中国油料作物学报
Chinese Journal of Oil Crop Sciences
2026,48(4):195-203
doi:10.19802/j.issn.1007-9084.2025284

甘蔗间作花生根系分泌物中富马酸对土壤微生态的影响

熊军[1],雷诗敏[1],黄志鹏[1],廖露露[1],廖国婷[1],吴海宁[1],李忠[2],隋梦静[3],贺梁琼[1],蒋菁[1],韩柱强[1],唐秀梅[1*],唐荣华[1*]
(1.广西壮族自治区农业科学院经济作物研究所,广西 南宁,530007;
2.广西作物遗传改良生物技术重点开放实验室,广西 南宁,530007;
3.广西大学农学院,广西 南宁,530004)

摘要:为探究甘蔗间作花生模式下根系分泌物对土壤微生态环境的调控机制,本研究基于前期代谢组学结果,选取富马酸为关键代谢物,采用外源富马酸、模拟根系分泌物及实际根系分泌物,设置低、中、高三个浓度梯度进行土壤处理,分析上述处理对土壤养分、酶活性及微生物群落的影响。结果表明,富马酸显著调控土壤养分与酶活性:各处理均提高土壤碱解氮含量、降低速效钾含量,并增强酸性磷酸酶和脲酶活性,且中高浓度效应最为显著。不同来源分泌物作用存在差异,实际根系分泌物在中浓度下对碱解氮及脲酶活性的促进作用最强,而高浓度模拟分泌物可进一步提高脲酶活性并提升土壤pH。微生物响应呈现明显类群特异性:低浓度富马酸促进细菌生长,实际根系分泌物各浓度均抑制细菌,而高浓度富马酸及模拟分泌物则促进放线菌增殖。相关性分析显示,放线菌与土壤碱解氮、pH及细菌数量显著正相关,表明其在土壤氮素转化过程中发挥重要作用。综上,甘蔗间作花生系统中富马酸可通过提升氮素有效性、增强关键酶活性及优化微生物群落结构,协同调控土壤微生态环境。

关键词:甘蔗/花生间作;根系分泌物;富马酸;土壤酶活性;土壤养分;微生物群落
中图分类号:S565.2;S566.1　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1007-9084(2026)04-0195-09

Effects of fumaric acid in root exudates on soil microecology in sugarcane/peanut intercropping system

XIONG Jun[1], LEI Shi-min[1], HUANG Zhi-peng[1], LIAO Lu-lu[1], LIAO Guo-ting[1], WU Hai-ning[1], LI Zhong[2], SUI Meng-jing[3], HE Liang-qiong[1], JIANG Jing[1], HAN Zhu-qiang[1], TANG Xiu-mei[1*], TANG Rong-hua[1*]
(1. *Cash Crops Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning* 530007, *China*; 2. *Guangxi Crop Genetic Improvement and Biotechnology Lab, Nanning* 530007, *China*; 3. *College of Agriculture, Guangxi University, Nanning* 530004, *China*)

Abstract: To investigate the regulatory mechanisms of root exudates on soil microecological environment in sugarcane-peanut intercropping system, this study selected fumaric acid as a key metabolite based on previous metabolomic analyses. Soil treatments were conducted using exogenous fumaric acid, artificial root exudates, and actual root exudates at 3 concentration gradients (low, medium, and high) to evaluate their effects on soil nutrients, enzyme activities, and microbial communities. The results demonstrated that fumaric acid significantly modulated soil nutrients and enzyme activities. Specifically, all treatments increased soil alkali-hydrolyzable nitrogen (N) content, decreased available potassium content, and enhanced the activities of acid phosphatase and urease, with medium and high concentrations exhibiting the most pronounced effects. Variations in efficacy were observed among exudates from different sources: actual root exudates at the medium concentration maximized the promotion of alkali-hydrolyzable N and urease activities, whereas artificial exudates at the high concentration further enhanced urease activity and elevated soil pH. Furthermore, microbial responses exhibited distinct taxon-specific patterns. A low

