华, 吴娟, 宋建国, 等. 生活垃圾热水解产物对土壤养分和酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(7): 1584–1590.

WANG Z H, WU J, SONG J G, et al. Effect of a domestic waste thermal hydrolysate on soil nutrients and enzymatic activity[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(7): 1584–1590.



开放科学 OSID

生活垃圾热水解产物对土壤养分和酶活性的影响

王振华^{1,2}, 吴娟³, 宋建国⁴, 白洁^{1*}

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 烟台市环境卫生管理中心, 山东 烟台 264000; 3. 青岛农业大学资源与环境学院, 山东 青岛 266109; 4. 烟台大学材料与工程学院, 山东 烟台 264005)

摘要: 生活垃圾分类背景下有机组分的高效处理与资源化利用是一个亟待解决的问题。为阐明生活垃圾热水解营养土对土壤营养成分和蔬菜生长的影响和作用机制, 采用盆栽试验研究了营养土对油麦菜种植过程中土壤养分和酶活性的影响。结果表明, 施用不同比例的营养土后, 在油麦菜的各生长阶段, 施加营养土的土壤中碱解氮含量均高于未施用的对照组, 营养土施用量越大, 碱解氮含量越高; 土壤中速效磷总体呈先升高后降低的趋势, 在油麦菜种植后 10~30 d 含量均较高; 速效钾最高值为 312.18 mg·kg⁻¹, 出现在营养土与土壤质量比 1:3 的处理(30 d); 各处理中土壤过氧化氢酶、脲酶和蔗糖酶活性均显著高于对照组, 并随施用量的增加而增加; 但施用营养土处理组磷酸酶活性与对照组的差异不显著。营养土的施加能显著增加土壤碱解氮的含量, 提高土壤中过氧化氢酶活性、脲酶活性和蔗糖酶活性, 提高了土壤的肥力和活性, 可有效促进植物的生长。

关键词: 生活垃圾; 热水解; 营养土; 土壤肥力; 酶活性

中图分类号: S158.3; X799.3; S636.9 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)07-1584-07 doi:10.11654/jaes.2020-1399

Effect of a domestic waste thermal hydrolysate on soil nutrients and enzymatic activity

WANG Zhenhua^{1,2}, WU Juan³, SONG Jianguo⁴, BAI Jie^{1*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Environmental Sanitation Management Center of Yantai, Yantai 264000, China; 3. College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 4. School of Environmental and Material Engineering, Yantai University, Yantai 264005, China)

Abstract: Given the background of household waste classification, efficient disposal and resource utilization of organic components is an urgent problem. To clarify the effect and mechanism of thermally hydrolyzed vegetative soil of domestic waste on soil nutrient composition and vegetable growth, a pot experiment was used to investigate the effects of nutrient soil produced by the pyrohydrolysis of domestic waste on soil nutrients and enzyme activity during the planting of rapeseed. The results showed that the available nitrogen content in soil containing different nutrient soil proportions was higher than in the blank group at each rapeseed growth stage. The available nitrogen content increased with increasing nutrient soil application. The available phosphorus content was higher in the soil from 10 d to 30 d, with an initially rising then declining trend. The maximum value of available potassium was 312.18 mg·kg⁻¹ occurring in nutrient soil with a soil mass ratio of 1:3 applied at 30 d. The catalase, urease, and sucrase activities in soil were significantly higher than in CK and tended to increase with an increase in nutrient soil application. However, there was no significant difference in phosphatase activity between the treatment and control groups. Adding nutrient soil can increase the content of alkali-hydrolyzed nitrogen and improve catalase, urease, and sucrase activities in soil. Thus, it could improve soil fertility and enzyme activity, effectively promoting plant growth.

Keywords: domestic garbage; pyrohydrolysis; nutrient soil; soil fertility; enzymatic activity

收稿日期: 2020-12-03 录用日期: 2021-02-19

作者简介: 王振华(1979—), 男, 山东荣成人, 博士生, 高级工程师, 主要从事有机质固体废弃物资源化利用研究。E-mail: :wzh2085@stu.ouc.edu.cn

*通信作者: 白洁 E-mail: 461519761@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(62072391); 山东省自然科学基金项目(ZR2019MF060)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (62072391); The Natural Science Foundation of Shandong Province, China (ZR2019MF060)

