

液态有机肥对酚酸胁迫下马铃薯生长发育和土壤酶活性影响

熊湖¹, 郑顺林^{1,2}, 龚静¹, 黄强¹, 袁继超¹, 何卫³

(1. 四川农业大学农学院, 农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 成都 611130;

2. 农业部薯类作物遗传育种重点实验室, 成都久森农业科技有限公司, 成都 610500; 3. 四川省农科院作物所, 成都 610066)

摘要: 为明确液态有机肥对土壤酚酸导致马铃薯的连作障碍的缓解效应, 采用盆栽试验, 将阿魏酸与香草酸等量混合后按不同浓度(0, 50, 100, 150 mg/kg)施加于马铃薯基质土壤中, 模拟马铃薯连作分泌的有机酸自毒物质, 并施加不同浓度梯度液态有机肥(0, 225, 450, 675 kg/hm²), 探讨酚酸胁迫下液态有机肥对马铃薯生长发育以及土壤酶活性的影响。结果表明: 单一施加外源酚酸对马铃薯株高、茎粗、叶面积以及干物质量皆有不同程度的抑制作用, 随酚酸浓度增加, 土壤中脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶活性相对对照分别降低 2.74%~10.95%, 11.11%~20.55%, 5.29%~12.96%, 过氧化氢酶、多酚氧化酶活性升高, FDA 水解酶活性表现为低促进高抑制。施加液态有机肥后提高了马铃薯株高、茎粗、叶面积以及干物质量, 土壤酶活性均有提高, 脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶、FDA 水解酶活性相对对照处理最高分别提高了 10.80%, 21.40%, 18.20%, 29.60%, 37.69%, 12.31%, 但是液态有机肥浓度过高降低了其对磷酸酶、脲酶、过氧化氢酶的提升效果, 抑制了 FDA 水解酶活性。因此合理施加液态有机肥可以促进马铃薯生长发育, 提高土壤酶活性, 增强马铃薯的抗逆性, 从而缓解酚酸对马铃薯的胁迫作用。

关键词: 马铃薯; 酚酸; 液态有机肥; 土壤酶

中图分类号: S532

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)03-0254-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.03.038

Effects of Liquid Organic Fertilizer on Potato Growth and Soil Enzyme Activities Under Phenolic Acid Stress

XIONG Hu¹, ZHENG Shunlin^{1,2}, GONG Jing¹, HUANG Qiang¹, YUAN Jichao¹, HE Wei³

(1. Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Southwest of China, Ministry of Agriculture, College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130; 2. Key Laboratory of Tuber Crop Genetics and Breeding, Ministry of Agriculture, Chengdu Jiuse Agricultural Science and

Technology Co., Ltd., Chengdu 610500; 3. Crop Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066)

Abstract: A pot experiment was conducted to clarify the mitigation effect of liquid organic fertilizer on continuous cropping obstacle caused by phenolic acid in soil. Ferulic acid and vanillic acid were mixed equally and applied to potato substrate soil at different concentrations (0, 50, 100 and 150 mg/kg) to simulate the auto-toxin substances secreted by potato continuous cropping, and different concentration gradients liquid organic fertilizer (0, 225, 450 and 675 kg/hm²) were applied to clarify the effects of liquid organic fertilizer on potato growth and soil enzyme activity under phenolic acid stress. The results showed that single exogenous phenolic acids reduced the potato plant height, stem diameter, leaf area and dry weight in different degree. With the increasing of phenolic acid concentration, the activity of urease, acid phosphatase and invertase in soil decreased by 2.74% ~ 10.95%, 11.11% ~ 20.55% and 5.29% ~ 12.96% compared with the control, respectively, the activity of catalase and polyphenol oxidase increased, while FDA hydrolase activity showed low promotion and high inhibition. Applying liquid organic fertilizer improved the potato plant height, stem diameter, leaf area and dry weight. Soil enzymes activities all increased, the activity of urease, acid phosphatase, invertase, catalase, polyphenol oxidase and FDA hydrolase increased by 10.80%, 21.40%, 18.20%, 29.60%, 37.69% and 12.31% at most, respectively, compared with the control. But excessive concentra-

收稿日期: 2018-12-20

资助项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0200808); 四川省育种攻关及配套项目(2016NYZ0051-5, 2016NYZ0032); 四川马铃薯创新团队支持项目(2016NYZ0051-5, 2016NYZ0032)

第一作者: 熊湖(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事马铃薯高产栽培技术研究。E-mail: 475832961@qq.com

通信作者: 郑顺林(1977—), 男, 博士, 教授, 主要从事薯类栽培理论与技术研究。E-mail: 248977311@qq.com

tion of liquid organic fertilizer decreased its enhancement of activity of phosphatase, urease and catalase, and inhibited the activity of FDA hydrolase. Therefore, reasonable application of liquid organic fertilizer could promote the growth and development of potato, improve soil enzyme activity and enhance the stress resistance of potato, thereby alleviating the phenolic acid stress on potato.