收稿日期:2025-12-11
基金项目:广西自然科学基金(2024GXNSFAA010172);国家自然科学基金(32260544、32560510);现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-13-华南区栽培);广西农业科学院基本科研业务专项(2026YT109、2026YP006);现代农业产业技术体系广西大豆油料创新团队项目(nycytxgxcxta-2023-22-01)
作者简介:熊军(1978-),男,博士,副研究员,主要从事花生栽培基础理论研究,E-mail:541982389@qq.com
*通讯作者:唐秀梅(1983-),女,博士,研究员,主要从事间作花生栽培生理生态研究,E-mail:tangxiumei2005@163.com;
唐荣华(1965-),男,博士,研究员,主要从事花生高产栽培研究,E-mail:tronghua@163.com

concentration of exogenous fumaric acid promoted bacterial growth, while actual root exudates inhibited bacteria across all tested concentrations. Conversely, high concentrations of both exogenous fumaric acid and artificial exudates stimulated the proliferation of actinomycetes. Correlation analysis revealed significant positive correlations between the abundance of actinomycetes and soil alkali-hydrolyzable N, pH, as well as bacterial abundance, indicating that actinomycetes play a crucial role in soil nitrogen transformation. In conclusion, fumaric acid in the sugarcane-peanut intercropping system might synergistically regulate soil microecological environment by improving nitrogen availability, enhancing the activities of key soil enzymes, and optimizing structure of microbial community.

Key words: sugarcane/peanut intercropping; root exudates; fumaric acid; soil enzyme activity; soil nutrients; microbial community

甘蔗(*Saccharum officinarum* L.)是我国重要能源与经济作物,对广西区域经济发展及食糖供给安全具有重要意义,其制糖副产物及田间残余物也具有较高的综合利用价值[1]。花生(*Arachis hypogaea* L.)是我国主要油料作物之一,广西作为优势产区,种植面积与总产量均居区域内油料作物首位[2]。两者间作成为一种高效种植模式,可提升土壤肥力、增加作物产量并提高农户收益。花生植株矮、生育期短、根系浅的特性与甘蔗行距宽、生育期长、根系深的特性互补,通过特性互补形成种植优势,进而实现高效利用土地资源、有效缓解作物争地矛盾[3]。

在植物与土壤进行物质交换、信息传递及对外界胁迫的响应过程中,根系分泌物发挥重要作用。研究表明,根系分泌物中的有机碳含量与微生物群落丰度和多样性密切相关,其中有机酸和糖类参与调控功能基因表达和养分循环过程,而酚类和次生代谢产物则与植物防御作用紧密相关[4-6]。因此,根系分泌物被认为是调控根际微生态功能的关键因子[7]。有研究表明,草酸、乙酸、柠檬酸和苹果酸等根系分泌物中的重要有机酸,在植物养分吸收、调节碳氮循环、影响土壤酶活性以及改善土壤微环境等方面具有重要作用[8,9]。在间作体系中,根系分泌物可通过改变土壤酶活性和微生物群落结构,进一步影响土壤养分有效性[10]。同时,豆科与禾本科作物间作不仅能够发挥豆科作物的生物固氮优势,还可显著提高土壤中过氧化氢酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶及脲酶活性[11]。与单作相比,间作可促进有机酸、氨基酸和酚类物质等分泌物释放,这些分泌物通过活化难溶性养分,提高根际土壤有效养分含量[12]。

富马酸是根系分泌物中常见的有机酸之一,也是三羧酸循环的关键中间代谢产物。研究表明,在高寒草甸土壤中外源施加富马酸,土壤中脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶的活性随着富马酸的浓度增加而上升,表明富马酸在调控土壤酶活及养分循环方面具有明确功能[13]。此外,衣婷婷等[14]发现玉米/花生间作系统中玉米根系分泌物对连作花生土壤微生态环境的改善有重要作用。唐秀梅[15]等进一步指出,甘蔗/花生间作能通过提升土壤碱解氮含量、增加微生物数量与多样性,以及提高部分土壤酶活性,最终改善根际土壤环境。然而,上述研究多集中于根系分泌物的整体效应,针对根系分泌物中关键功能代谢物(如富马酸)在调控土壤生态过程中的具体作用机制仍缺乏深入解析。

