

不同滴灌带布设方式对苹果—大豆间作系统 土壤化感物质与微生物的影响

王鑫^{1,2}, 王若水^{1,2}, 陈梨^{1,2}, 王莉莎^{1,2},
熊常^{1,2}, 张萌^{1,2}, 代厚帅^{1,2}, 张彦勤³

(1.北京林业大学山西吉县森林生态系统国家野外科学观测研究站,北京 100083;
2.北京林业大学水土保持学院,北京 100083; 3.山西吉县红旗国有林场,山西 吉县 042299)

摘要: 为探究不同滴灌带布设方式对果农间作系统土壤酚酸类物质、酶活性和微生物分布特性影响,初步探明间作滴灌条件下,土壤酚酸类物质与土壤生物因子的相互关系。以晋西黄土区典型的苹果—大豆间作系统为研究对象,设置 3 种(L1、L2、L3)滴灌带间距,分析不同水分分布下土壤酚酸类物质、酶活性和微生物数量的空间分布变化,并在相关性基础上利用逐步回归模型,分析 3 个土壤因子之间的相互关系。结果表明:除苯甲酸和间苯三酚外,滴灌带间距对酚酸类物质分布影响显著($p < 0.05$),除过氧化氢酶外,滴灌带间距对酶活性、微生物数量分布有显著影响($p < 0.05$)。在垂直方向上,不同滴灌带布设方式使酚酸更多地分布在深层土壤,微生物数量和部分酶活性在 L1、L2 处理中随土层加深而先减后增;在水平方向上,不同滴灌带布设方式对土壤酚酸类物质、细菌和真菌分布影响与间作对照处理一致,随距树距离增加而增加。滴灌条件下,除对羟基苯甲酸外,酚酸类物质受脲酶、过氧化氢酶和放线菌的抑制作用显著,间作处理土壤酚酸总量较单作有所减少。L1 处理土壤酶活性、微生物总量最高,L2 处理土壤酚酸类物质累积量最低。其中 L2 处理在酚酸累积量最低的基础上,土壤酶活性也处于较高水平,因此,建议在果农间作系统中采用隔行大豆布设滴灌带模式,改善土壤微生态环境的同时可缓解化感物质的抑制作用。

关键词: 晋西黄土区; 滴灌带布设; 土壤酚酸; 土壤酶活性; 果农间作

中图分类号:S274.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2023)06-0305-10

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.06.039

Effects of Different Drip Irrigation Belt Layout Modes on Soil Allelopathic Substances and Microorganisms in Apple-Soybean Intercropping System

WANG Xin^{1,2}, WANG Ruoshui^{1,2}, CHEN Li^{1,2}, WANG Lisha^{1,2},

XIONG Chang^{1,2}, ZHANG Meng^{1,2}, DAI Houshuai^{1,2}, ZHANG Yanqin³

(1.Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, CNERN, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.College of Soil and Water Conservation,

Beijing Forestry University, Beijing 100083; 3.Jixian Hongqi Stateowned Forest Farm, Linfen, Shanxi 042299)

Abstract: To investigate the effects of different drip irrigation belt layout modes on the distribution of soil phenolic acids, enzyme activities, and microorganisms in the fruit characteristics-crop intercropping system, and to preliminarily explore the relationship between soil phenolic acids and soil biological factors under intercropping drip irrigation conditions, a typical apple (*Malus pumila* L.)-soybean (*Glycine max* L.) intercropping system in the loess region of western Shanxi was used as the research object, with three types of drip irrigation belt spacing (L1, L2, L3). The spatial distribution changes of soil phenolic substances, enzyme activity, and microbial quantity under different water distributions were analyzed, and based on this, stepwise regression model was used to analyze the interrelationships among these three soil factors. The results showed that except for benzoic acid and phloroglucinol, the distance between drip irrigation belts had a significant impact on the distribution of phenolic acids ($p < 0.05$), and had a significant impact on the

收稿日期:2023-05-01

资助项目:国家重点研发计划项目(2022YFE0115300);国家自然科学基金项目(32271960)

第一作者:王鑫(1999—),男,硕士研究生,主要从事农林复合方向研究。E-mail:wxin19992022@163.com

通信作者:王若水(1983—),副教授,博士,主要从事复合农林系统水肥调控研究。E-mail:wrsily_2002@163.com

enzyme activity and the distribution of microbial population except for catalase ($p < 0.05$). In the vertical direction, different drip irrigation belt layout modes resulted in more distribution of phenolic acids in deep soil, the number of microorganisms and some enzyme activities first decreased and then increased with the deepening of soil layer in L1 and L2 treatments; In the horizontal direction, the effects of different drip irrigation belt layout modes on the distribution of soil phenolic acids, bacteria, and fungi were consistent with the intercropping control treatment, increasing with the increase of distance from the tree. Under the condition of drip irrigation, phenolic acids except p-hydroxybenzoic acid were significantly inhibited by urease, catalase and actinomycetes, and the total amount of phenolic acids in intercropping soil was less than that in monocropping. L1 treatment had the highest soil enzyme activity and total microbial biomass, while L2 treatment had the lowest accumulation of phenolic acids in the soil. Among them, L2 treatment had a relatively high level of soil enzyme activity on the basis of the lowest accumulation of phenolic acids. Therefore, it is recommended to adopt the pattern of arrange a drip irrigation belt at intervals of one row of soybean in the fruit-crop intercropping system, improving the soil micro-ecological environment can alleviate the inhibition of allelochemicals at the same time.

Keywords: the losses plateau of west Shanxi Province; drip irrigation belt layout; soil phenolic acid; soil enzyme activity; fruit-crop intercrop

果农间作系统可改善水土流失,促使土地合理利用,提升农民的经济收入,因此,在晋西黄土地区被广泛应用^[1]。但由于晋西黄土地区降水不均,春夏季节蒸发旺盛,土壤涵养水源能力较差,引起地区水资源稀缺。同时,相比农作物单作,果农间作系统由于根系生态位重叠,土壤水分竞争更激烈,导致土壤微生物群落结构、酶活性受到影响,土壤微生物活性下降^[2],造成作物营养失衡,且干旱栽培条件下还会增加土壤中酚酸类物质的累积^[3],产生化感自毒作用,从而抑制作物生长,进一步影响间作系统的产量及土地生产力。因此,为实现间作系统的可持续高效发展,需在作物生长的关键时期补给水分,以改善土壤微生态环境,缓解土壤酚酸累积。不同的补水方式在改善土壤微生态环境的同时也会产生微生物数量与分布的差异^[4]。土壤酚酸与酶活性、微生物之间还存在互作关系,土壤微生物能降解、转化酚酸化感物质以改变其在土壤中的含量^[5],使化感作用发生变化,间作系统的产出受到影响,所以,需进一步探寻供水条件下土壤微生物与酚酸的相互作用机制。

一定的水分措施可以影响土壤酚酸含量、微生物数量及酶活性大小,李华等^[6]研究表明,节水措施能提高土壤微生物量和酶活性,但过高的灌水量也减少土壤微生物量;孙盈等^[7]研究芦苇(*Phragmites australis* L.)土壤中酚酸类化感物质对水分的响应发现,酚酸类物质含量随土壤含水量的升高而减少。除受水分影响外,土壤生物因子与酚酸物质间也会相互影响,及利等^[8]研究发现,在人工林土壤下阿魏酸和松香酸对微生物数量具有明显的促进作用。而在植

烟土壤中阿魏酸受到脲酶和过氧化氢酶的抑制作用,间苯三酚和阔马酸也受到脲酶的抑制作用^[9];余江敏等^[10]研究发现,对作物根部进行局部灌溉,能有效促进土壤微生物繁殖,有利于土壤生物活动。相比于传统灌溉方式,滴灌在干旱地区土壤微生物量、酶活性等方面提升效果更好^[11],其中土壤酶活性随滴灌滴头向其四周逐渐减小^[12],存在分布不均的情况。而在果农间作系统中,均匀补水条件下,土壤水分因种间竞争力的差异随果树距离的增加而增加^[13],农作物行间土壤水分分布不均,使得水分无效消耗增大,加剧果树与农作物之间的种间竞争,部分土壤也因为水分的增加提高土壤酶活性,但随着土壤含水量进一步升高,土壤转变为厌氧环境,氧气的限制使微生物呼吸受到影响,酶活性受到抑制^[14],间接抑制农作物的生长。因此,当前需考虑进一步控制土壤水分的分布,实现有利于稳产高效的间作土壤环境。目前,关于间作系统水分分布调控的研究^[13,15]主要集中在水分利用效率、作物生长指标及光合生理特性等方面,有关其对间作土壤微生物环境、酚酸分布的影响机制尚不清楚,间作补水条件下土壤酚酸与酶活性、微生物的互作研究也未充分开展。

