

浒苔发酵液及其复合液剂对土壤性质和酶活性的影响

庞晓雯, 谢钦铭

集美大学水产学院, 福建 厦门

收稿日期: 2024年5月28日; 录用日期: 2024年7月11日; 发布日期: 2024年7月25日

摘要

为探讨海藻生物肥对土壤性质及酶活性的影响, 本文以浒苔发酵液及其复合液在番茄种植土壤施用后, 不同处理组间土壤性质及酶活性进行了比较研究。试验结果表明: T1 (浒苔发酵液)的pH值最低, 较未处理前下降10.95%; T4 (浒苔-菊花复合液)处理下的土壤脲酶酶活性最高, 较空白对照组显著提高58.82%; T3 (浒苔-金银花复合液)处理下的蔗糖酶酶活性最高, 较空白对照组提高6.13%; T3 (浒苔-金银花复合液)处理下的土壤磷酸酶酶活性最高, 较空白对照组显著提高13.44%。综上, 浒苔发酵液及其复合液能够降低土壤的pH值, 促进植株对有机质的吸收, 提高土壤中脲酶、蔗糖酶、磷酸酶的活性, 有利于改善土壤肥效转化的微生态环境。

关键词

浒苔, 发酵液, 土壤脲酶, 蔗糖酶, 磷酸酶

Influence of *Enteromorpha prolifera* Fermentation Liquid and Its Composite Liquid on Soil Properties and Enzyme Activities

Xiaowen Pang, Qinming Xie

Fisheries College of Jimei University, Xiamen Fujian

Received: May 28th, 2024; accepted: Jul. 11th, 2024; published: Jul. 25th, 2024

Abstract

In order to explore the effect of seaweed biofertiliser on soil properties and enzyme activities, this paper conducted a comparative study of soil properties and enzyme activities between different treatments after the application of *Enteromorpha prolifera* fermentation liquid and its composite liquid in tomato planting soil. The test results showed that: T1 (*Enteromorpha prolifera* fermentation liquid) had the lowest pH value, which decreased by 10.95% compared to that before untreated; T4 (*Enteromorpha prolifera*-chrysanthemum composite liquid) had the highest soil urease enzyme activity under the treatment, which was significantly increased by 58.82% compared to that of the blank control group; T3 (*Enteromorpha prolifera*-honeysuckle composite liquid) had the highest sucrase enzyme activity under the treatment, which was increased by 6.13% compared to that of the blank control group; T3 (*Enteromorpha prolifera*-honeysuckle composite liquid) had the phosphatase enzyme activity was the highest, which was significantly increased by 13.44% compared to the blank control group. In conclusion, the *Enteromorpha prolifera* fermentation liquid and its compound liquid can reduce the soil PH, promote the absorption of organic matter by plants, improve the activities of urease, sucrase and phosphatase in soil, and help to improve the soil microbiological environment of soil fertility transformation.

Keywords

Enteromorpha prolifera, Fermentation Liquid, Soil Urease Enzyme, Sucrase Enzyme, Phosphatase Enzyme

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由于简化作物结构和精耕细作为基础的过度集约耕作, 以及为了获得最高产量而过度使用化肥和农药保护作物, 破坏了土壤的生物平衡[1]。因此, 减少化学品的使用量, 寻求部分可替代化肥、农药等化学品在农业生产上的应用, 实现绿色安全生产是目前亟待解决的问题。

浒苔隶属于绿藻门(Chlorophyta)石莼目(Ulvales)石莼科(Ulvaceae)浒苔属(*Enteromorpha*), 是一种适应力强、繁殖快、广温、广盐、耐酸的大型天然经济绿藻, 而全球变暖、海水升温等诸多因素为浒苔的生长提供了有利条件, 导致浒苔危害频繁爆发, 多个拥有海岸线的国家均出现了不同程度的绿潮侵袭[2]。浒苔虽然无毒, 但大量繁殖会导致海底动植物因缺氧而死, 且其他海洋生物受到浒苔分泌的化学物质的不利影响, 腐烂后的浒苔藻体还会散发出恶臭, 严重影响周边地区居民正常的生活。同时, 浒苔爆发后需大量人力物力打捞, 据统计, 打捞上来的浒苔超过 60%被直接填埋, 难以发挥其生物价值, 造成这一有效海藻资源的浪费[3]。