本研究基于前期甘蔗间作花生模式的根系代谢组分析发现,间作花生中富马酸含量较单作显著提高,且富马酸参与丙氨酸-天冬氨酸-谷氨酸代谢、三羧酸循环等8条关键代谢通路,推测其可能为调控间作土壤生态过程的核心功能物质[16]。然而,富马酸在间作体系中对土壤微生态环境的具体作用机制尚需深入阐明。因此,本研究采用不同浓度的根系分泌物及其主要成分淋浇处理土壤,系统测定土壤养分、酶活性、微生物数量的变化,旨在明确富马酸及根系分泌物对间作土壤微生态的调控效应,为解析甘蔗间作花生优势机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

甘蔗品种桂糖42号为广西主栽品种,由广西农业科学院甘蔗研究所提供。花生品种桂花376,由广西农业科学院经济作物研究所提供,适合间套作。

土壤采自广西农业科学院武鸣里建科研基地(23°1425'N, 108°0342'E),前茬作物为花生。基础理化性质为pH 6.81,有机质含量15.7 g/kg,碱解氮48.3 mg/kg,有效磷3.7 mg/kg,速效钾28.2 mg/kg。

1.2 试验设计

1.2.1 甘蔗/花生间作田间种植 采用宽窄行复合栽培技术,于2024年3月15日同期种植甘蔗与花

生。种植规格:甘蔗窄行距1.2 m,宽行距2.4 m,选用双芽段脱毒甘蔗种茎进行铁轨式摆种,于2.4 m宽行内间种4行花生,窄行不种植。

1.2.2 甘蔗根系分泌物的收集 2024年7月15日(甘蔗拔节伸长期、花生成熟期),于非边行间作区选取生长一致、无病虫害的健康甘蔗植株。根系经灭菌去离子水轻柔冲洗以去除附着土壤,将洗净的甘蔗根系(3株/桶)浸没于1000 mL灭菌去离子水中,室温避光培养2 h。培养结束后收集培养液,取200 mL经40℃减压旋转蒸发浓缩至25 mL,于-20℃保存备用。

1.2.3 处理溶液制备 实际根系分泌物处理:将收集的浓缩甘蔗根系分泌物按体积比设置低、中、高3个浓度梯度,具体处理为:CK(15 mL去离子水)、低浓度实际根系分泌物(LR,5 mL根系分泌物+10 mL去离子水)、中浓度实际根系分泌物(MR,10 mL根系分泌物+5 mL去离子水)、高浓度实际根系分泌物(HR,15 mL根系分泌物)。

含富马酸组合模拟根系分泌物制备:参考Drake等[17]方法并改进。将1.25 g柠檬酸、2.47 g草酸、1.13 g富马酸、1.35 g丙二酸和1.56 g葡萄糖溶解于1000 mL灭菌去离子水中,制成模拟根系分泌物母液;按上述体积比例设置低、中、高浓度梯度:低浓度模拟根系分泌物(LAR,5 mL母液+10 mL去离子水)、中浓度模拟根系分泌物(MAR,10 mL母液+5 mL去离子水)、高浓度模拟根系分泌物(HAR,15 mL母液)。

富马酸溶液制备:用分析纯富马酸配制100 mg/L母液(pH调至7.0)。富马酸处理设置:低浓度富马酸溶液(LF,5 mL母液+10 mL去离子水)、中浓度富马酸溶液(MF,10 mL母液+5 mL去离子水)、高浓度富马酸溶液(HF,15 mL母液)。

1.2.4 土壤培养与处理 选取耕作层无污染、地力均匀的土壤,经自然风干、除杂、过筛、混匀后,称取80 g置于培养皿中。通过预实验测定(称取80 g鲜土常温放置3 d,每日称重至恒重)日水分挥发量为15 mL,据此每日添加15 mL去离子水维持初始含水率,置于25℃恒温培养箱黑暗条件下预培养7 d以稳定土壤环境。预培养第8 d,将15 mL各处理溶液淋浇至土壤中,记为正式培养第1 d,每日补充各处理溶液15 mL,试验周期3周。培养结束后取样,参考Renella等[18]方法并改进后测定土壤养分、酶活性及微生物数量。各处理设3次重复,所有处理溶液均现配现用。