综上,拟采用不同滴灌带布设措施调控土壤水分分布,探究不同水分分布对苹果—大豆间作系统土壤酚酸、酶活性和微生物数量的影响,为缓解当地苹果—大豆间作系统土壤酚酸的累积以及探索间作土壤酚酸与酶活性、微生物的互作关系提供参考,为优化晋西黄土区苹果—大豆间作系统滴灌水分管理模式提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

研究区位于山西省吉县(110°27'30"—111°07'20"E, 35°53'10"—36°21'02"N),属于温带大陆性气候,年平均气温 10 ℃,无霜期 170 天,年均降水量 570 mm,年均蒸发量 1 723 mm,该区表层土壤为第四纪风积黄土,土层较厚,质地均匀。供试果园 0—60 cm 土层土壤有机质、全氮、全磷分别为 9.44,0.43,0.52 g/kg,铵态氮、硝态氮、速效磷、速效钾分别为 0.73,6.92,4.64,77.87 mg/kg。

1.2 供试材料

在山西省吉县中垛乡,选取苹果—大豆间作模式作为研究对象。苹果树品种为“短枝红富士”,树龄 4 年,尚未开始坐果,果树行距为 5 m×5 m,平均胸径 6.7 cm,南北冠幅 3.1 m,东西冠幅 3.4 m,冠高 3.1 m。大豆品种为“晋豆 37 号”,株行距为 0.3 m×0.5 m,种植行距果树 1 m,播种时间为 2022 年 4 月 29 日,每个小区共 2 棵果树,小区面积 25 m²(图 1)。

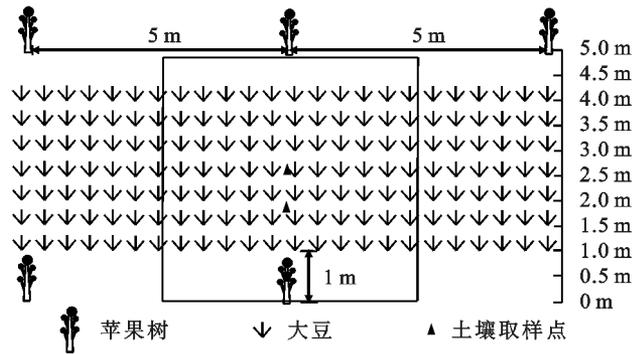


图 1 试验小区及土壤取样点平面示意

1.3 试验设计

试验于 2022 年 4—9 月进行。试验设置苹果大豆间作、苹果单作和大豆单作 3 种模式,间作设置 3 种(L1:每行大豆布设 1 条滴灌带并覆膜;L2:每间隔 1 行大豆布设 1 条滴灌带并覆膜;L3:距果树第 3 行大豆布设 1 条滴灌带并覆膜)滴灌带间距(图 2),空白对照 CK(覆膜不灌水),苹果单作 A1 和大豆单作 S1 均为覆膜不灌水,共 6 个处理,3 次重复,18 个试验小区(表 1)。由于苹果尚未坐果,所以间作系统的灌水量都以大豆的生育期为参照。以滴灌的方式在大豆的 3 个生育期(分枝期、结荚期和鼓粒期)对大豆和苹果同时进行灌水,灌溉上限为 0—60 cm 土层平均质量含水量占田间持水量(Fc)的 90%。滴灌带位于大豆根部,滴头间距 0.3 m,滴头设计流量 2 L/h。通过灌水前测定的含水量与目标含水量的差值来计算灌水量。

灌水量计算公式为:

$$M=10\gamma H(\theta_w-\theta_0) \quad (1)$$

式中:M 为灌水量(mm); γ 为土壤计划湿润层内的

土壤容重(g/cm³);H 为土壤计划湿润层深度(0.6 m); θ_w 为设定灌溉水平下土壤质量含水量(%); θ_0 为测定时的土壤质量含水量(%)。

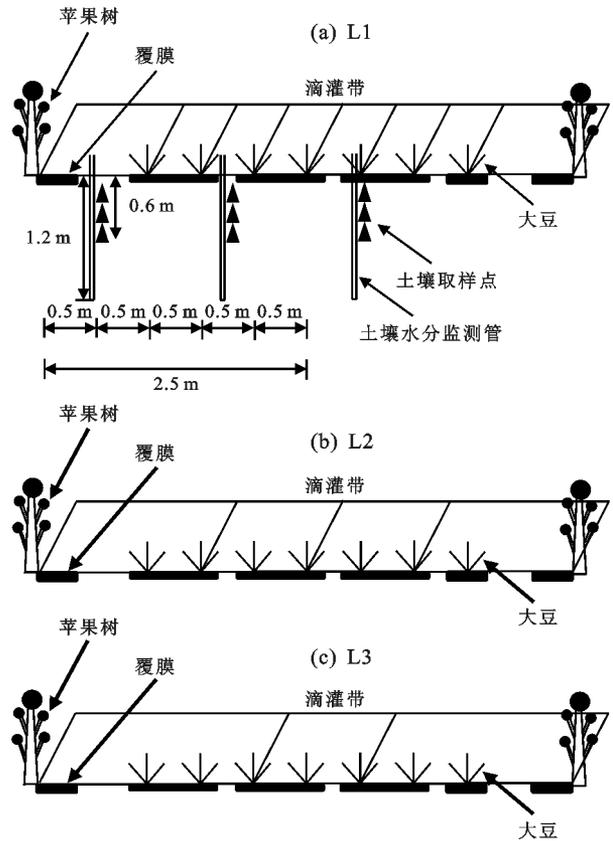


图 2 滴灌带布设

表 1 试验处理灌水量 单位:m³/hm²

处理 编号	分枝期 (05-27—06-16,20 天)	开花结荚期 (06-17—07-21,35 天)	鼓粒期 (07-22—08-20,30 天)
L1	712	823	87.3
L2	712	775	93
L3	712	556	111
CK	0	0	0
A1	0	0	0
S1	0	0	0

1.4 测定项目与方法

1.4.1 田间持水量、土壤容重及土壤含水量 播种前用环刀取 0—60 cm 土层(每 10 cm 为 1 层)土壤样品带回室内测定土壤容重和田间持水量。播种后,每隔 7 天用德国 IMKO 公司 TRIME—IPCO 土壤水分测定仪监测土壤含水量,在距离树行 0.5,1.75,2.5 m 处布设取样点,监测土层深度为 0—60 cm,每 10 cm 为 1 层。在灌水和降水后进行加测,采用烘干法进行校正。

1.4.2 土壤酚酸类物质 在大豆鼓粒期(8 月中旬)进行采样,采样点距离树干分别为 0.5,1.75,2.5 m(滴头正下方)处。在 0—20,20—40,40—60 cm 的 3 个垂直土层用土钻取土,单作苹果取距树干等距离空

地处,单作大豆以小区中间第 1 行大豆南侧 1 m 处为基准点(间作苹果树处),距离基准点 0.5,1.75,2.5 m 处相同的 3 个垂直层次(间作大豆同位置)进行采样,将土样自然风干过 40 目筛后带回室内分析。测定指标包括肉桂酸、苯甲酸、对羟基苯甲酸、根皮苷、根皮素和间苯三酚,按照张江红^[16]方法进行测定,称取风干土样各 100 g 于 250 mL 棕色玻璃广口瓶中,加入 200 mL 二氯甲烷,振荡过夜后过滤,滤液过 0.45 μm 滤膜,30 $^{\circ}\text{C}$ 减压浓缩至干,1 mL 甲醇溶解,20 μL 进样,采用高效液相色谱仪测定酚酸类物质含量。