有研究表明海藻生物肥可以改善土壤性质。如通过根部浇灌, 海藻肥中的海藻多糖-褐藻胶可作为天然的土壤改良剂, 具有较强的螯合能力, 能与重金属离子形成螯合物, 还具有凝胶保水的作用。海藻提取物提高土壤中有效促生长因子的持久性及利用率, 提高团粒状结构的形成, 改善土壤内部空隙, 提高土壤的吸水锁水率和通透性, 协调土壤中固体、液体和气体三种物质的比例, 平衡土壤的天然胶体, 增加土壤中有机质的含量[4]。张蕊等[5]研究表明, 施用海藻肥可明显提高土壤有机质、有效钾、有

效氮、有效磷的含量。土壤酶能够表征土壤环境质量, 可以极为敏感反映土壤环境的微小变化。王秀梅等[6]研究发现海藻肥能够增强土壤中蔗糖酶的活性, 但对磷酸酶活性影响不大。有研究表明, 马尾藻肥料可以影响蛋白酶活性、多酚氧化酶活性和脲酶活性等酶活性, 增加了细菌多样性和丰富度, 进而促进番茄生长[7]。海藻肥可以直接改善土壤理化性质, 提高土壤有机质、速效磷、碱解氮、速效钾含量, 调节土壤中的 C/N 比值, 改良土壤结构, 改善土壤微生物环境, 增加根际细菌群落多样性, 可以使土壤养分供应更加协调[8]。

近年来, 海藻生物肥作为其中一种新兴的生物肥料的开发研究引起了国内外有关学者的广泛关注, 目前生产中海藻生物肥料的原料大都是褐藻门的马尾藻属(*Sargassum* spp.)和海带属(*Laminaria*), 而对大型绿藻类海藻-浒苔的开发应用研究较少。因此, 如何有效实现浒苔资源的利用已成为海藻综合利用和改善生态环境的重要课题。故有必要开发一种广泛可用的方法, 将海洋生物质废物转化为高价值产品。

本文以浒苔为主要原料, 以其他中草药为辅佐材料, 通过微生物发酵工艺制备的发酵液, 研究浒苔发酵液及其复合液对土壤性质和土壤酶活性的影响, 为新型土壤改良剂提供新品种提供理论基础。同时, 实现了有害绿潮藻类的资源化利用, 对保护生态环境实现可持续发展具有重要的现实意义。

2. 材料与方法

2.1. 供试材料

(1) 试验材料

①供试蔬菜作物品种: 供试番茄品种为矮生红番茄, 购自语桐种苗园艺;

②供试植物种类: 浒苔粉剂由上海海洋大学水域环境生态工程研究中心提供; 丁香、菊花、金银花购自药材店; 蟛蜞菊在厦门地区野外采集;

③化学药剂: 41.7%氟吡菌酰胺悬浮剂(拜尔股份公司生产)。

(2) 试验生物制剂材料

①枯草芽孢杆菌(山东苏柯汉生物工程股份有限公司, 有效菌数为 200 亿 cfu/g);

②微生物菌剂(沃宝生物科技, 主要菌种有地衣芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌、苏云金芽孢杆菌、淡紫拟青霉、绿色木霉、凝结芽孢杆菌, 有效活菌数 ≥ 100 亿/g);

③纤维素酶(正宏生物科技有限公司);

④果胶酶(正宏生物科技有限公司);

⑤面包改良剂(师傅 300 复配面包酶制剂)。

2.2. 试验方法

2.2.1. 发酵液的制备

发酵液配方为: 1 kg 植物干粉末, 30 g 面包改良剂, 2 g 枯草芽孢杆菌, 10 g 微生物菌剂, 2 g 纤维素酶, 8 g 果胶酶。与 15 L 水混合均匀, 将混合物装入塑料桶中发酵, 发酵起始温度为 30℃~40℃, 发酵时间 30 d~50 d, 后得到 67 mg/mL 的植物发酵液。

2.2.2. 发酵液盆栽试验

将矮生红番茄苗定植到填装沙壤土(田园土:沙 = 7:3)的盆中, 每盆沙壤土 1 kg, 试验共设 5 个处理组, 利用氟吡菌胺作为阳性对照, 两个对照组: T6 作阳性对照, T7 作空白对照, 具体见表 1, 发酵液的母液浓度均为 67 mg/mL。并利用 LC-MS 分析了浒苔发酵液的化学成分。

每个花盆每次施肥 100 ml, 混合肥是以 4:1 将浒苔发酵液和中草药发酵液混合均匀之后对植物进行

根部施肥。每个处理 3 次重复, 每次重复 4 盆, 每盆种植一株番茄。待番茄缓苗成功后, 浇灌上述处理组和对照组, 开始正常的水肥管理, 即 10 d 浇一次肥, 2 d 浇一次水。70 d 后, 采土壤进行检测。