1.3 测定方法

全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾和有机质按照《土壤农化分析》[19]测定;pH采用酸度计测定(土水比1:5);土壤酶活性依据《土壤酶及其研究法》,用ELISA检测试剂盒[20]测定过氧化氢酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶、酸性蛋白酶和脲酶活性;采用平板稀释涂布法测定土壤细菌、真菌及放线菌数量。

1.4 数据分析

采用Excel2021进行数据统计与图表绘制,图表数据以3次重复的平均值±标准误表示。采用DPS 7.05软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),通过Duncan多重比较法检验各项指标的差异显著性($P<0.05$)。采用Pearson相关分析探究根际土壤养分、酶活性及微生物数量间的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤酶活性的影响

由表1可知,不同类型及浓度的根系分泌物处理对土壤酶活性产生差异化影响。在酸性磷酸酶活性方面,富马酸各浓度(LF、MF、HF)处理均显著提高其活性,而模拟根系分泌物中、高浓度(MAR、HAR)具有促进作用,实际根系分泌物则仅低浓度(LR)处理达到显著水平;在脲酶活性方面,富马酸中、高浓度(MF、HF)及实际根系分泌物中、高浓度(MR、HR)处理均显著提高,且富马酸的促进效应呈现浓度依赖性,模拟根系分泌物在低、中、高浓度(LAR、MAR、HAR)下均表现出促进作用,其中高浓度(HAR)脲酶活性最高;在酸性蛋白酶活性方面,模拟根系分泌物低浓度(LAR)处理促进作用最强(较对照提高218.6%),中浓度(MAR)亦显著增加,实际根系分泌物在各浓度下均表现出促进作用,其中高浓度(HR)较对照提高147.2%,富马酸各浓度处理均使酸性蛋白酶活性显著上升;在过氧化氢酶活性方面,各处理均未产生显著影响;在蔗糖酶活性方面,低浓度富马酸(LF)与高浓度实际根系分泌物(HR)处理显著降低其活性(较对照分别下降28.5%和31.1%),其余处理均无显著差异。总体来看,不同来源有机物对土壤酶活性的调控具有明显选择性,其中模拟根系分泌物对氮转化相关酶(脲酶、酸性蛋白酶)的促进作用更为显著,而单一富马酸主要影响磷酸酶和酸性蛋白酶活性。