Keywords: potato; phenolic acid; liquid organic fertilizer; soil enzyme

由于我国人口仍然持续的增长,使得我国粮食消费的需求仍呈刚性增长的趋势,因此马铃薯主食化战略的提出有利于缓解资源和环境的压力^[1],同时也能保障我国的粮食安全,对实现农业可持续发展具有十分重要的意义^[2]。然而随着马铃薯产业的发展,重茬连作现象日益突出,导致土壤中化感物质的积累,马铃薯植株会产生严重的自毒作用,出现马铃薯生长发育不良、病虫害频繁发生、土壤病原菌累积增多的现象,造成作物的抗逆性、产量与品质严重下降^[3]。

酚酸是化感物质中比较重要的一类^[4],对羟基苯甲酸、香草酸和阿魏酸这3种酚酸类化合物是常见的化感物质,对马铃薯植株施加这3种酚酸,结果表明马铃薯植株的生长发育受到了抑制^[5],在连作5,7年时,香草酸与阿魏酸显著增加,而对羟基苯甲酸增加却不显著^[3]。阿魏酸能引起生长素、赤霉素和细胞分裂素含量的积累,并造成脱落酸含量的升高^[6]。同时酚酸类物质具有化感活性,可以在土壤中积累并对下季作物产生毒害作用,并且能够影响土壤中微生物的活性^[7]。因此抑制土壤中酚酸活性是有效的减缓连作障碍的手段之一。液态有机肥是新型的有机肥料,含碳较高,可以快速改善土壤环境,并促进作物对主要养分元素的吸收,同时可以改善土壤微生物活性,增强作物抗逆性,提高作物产量^[8]。但液态有机肥关于缓解马铃薯连作障碍研究较少,其机理尚不明确。本试验通过添加不同量外源酚酸与液态有机肥对马铃薯形态性状与土壤相关酶活性变化,探讨土壤酚酸含量对马铃薯生长发育与土壤酶活性的影响,从而为通过施加液态有机肥缓解马铃薯连作障碍提供一定依据与生产实践指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验马铃薯品种为“川芋117”,控制种薯大小一致。酚酸标品选用马铃薯连作中主要的2类酚酸(香草酸、阿魏酸),按照等量配比混合均匀;液态有机肥由云南七彩环保科技有限公司提供,产品规格为有机质 ≥ 250 g/L, $N+P_2O_5+K_2O \geq 150$ g/L,氨基酸 ≥ 80 g/L, PH 5.5~6.5。

1.2 试验设计

选择盆栽试验于2017年1—4月在成都温江区实验棚进行,其土壤基础肥力为全氮2.58 g/kg,碱解氮

142.16 mg/kg,有效磷17.42 mg/kg,速效钾109.24 mg/kg,有机质20.86 g/kg, pH 6.32。搅拌混匀后每盆20 kg装入长宽高为56 cm \times 32 cm \times 12 cm的花盆中,设外源酚酸为处理A,共0,50,100,150 mg/kg 4个水平,用少量乙醇溶解后稀释浇灌在基质土中,并充分搅拌均匀;液态有机肥施用量为处理B,共0,225,450,675 kg/hm² 4个水平,按花盆面积,实际施用量为0,60,120,150 g/盆,按照使用方法稀释40倍,于马铃薯出苗后均匀浇灌于试验花盆土壤上。每盆种植6株马铃薯为1个处理,每个处理重复3次。取样时期为成熟期,土壤选择与植株根系结合比较紧密的根际土壤,用抖土法收集并将各土壤混匀后风干过1.00 mm筛保存。

1.3 测定项目及方法

选择生长均匀的植株测定其单株的株高、茎粗、叶面积、根长,整株干物质质量于105℃杀青,80℃烘干至恒重后测定。土壤酶活性测定参考关松荫^[9]的方法,其中脲酶采用苯酚钠一次氯酸钠比色法测定;多酚氧化酶采用邻苯三酚比色法测定;蔗糖酶采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定;酸性磷酸酶采用磷酸苯二钠法测定;过氧化氢酶采用紫色分光光度法测定;FDA水解酶采用荧光素法^[10]测定。

采用Origin 2017软件对数据进行处理和绘图;采用DPS 7.05软件对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同液态有机肥施用量对不同浓度酚酸胁迫下马铃薯成熟期形态影响

2.1.1 株高 由表1可知,在B1条件下,不同浓度酚酸对马铃薯株高影响较小,各组之间差异均不显著,施加液态有机肥后各组株高相较施加前上升,随着酚酸浓度提高,各组平均株高降低,其中A4处理相较A1处理,B2、B3、B4分别降低20.41%,17.30%,19.74%,均达到显著差异;施加液态有机肥后以B3处理植株生长最高且达到显著差异,各组平均株高相较B1分别提高17.10%,32.91%,7.58%。结果表明,液态有机肥可以促进马铃薯生长,提高马铃薯株高,在未施加液态有机肥时酚酸对马铃薯植株高影响较小,但会抑制施加液态有机肥后马铃薯株高,并且在该范围内株高与酚酸浓度呈负相关($p < 0.05$, $r = -0.98$),可能是因为酚酸会阻止马铃薯对液态有机肥中养分吸收与转化,从而抑制了马铃薯生长。