Table 1. Experimental groups
表 1. 7 个实验组

| 处理 | 发酵液 |
|----|---------------------------|
| T1 | 浒苔 |
| T2 | 浒苔 + 蟛蜞菊 |
| T3 | 浒苔 + 金银花 |
| T4 | 浒苔 + 菊花 |
| T5 | 浒苔 + 丁香 |
| T6 | 41.7% 氟吡菌酰胺悬浮剂(0.03 mL/株) |
| T7 | 曝氧自来水 |

2.2.3. 土壤基础性质及酶活测定

使用检测试剂盒(上海科顺生物科技有限公司)检测各组土壤的有机质含量以及土壤脲酶、土壤蔗糖酶、土壤磷酸酶活性。

pH 检测: 称取 10.0 g 风干的土壤试样, 置于 50 ml 的烧杯中, 并加入 25 mL 水, 将容器密封后用搅拌器, 剧烈搅拌 5 min, 然后静置 1 h~3 h。后插入校正过的 pH 计入试样溶液中, 待读数稳定后读取 pH。

2.2.4. 发酵液成分分析

代谢物提取: 将实验样本在 4℃ 条件下解冻, 解冻后样本涡旋 1 min, 混合均匀; 精确移取适量样本于 2 mL 离心管中, 浓缩干燥; 接着加入 500 uL 甲醇溶液到干燥后的样本管中, 涡旋 1 min; 12,000 rpm 4℃ 离心 10 min, 取全部上清液, 转移至新的 2 mL 离心管中, 浓缩干燥; 准确加入 150 uL 80% 甲醇水配制的 2-氯-L-苯丙氨酸(4 ppm)溶液复溶样品, 取上清液过 0.22 um 膜过滤, 过滤液加入到检测瓶中, 用于 LC-MS 检测。

色谱条件: 使用 ACQUITY UPLC® HSS T3 (2.1 × 100 mm, 1.8 um) 色谱柱, 0.3 mL/min 的流速, 40℃ 的柱温, 进样量 2 uL。正离子模式, 流动相为 0.1% 甲酸乙腈(B2)和 0.1% 甲酸水(A2), 梯度洗脱程序为: 0~1 min, 8% B2; 1~8 min, 8%~98% B2; 8~10 min, 98% B2; 10~10.1 min, 98%~8% B2; 10.1~12 min, 8% B2。负离子模式, 流动相为乙腈(B3)和 5 mM 甲酸铵水(A3), 梯度洗脱程序为: 0~1 min, 8% B3; 1~8 min, 8%~98% B3; 8~10 min, 98% B3; 10~10.1 min, 98%~8% B3; 10.1~12 min, 8% B3。

质谱条件: 电喷雾离子源(ESI), 正负离子模式分别采集数据。正离子喷雾电压为 3.50 kV, 负离子喷雾电压为 -2.50 kV, 鞘气 40 arb, 辅助气 10 arb。毛细管温度 325℃, 以分辨率 70,000 进行一级全扫描, 一级离子扫描范围 100~1000 m/z, 并采用 HCD 进行二级裂解, 碰撞能量为 30 eV, 二级分辨率为 17,500, 采集信号前 3 离子进行碎裂, 同时采用动态排除去除无必要的 MS/MS 信息。

2.2.5. 数据处理

试验数据均运用 SPSS 22.0 软件分析处理, 首先对试验数据进行单因素方差分析(ANOVA), 用 Duncan's 多重比较法进行数据平均数的差异显著性分析, 数据使用平均值 ± 标准误(mean ± SE)表示, $p < 0.05$ 为差异显著。将实验样本中检测的特征峰分子量、保留时间、二级谱图与植物谱图库进行比较、匹配, 实现代谢物的定性、定量鉴定。

3. 结果与分析

3.1. 浒苔及其复合发酵液对土壤 pH、有机质的影响

浒苔及其复合发酵液不同处理组对土壤 pH、有机质见图 1、图 2。

由图 1 可知, 与未处理前相比, 不同处理组下的土壤 pH 均有所下降。其中, T1 的 pH 值最低, 为 6.91, 下降幅度最大, 较未处理前下降 10.95%, 其余处理组按前后顺序分别较未处理前下降 10.05%、3.86%、7.34%、5.41%、7.86%、6.18%, 下降幅度按大小依次为 T1 > T2 > T6 > T4 > T7 > T5 > T3。