1.4.3 土壤酶活性和微生物数量 将钻取的 150 g 鲜土样当天过 100 目筛,置入冰箱 4 $^{\circ}\text{C}$ 保存备用。土壤酶活性指标包括过氧化物酶、脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶,参考《土壤酶及其研究法》^[17] 的方法进行测定,过氧化物酶、脲酶、过氧化氢酶和蔗糖酶活性分别采用邻苯三酚比色法、靛酚比色法、高锰酸钾滴定法和二硝基水杨酸比色法测定。土壤微生物指标包括细菌、真菌、放线菌,数量测定均采用稀释平板计数法^[18],其中细菌所用培养基为牛肉膏蛋白胨培养基,真菌为马丁氏培养基,放线菌为改良高氏 1 号培养基。

1.5 数据处理与统计分析

原始数据均使用 Excel 2019 软件进行整理,使用 Origin 2021 软件对不同处理中的土壤酚酸含量、酶活性和微生物数量进行绘图。采用 SPSS 26.0 软件对影响土壤指标的 3 个因素(土层深度、距树距离以及滴灌带间距)进行方差分析,LSD 法对不同处理间土壤各指标的均值进行差异显著性检验($p < 0.05$),并在相关性基础上通过逐步回归模型对各土壤指标进行分析。

2 结果与分析

2.1 土壤酚酸类物质空间分布特征

2.1.1 垂直分布特征 在垂直方向上(图 3),间苯三酚和根皮素的含量在 CK 处理的 20—40 cm 土层较大,分别为 184.73,24.71 $\mu\text{g}/\text{kg}$,说明自然间作环境中 20—40 cm 土层有利于酚酸累积。除苯甲酸外,各处理土壤酚酸含量垂直分布变化相似,在无滴灌带布设的 A1、S1、CK 处理中随土层深度增加先增后减,在 L1 处理下,随土层深度增加而增加,在 L2、L3 处理下则随土层深度增加先减后增。土壤苯甲酸含量在 L1、L3 和 CK 处理下随土层深度增加先增后减,其余处理下随土层深度增加先减后增。方差分析表明,滴灌带间距对土壤根皮苷和对羟基苯甲酸含量垂直分布影响显著($p < 0.05$),对肉桂酸和根皮素影响极显著($p < 0.001$)。

2.1.2 水平分布特征 由图 4 可知,在水平方向上,

S1 处理距基准点 0.5 m 处的土壤对羟基苯甲酸含量最高,相较于有苹果树的处理显著增加,说明苹果根系对缓解土壤对羟基苯甲酸的累积具有明显效果。同理 A1 处理距树 0.5,1.75 m 处苯甲酸含量相比间作处理较高,表明与大豆间作可以抑制苹果林下土壤苯甲酸累积。L1、L2、L3 和 CK 处理中除 CK 处理的间苯三酚外,随距树距离的增加,土壤酚酸含量均呈增加趋势,CK 处理中间苯三酚含量则随距树距离的增加先增后减。在 A1 处理中,间苯三酚含量随距树距离增加先减后增,根皮素含量随距树距离增加而增加,其余土壤酚酸含量均随距树距离增加而减少。方差分析表明,除苯甲酸外,滴灌带间距对土壤酚酸类物质含量水平分布影响极显著($p < 0.01$),距树距离对根皮苷影响显著($p < 0.05$),对间苯三酚影响极显著($p < 0.001$),滴灌带间距和距树距离的交互作用对间苯三酚影响极显著($p < 0.001$)。

2.1.3 整体均值 由表 2 可知,滴灌带布设处理土壤酚酸总量大小为 $L3 > L1 > L2$,相比对照处理 CK 降低 8.4%~14.6%;间作 CK 处理酚酸总量小于苹果单作 A1 处理和大豆单作 S1 处理,分别减少 20.9%,6.8%。对羟基苯甲酸、根皮苷、肉桂酸和根皮素平均含量在 L2 处理最低,在 S1 处理最高;间苯三酚和苯甲酸平均含量分别在 A1、L1 处理最低,在 CK、A1 处理最高。除间苯三酚外,各酚酸平均含量都在 L1 或 L2 处理达到最低,说明 5,9 条滴灌带的布设对缓解土壤中酚酸类物质的累积有显著效果,其中 5 条滴灌带(隔行大豆布设滴灌带)处理土壤酚酸总量最低,缓解效果最好。

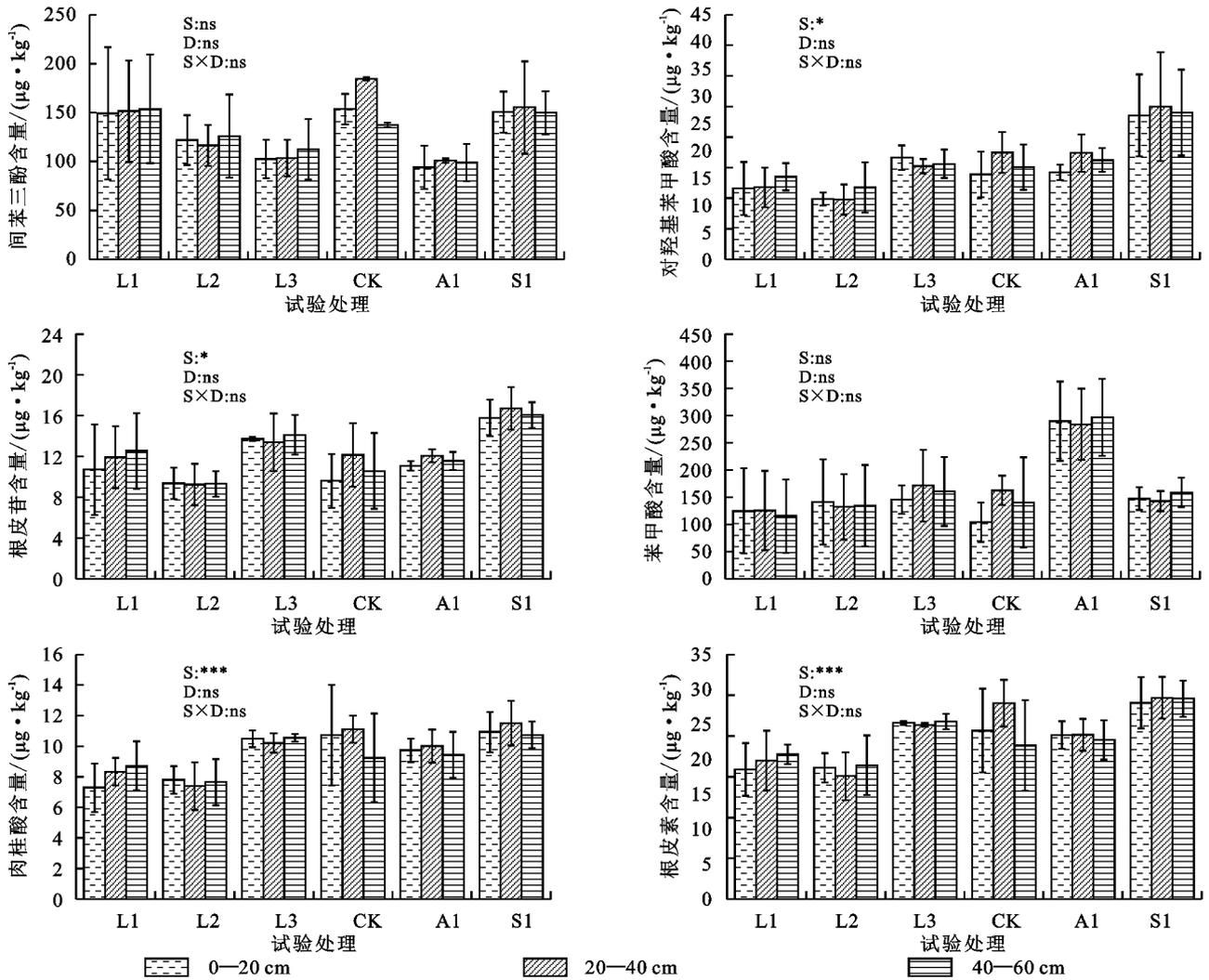
2.2 土壤酶活性与微生物空间分布特征

2.2.1 垂直分布特征 由图 5 可知,过氧化物酶活性在 A1、S1 处理下随土层深度增加先减后增,其余处理下随土层深度增加先增后减;过氧化氢酶活性总体上随土层深度增加先减后增;L1 处理中脲酶活性和 L1、L2 处理中蔗糖酶活性随土层深度增加先减后增,2 种酶活性在其余处理中则随土层深度增加而减小。过氧化物酶和脲酶活性最大值分别出现在 S1 处理 40—60 cm 土层和 A1 处理 0—20 cm 土层,过氧化氢酶和蔗糖酶活性最大值均出现在 L1 处理 40—60 cm 土层。方差分析表明,除过氧化氢酶外,滴灌带间距对土壤酶活性垂直分布影响极显著($p < 0.01$),土层深度对过氧化氢酶活性影响显著($p < 0.05$),对蔗糖酶活性影响极显著($p < 0.001$),二者交互作用仅对蔗糖酶活性的影响达到极显著水平($p < 0.01$)。