表 1 液态有机肥对不同浓度酚酸胁迫下马铃薯株高的影响

单位:cm

处理	A1	A2	A3	A4	平均值
B1	44.38±3.54c	48.68±9.22c	45.38±7.43c	46.78±8.84c	46.30±1.86b
B2	59.43±7.75ab	51.15±4.06bc	59.00±5.43ab	47.30±5.69c	54.22±5.98ab
B3	66.75±6.61a	67.45±9.48a	52.78±2.98bc	55.20±9.51b	61.54±6.93a
B4	60.12±36.20ab	45.32±2.87c	48.25±5.38c	45.60±7.34c	49.81±6.98b
平均值	57.66±9.45a	53.14±9.83ab	51.35±5.93ab	48.72±4.37b	

注:表中数据为平均值±标准误差;同列不同小写字母表示差异显著水平($p<0.05$)。下同。

2.1.2 茎粗 由表 2 可知,在施加液态有机肥量相同时,各组茎粗随酚酸浓度增加而下降,平均值与酚酸浓度呈显著负相关($p<0.05$, $r=-0.97$),其中各组 A4 处理较 A1 处理茎粗分别下降 10.67%,6.72%,11.20%,11.11%;各组茎粗大小平均值为

B3>B4>B2>B1,不同浓度酚酸下均以 B3 处理茎粗最大,且与对照组 B1 达到显著差异,说明会抑制马铃薯茎生长,施加液态有机肥可以缓解酚酸对马铃薯茎的抑制作用,通过壮苗使马铃薯正常生长发育。

表 2 液态有机肥对不同浓度酚酸胁迫下马铃薯茎粗的影响

单位:mm

处理	A1	A2	A3	A4	平均值
B1	8.62±1.30bcd	8.29±1.40bcd	8.17±1.02bcd	7.70±1.42d	8.19±0.97a
B2	8.92±1.24bcd	8.45±0.9bcd	8.54±1.21bcd	8.31±0.65bcd	8.55±0.66b
B3	10.44±1.32a	10.53±0.16a	9.51±1.17a	9.27±1.41abc	9.93±0.84b
B4	8.91±0.60bcd	9.08±1.03abcd	8.83±0.71bcd	7.92±1.06cd	8.68±1.13b
平均值	9.22±0.99a	9.09±1.34a	8.76±1.02ab	8.30±1.18b	

2.1.3 叶面积 由表 3 可知,各组处理中 A1 与 A2 叶面积大小均达到显著差异,A2、A3、A4 之间差异不显著,平均值表现相同,整体上各组叶面积随酚酸浓度变化较小,各组 A4 处理相较 A1 处理叶面积大小分别下降 16.20%,6.38%,17.44%,21.68%,说明施加外源酚酸可以抑制马铃薯叶片生长,降低马铃

薯叶面积大小,但是受酚酸浓度变化的影响较低;在同一酚酸浓度下,施加液态有机肥提高了马铃薯叶面积,B3 浓度处理各组均与 B1 达到显著差异,各组叶面积平均大小为 B3>B4>B2>B1,平均值之间均达到显著差异,表明液态有机肥可以促进马铃薯叶片生长,增加马铃薯叶面积。

表 3 液态有机肥对不同浓度酚酸胁迫下马铃薯叶面积的影响

单位:cm²

处理	A1	A2	A3	A4	平均值
B1	1271.47±137.66efg	1030.67±102.01i	1156.26±229.95ghi	1065.40±63.57hi	1130.95±198.00d
B2	1314.84±373.00defg	1180.07±264.16ghi	1259.62±249.40fgh	1230.92±237.40fgh	1246.36±203.43c
B3	1766.91±387.13a	1501.45±187.84bcd	1570.77±352.82bcde	1458.69±369.45bcd	1574.45±207.48a
B4	1600.44±90.70ab	1389.88±187.01cdef	1378.97±214.77cdef	1253.40±412.05fgh	1405.67±210.54b
平均值	1488.41±296.36a	1275.51±226.11b	1341.40±226.76ab	1252.10±250.20b	

2.1.4 整株干物质 由表 4 可知,各组处理的整株干物质质量随着酚酸浓度增加,B1 整体表现为下降,其他各组表现为先升后降,各组 A4 与 A1 处理相比,B2 上升 0.42%,B1、B3、B4 分别下降 10.84%,2.14%,2.72%;施加液态有机肥后,各组干物质质量随液态有机肥浓度增加

而增加,平均值大小为 B4>B3>B2>B1,且 B4 各组平均值与 B1 均达到显著差异,说明液态有机肥可以补充土壤中养分,提高马铃薯整株的干物质质量,低浓度酚酸与液态有机肥表现为协同作用,进一步提高了马铃薯干物质质量,但高浓度酚酸会减小马铃薯整株干物质质量。

表 4 液态有机肥对不同浓度酚酸胁迫下马铃薯干物质质量的影响

单位:g

处理	A1	A2	A3	A4	平均值
B1	37.16±5.99ab	35.75±6.72ab	32.37±6.23b	33.13±2.25b	34.62±2.24b
B2	35.33±6.19ab	37.23±3.99ab	32.96±4.23b	35.48±1.67ab	34.67±1.38b
B3	37.35±3.77ab	39.77±5.23a	33.42±3.82b	36.55±4.89ab	36.75±2.73ab
B4	38.10±5.23ab	40.27±3.00a	34.67±2.09ab	37.06±6.01ab	38.10±1.53a
平均值	36.22±1.11ab	37.75±2.65a	33.40±0.99b	35.75±2.06ab	