由图 2 可知, 与未处理前相比, 不同处理对土壤有机质影响不同。其中, T7 的有机质含量最高, 为 37.92, 增加幅度最大, 较未处理前上升 62.75%, 其余处理组按前后顺序分别较未处理前上升-17.68%、-14.25%、28.07%、18.63%、39.36%、27.51%, 上升幅度按大小依次为 T7 > T5 > T3 > T6 > T4 > T2 > T1。

3.2. 浒苔及其复合发酵液对土壤酶活的影响

不同处理组下的土壤酶活均存在显著差异, 具体情况见表 2。

在土壤脲酶方面, 与空白对照组相比, 不同处理对土壤脲酶酶活性影响不同。其中, T4 处理下的土壤脲酶酶活性最高, 其活性达到 9782.89 U/g, 较空白对照组显著提高 58.82%, 其余处理组按前后顺序分别较空白对照组提高 20.90%、12.52%、-4.50%、47.50%、30.91%, T2 处理下的土壤脲酶酶活性最低, 显著低于除 CK 组的其余处理组, 各处理对土壤脲酶酶活性影响大小依次为 T4 > T5 > T3 > T6 > T1 > T7 > T2。

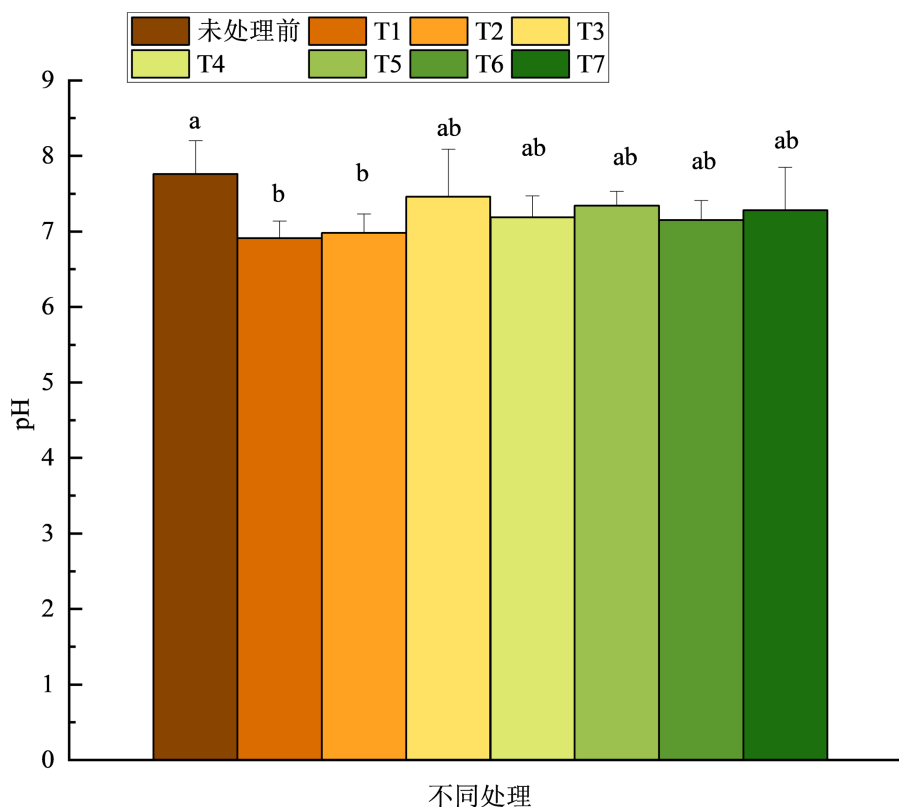


Figure 1. pH of soil under different treatments

图 1. 不同处理下土壤 pH

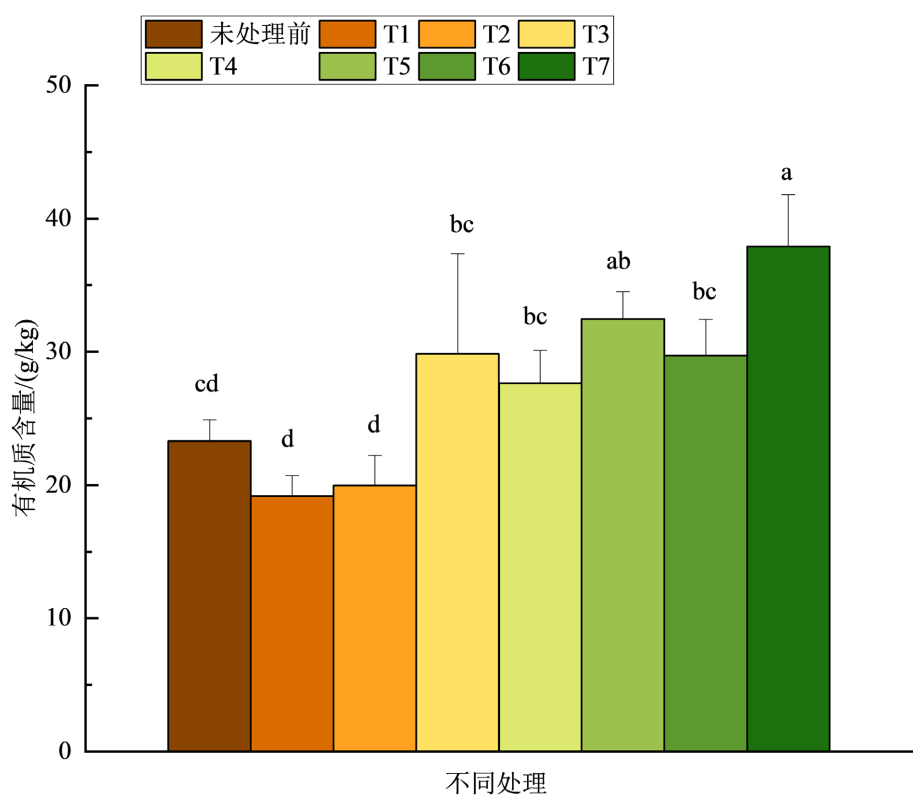


Figure 2. Organic matter of soil under different treatments
图 2. 不同处理下土壤有机质

Table 2. Soil enzyme activities under different treatments
表 2. 不同处理下土壤酶活

| 处理 | 土壤酶活(U/g) | | |
|---------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| | 脲酶 | 蔗糖酶 | 磷酸酶 |
| T1 (苕苔) | 7447.02 ± 309.83 ^d | 492.58 ± 41.02 ^b | 0.0746 ± 0.0026 ^c |
| T2 (苕苔 + 蟛蜞菊) | 5882.06 ± 515.90 ^e | 515.32 ± 27.88 ^b | 0.0852 ± 0.0028 ^b |