目前我国已全面开展城市生活垃圾分类,生活垃圾中有机组分可占其质量的37%~62%^[1],将其高效快速处理及资源化利用十分必要。堆肥技术是《农村生活垃圾处理技术导则》中推荐的有机固体废物处理及资源化的主要技术之一,但具有腐熟时间长、臭气二次污染等一系列问题。热水解工艺是在密闭容器中通入一定温度和压力的蒸汽,将垃圾中的有机组分在60 min内腐熟降解,同时杀灭虫卵、灭活种子,可实现有机固体废物的快速减量化和无害化,与好氧堆肥技术相比用时短、环境友好,具备较大优势。热水解产物富含有机质和营养元素,可增加土壤有机质,对改善土壤理化性质有着至关重要的作用^[2-5],具备明显的资源化利用前景。

国内已有少数学者开展了生活垃圾中有机组分的热水解技术研究。郭淑青等^[6]将木质纤维类废物在较高温度(177℃)下进行热水解,得到的产物营养元素丰富,可安全应用于农业生产中,但其热水解温度过高,能耗大,在实际生产中难以实现。李海云等^[7]考察了生活垃圾热水解温度对产物蛋白质含量的影响,发现在70~110℃范围内,蛋白质浓度随着热水解温度升高不断增加。李甲亮等^[8]依托滨州市生活垃圾处理场热水解车间,采集营养土产品进行了肥效和安全性试验研究,发现热水解产物肥效显著且安全性较高。由此可见,有机类固体废物热水解工艺已得到较高认可,但目前对热水解产物施用后的土壤和作物响应、土壤肥力及生物特性、作物产量及品质等均缺少系统研究。本研究在烟台市生活垃圾处理场热水解工段采集热水解产物,通过盆栽试验考察了产物施用对作物品质和土壤养分及生物活性的影响,期为生活垃圾分类背景下有机组分的资源化利用提供理论参考和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试生活垃圾热水解营养土取自烟台市生活垃圾处理场热水解工段(反应温度110℃,反应时间40 min),样品经过筛分(2 cm)后取筛下物备用。供试土

壤取自青岛市城阳区周边农田耕层土壤(0~20 cm),经自然风干、研磨过筛(2 mm)后备用。供试土壤和营养土的基本理化性质见表1。盆栽试验选用北京宜才园农业科技推广有限公司选育的油麦菜种(油麦王,商标注册号3725810)。

1.2 盆栽试验设置与样品采集

盆栽试验分为4个处理组和1个对照组(CK),每组3个平行。4个处理组营养土与土壤质量比分别为1:14、1:6、1:4和1:3,分别标记为F1、F2、F3和F4。将营养土和土壤按照设定比例分别混合均匀,取8 kg置于塑料花盆中(上口直径29.5 cm,下口直径25.5 cm,高22 cm,盆底有洞),每盆定植15株油麦菜,待油麦菜长出两片叶子时,间苗,每盆保留9株。盆栽置于人工温室,恒温26℃,根据土壤的干湿程度进行浇水,各处理的浇水量保持一致。油麦菜种植后在第0、10、20、30、40 d采集土壤样品,测定新鲜土壤样品的酶活性和风干土壤样品的养分含量。在种植后第40 d收获油麦菜,并测定其根长、叶长、叶宽和鲜质量等生长指标。

1.3 样品测定方法

土壤pH、碱解氮、速效磷、速效钾和有机质分别采用电位法、碱解扩散法、碳酸氢钠法、醋酸铵-火焰光度计法和重铬酸钾容量法测定^[9]。脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶和磷酸酶活性分别采用苯酚-次氯酸钠比色法、高锰酸钾容量法、3,5-二硝基水杨酸比色法和磷酸苯二钠比色法测定^[10]。

1.4 数据处理

用Microsoft Excel 2010和SPSS 20统计分析软件对于试验数据进行整理计算和分析,用OriginPro 8绘图软件绘图。

2 结果与讨论

2.1 营养土对土壤中养分的影响

2.1.1 营养土对土壤碱解氮含量的影响

垃圾热水解营养土对土壤碱解氮含量的影响如图1所示。土壤碱解氮是植物能够直接或间接吸收与利用的有效氮,很大程度上体现了土壤供应氮素养

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of tested soil

指标 Index	pH	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Available N/(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K/(mg·kg ⁻¹)
土壤	6.76±0.32	15.36±1.02	47.82±2.85	30.56±2.27	185.58±14.65
营养土	7.01±0.29	144.79±9.56	7 703.70±102.3	874.07±20.79	1 162.96±38.46