2.2 不同液态有机肥施用量对不同浓度酚酸胁迫下马铃薯成熟期土壤酶活性影响

2.2.1 酸性磷酸酶 酸性磷酸酶活性与作物的供磷

水平有关,可以加速有机磷的脱磷速度,可以用以评估土壤磷素的转化强度^[11]。从图 1 可以看出,除 B2 外,各组磷酸酶活性均随酚酸浓度增加而下降,各组处理

A4 相较 A1 酶活性分别下降 10.95%, 7.69%, 6.66%, 15.00%; 在添加液态有机肥后各组磷酸酶活性变化趋势相同, 均为先上升后下降, 其中 A4 处理在 B2 处理下酶活性最高, 其余各组均以 B3 处理下活性最高, B3 组相较 B1 组活性分别提高 8.75%, 7.79%, 10.80%, 9.09%。表明酚酸可以抑制土壤酸性磷酸酶活性, 从而阻碍马铃薯对土壤中有效磷的吸收, 而液态有机肥可以补充土壤中的磷元素, 改善土壤磷酸酶活性, 但是当有机肥浓度超量时改善效果会有所下降。

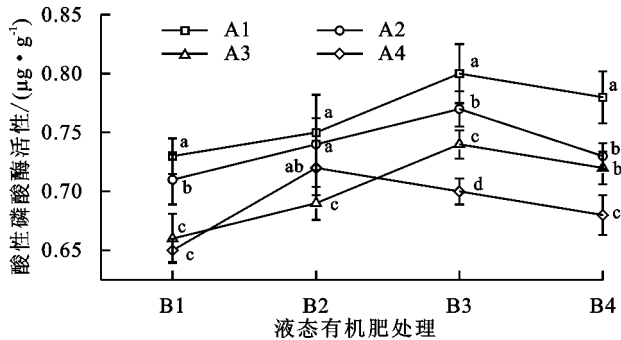


图 1 液态有机肥对不同浓度酚酸胁迫下土壤酸性磷酸酶活性影响

2.2.2 脲酶 脲酶可以专一性地对尿素进行水解作用, 并且具有唯一性, 能够影响土壤氮素的循环, 一定程度上可以通过其活性大小体现氮肥利用率的高低^[12]。由图 2 可知, 各组处理脲酶活性随着酚酸浓度增加而受到抑制, 各组处理脲酶活性大小均为 A1>A2>A3>A4, 各组均与 A1 处理达到显著差异, 但是处理组间差异不显著; 添加液态有机肥后各组处理变化为先升后降, 且均以 B3 处理下活性最高, B3 各组相较 B1 组活性分别提高 8.05%, 11.49%, 21.40%, 20.74%。表明酚酸可以抑制土壤脲酶活性, 但是酚酸浓度不同对脲酶活性抑制效果差异较小, 施用液态有机肥可以减轻酚酸对土壤脲酶活性的抑制作用, 并且缓解效果随浓度而变化, 在本试验中以 B3 组处理效果最好。

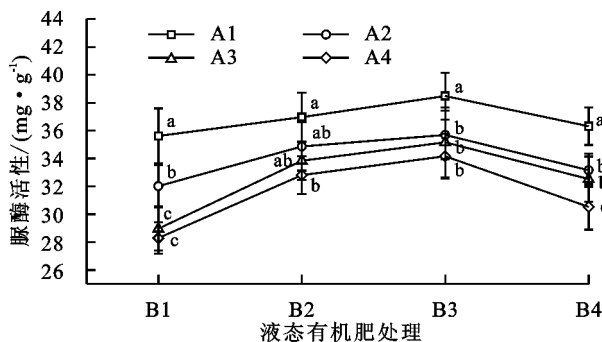


图 2 液态有机肥对不同浓度酚酸胁迫下土壤脲酶活性影响

2.2.3 蔗糖酶 由图 3 可知, 随着酚酸浓度增加, 对对照组 B1 蔗糖酶活性表现为随酚酸浓度上升而下降,

而施加液态有机肥后的 B2、B3、B4 处理均为先上升后下降趋势, 以 A2 活性最高, A4 活性最低, 在未添加液态有机肥时, 酚酸对蔗糖酶活性的抑制作用随酚酸升高而升高; 低浓度酚酸与液体有机肥表现为协同作用, 高浓度酚酸则会抑制蔗糖酶活性, 即低促高抑现象; 施用液态有机肥后, 各组酶活性均随着有机肥浓度增加而提高, 表现为极显著正相关 ($P < 0.01$), 各组 B4 处理相较 B1, 酶活性分别提高 7.50%, 11.69%, 18.20%, 13.12%, 在 A3 酚酸浓度下提升效果最强。