| T3 (苕苔 + 金银花) | 9085.22 ± 377.69 ^b | 598.89 ± 28.30 ^a | 0.0954 ± 0.0047 ^a |
| T4 (苕苔 + 菊花) | 9782.89 ± 208.23 ^a | 383.71 ± 51.40 ^c | 0.0704 ± 0.0028 ^{cd} |
| T5 (苕苔 + 丁香) | 9370.45 ± 197.01 ^b | 563.99 ± 15.88 ^a | 0.0684 ± 0.0048 ^d |
| T6 (阳性 CK 组 - 化学药剂) | 8063.75 ± 318.68 ^c | 572.31 ± 45.29 ^a | 0.0939 ± 0.0045 ^a |
| T7 (CK 组) | 6159.59 ± 200.56 ^e | 564.31 ± 31.63 ^a | 0.0841 ± 0.0046 ^b |

注：同列数据后不同字母表示差异达到显著水平(P < 0.05)。

在土壤蔗糖酶方面，与空白对照组相比，不同处理对土壤蔗糖酶活性影响不同。其中，T3 处理下的蔗糖酶活性最高，其活性达到 598.89 U/g，较空白对照组提高 6.13%，其余处理组按前后顺序分别较空白对照组提高-12.71%、-8.68%、-32.00%、0%、1.42%，T4 处理下的蔗糖酶活性最低，显著低于其余组，各处理对蔗糖酶活性影响大小依次为 T3 > T6 > T7 > T5 > T2 > T1 > T4。

在土壤磷酸酶方面，与空白对照组相比，不同处理对土壤磷酸酶活性影响不同。其中，T3 处理下的土壤磷酸酶活性最高，其活性达到 0.0954 U/g，较空白对照组显著提高 13.44%，其余处理组按前后

顺序分别较空白对照组提高-11.30%、1.31%、-16.29%、-18.67%、11.65%，T5 处理下的土壤磷酸酶酶活性最低，显著低于除 T4 外的其余处理组，各处理对土壤磷酸酶酶活性影响大小依次为 T3 > T6 > T2 > T7 > T1 > T4 > T5。

3.3. 浒苔发酵液成分分析

对浒苔发酵液进行 LC-MS 测总离子流图(见图 3)。本次检测，浒苔发酵液共鉴定到 857 个代谢物。其中，浒苔发酵液中含有大量的脂肪酸及其衍生物、氨基酸类、木质素等化合物。