分的状况。与CK相比,施加营养土均不同程度提高了土壤碱解氮含量,其变化规律为F4>F3>F2>F1>CK;在第10 d之后除CK外,各处理土壤中碱解氮的含量有明显跃升,在第30 d时达到最大值,CK、F1、F2、F3、F4 碱解氮的数值分别达到 56.78、77.36、82.37、97.94 mg·kg⁻¹ 和 114.14 mg·kg⁻¹, F1、F2、F3 和 F4 处理比 CK 处理高出 36.25%、45.07%、72.49% 和 101.02%。营养土的施加对处理 F1、F2、F3、F4 的碱解氮含量起到积极作用^[11],第40 d比第30 d除CK外,各处理碱解氮含量略有下降,这是因为碱解氮含量随着生育期推进会逐渐降低^[12]。

2.1.2 营养土对土壤速效磷含量的影响

各试验处理对土壤速效磷含量的影响如图2所示。在油麦菜生长期内的各时间段,施加营养土的土壤速效磷含量均大于CK处理,说明施加营养土能提高土壤中速效磷含量。不同处理土壤中速效磷含量总体呈先上升后下降的趋势,第10~30 d较高,第40 d各施营养土处理比CK分别高21.16%、10.26%、

23.08%、46.16%,与第0 d时相同处理土壤中速效磷含量差别较小。同一处理第40 d速效磷的含量低于第0 d含量,主要由于在成熟期油麦菜对养分的需求增加^[13]。

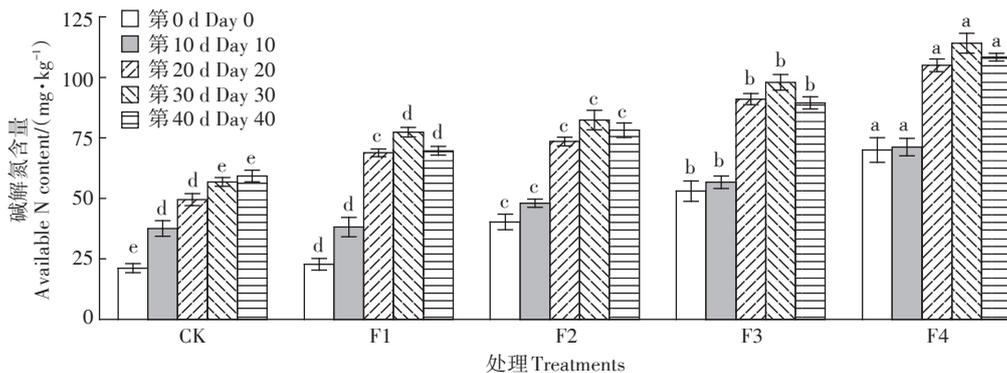
2.1.3 营养土对土壤速效钾含量的影响

各试验处理对土壤速效钾含量的影响如图3所示。在油麦菜40 d的生长期,相同天数,施加营养土的处理土壤中速效钾含量均大于CK处理,说明施营养土能提高土壤中速效钾的含量;不同处理土壤中速效钾含量呈现出0~10 d降低,10~30 d升高,30 d后降低的趋势。速效钾最大值出现在30 d时的F4处理,最大值为312.18 mg·kg⁻¹,在20~30 d时增加最为显著,最大增加量为F3处理,比20 d时增加了155%,出现这种现象说明营养土的投加可以促进速效钾的有效产生^[14]。

2.2 营养土对土壤酶活性的影响

2.2.1 营养土对土壤过氧化氢酶活性的影响

土壤酶主要来自土壤微生物和植物根系,而微生物和植物生长状况均与土壤肥力特征关系密切。施



不同字母表示相同天数不同处理间差异显著性($P<0.05$)。下同
Different letters indicate the significant difference among different treatments in the same days ($P<0.05$). The same below