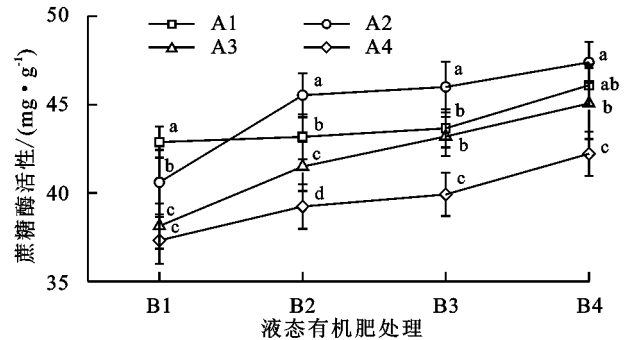


图 3 液态有机肥对不同浓度酚酸胁迫下土壤蔗糖酶活性影响

2.2.4 过氧化氢酶 过氧化氢酶可以处理过氧化氢的分解, 从而解除过氧化氢对作物的毒害作用。由图 4 可知, 各组过氧化氢酶活性随着酚酸浓度增加, 整体呈上升趋势, 说明酚酸可能会加重土壤毒害物质的生成, 从而使马铃薯对逆境的胁迫产生了应答, 通过增加过氧化氢酶活性加速毒害物质的分解; 添加液态有机肥后, A1 处理酶活性表现为上升, 其余各组均表现为先升后降, 在 B4 处理下 A2 酶活性低于 A1 处理, 并且处理之间的差异性减小, 表明液态有机肥可以提高土壤过氧化氢酶活性, 从而加强马铃薯对土壤中自毒物质的清理作用, 但是过高的液态有机肥会降低酚酸处理下的过氧化氢酶活性, 这可能与液态有机肥含有大量有机质相关。

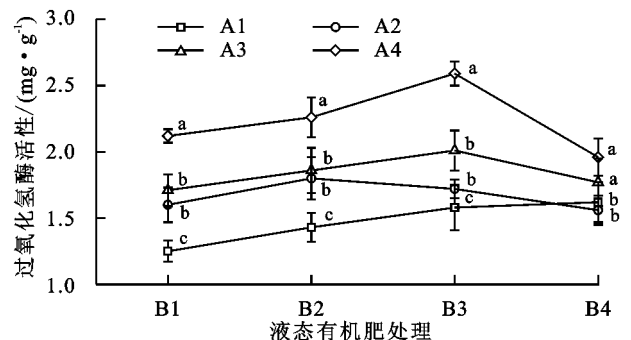


图 4 液态有机肥对不同浓度酚酸胁迫下土壤过氧化氢酶活性影响

2.2.5 多酚氧化酶 由图 5 可知, 随着酚酸浓度上升, 各组多酚氧化酶活性整体均为上升趋势, 均以 A4 活性最高, 与 A1 相比分别上升 51.14%, 21.45%, 8.93%,

58.7%；添加液态有机肥后除 A1 外各组酶活性均随有机肥浓度提高而提高，并且差异显著也随之增加，B4 各组处理间均达到显著差异，B4 处理相较 B1 处理各组酶活性分别提高 23.91%，22.64%，33.66%，37.69%。表明酚酸可以提高土壤多酚氧化酶活性，并随浓度增加提高作用加强，在高浓度液态有机肥下差异更显著；施加液态有机肥可以提高多酚氧化酶活性，且随着有机肥浓度增加，对酚酸处理下多酚氧化酶活性提高效果增加，但是对未做酚酸处理的土壤，有机肥浓度过高则提高效果下降。

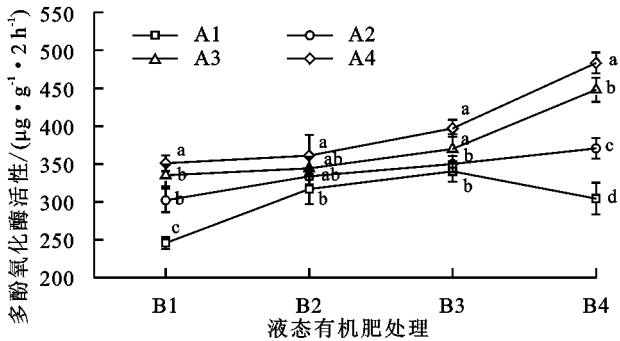


图 5 液态有机肥对不同浓度酚酸胁迫下土壤多酚氧化酶活性影响

2.2.6 FDA 水解酶 FDA 水解酶活性与微生物活性的相关性比其他酶活性更高，可以反映土壤中系统有机质的转化及微生物的活性和种类多样性，是土壤质量评价指标之一^[10]。由图 6 可知，施加有机肥浓度相同时，各组 FDA 水解酶活性大小为 A3>A4>A2>A1，表现为随着酚酸浓度的升高，FDA 水解酶活性先上升后下降；添加液态有机肥后各组酶活性表现为先上升后下降，各组在 B4 处理相较 B1 分别降低 1.24%，1.71%，1.67%，7.89%。表明酚酸可以提高 FDA 水解酶活性，施加液态有机肥可以进一步增强提高效果，但是液态有机肥浓度过高，提高效果会下降甚至产生抑制作用，这可能是因为液态有机肥中大量有机质与腐解酸改变了土壤中微生物的生长环境，影响了 FDA 水解酶的活性。