由图 6 可知,细菌、真菌和放线菌数量的最大值均出现在 0—20 cm 土层,说明土壤表层环境有利于

微生物的活动和繁殖。除 L1 和 L2 处理外,0—20 cm 土层细菌、真菌、放线菌数量高于其他土层 6.8%~122.4%,并随土层深度增加而降低,L1 和 L2 处理中细菌、真菌、放线菌数量则随土层深度增加先减后

增。方差分析表明,滴灌带间距对土壤细菌、真菌、放线菌数量垂直分布影响极显著($p < 0.01$),土层深度对细菌影响显著($p < 0.05$),对真菌影响极显著($p < 0.01$),二者的交互作用仅对真菌影响显著($p < 0.05$)。



注:标号显示不同的因素与土壤酚酸各个指标的显著性关系,S、D 分别为滴灌带间距、土层深度,ns 表示影响不显著($p > 0.05$);*、**、*** 分别表示 $p < 0.05, 0.01, 0.001$ 。下同。

图 3 土壤酚酸类物质含量垂直分布

2.2.2 水平分布特征 由图 7 可知,L1、L2、L3 处理中除蔗糖酶外,各酶活性总体上随距树距离增加先减后增;CK 处理中除脲酶外,各酶活性均随距树距离增加而增加;除过氧化氢酶外,各酶活性在 A1 处理下随距树距离增加先增后减,在 S1 处理下随距基准点距离增加而减小。方差分析表明,除过氧化氢酶外,滴灌带间距对土壤酶活性水平分布影响极显著($p < 0.01$),距树距离对过氧化氢酶活性影响显著($p < 0.05$)。

由图 8 可知,细菌、真菌、放线菌数量在 L2 处理下随距树距离增加而增加,在 A1 处理下随距树距离增加而减少;在 L1、L3、CK 处理下细菌和真菌数量随距树距离增加而增加,放线菌数量则随距树距离增加变化各不相同。方差分析表明,滴灌带间距对土壤 3 种微生物数量水平分布影响极显著($p < 0.001$),距

树距离对真菌影响达到显著水平($p < 0.05$)。

2.2.3 整体均值 由表 3 可知,滴灌带布设处理土壤酶活性总量大小为 $L1 > L2 > L3$,L1、L2 处理显著大于对照 CK 处理,分别增加 84.9%,26.4%,L3 处理高于对照 CK14.8%;过氧化物酶、过氧化氢酶、脲酶、蔗糖酶活性均值分别在 A1、CK、L3、S1 处理最低,在 L3、L1、A1、L1 处理最高,L1、L2 处理在蔗糖酶和酶活性总量方面显著高于无灌溉处理,说明 9,5 条滴灌带的布设措施对于提升土壤酶活性效果显著,其中 L1 处理酶活性总量更大,提升效果最强。

由表 4 可知,滴灌带布设处理土壤微生物总量大小为 $L1 > L3 > L2$,L1 处理较对照 CK 显著增加 144.46%,L2 处理较对照 CK 显著减少 34.18%,L3 处理也低于对照 9%;细菌、真菌、放线菌平均数量均在 L2 处

理最低,在 L1 处理最高,且 L1 处理下各微生物平均数量和总量均显著高于其他处理,表明 9 条滴灌带

(每行大豆布设滴灌带)的布设措施能显著提升间作土壤中微生物数量。

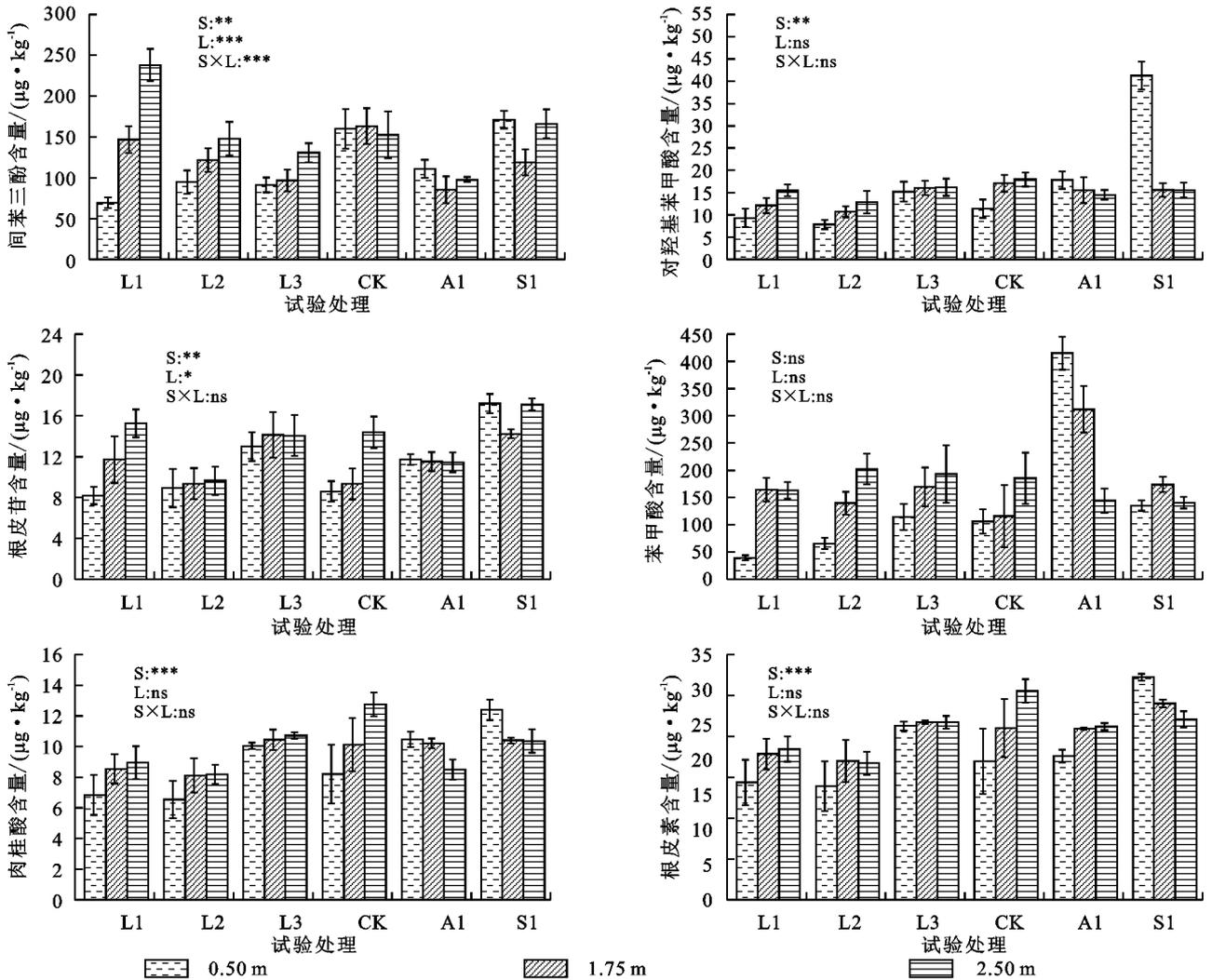


图 4 土壤酚酸类物质含量水平分布

表 2 土壤酚酸类物质含量整体平均值比较

单位: $\mu\text{g}/\text{kg}$

土壤酚酸类物质	L1(9条)	L2(5条)	L3(4条)	CK	A1	S1
间苯三酚	151.51±74.25a	121.47±27.25ab	106.18±21.05b	158.56±22.29a	98.03±14.94b	151.95±28.18a
对羟基苯甲酸	12.30±3.06b	10.47±2.65b	15.83±1.75b	15.49±3.48b	15.95±2.36b	24.16±12.99a
根皮苷	11.73±3.37bc	9.31±1.42d	13.74±1.75b	10.78±2.98cd	11.57±0.73c	16.18±1.58a
苯甲酸	122.15±63.54b	135.99±62.07b	159.03±48.87b	135.75±53.76b	290.38±121.81a	149.83±20.72b
肉桂酸	8.11±1.38b	7.61±1.19b	10.41±0.47a	10.36±2.40a	9.73±1.03a	11.06±1.14a
根皮素	16.89±2.65c	15.87±2.58c	21.58±0.53b	21.18±4.65b	19.92±1.80b	24.46±2.32a
总量	322.69±140.49b	300.72±93.37b	326.77±64.67b	352.11±70.46ab	445.57±127.09a	377.64±28.45ab