图1 各处理对土壤中碱解氮含量的影响

Figure 1 Effects of various treatments on the content of available N in soil

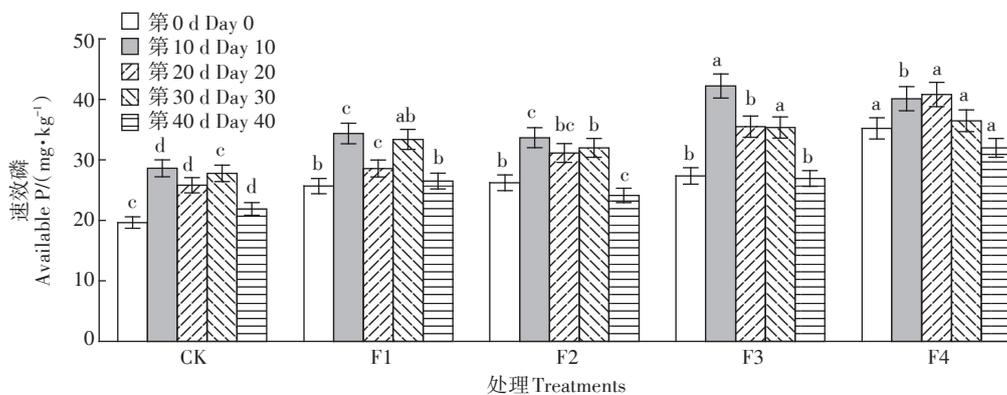


图2 各处理对土壤中速效磷含量的影响

Figure 2 Effects of various treatments on the content of available P in soil

加营养土对土壤过氧化氢酶活性的影响如图4所示。过氧化氢酶参与土壤中的微生物物质代谢,促进土壤和生物体内过氧化氢的分解,解除呼吸过程产生的过氧化氢对植物的危害^[15-16]。不同处理土壤中过氧化氢酶活性在0~20 d呈上升趋势,且增加显著,此时油麦菜生长迅速,各处理在第20 d时土壤过氧化氢酶活性均最高,最大值出现在F4处理,比同天数CK高出77.78%;40 d时不同处理土壤中过氧化氢酶活性呈现F3>F2>F1>F4>CK的规律,各处理土壤中过氧化氢酶活性均大于CK处理,且营养土施加量越高的处理,土壤过氧化氢酶活性越高,说明施加该营养土能有效提高土壤过氧化氢酶活性。

2.2.2 营养土对土壤脲酶活性的影响

施加营养土对土壤中脲酶活性的影响如图5所示。脲酶能水解有机物分子中的肽键,其活性是对土壤有机态氮转换成有效态氮的能力的有效反映^[17-18]。0~30 d不同处理土壤中脲酶活性增长显著,在第10 d不同处理下脲酶活性较第0 d分别增加了96.9%、61.31%、101.25%、124.76%、131.65%,油麦菜在30 d前生长旺盛,在30~40 d不同处理土壤中脲酶活性虽

出现不同程度的下降,但40 d时不同处理土壤中脲酶活性仍远高于0 d时土壤中脲酶活性,说明不同处理土壤中脲酶活性随该营养土的施加量的增加而上升,脲酶的增加加速了土壤中尿素的转化,增加土壤中可供作物利用的氮素,促进作物生长。

2.2.3 营养土对土壤蔗糖酶活性的影响

施加营养土对土壤中蔗糖酶活性的影响如图6所示。蔗糖酶可促进蔗糖向单糖的转化^[19],提供给土壤微生物活动能量^[20-21]。在油麦菜生长期,各处理土壤中蔗糖酶活性均大于CK处理,说明该营养土有提高土壤中蔗糖酶活性的作用,F1、F2、F3、F4在0~10 d蔗糖酶活性较CK处理显著增加,随营养土施加量的增加,第10 d蔗糖酶活性比第0 d分别增加24.7%、45.3%、62.7%、60.9%,除CK处理外,各不同处理的峰值期均出现在第10 d,此时油麦菜快速生长,在第10 d后不同处理土壤中蔗糖酶活性均出现下降,但都高于相同天数的CK处理。第40 d时,蔗糖酶活性最大值为F4处理的 $37.55 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,比CK高44.12%。说明施加该营养土在初期能显著提高土壤中蔗糖酶活性。