表 5 马铃薯形态指标和土壤酶活性相关性

指标	株高	茎粗	叶面积	干物质质量	酸性磷酸酶	脲酶	蔗糖酶	过氧化氢酶	多酚氧化酶	FDA 水解酶
株高	1.00									
茎粗	0.31	1.00								
叶面积	0.79**	0.34	1.00							
干物质质量	0.65*	0.23	0.83**	1.00						
酸性磷酸酶	0.52*	0.54*	0.35	0.60*	1.00					
脲酶	0.56*	0.55*	0.81**	0.85**	0.54*	1.00				
蔗糖酶	0.14	0.81**	0.25	0.29	0.70*	0.53*	1.00			
过氧化氢酶	-0.23	-0.54*	-0.20	-0.37	-0.76**	-0.41	-0.68*	1.00		
多酚氧化酶	-0.12	-0.28	-0.12	-0.36	-0.57*	-0.38	-0.13	0.28	1.00	
FDA 水解酶	-0.12	-0.63*	0.12	-0.06	-0.52*	-0.13	-0.53*	0.66*	0.70*	1.00

注：* 表示达到 $P<0.05$ 水平；** 表示达到 $P<0.01$ 水平。

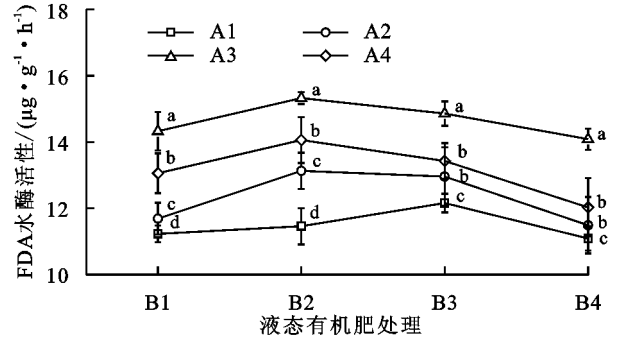


图 6 液态有机肥对不同浓度酚酸胁迫下土壤 FDA 水解酶活性影响

2.3 相关性分析

由表 5 可知，马铃薯形态指标之间，叶面积与株高、干物质质量之间极显著正相关 ($P<0.01$)，株高与干物质质量显著正相关 ($P<0.05$)，茎粗与株高、叶面积、干物质质量均未达到显著性差异。马铃薯形态指标与酸性磷酸酶、脲酶、蔗糖酶之间均为正相关，与过氧化氢酶、多酚氧化酶、FDA 水解酶之间均为负相关，其中以脲酶与形态指标之间相关性最好，与干物质质量、叶面积达到极显著正相关 ($P<0.01$)，与株高、茎粗达到显著正相关 ($P<0.05$)；酸性磷酸酶与株高、茎粗、干物质质量达到显著正相关 ($P<0.05$)；蔗糖酶仅与茎粗达到极显著相关 ($P<0.01$)；各形态指标与过氧化氢酶、多酚氧化酶、FDA 水解酶之间相关性较低，仅茎粗与过氧化氢酶、FDA 水解酶达到显著负相关 ($P<0.05$)。

土壤酶活性之间也存在相互影响，酸性磷酸酶、脲酶、蔗糖酶之间均为显著正相关 ($P<0.05$)；过氧化氢酶、多酚氧化酶、FDA 水解酶之间均为正相关，其中 FDA 水解酶与过氧化氢酶、多酚氧化酶为显著正相关 ($P<0.05$)。这 2 组酶之间均为负相关，酸性磷酸酶与过氧化氢酶极显著负相关 ($P<0.01$)，与多酚氧化酶、FDA 水解酶之间为显著负相关 ($P<0.05$)，脲酶与过氧化氢酶、多酚氧化酶、FDA 水解酶之间未达到显著 ($P>0.05$)，蔗糖酶与过氧化氢酶、FDA 水解酶之间达到显著负相关 ($P<0.05$)。

3 讨论

连作障碍已经成为当代农业生产中不容忽视的问题,而由酚酸类物质引起的化感作用与其密切相关^[13]。在不同浓度酚酸胁迫下,马铃薯的株高、茎粗、叶面积与干物量整体均为抑制作用,并且随着酚酸浓度增加,抑制作用效果更加强烈,这与石振等^[14]在酚酸类物质对大豆幼苗的生长中的研究结果相似,但也有研究^[15]表明,酚酸类物质对水稻种子萌发起着低浓度促进、高浓度抑制作用,该现象在本文中并未出现,这可能与酚酸的浓度梯度设置相关;通过施加液态有机肥可以缓解酚酸类物质带来的抑制作用,提高株高、茎粗、叶面积与干物量,酚酸浓度较低时,随施肥量增高缓解效果差异更显著,但是随着酚酸浓度增加,各组与对照组的差异减小,表明液态有机肥对酚酸的毒害作用的缓解能力有限。以各酚酸浓度下的平均数值为参考,株高、茎粗、叶面积均以 B3 处理效果最好,而干物质量以 B4 效果最好。