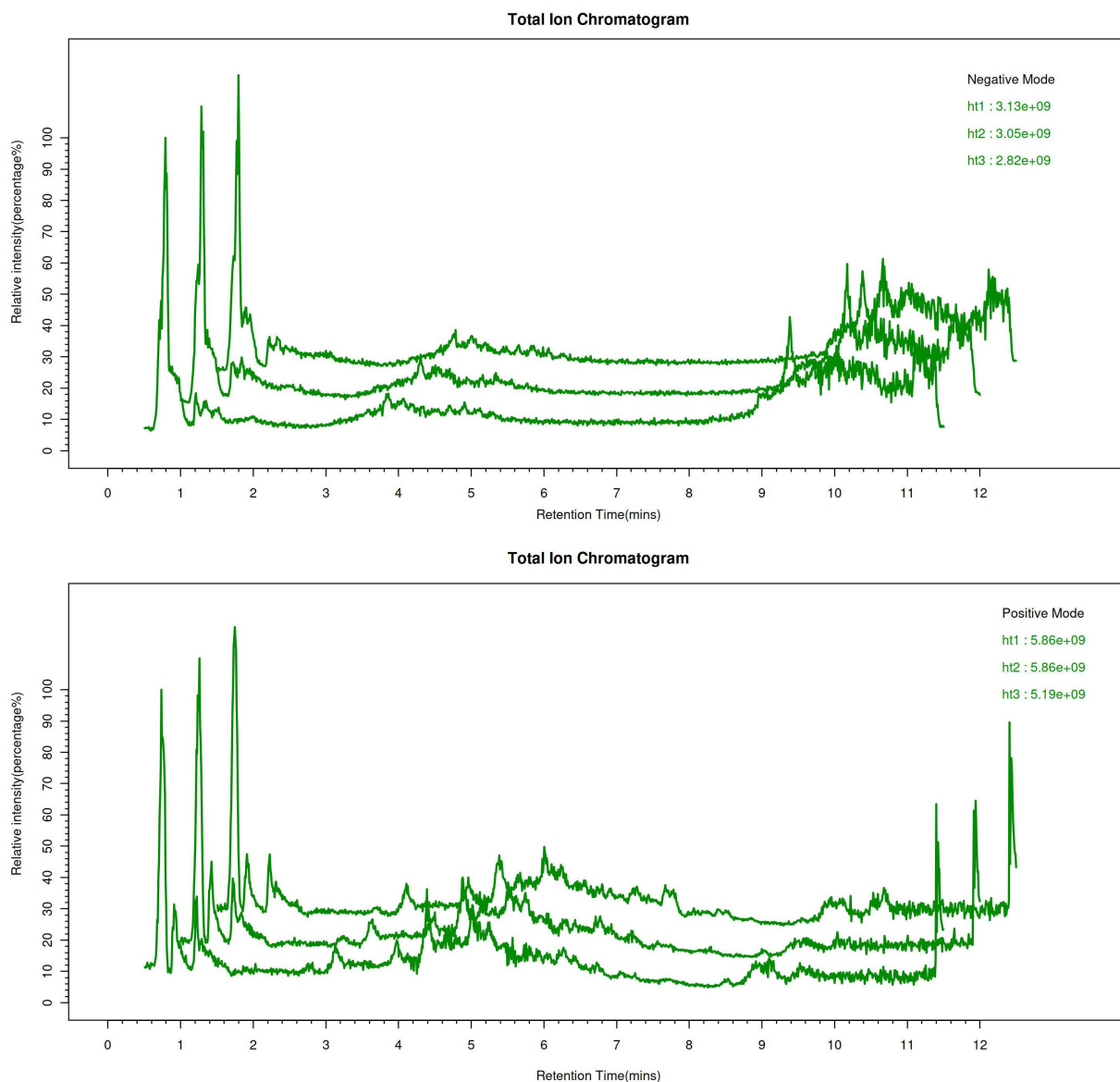


Figure 3. LC-MS analysis of volatile components of *Enteromorpha prolifera*

图 3. 浒苔挥发性组分 LC-MS 分析

4. 讨论

健康的土壤环境是农作物茁壮生长的重要条件，土壤理化因子与酶活性则能表征土壤肥力。化学药

剂的使用容易造成化肥、农药残留及超标和土壤大面积污染,不利于作物的生长。通过植物物种多样性方法在增加土壤生物多样性的同时还维护了土壤的健康,减少化肥、农药对土壤生态系统的破坏[9]。本研究中不同处理后对各土壤因子的影响不同,可能是番茄生长期间对不同养分的需求不同原因所致。