注:表中数据为平均值±标准差;同行中不同小写字母表示不同处理间酚酸类物质含量差异显著($p < 0.05$)。下同。

2.3 滴灌土壤中酚酸与土壤微生物数量、酶活性的相互关系

2.3.1 土壤酚酸与土壤微生物数量、酶活性的相关性分析 从表 5 可以看出,在 0—60 cm 土层滴灌土壤中,酚酸类物质与酶活性、微生物数量存在不同程度相关性。间苯三酚与真菌呈显著正相关($p < 0.05$),与细菌、蔗糖酶呈极显著正相关($p < 0.01$)。对羟基

苯甲酸与真菌、过氧化物酶呈显著正相关($p < 0.05$),与脲酶呈极显著负相关($p < 0.001$)。根皮苷与真菌呈显著正相关($p < 0.05$),与脲酶呈显著负相关($p < 0.05$)。苯甲酸与过氧化氢酶呈极显著负相关($p < 0.01$)。肉桂酸和根皮素均与脲酶呈极显著负相关($p < 0.001$)。除放线菌外,各微生物、酶活性指标均与酚酸存在显著相关关系。

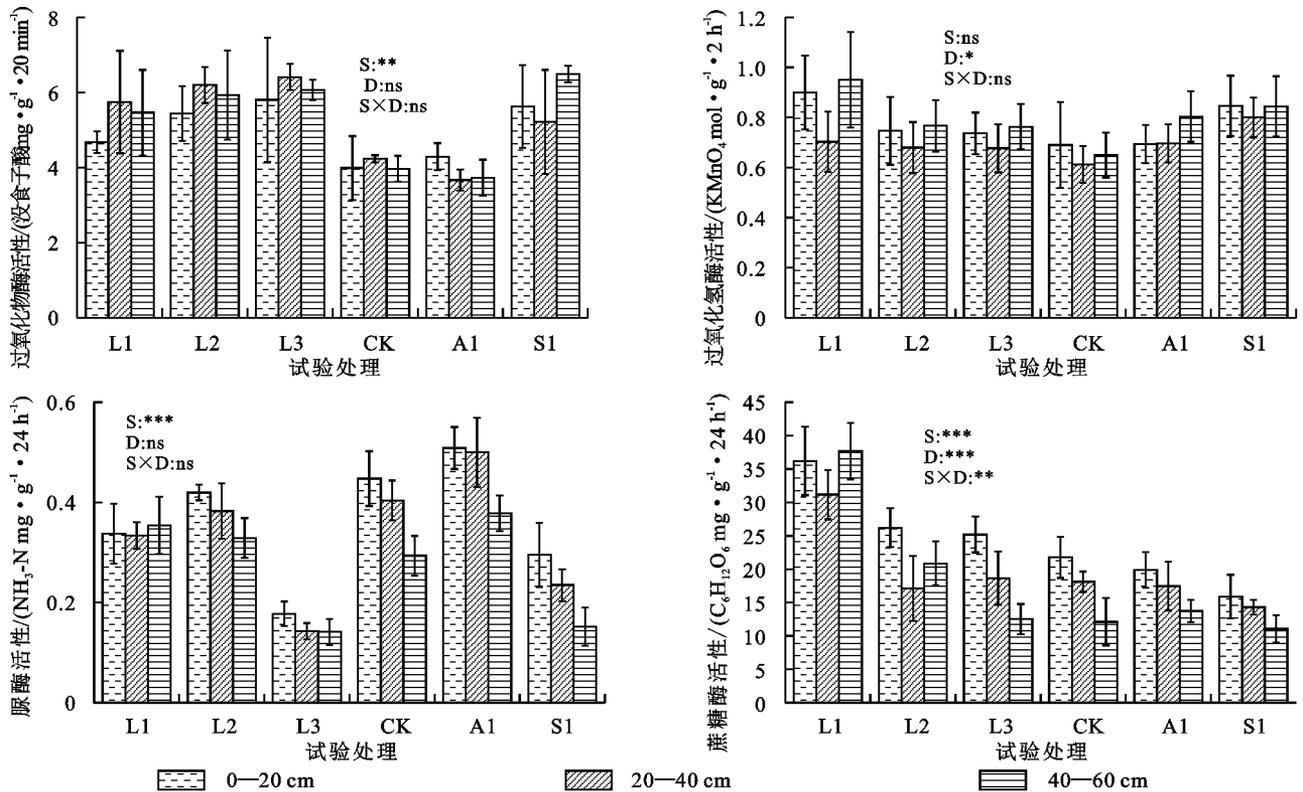


图 5 土壤酶活性垂直分布

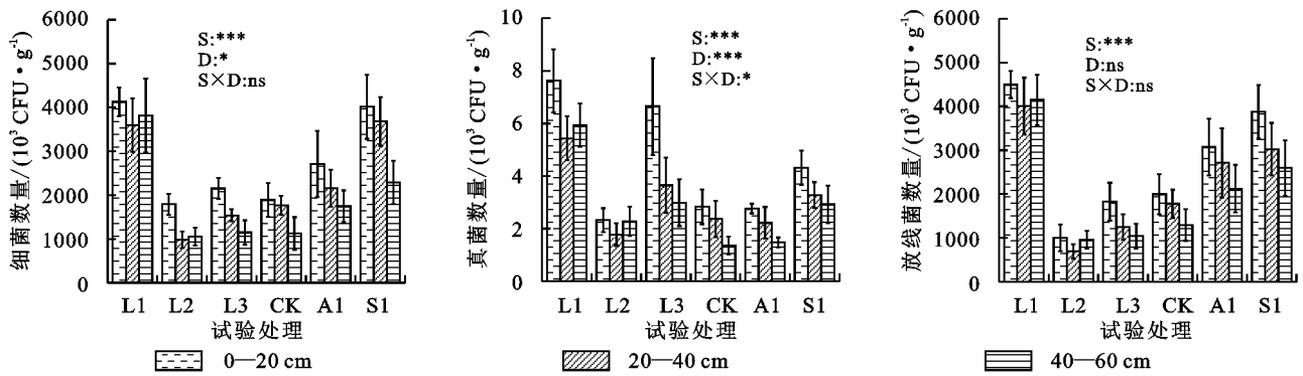


图 6 土壤微生物数量垂直分布

2.3.2 土壤酚酸与土壤微生物数量、酶活性的相互影响 为避免变量之间的干扰因素,通过逐步回归分析对 3 种土壤因子之间进行线性回归,其中标准化系数体现自变量的影响力强弱,系数正负值分别表示对因变量的促进或抑制作用^[19]。以酚酸为自变量,酶活性和微生物为因变量,剔除无关变量后拟合出回归方程(表 6),说明土壤细菌和蔗糖酶均分别受间苯三酚的促进作用和苯甲酸的抑制作用,且间苯三酚的影响更大,真菌则只受间苯三酚的促进作用。对羟基苯甲酸对过氧化物酶有促进作用,苯甲酸对过氧化氢酶有抑制作用。脲酶分别受间苯三酚的促进作用、肉桂酸和对羟基苯甲酸的抑制作用,且以间苯三酚影响最大,对羟基苯甲酸次之,肉桂酸最小。

由表 7 可以看出,以酶活性作为自变量,酚酸为因变量,剔除无关变量后拟合出 4 种酶活性和 6 种酚酸类物质的回归方程,表明间苯三酚分别受蔗糖酶的

促进作用和过氧化氢酶的抑制作用,且蔗糖酶的影响更大。对羟基苯甲酸分别受脲酶的抑制作用、蔗糖酶和过氧化物酶的促进作用,其中脲酶的影响最大,蔗糖酶次之,过氧化物酶最小。脲酶还影响根皮苷、肉桂酸、根皮素,过氧化氢酶能影响苯甲酸,从标准化系数来看,均为抑制作用。