2.2 不同处理对土壤微生物数量的影响

由图1可知,不同处理对土壤微生物数量的影响存在显著差异。真菌数量整体响应不显著,仅中

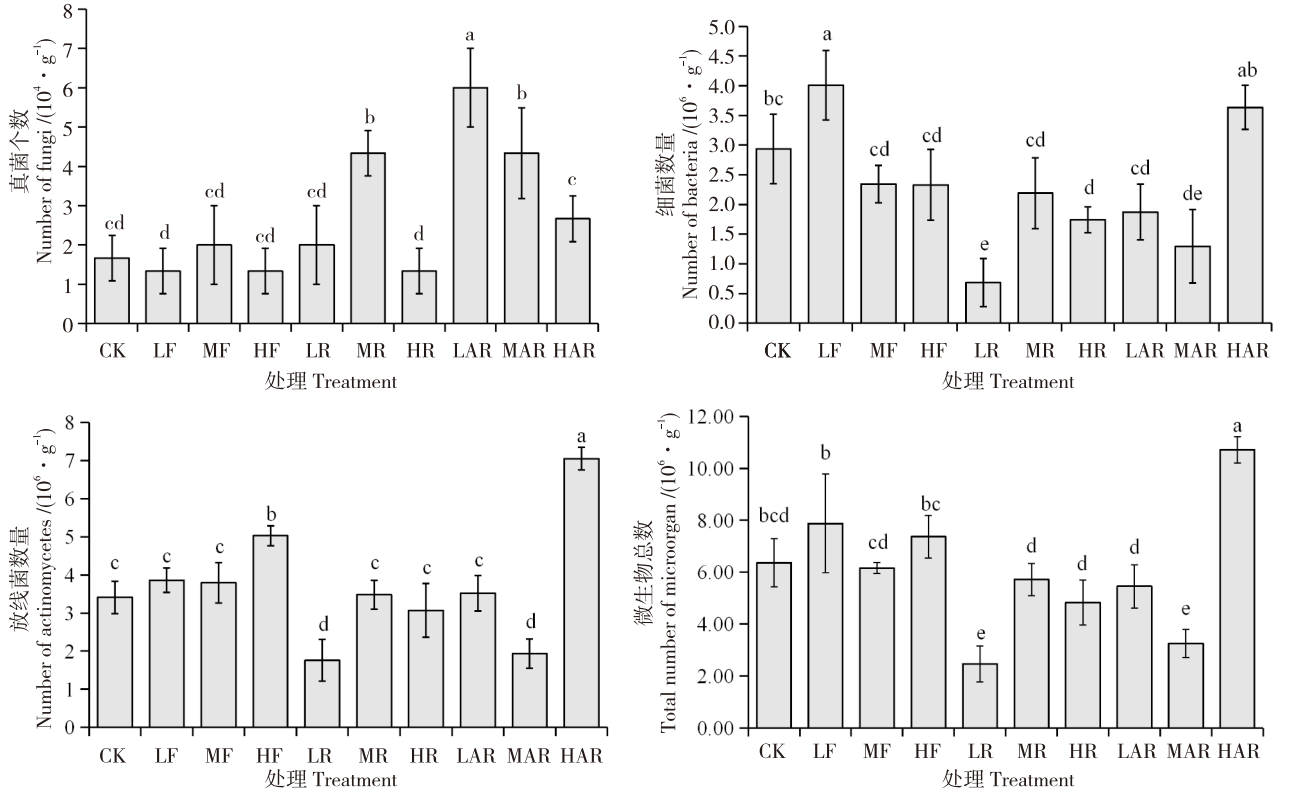
表1 不同处理下的土壤酶活性

Table 1 Soil enzyme activities under different treatments /(U/g)

处理 Treatment	过氧化氢酶 Catalase	蔗糖酶 Saccharase	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	酸性蛋白酶 Acid protease	脲酶 Urease
CK	204.26±1.18ab	11.40±1.31a	1754.70±25.21d	7.07±0.11e	227.08±10.17e
LF	151.33±3.56b	8.15±1.19bc	1921.45± 60.34bc	16.99±0.49c	238.12±8.49de
MF	221.99±7.93a	10.37±1.23ab	1970.80±57.61bc	31.31±1.06a	292.66±11.37b
HF	209.34±7.02ab	9.96±0.12abc	2124.21±62.18a	13.42±0.36cd	275.47±9.11bc
LR	210.51±4.44ab	10.81±1.03a	2053.06±84.53ab	13.09±0.23cd	242.35±20.35de
MR	185.98±10.77ab	9.52±2.11abc	1728.02±27.83d	13.42±0.43bc	261.21±17.33cd
HR	187.15±7.91ab	7.86±0.15c	1863.64±63.70cd	17.48±0.15bc	258.82±14.27cd
LAR	168.01±4.13ab	9.10±1.33abc	1839.63±44.49cd	22.53±0.12b	356.43±10.69a
MAR	192.99±10.65ab	10.30±1.06abc	2141.11±76.13a	17.81±0.43bc	346.41±11.17a
HAR	193.57±9.87ab	10.81±0.19a	2158.01±99.38a	10.01±0.07de	374.37±15.84a

注:数据为平均值±标准误差,同一列数值后不同小写字母表示在$P<0.05$水平上差异显著。LF、MF、HF分别表示低、中、高浓度富马酸处理;LR、MR、HR分别表示低、中、高浓度实际根系分泌物处理;LAR、MAR、HAR分别表示低、中、高浓度模拟根系分泌物处理。下同