4.1. 浒苔发酵对土壤 pH 值的影响

土壤 pH 即土壤的酸碱度,是影响农作物生长发育的决定性因素,一般作物最适宜生长的土壤 pH 为 6.5~7.5 [10]。试验结果表明,不同处理组的土壤 pH 值均有所下降,且均在作物适宜范围之内,有益于作物的生长发育,这与刘新源[12]研究的添加生物炭后土壤 pH 降低的结果相一致。

4.2. 浒苔发酵对土壤有机质吸收的影响

有机质是土壤的重要组成部分,有机质含量多少是判断土壤肥力的重要指标,也是作物生长必需的磷等元素各种养分的重要来源,且对土壤的结构性、缓冲性、耐肥性、通气性等指标有着重要的影响[11]。不同处理对土壤中有有机质含量变化的影响有着显著差异。

土壤中根系分泌物和植物残体是土壤有机质的主要来源。从本试验结果可知,土壤有机质含量随着时间的延长而增加,与未处理前组相比,空白对照组的有机质含量显著增加,而浒苔发酵液组 T1、螯螭菊复合发酵液 T2 组的有机质含量低于未处理前组,造成这种现象的原因可能是土壤 pH 值[13]通过影响微生物活性及土壤腐殖质含量,进而影响了有机质含量,生物肥的添加会促进植株对有机质的吸收,将其转化成自身生长所需的营养物质。

4.3. 浒苔发酵对土壤酶活性变化的影响

土壤酶是存在于土壤中不同状态酶类的总称,具备催化、转化功能,是评价土壤肥力的又一重要指标。土壤中有有机质等矿物质的降解与吸收都有着土壤酶的参与,因此土壤酶活性的强弱直接反映土壤肥力,影响到土壤中碳氮磷等物质的转化、能量的传递[14]。

土壤脲酶促进氮循环,水解尿素产生氨和碳酸,以便于作物为吸收利用[15]。研究表明除了 T2,其余处理组的脲酶活性要显著高于空白对照组 T7。土壤蔗糖酶参与碳循环,能够将蔗糖分解成相应的单糖而被作物吸收利用[16],其催化产物与易溶性营养物质(有机质、氮、磷等)含量和微生物数量及土壤呼吸强度有着紧密的联系,是间接评价土壤肥力的生物指标之一。本试验中, T3 的蔗糖酶活性要高于 T7。土壤磷酸酶活性高低可以反映土壤磷素的供应状况和转化规律,土壤中有有机磷的分解、转化和其生物有效性受到直接影响[17]。T2、T3 的磷酸酶活性要高于 T7。

由于番茄种植过程常有根结线虫等病原生物的危害,因此种植户常用氟吡菌胺处理种植土壤,氟吡菌胺是一种吡唑酰胺类广谱杀菌剂悬浮剂为氟吡菌胺和霜霉威的复配液体制剂,对霜霉病、疫病、晚疫病、猝倒病等常见卵菌纲病害具有杰出防效,对作物和环境安全。

试验发酵液复合液处理组中存在一些处理组的蔗糖酶、磷酸酶低于空白对照组的情况,可能是因为作物生长消耗土壤大量养分,导致相对应的土壤酶活力还没恢复过来而引起的。这与徐忠山等[18]的研究结果相似,他们发现土壤蔗糖酶活性与过氧化氢酶活性均表现为旺盛期最低。

有研究表明,木质素在土壤中可以通过转化为腐殖质,提高土体的内部空隙和胶结土壤颗粒,使得松散的土壤颗粒呈团聚体,土体结构更加密实[19],以此来改善土壤结构、培育土壤,有利于控制土传病虫害的影响及作物的生长发育[20]。在本研究中也从浒苔发酵液中检测到了此类化合物。然而,由于本试验没设计时间梯度的土壤样品的检测,没有从动态上去分析发酵液及其复合液对土壤环境因子的影响,应增加多时间梯度样品的检测,以利于更好地确定不同发酵液处理组对土壤的影响。

5. 结论

试验结果表明, 浒苔发酵液及其复合液均对土壤性质有不同程度的改良, 即能够降低土壤的 pH 值, 促进植株对有机质的吸收, 同时能提高土壤中脲酶、蔗糖酶、磷酸酶的活性, 有利于改善土壤肥效转化的微生态环境。