通过研究土壤酶活性可以揭示土壤中生化代谢作用强度以及对外界环境的适应能力^[16]。酚酸类物质对土壤酶活性影响显著^[17-18]。在本试验中,脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶随着酚酸浓度增加其活性整体为下降趋势,过氧化氢酶、FDA 水解酶、多酚氧化酶随着酚酸浓度增加其活性整体为上升趋势,这可能与酶的功能相关。脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶与土壤养分的转化关联较大^[19-20],FDA 水解酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶则作物的抗逆性相关性较大。在酚酸胁迫下,土壤养分转化受到了抑制,土壤中速效氮和速效钾迅速降低,有机质也有所减少^[21],同时土壤中的毒害物质增加,使作物对此环境产生了应答作用,提高抗逆酶活性来缓解酚酸的毒害作用^[22],酚酸也通过影响微生物对土壤酶产生影响,阿魏酸抑制了氨化细菌、硝化细菌和反硝化细菌的生长,削弱了土壤脲酶与蛋白酶的活性^[23]。功能的不同使土壤酶与马铃薯生长性状的相关性也不同,目前关于土壤酶与作物生长发育的相关性报道很多,但是结果并不一致^[24],本试验中脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶与马铃薯生长性状表现为正相关,脲酶与各生长性状均达到显著相关($P < 0.05$),这是因为脲酶具有绝对专一性,特异性地催化尿素转化为可供作物吸收的氮素,促进了作物生长发育;过氧化氢酶、FDA 水解酶、多酚氧化酶与马铃薯生长性状表现为负相关,但是相关性较低,这可能是因为它们与土壤中养分之间直接关系较低,主要与毒害物质的降解与逆境应答作用相关;功能相似的土壤酶之间表现为正相关,不同功能之间表现为负相关,其中酸性磷酸酶与过氧化氢酶、FDA 水解酶、多酚氧化酶均达到显著负相关($P < 0.05$)。

液态有机肥含有大量的有机质、腐殖酸,能迅速补充土壤中的养分,对土壤微生物也有显著影响^[25]。本试验中施加液态有机肥后,与对照组相比土壤酶活性整体均有提高,但是高施肥量处理中脲酶、酸性磷酸酶、FDA 水解酶、多酚氧化酶活性下降,表明施加液态有机肥提高了土壤酶活性,促进土壤中养分的转化,加速马铃薯对自毒物质的分解,改善土壤环境,但是过量的液态有机肥会降低部分对酶活性的促进效果,其中酸性磷酸酶、脲酶、过氧化氢酶在 B3 处理活性最高,蔗糖酶、多酚氧化酶在 B2 处理活性最高,FDA 水解酶最高在 B2 处理活性最高。

4 结论

在以香草酸和阿魏酸作为马铃薯的自毒物质模拟连作障碍试验中,外源酚酸降低了马铃薯株高、茎粗、叶面积,导致马铃薯整株的干物质量下降,抑制土壤中脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶活性,并且随着酚酸浓度增加,抑制作用增强,而过氧化氢酶、多酚氧化酶、FDA 水解酶活性在一定范围内上升。

施加液态有机肥后缓解了酚酸的抑制作用,减小了不同浓度酚酸处理间的差异,促进马铃薯生长发育,提高各项生长指标,提高土壤酶活性,加速了土壤中养分的转化与自毒物质的分解,但是不同浓度液态有机肥的缓解效果不同,过高浓度的液态有机肥会降低改善效果,在本试验中,综合生长指标与土壤酶活性,以 450 kg/hm² 的施用量效果最好。

参考文献:

- [1] 李沛文. 加快推进马铃薯主食化战略对我国粮食安全的意义与建议[J]. 发展, 2016(3): 6-7.
- [2] 翟印礼, 周博. 农业可持续发展视角下的我国粮食安全形势判断[J]. 农业经济, 2015(6): 3-5.
- [3] 徐雪凤, 回振龙, 李自龙, 等. 马铃薯连作障碍与土壤环境因子变化相关研究[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 16-23.
- [4] 林文雄. 化感水稻抑草作用的根际生物学特性与研究展望[J]. 作物学报, 2013, 39(6): 951-960.
- [5] 李自龙, 回振龙, 张俊莲, 等. 外源酚酸类物质对马铃薯植株生长发育的影响及机制研究[J]. 华北农学报, 2013, 28(6): 147-152.
- [6] 王明道, 吴宗伟, 原增艳, 等. 外源阿魏酸对水培地黄生长的影响[J]. 河南农业大学学报, 2009, 43(1): 25-29.
- [7] 田给林. 连作草莓土壤酚酸类物质的化感作用及其生物调控研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [8] 廖宗文, 毛小云, 刘可星. 有机碳肥对养分平衡的作用初探: 试析植物营养中的碳短板[J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 656-659.
- [9] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.