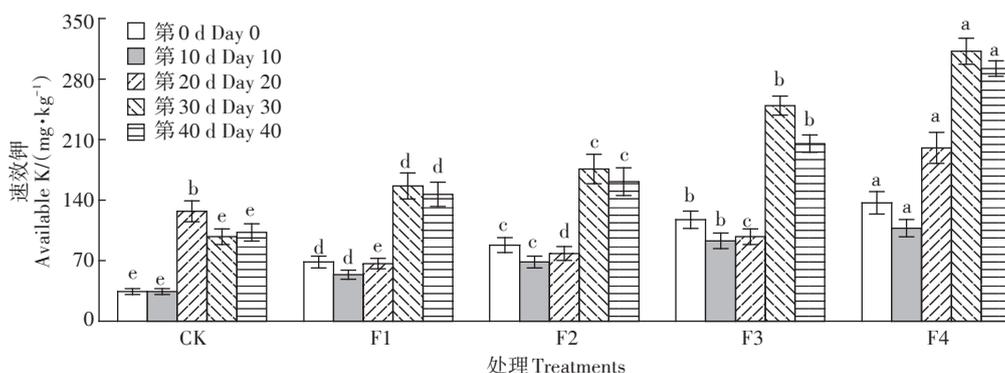


图3 各处理对土壤速效钾含量的影响

Figure 3 Effects of various treatments on the content of available K in soil

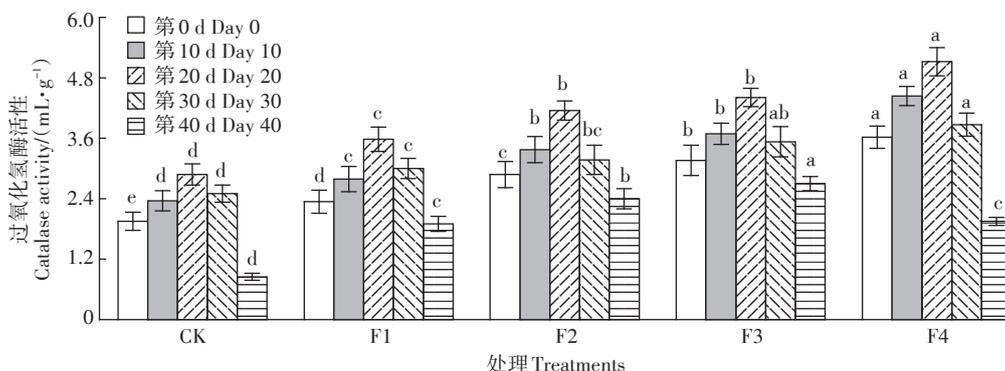


图4 各处理对土壤中过氧化氢酶活性的影响

Figure 4 Effects of various treatments on catalase activity in soil

2.2.4 营养土对土壤磷酸酶活性的影响

磷酸酶与土壤中磷的转化密切相关^[15],施加营养土对土壤中磷酸酶活性的影响如图7所示。盆栽油麦菜经过40 d的生长期,不同处理的土壤磷酸酶活性变化趋势相似,呈现出在0~30 d增加,在30~40 d降低的趋势。在0~30 d不同处理土壤中磷酸酶活性均处于增加状态,在30 d时达到峰值期,最大值出现在F2处理,为5.93 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,比CK处理高28.52%,各处理

磷酸酶活性差别较小,在20~30 d不同处理土壤中磷酸酶活性增加最显著。在相同天数下,不同处理土壤中磷酸酶活性差异较小,说明在油麦菜生长期,不同施营养土处理土壤供给有效磷的强度不同,但是各处理土壤中酶活性差别较小。