致 谢

浒苔生物肥关键技术与产品开发(上海海洋大学资助横向项目编号: 集大 S19098); 泉州师范学院福建省海洋藻类活性物质制备与功能开发重点实验室 2018 年度开放课题“防治茶叶假眼绿叶蝉的海藻植保剂的研发”(2018FZSK04); 福建农林大学国家重点实验室 2017 年度开放课题“海藻植保剂在辣木主要害虫中的生防应用研究”(SKB2017014)。

参考文献

- [1] Wolna-Maruwka, A., Piechota, T., Niewiadomska, A., Kamiński, A., Kayzer, D., Grzyb, A., et al. (2021) The Effect of Biochar-Based Organic Amendments on the Structure of Soil Bacterial Community and Yield of Maize (*Zea mays* L.). *Agronomy*, **11**, Article 1286. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071286>
- [2] 郇丽, 顾文辉, 王立军, 等. 绿藻浒苔多元化应用研究进展[J]. 海洋科学, 2022, 46(11): 139-146.
- [3] 王宗灵, 傅明珠, 周健, 等. 黄海浒苔绿潮防灾减灾现状与早期防控展望[J]. 海洋学报, 2020, 42(8): 1-11.
- [4] 王秀娟, 张坤生, 任云霞, 等. 海藻酸钠凝胶特性的研究[J]. 食品工业科技, 2008(2): 259-262.
- [5] 张蕊, 王钰馨, 赵雪惠, 等. 海藻有机肥不同施用量对土壤肥力及‘肥城’桃品质的影响[J]. 植物生理学报, 2016, 52(12): 1819-1828.
- [6] 王秀梅, 安毅, 秦莉, 等. 对比施用生物炭和肥料对土壤有效镉及酶活性的影响[J]. 环境化学, 2018, 37(1): 67-74.
- [7] Wang, M., Chen, L., Li, Y., Chen, L., Liu, Z., Wang, X., et al. (2018) Responses of Soil Microbial Communities to a Short-Term Application of Seaweed Fertilizer Revealed by Deep Amplicon Sequencing. *Applied Soil Ecology*, **125**, 288-296. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.02.013>
- [8] 张广雨, 褚德朋, 刘元德, 等. 生物炭及海藻肥对烟草生长、土壤性状及青枯病发生的影响[J]. 中国烟草科学, 2019, 40(5): 15-22.
- [9] 王孝莹, 白光瑛, 吴林林, 等. 利用植物多样性控制南方根结线虫(*Meloidogyne in cognita*)的初步探讨[J]. 生态学杂志, 2016, 35(5): 1233-1239.
- [10] 郭慧婷, 高静, 张强, 等. 有机肥对我国酸性和碱性土壤 pH 的影响差异及原因[J/OL]. 应用与环境生物学报. <https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2023.06003>, 2024-04-16.
- [11] 林正眉, 侯琼昭, 罗刚跃, 等. 桉树林下套种牧草糙毛假地豆的生长和林地土壤养分的影响[J]. 广东农业科学, 2017, 44(12): 45-52.
- [12] 刘新源. 生物炭与无机有机肥料混合施用对土壤理化特性和烟叶产量品质的影响[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 河南农业大学, 2014.
- [13] 高彦波, 翟鹏辉, 谭德远. 土壤酶活性与土壤肥力的关系研究进展[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(6): 100-101, 183.
- [14] 黄雪琳, 杨静, 贺宇纯. 土壤酶活性的主要影响因素分析[J]. 现代园艺, 2018(11): 92-93.
- [15] 王国兴, 徐福利, 王渭玲, 等. 土壤中细菌产氨代谢对农田生态系统的意义[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6): 305-308.
- [16] Naga Raju, M., Golla, N. and Vengatampalli, R. (2016) Soil Invertase. In: Naga Raju, M., Golla, N. and Vengatampalli, R., Eds., *Soil Enzymes*, Springer, 41-46. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42655-6_8
- [17] 李莹飞, 耿玉清, 周红娟, 等. 基于不同方法测定土壤酸性磷酸酶活性的比较[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(1): 98-104.
- [18] 徐忠山, 杨彦明, 陈晓晶, 等. 菌肥对混播牧草土壤酶活性及微生物的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(6): 77-83.
- [19] 陈学军, 丁翔, 徐科宇. 木质素及其衍生物对土性能和机理的研究进展综述[J]. 土工基础, 2021, 35(2): 156-160.
- [20] 雷震远. 木质素对土壤改良以及小油菜生长的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2023.