- [7] Hu H C, Tian F Q, Hu H P. Soil particle size distribution and its relationship with soil water and salt under mulched drip irrigation in Xinjiang of China [J]. *Science China(Technological Sciences)*, 2011, 54(6): 1568-1574.
- [8] Chedlia B A, Salwa M, Bechir B R, et al. Saline water irrigation effects on soil salinity distribution and some physiological responses of field grown Chemlali olive [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 113:538-549.
- [9] 汪洋,田军仓,高艳明,等.非耕地温室番茄微咸水灌溉试验研究[J].*灌溉排水学报*,2014,33(1):12-16.
- [10] 刘小刚,朱益飞,余小弟,等.不同水头和土壤容重下微润灌溉湿润体内水盐分布特性[J].*农业机械学报*,2017,48(7):189-197.
- [11] 胡宏昌,田富强,张治,等.干旱区膜下滴灌农田土壤盐分非生育期淋洗和多年动态[J].*水利学报*,2015,46(9):1037-1046.
- [12] Phocaides A. Handbook on Pressurized Irrigation Techniques [M]. 2nd ed. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2007.
- [13] 卢星航,史海滨,李瑞平,等.覆盖后秋浇对翌年春玉米生育期水热盐及产量的影响[J].*农业工程学报*,2017,33(1):148-154.
- [14] 杨树青,叶志刚,史海滨,等.蒙河套灌区咸淡水交替灌溉模拟及预测[J].*农业工程学报*,2010,26(8):8-17.
- [15] 朱成立,强超,黄明逸,等.咸淡水交替灌溉对滨海垦区夏玉米生理生长的影响[J].*农业机械学报*,2018,49(12):253-261.
- [16] 闵勇,朱成立,舒慕晨,等.微咸水—淡水交替灌溉对夏玉米光合日变化的影响[J].*灌溉排水学报*,2018,37(3):9-17.
- [17] 张刘东,王庆明.咸水不充分灌溉对土壤盐分分布的影响及SWAP模型模拟[J].*节水灌溉*,2015(7):32-35,39.
- [18] 郭仁松,林涛,徐海江,等.微咸水滴灌对绿洲棉田水盐运移特征及棉花产量的影响[J].*水土保持学报*,2017,31(1):211-216.
- [19] 郑凤杰,杨培岭,任树梅,等.微咸水滴灌对食用葵花的生长影响及其临界矿化度的研究[J].*灌溉排水学报*,2015,34(12):19-23.
- [20] 李彬,史海滨,张建国,等.节水改造前后内蒙古河套灌区地下水水化学特征[J].*农业工程学报*,2014,30(21):99-110.
- [21] 朱成立,舒慕晨,张展羽,等.咸淡水交替灌溉对土壤盐分分布及夏玉米生长的影响[J].*农业机械学报*,2017,48(10):220-228,201.
- [22] 马文军,程琴娟,李良涛,等.微咸水灌溉下土壤水盐动态及对作物产量的影响[J].*农业工程学报*,2010,26(1):73-80.
- [23] 栗现文,靳孟贵,袁晶晶,等.微咸水膜下滴灌棉田漫灌洗盐评价[J].*水利学报*,2014,45(9):1091-1098,1105.
- [24] 孙林,罗毅,杨传杰,等.不同灌溉量膜下微咸水滴灌土壤盐分分布与积累特征[J].*土壤学报*,2012,49(3):428-436.
- (上接第259页)
- [10] 刘海芳,马军辉,金辽,等.水稻土 FDA 水解酶活性的测定方法及应用[J].*土壤学报*,2009,46(2):365-367.
- [11] 翟优雅,张立新,高梅,等.施用磷肥对烤烟烟叶氮磷钾养分以及酸性磷酸酶和多酚氧化酶活性的影响[J].*中国土壤与肥料*,2014(2):53-57.
- [12] 曾庆宾,李涛,王昌全,等.微生物菌剂对烤烟根际土壤脲酶和过氧化氢酶活性的影响[J].*中国农学通报*,2016,32(22):46-50.
- [13] 李庆凯,刘苹,唐朝辉,等.两种酚酸类物质对花生根部土壤养分、酶活性和产量的影响[J].*应用生态学报*,2016,27(4):1189-1195.
- [14] 石振,马凤鸣,李彩凤,等.外源酚酸类物质对大豆幼苗生长的影响[J].*作物杂志*,2008(3):40-43.
- [15] 顾元,常志州,于建光,等.外源酚酸对水稻种子和幼苗的化感效应[J].*江苏农业学报*,2013,29(2):240-246.
- [16] 杨苞梅,李国良,姚丽贤,等.有机肥施用模式对蔬菜产量、品质及土壤酶活性的影响[J].*土壤通报*,2011,42(1):70-76.
- [17] 宋慧,高小丽,王晓曼,等.外源酚酸对小豆根际土壤酶活性及微生物群落结构的影响[J].*农业科学与技术*,2017(10):1935-1940.
- [18] 李庆凯,刘苹,唐朝辉,等.两种酚酸类物质对花生根部土壤养分、酶活性和产量的影响[J].*应用生态学报*,2016,27(4):1189-1195.
- [19] 方斯文,张爱华,贾明慧,等.化感作用对土壤酶影响的研究进展[J].*中国农学通报*,2012,28(32):249-252.
- [20] 荣丽,李守剑,李贤伟,等.华西雨屏区不同退耕模式细根(包括草根)分解过程中土壤酶动态[J].*植物生态学报*,2010,34(6):642-650.
- [21] 王延平,倪桂萍,姜岳忠,等.酚酸对杨树人工林土壤养分有效性及酶活性的影响[J].*应用生态学报*,2013,24(3):667-674.
- [22] 母容,潘开文,王进闯,等.阿魏酸、对羟基苯甲酸及其混合液对土壤氮及相关微生物的影响[J].*生态学报*,2011,31(3):793-800.
- [23] 沙海宁,孙权,周明,等.氮素供应对土壤酶活性及设施番茄生理抗性和产量的影响[J].*北方园艺*,2010(7):9-11.
- [24] 曹银珠,赵同科,刘树庆,等.脲酶/硝化抑制剂双控过程中硝化抑制尿素分解效应[J].*水土保持学报*,2015,29(4):143-147.
- [25] 潘芳慧,张晓玮,王友保.施磷对吊兰修复镉污染土壤及土壤酶活性的影响[J].*水土保持学报*,2018,32(3):346-351.