2.3 土壤养分与酶活性相关性分析

土壤养分和土壤中酶活性的相关性分析如表2所示。除磷酸酶外,土壤养分与酶活性之间存在正相

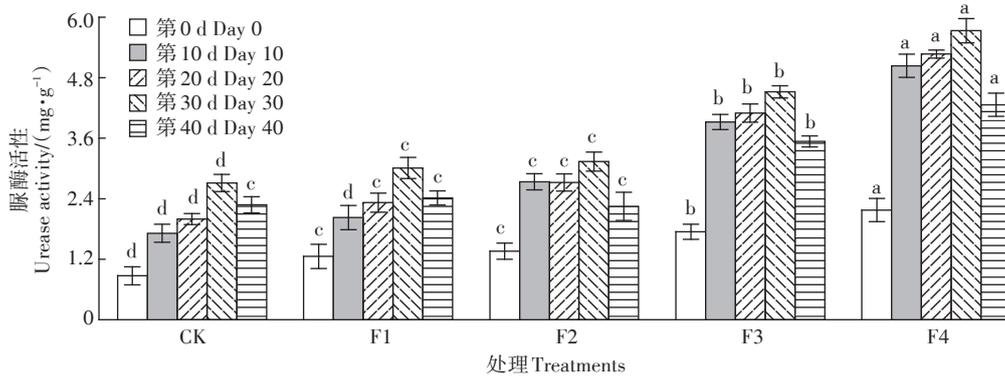


图5 各处理对土壤中脲酶活性的影响

Figure 5 Effects of various treatments on urease activity in soil

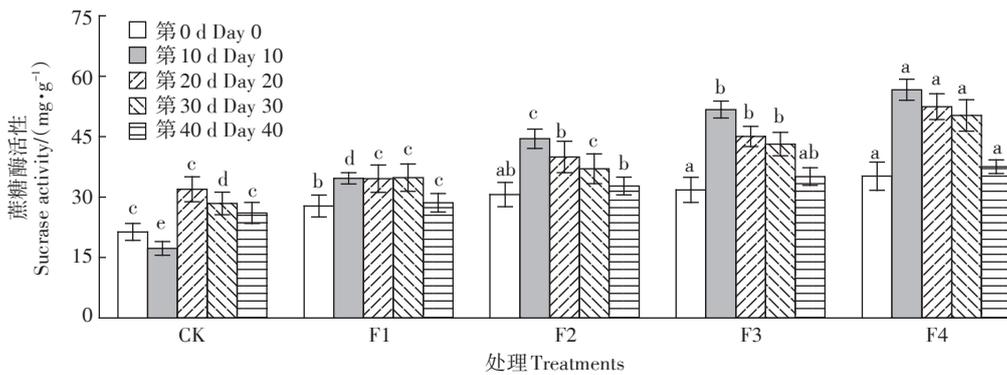


图6 各处理对土壤中蔗糖酶活性的影响

Figure 6 Effects of various treatments on sucrase activity in soil

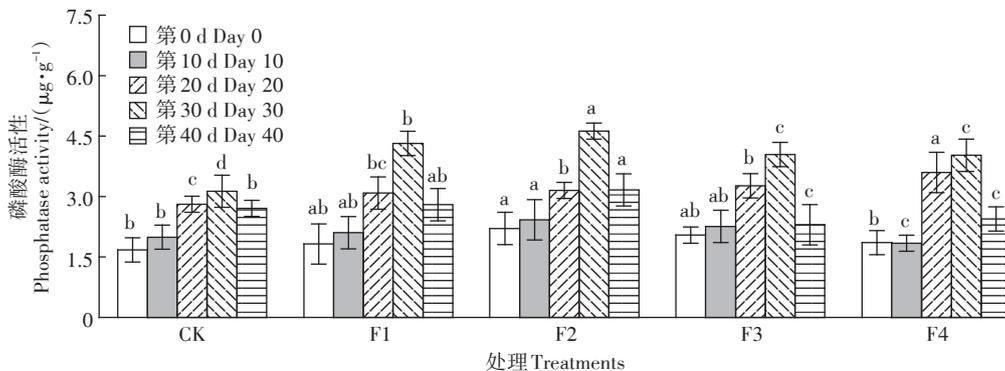


图7 各处理对土壤中磷酸酶活性的影响

Figure 7 Effects of various treatments on phosphatase activity in soil

关,施该营养土后,土壤养分与酶活性之间存在相互促进作用,其中过氧化氢酶与碱解氮和速效钾之间相关性极显著,与速效磷相关性显著;脲酶与碱解氮相关性显著,与速效钾之间相关性极显著,与速效磷不存在相关性;蔗糖酶与土壤养分的相关性规律与过氧化氢酶的规律一致,磷酸酶与土壤养分不具有相关性。研究表明,土壤肥力水平在很大程度上受土壤酶影响^[22]。酶是土壤生态系统生物地球化学循环过程的重要驱动力,在土壤有机质转化、养分释放和肥力维持等方面具有不可替代的作用^[23]。施加营养土提高了土壤中的过氧化氢酶、脲酶和蔗糖酶等多种酶的活性,对土壤中养分的转化、有效性的提高有密切的关系。作为土壤质量的重要指示,土壤酶活性可以作为衡量土壤肥力的指标^[22],被广泛用于施肥措施等对土壤营养物质循环和土壤肥力状况影响的评价。

2.4 施垃圾热水解营养土对油麦菜生长特征的影响

施垃圾热水解营养土对油麦菜生长指标的影响如表3所示。随着营养土施加量的增加,油麦菜的叶长、叶宽和鲜质量增加,但是对油麦菜根长的影响不显著。F1与CK相比对油麦菜叶长的影响无显著性差异,F2、F3、F4与CK相比显著增加了油麦菜的叶长,分别增加了5.89%、8.86%和17.91%;与CK相比,F1、F2、F3、F4处理均显著增加了油麦菜的叶宽和鲜质量。其中F4处理相比CK使油麦菜的叶宽和鲜质

量分别增加了28.13%和57.69%。营养土施加比例的提高,提高了土壤中供植物所需要的养分含量,增加了土壤酶活性,从而增加了油麦菜产量。

3 结论

(1)施加生活垃圾热水解后的营养土可以提高油麦菜种植中土壤的碱解氮、速效磷和速效钾含量,其中对碱解氮的含量增加显著。

(2)施加生活垃圾热水解后的营养土能提高土壤中过氧化氢酶活性、脲酶活性和蔗糖酶活性,对土壤磷酸酶活性无显著影响。

(3)相关性分析表明,土壤中磷酸酶活性与土壤养分之间不具有相关性,过氧化氢酶、脲酶和蔗糖酶活性与土壤养分存在正相关。

(4)施加生活垃圾热水解营养土能增加油麦菜的叶长、叶宽和鲜质量,具备提升作物产量和品质的潜在应用前景。

参考文献:

- [1] 王向会,李广魏,孟虹,等.国内外餐厨垃圾处理状况概述[J].环境工程,2005(2):41-43. WANG X H, LI G W, MENG H, et al. Discussion on treatment status of food residue[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2005(2):41-43.
- [2] 赵业婷,常庆瑞,李志鹏,等.1983—2009年西安市郊区耕地土壤有机质空间特征与变化[J].农业工程学报,2013,29(2):132-140. ZHAO Y T, CHANG Q R, LI Z P, et al. Spatial characteristics and changes of soil organic matter for cultivated land in suburban area of Xi'an from 1983 to 2009[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(2):132-140.
- [3] AL-TAEY D K A, ALAZAWI S S M, AL-SHAREEFI M J H, et al. Effect of saline water, NPK and organic fertilizers on soil properties and growth, antioxidant enzymes in leaves and yield of lettuce (*Lactuca sativa* var. Parris Island)[J]. *Research on Crops*, 2018, 19(3):441-449.
- [4] 王子腾,耿元波,梁涛,等.减施化肥和配施有机肥对茶园土壤养分及茶叶产量和品质的影响[J].生态环境学报,2018,27(12):2243-2251. WANG Z T, GENG Y B, LIANG T, et al. Effects of reducing

表2 土壤养分和土壤酶活性之间的相关性

Table 2 Correlation between soil nutrients and soil enzyme activities

指标 Index	过氧化氢酶	脲酶	蔗糖酶	磷酸酶
碱解氮	0.999**	0.938*	0.997**	0.367
速效磷	0.948*	0.826	0.925*	0.445
速效钾	0.990**	0.968**	0.998**	0.269

注:**在 $P<0.01$ 相关性极显著,*在 $P<0.05$ 相关性显著。

Notes:** has an extremely significant correlation at $P < 0.01$, and * has a significant correlation at $P < 0.05$.

表3 各处理油麦菜生长指标

Table 3 Growth indexes of each treatment

处理 Treatment	根长 Root length/cm	根长增加幅度 Increase in root length/%	叶长 Leaf length/cm	叶长增加幅度 Increase in leaf length/%	叶宽 Leaf width/cm	叶宽增加幅度 Increase in leaf width/%	鲜质量 Fresh weight/g	鲜质量增加幅度 Increase in fresh weight/%
CK	6.65	—	15.80	—	1.60	—	1.82	—
F1	6.57	-1.20	15.93	0.82	1.67	4.38	2.02	10.99
F2	6.60	-0.75	16.73	5.89	1.75	9.38	2.42	32.97
F3	6.67	0.30	17.20	8.86	1.83	14.38	2.65	45.60
F4	6.70	0.75	18.63	17.91	2.05	28.13	2.87	57.69