由表 8 可以看出,以微生物作为自变量,酚酸类物质为因变量,剔除无关变量后拟合出细菌、真菌、放线菌、间苯三酚、对羟基苯甲酸和根皮苷的回归方程,说明间苯三酚受到细菌的促进作用和放线菌的抑制作用,其中细菌的影响更大。对羟基苯甲酸和根皮苷均受到真菌的促进作用和放线菌的抑制作用皆是真菌的影响更大。

3 讨论

3.1 不同滴灌带布设对间作土壤酚酸空间分布的影响

本研究发现,在垂直方向上,CK、A1 和 S1 处理

酚酸类物质在 20—40 cm 土层中分布最多,有滴灌带布设的 L1、L2、L3 处理则更多分布在 40—60 cm 土层,主要因为降雨对土壤中酚酸类物质具有淋溶作用,而滴灌措施加剧淋溶作用,使大量酚酸类物质向更深层土壤运动。在水平方向上,间作处理土壤酚酸含量随距树距离增加而升高,可能是由于随着距离增加,鼓粒期大豆行间的郁闭度高于幼龄苹果树,受光照和降雨的淋溶作用较小,酚酸类物质降解较慢。本研究发现,间作 CK 处理土壤酚酸总量少于单作处理,表明苹果大豆间作种植有利于抑制酚酸类物质在土壤中的累积,是由于合理间作通过有效调节根际微

生物区系和群落结构,降低土壤中有害细菌,增加有益菌属,增加土壤中酚酸的降解^[20]。此外,在相同的灌溉方式下,L2 处理土壤酚酸累积量最少,可能的原因是 L3 处理 4 条滴灌带间距过大,部分大豆根部土壤供水不足,氧气含量增加,使影响酚酸物质转化的微生物固氮作用发生变化,加剧土壤酚酸类物质累积^[7],L1 处理 9 条滴灌带间距过小,水分分布更均匀,作物生长过旺而促进根系化感物质的分泌。因此,在苹果、大豆种植过程中可以考虑间作且调整滴灌带间距的措施以缓解土壤酚酸类物质的累积,以降低化感自毒作用,提高作物产量与品质。

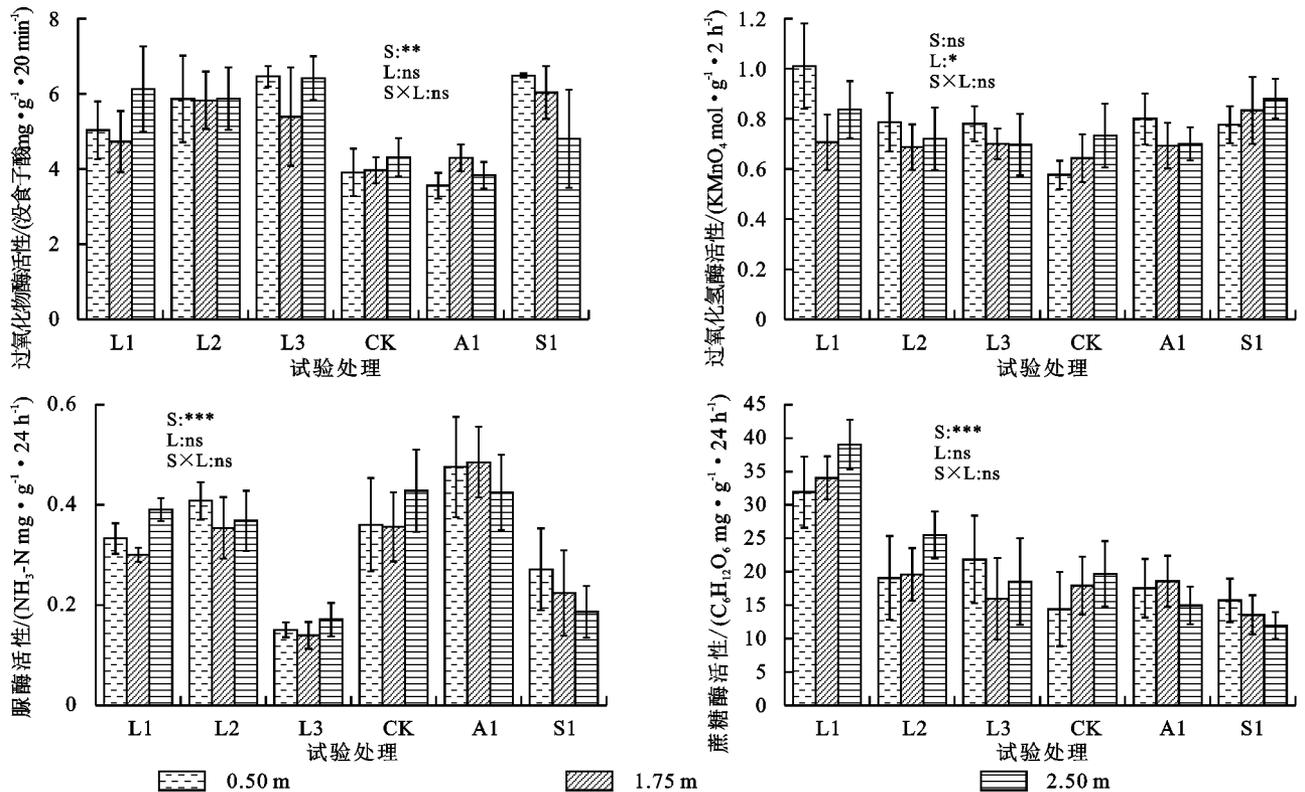


图 7 土壤酶活性水平分布

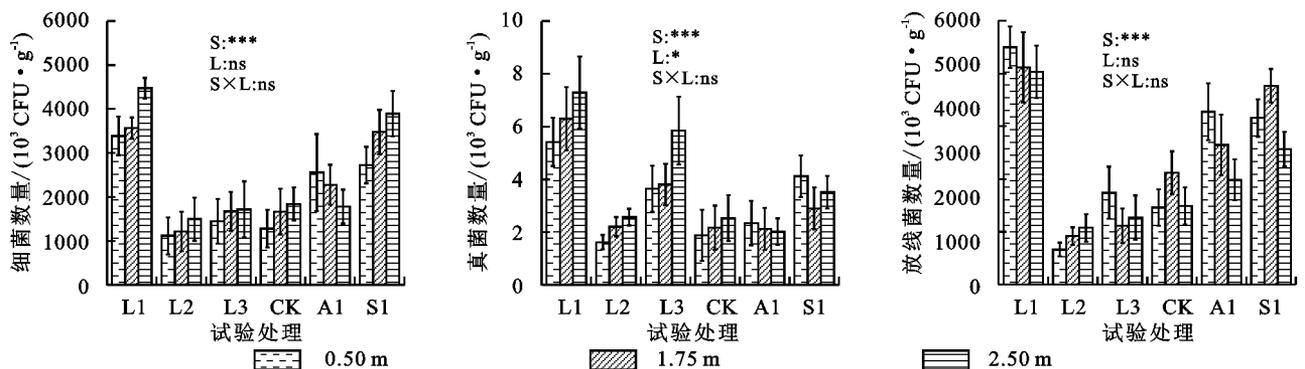


图 8 土壤微生物数量水平分布

3.2 不同滴灌带布设对间作土壤酶活性和微生物数量空间分布的影响

本研究发现,在垂直方向上,脲酶、蔗糖酶活性和微生物数量除 L1、L2 处理外,均随土层深度增加而减少,一方面,是因为靠近地表的土层具有更好的水

热、通气条件,枯落物及养分充足,有利于微生物繁殖代谢,进而提高土壤酶活性^[20];另一方面,根系的脱落、分泌物对土壤微生物及酶活性产生有利影响^[21],而随着土层加深,植物根系也相应减少。L1、L2 处理则是减少的过程中在 40—60 cm 土层又增加,可能

是由于滴灌孔出水流量主要渗入到 60 cm 土层左右, 40—60 cm 土层土壤含水量更高^[15], 该土层凭借高含水量促进土壤生物学特性的改善^[22]。在水平方向上, 细菌和真菌数量在间作处理中随距树距离增加而增加, 是由于随距树距离增加, 土壤含水率逐渐增大^[13], 使土壤团聚体破裂释放出有机碳源, 进而促进土壤微生物群落的代谢能力^[23]。本研究发现, 酶活

性和微生物总量均在 L1 处理达到最大, 表明更小的滴灌带间距有利于土壤微生物数量及酶活性的提高, 可能的原因是滴灌带条数越多, 出水口越多, 单孔出水量越少, 土壤表层水分分布越均匀, 提升土壤渗透势、养分和能量转移, 进而提高微生物活性^[24]。因此, 在苹果大豆间作系统中, 短滴灌带间距对土壤微生物、酶活性环境有更好的效果。

表 3 土壤酶活性整体平均值比较

土壤酶	L1(9 条)	L2(5 条)	L3(4 条)	CK	A1	S1
过氧化物酶/(没食子酸 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 20\text{min}^{-1}$)	5.29±1.02a	5.85±0.81a	6.09±0.90a	4.06±0.48b	3.89±0.44b	5.77±1.05a
过氧化氢酶/(KMnO_4 $\text{mol} \cdot \text{L} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 2\text{h}^{-1}$)	0.85±0.18a	0.73±0.11bc	0.73±0.09bc	0.65±0.11c	0.73±0.09bc	0.83±0.10ab
脲酶/($\text{NH}_3\text{-N}$ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24\text{h}^{-1}$)	0.34±0.04b	0.38±0.05b	0.15±0.03d	0.38±0.08b	0.46±0.08a	0.23±0.07c
蔗糖酶/($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24\text{h}^{-1}$)	35.00±4.82a	21.39±5.13b	18.78±6.09b	17.34±4.88bc	17.03±3.60bc	13.74±2.93c
总量	41.49±5.33a	28.36±5.00b	25.75±6.27bc	22.43±5.12cd	22.12±3.83cd	20.57±3.15d

表 4 土壤微生物数量整体平均值比较

土壤微生物	L1(9 条)	L2(5 条)	L3(4 条)	CK	A1	S1
细菌	3809.82±575.35a	1275.21±429.20c	1610.76±479.34bc	1593.66±457.70bc	2203.01±629.94b	3365.46±978.97a
真菌	6.33±1.30a	2.13±0.50c	4.43±2.04b	2.19±0.82c	2.16±0.65c	3.51±0.83b
放线菌	4217.22±509.93a	886.06±247.36e	1374.18±459.25de	1690.16±453.31d	2636.57±709.97c	3164.77±775.40b
总量	8033.37±711.50a	2163.40±614.38e	2989.37±820.80de	3286.01±826.31d	4841.74±1242.08c	6533.74±1484.72b

单位:($\times 10^3$ CFU/g)

表 5 0—60 cm 土层滴灌土壤中酚酸类物质与酶活性、微生物数量相关性分析

酚酸类物质	细菌	真菌	放线菌	过氧化物酶	过氧化氢酶	脲酶	蔗糖酶
间苯三酚	0.512**	0.418*	0.282	0.167	-0.082	0.335	0.505**
对羟基苯甲酸	0.082	0.389*	-0.036	0.394*	-0.117	-0.600***	0.014
根皮苷	0.198	0.407*	0.060	0.204	-0.192	-0.472*	0.059
苯甲酸	-0.032	0.103	-0.234	0.138	-0.522**	-0.239	-0.056
肉桂酸	-0.083	0.203	-0.172	0.239	-0.266	-0.738***	-0.210
根皮素	-0.122	0.205	-0.176	0.356	-0.210	-0.745***	-0.196

表 6 滴灌土壤酚酸类物质与酶活性、微生物数量的逐步回归分析

y	x	偏回归方程	NC	R ²	p
细菌	x_1 , 间苯三酚	$y = 1.147 \times 10^6 + 1.935 \times 10^4 x_1 - 9.786 \times 10^3 x_2$	0.768(x_1)	0.358	0.002**
	x_2 , 苯甲酸		-0.460(x_2)		
真菌	间苯三酚	$y = 1913.548 + 18.864x$	0.418	0.142	0.030*
过氧化物酶	对羟基苯甲酸	$y = 4.317 + 0.111x$	0.394	0.121	0.042*
过氧化氢酶	苯甲酸	$y = 0.94 - 0.001x$	-0.522	0.243	0.005**
脲酶	x_1 , 间苯三酚	$y = 0.597 + 0.001x_1 - 0.03x_2 - 0.017x_3$	0.627(x_1)	0.837	0.001***
	x_2 , 肉桂酸		-0.456(x_1)		
	x_3 , 对羟基苯甲酸		-0.516(x_1)		
蔗糖酶	x_1 , 间苯三酚	$y = 17.706 + 0.14x_1 - 0.075x_2$	0.778(x_1)	0.372	0.001***
	x_2 , 苯甲酸		-0.490(x_2)		

注:NC 为标准化系数, 样本总数为 81。下同。

3.3 土壤酚酸与土壤微生物数量、酶活性的相互关系

本研究发现, 在 0—60 cm 土层滴灌土壤中, 除间苯三酚外, 总体上土壤酚酸类物质对微生物、酶活性具有抑制作用, 即随着酚酸类物质累积, 酶活性、微生物数量越低, 其可能原因是酚酸通过淋溶、根系分泌等途径进入土壤后, 引起微生物区系及其活力的改变, 使周围生态环境遭到破坏, 进而影响土壤中微生物

数量与酶活性^[25], 反之脲酶、放线菌等因子显著抑制土壤中酚酸增长, 因此, 可以通过调节土壤微生态环境来缓解间作土壤中酚酸的累积, 以降低间作中植物的生长障碍。此外, 标准化系数表明, 土壤脲酶活性对酚酸类物质的影响较酚酸类物质对脲酶活性更大, 与前人^[9]研究结果一致。酚酸类物质对放线菌无直接影响, 考虑到酚酸与 4 种酶活性的相互关系, 可

以推断酚酸能通过影响酶活性对土壤放线菌间接产生影响,以抑制土壤团聚体结构形成,降低土壤肥力。综上所述,本研究中土壤脲酶、过氧化氢酶和放线菌对部分酚酸的降解有显著效果,由于 L2 处理土壤酶

活性总量较高,酚酸总量最低,且 L2 处理 5 条滴灌带较 L1 处理 9 条滴灌带成本更低,建议在苹果间作大豆滴灌系统中采用隔行大豆布设滴灌带(5 条滴灌带)模式。

表 7 滴灌土壤酶活性与酚酸类物质的逐步回归分析

<i>y</i>	<i>x</i>	偏回归方程	NC	R^2	<i>p</i>
间苯三酚	x_1 , 蔗糖酶	$y = 137.977 + 3.727x_1 - 136.467x_2$	0.673	0.318	0.004**
	x_2 , 过氧化氢酶		-0.380		
对羟基苯甲酸	x_1 , 脲酶	$y = 7.382 - 23.268x_1 + 0.174x_2 + 1.373x_3$	-0.752	0.559	0.001***
	x_2 , 蔗糖酶		0.465		
	x_3 , 过氧化物酶		0.387		
根皮苷	脲酶	$y = 15.295 - 12.734x$	-0.472	0.192	0.013*
苯甲酸	过氧化氢酶	$y = 309.739 - 221.879x$	-0.522	0.243	0.005**
肉桂酸	脲酶	$y = 11.939 - 11.094x$	-0.738	0.526	0.001***
根皮素	脲酶	$y = 24.692 - 22.612x$	-0.745	0.537	0.001***

表 8 滴灌土壤微生物与酚酸类物质的逐步回归分析

<i>y</i>	<i>x</i>	偏回归方程	NC	R^2	<i>p</i>
间苯三酚	x_1 , 细菌	$y = 67.516 + 6.036 \times 10^{-5}x_1 - 3.513 \times 10^{-5}x_2$	1.520	0.442	0.001***
	x_2 , 放线菌		-1.105		
对羟基苯甲酸	x_1 , 真菌	$y = 10.203 + 0.001x_1 - 1.637 \times 10^{-6}x_2$	0.962	0.352	0.002**
	x_2 , 放线菌		-0.761		
根皮苷	x_1 , 真菌	$y = 9.202 + 0.001x_1 - 1.067 \times 10^{-6}x_2$	0.835	0.248	0.013*
	x_2 , 放线菌		-0.569		