- chemical fertilizer and organic fertilizer combination on tea garden soil and tea yield and quality[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(12):2243-2251.
- [5] 徐明岗, 卢昌艾, 张文菊, 等. 我国耕地质量状况与提升对策[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(7):8-14. XU M G, LU C A, ZHANG W J, et al. Situation of the quality of arable land in China and improvement strategy[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2016, 37(7): 8-14.
- [6] 郭淑青, 董向元, 肖云汉. 木质纤维类生物质催化湿解的实验研究[J]. 太阳能学报, 2008(4):476-481. GUO S Q, DONG X Y, XIAO Y H. Experimental study on lignocellulosic biomass by catalytic hydrothermal degradation[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2008(4): 476-481.
- [7] 李海云, 周焱, 单永辉, 等. 生活垃圾在不同湿解条件下蛋白质含量的动态分析研究[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(6):67-69. LI H Y, ZHOU Y, SHAN Y H, et al. Dynamic analysis on protein content in garbage under different conditions of wet solution[J]. *Environmental Science and Management*, 2015, 40(6):67-69.
- [8] 李甲亮, 杜文琪, 张鑫, 等. 城市生活垃圾RD湿解产物营养土的资源化利用[J]. 土壤通报, 2014, 45(2):476-479. LI J L, DU W Q, ZHANG X, et al. Utilization of nutritious soil from RD hydrothermal products of urban garbage[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(2):476-479.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2005. BAO S D. Soil agricultural chemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [10] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社, 1986. GUAN S Y. Soil enzyme and its research methods[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986.
- [11] 郑钰钢, 胡素萍, 陈辉, 等. 油茶饼粕生物炭和有机肥对土壤酶活性的影响[J]. 森林与环境学报, 2018, 38(3):348-354. ZHENG Y Y, HU S P, CHEN H, et al. Effects of camellia cake biochar and organic fertilizer on soil enzymatic activities[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2018, 38(3):348-354.
- [12] 李玥, 韩萌, 杨劲峰, 等. 炭基肥配施有机肥对风沙土养分含量及酶活性的影响[J]. 花生学报, 2020, 49(2):1-7. LI Y, HAN M, YANG J F, et al. Effects of biochar-based fertilizer combined with organic fertilizer on nutrient content and enzyme activities in aeolian sandy soil[J]. *Journal of Peanut Science*, 2020, 49(2):1-7.
- [13] 年耀萍, 夏体渊, 何明珠, 等. 养分管理对油麦菜氮磷养分利用率及硝酸盐累积的影响[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2011(6):47-56. NIAN Y P, XIA T Y, HE M Z, et al. Effects of nutrient management on nutrient utilization of N, P and nitrate accumulation in lettuce[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2011(6):47-56.
- [14] 曾进, 潘洋刘, 刘娟, 等. 磷钾肥对芳樟生长及产油量的影响[J]. 林业科学研究, 2019, 32(4):152-157. ZENG J, PAN Y L, LIU J, et al. Effects of phosphorus and potassium fertilizer on growth and oil-production of *Cinnamomum camphora*[J]. *Forest Research*, 2019, 32(4):152-157.
- [15] 胡诚, 刘东海, 乔艳, 等. 施用生物有机肥对土壤酶活性及作物产量的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(增刊1):308-312. HU C, LIU D H, QIAO Y, et al. Effect of biological organic manure on soil enzyme activity and crop yields[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, 32(Suppl 1):308-312.
- [16] 曲成闯, 陈效民, 韩召强, 等. 施用生物有机肥对黄瓜不同生育期土壤肥力特征及酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6):279-284. QU C C, CHEN X M, HAN Z Q, et al. Effects of bio-organic fertilizer on soil fertility and enzymes activities in different growth stages of cucumber[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(6):279-284.
- [17] 程万莉, 樊廷录, 张建军, 等. 等氮条件下长期施用有机物料氮替代部分无机氮对黑垆土氮素及相关酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(3):42-47. CHENG W L, FAN T L, ZHANG J J, et al. Characters of soil nitrogen and enzymes involved in nitrogen metabolism under isonitrogenous organic material nitrogen partly replacing to chemical nitrogen[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018(3):42-47.
- [18] 王振龙, 包蕾, 葛新伟, 等. 有机滴灌肥对酿酒葡萄园土壤微生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(2):61-67. WANG Z L, BAO L, GE X W, et al. Effects of organic fertilization by drip irrigation on soil microbial biomass carbon, nitrogen and enzyme activities in wine vineyards[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(2):61-67.
- [19] CHAMPION E, ANDRÉ I, MOULIS C, et al. Design of alpha-transglucosidases of controlled specificity for programmed chemoenzymatic synthesis of antigenic oligosaccharides[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2009, 131(21):7379-7389.
- [20] 郭鹏飞, 葛新伟, 王锐, 等. 有机肥对酿酒葡萄园土壤微生物、酶活性及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(3):145-154. GUO P F, GE X W, WANG R, et al. Effects of organic manure on soil microbial community, enzyme activity and yield of wine grape[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(3):145-154.
- [21] 陈建伟, 贾亮亮, 赵京奇, 等. 喷施沼液对苹果产量品质及蔗糖代谢相关酶活性的影响[J]. 北方园艺, 2017(18):35-41. CHEN J W, JIA L L, ZHAO J Q, et al. Effect of spraying biogas slurry on apple yield, quality and sucrose metabolism enzyme activity[J]. *Northern Horticulture*, 2017(18):35-41.
- [22] 薛冬, 姚槐应, 何振立, 等. 红壤酶活性与肥力的关系[J]. 应用生态学报, 2005, 16(8):1455-1458. XUE D, YAO H Y, HE Z L, et al. Relationships between red soil enzyme activity and fertility[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(8):1455-1458.
- [23] 杨海滨, 李中林, 邓敏, 等. 不同施肥措施对重庆茶园土壤氮转化酶活性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(5):1107-1114. YANG H B, LI Z L, DENG M, et al. Effects of different fertilizers and urea combined application on nitrogen transformation enzyme activities in tea-garden soil of Chongqing[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2020, 26(5):1107-1114.