4 结论

(1)垂直方向上,不同滴灌带布设方式使土壤酚酸类物质更多地分布在 40—60 cm 土层,脲酶、蔗糖酶活性和微生物数量在 L3 处理中与对照间作、单作处理变化一致,随土层深度增加而减少,在 L1、L2 处理中则随土层深度增加先减后增。

(2)水平方向上,土壤酚酸含量、细菌和真菌数量在滴灌带布设处理下随距树距离增加而增加,与间作 CK 处理一致。

(3)0—60 cm 土层滴灌土壤中间苯三酚对细菌、真菌、脲酶和蔗糖酶具有促进作用,其他酚酸则总体对酶活性、微生物存在抑制作用,除对羟基苯甲酸外,酚酸类物质受脲酶、过氧化氢酶和放线菌的抑制作用显著,间苯三酚、对羟基苯甲酸、根皮苷则受蔗糖酶、过氧化物酶、细菌、真菌的促进作用。

(4)间作处理土壤酚酸总量低于单作,酶活性总量高于单作。滴灌各处理土壤酚酸总量大小为 L3 > L1 > L2,酶活性总量大小为 L1 > L2 > L3,微生物总量大小为 L1 > L3 > L2。综上,L2 处理土壤酶活性总量较高的同时酚酸总量最低,因此,隔行大豆布设 1 条滴灌带可作为晋西黄土地区苹果大豆间作系统优化微生态环境、缓解土壤酚酸累积的参考。

参考文献:

[1] 王丹,毕华兴,许华森,等.苹果花生间作系统土壤水分

动态及主要竞争区域[J].干旱地区农业研究,2018,36(1):89-94.

- [2] Hueso S, García C, Hernández T. Severe drought conditions modify the microbial community structure, size and activity in amended and unamended soils[J].Soil Biology and Biochemistry,2012,50:167-173.
- [3] 孙小霞,王海斌,何海斌,等.田间旱育条件下不同化感潜力水稻根际土壤酚酸类和萜类物质分析[J].中国生态农业学报,2014,22(7):806-812.
- [4] 马梓文.补水对黄河口湿地土壤微生物和团聚体组成的影响[D].北京:北京林业大学,2017.
- [5] Inderjit. Soil microorganisms: An important determinant of allelopathic activity[J].Plant and Soil,2005,274(1/2):227-236.
- [6] 李华,贺洪军,李腾飞,等.不同地下滴灌制度下黄瓜根际微生物活性及功能多样性[J].应用生态学报,2014,25(8):2349-2354.
- [7] 孙盈,李萍萍,付为国.芦苇腐解土中酚酸类化感物质的水分响应特性研究[J].广西植物,2019,39(5):661-667.
- [8] 及利,杨立学.采煤沉陷区不同造林树种恢复土壤酚酸物质对土壤微生物的影响[J].应用生态学报,2017,28(12):4017-4024.
- [9] 白羽祥,杨焕文,徐照丽,等.连作植烟土壤中酚酸物质与土壤因子的关系分析[J].浙江农业学报,2018,30(11):1907-1914.

(下转第 324 页)

- [10] Song Y, Gao M X, Wang Z R, et al. Spatio-temporal variability characteristics of coastal soil salinization and its driving factors detection[J]. *Water*, 2022, 14(20): e3326.
- [11] 吴亚坤, 刘广明, 苏里坦, 等. 基于电磁感应研究新疆土壤盐分三维空间变异对季节的响应[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(14): 173-178.
- [12] 李洪义, 史舟, 唐惠丽. 基于三维普通克里格方法的滨海盐土电导率三维空间变异研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(2): 359-363.
- [13] Chamaki S, Taghvaeian S, Zhang H L, et al. Soil salinity variations in an irrigation scheme during a period of extreme dry and wet cycles[J]. *Soil Systems*, 2019, 3(2): e35.
- [14] Nachshon U. Cropland soil salinization and associated hydrology: Trends, processes and examples [J]. *Water*, 2018, 10(8): e1030.
- [15] 马贵仁, 屈忠义, 王丽萍, 等. 基于 ArcGIS 空间插值的河套灌区土壤水盐运移规律与地下水动态研究[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 208-216.
- [16] 张术伟, 王卓然, 常春艳, 等. 黄三角滨海区土壤水盐时空分异特征及耦合关系分析[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(4): 299-308, 315.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [18] 王遵亲, 祝寿泉, 俞仁培, 等. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [19] 云安萍. 西北绿洲典型盐渍土区土壤盐分的空间分布特征及淋盐需水量分析[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [20] 刘崇刚, 孙伟, 张落成. 长江三角洲碳排放与植被覆盖耦合协调时空格局及影响因素分析[J]. *地理科学*, 2023, 43(1): 142-151.
- [21] 邝嫦娥, 李文意, 黄小丝. 长江中游城市群碳排放强度与经济高质量发展耦合协调的时空演变及驱动因素[J]. *经济地理*, 2022, 42(8): 30-40.
- [22] Thiam S, Villamor G B, Kyei-Baffour N, et al. Soil salinity assessment and coping strategies in the coastal agricultural landscape in Djilor district, Senegal [J]. *Land Use Policy*, 2019, 88: e104191.
- [23] 许婕, 刘加珍, 张天举, 等. 黄河口湿地柽柳灌丛土壤盐渍化特征[J]. *生态学报*, 2022, 42(17): 7118-7127.
- [24] 黄静, 赵庚星, 奚雪, 等. 光谱与纹理信息结合的黄河三角洲土壤盐渍化信息提取: 以垦利区为例[J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(3): 594-601.
- [25] 王卓然, 赵庚星, 高明秀, 等. 黄河三角洲典型地区春季土壤水盐空间分异特征研究: 以垦利县为例[J]. *农业资源与环境学报*, 2015, 32(2): 154-161.

(上接第 314 页)

- [10] 余江敏, 李伏生, 农梦玲. 根区局部灌溉和有机无机氮比例对种植玉米土壤酶活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(2): 334-340.
- [11] 贺伟. 不同灌溉方式对燕麦光合及土壤生物特性的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
- [12] 窦超银, 康跃虎, 万书勤, 等. 覆膜滴灌对地下水浅埋区重度盐碱地土壤酶活性的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(3): 44-51.
- [13] 廖文超, 毕华兴, 赵云杰, 等. 晋西苹果+大豆间作土壤水分分布及其对大豆生长的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2014, 12(1): 24-28.
- [14] 李新鸽, 韩广轩, 朱连奇, 等. 降雨引起的干湿交替对土壤呼吸的影响: 进展与展望[J]. *生态学杂志*, 2019, 38(2): 567-575.
- [15] 李超楠, 王若水, 周宣, 等. 滴灌水肥调控对苹果-大豆间作系统光合特性和水分利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(3): 299-310.
- [16] 张江红. 酚类物质对苹果的化感作用及重茬障碍影响机理的研究[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2005.
- [17] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [18] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [19] 李亮亮, 李天来, 张恩平, 等. 四种酚酸物质在土壤中降解的研究[J]. *土壤通报*, 2010, 41(6): 1460-1465.
- [20] Zhang Z Y, Pan L P, Li H H. Isolation, identification and characterization of soil microbes which degrade phenolic allelochemicals[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2010, 108(5): 1839-1849.
- [21] 魏媛, 张金池, 喻理飞. 退化喀斯特植被恢复过程中土壤微生物生物量碳的变化[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2008, 32(5): 71-75.
- [22] 叶德练, 齐瑞娟, 张明才, 等. 节水灌溉对冬小麦田土壤微生物特性、土壤酶活性和养分的调控研究[J]. *华北农学报*, 2016, 31(1): 224-231.
- [23] 朱义族, 李雅颖, 韩继刚, 等. 水分条件变化对土壤微生物的影响及其响应机制研究进展[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4323-4332.
- [24] Chen R R, Senbayram M, Blagodatsky S, et al. Soil C and N availability determine the priming effect: Microbial N mining and stoichiometric decomposition theories [J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(7): 2356-2367.
- [25] Liu P, Liu Z H, Wang C B, et al. Effects of three longchain fatty acids present in peanut (*Arachis hypogaea* L.) root exudates on its own growth and the soil enzymes activities[J]. *Allelopathy Journal*, 2012, 29(1): 13-24.