Note: Data are means ± SE. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P<0.05$). LF, MF, and HF represent low, medium, and high concentrations of fumaric acid treatments, respectively; LR, MR, and HR represent low, medium, and high concentrations of actual root exudates treatments, respectively; LAR, MAR, and HAR represent low, medium, and high concentrations of artificial root exudates treatments, respectively. Same as below



注:不同小写字母表示差异达到显著水平($P<0.05$);LF、MF、HF分别表示低、中、高浓度富马酸处理;LR、MR、HR分别表示低、中、高浓度实际根系分泌物处理;LAR、MAR、HAR分别表示低、中、高浓度模拟根系分泌物处理。下同

Note: Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$). LF, MF, and HF represent low, medium, and high concentrations of fumaric acid treatments, respectively; LR, MR, and HR represent low, medium, and high concentrations of actual root exudates treatments, respectively; LAR, MAR, and HAR represent low, medium, and high concentrations of artificial root exudates treatments, respectively. Same as below

图1 不同处理下的土壤微生物数量

Fig. 1 Soil microbial abundance under different treatments

浓度实际根系分泌物(MR)及低、中浓度模拟根系分泌物(LAR、MAR)显著提高其丰度,较对照分别增加160%、160%和260%,其余处理均无显著影响;细菌数量对处理最为敏感且呈浓度效应:低浓度富马酸(LF)显著促进细菌生长(较对照增加36.4%),而低、高浓度实际根系分泌物(LR、HR)及中浓度模拟根系分泌物(MAR)则显著抑制细菌生长,较对照分别降低76.7%、40.6%和92.4%;放线菌数量表现为促进与抑制并存:高浓度富马酸(HF)和高浓度模拟根系分泌物(HAR)显著增加其数量(较对照分别增加47.2%和106.5%),低浓度实际根系分泌物(LR)和中浓度模拟根系分泌物(MAR)则显著降低其数量(较对照分别下降48.5%和43.3%);微生物总量仅高浓度模拟根系分泌物(HAR)显著提高(较对照增加68.2%),低浓度实际根系分泌物(LR)和中浓度模拟根系分泌物(MAR)则显著降低(较对照分别下降61.35%和48.9%)。综上,不同来源有机物对土壤微生物群落的调控具有类群特异性和浓度依赖性:模拟根系分泌物影响最显著(如对微生物总量提升效应),富马酸则呈现低浓度促细菌、高浓度促放线菌的特征。

2.3 不同处理对土壤养分性状的影响

由图2可知,不同处理对土壤养分含量及pH的影响存在显著差异。碱解氮含量对处理响应最敏感:富马酸各浓度(LF、MF、HF)均显著提高碱解氮含量,较对照增幅为48.5%~64.6%;实际根系分泌物仅中浓度(MR)显著促进(较对照增加101.2%),高浓度(HR)则显著抑制(较对照下降35.6%);模拟根系分泌物在低浓度(LAR)、高浓度(HAR)下均显著提高碱解氮含量,较对照分别增加59.4%和96.7%,表明氮素转化具有浓度依赖性。速效钾含量表现为选择性降低:富马酸各浓度(LF、MF、HF)显著降低速效钾含量,较对照降幅19.7%~27.3%;模拟根系分泌物中浓度(MAR)和高浓度(HAR)同样显著降低其含量,而实际根系分泌物各浓度(LR、MR、HR)对速效钾含量无显著影响。有效磷含量整体变化不显著,仅低浓度模拟根系分泌物(LAR)显著降低其含量(较对照降低7.2%。土壤pH对处理响应较弱:富马酸处理对pH无显著影响,实际根系分泌物低浓度(LR)使pH较对照下降1.9%,高浓度模拟根系分泌物(HAR)使pH较对照上升1.8%。综上,不同来源有机物对土壤养分及pH的调控具有明显选择性:对碱解氮的影响最显著,对有效磷和pH的影响较弱,速效钾在富马酸及模拟根系分泌物中高浓度处理下显著降低。

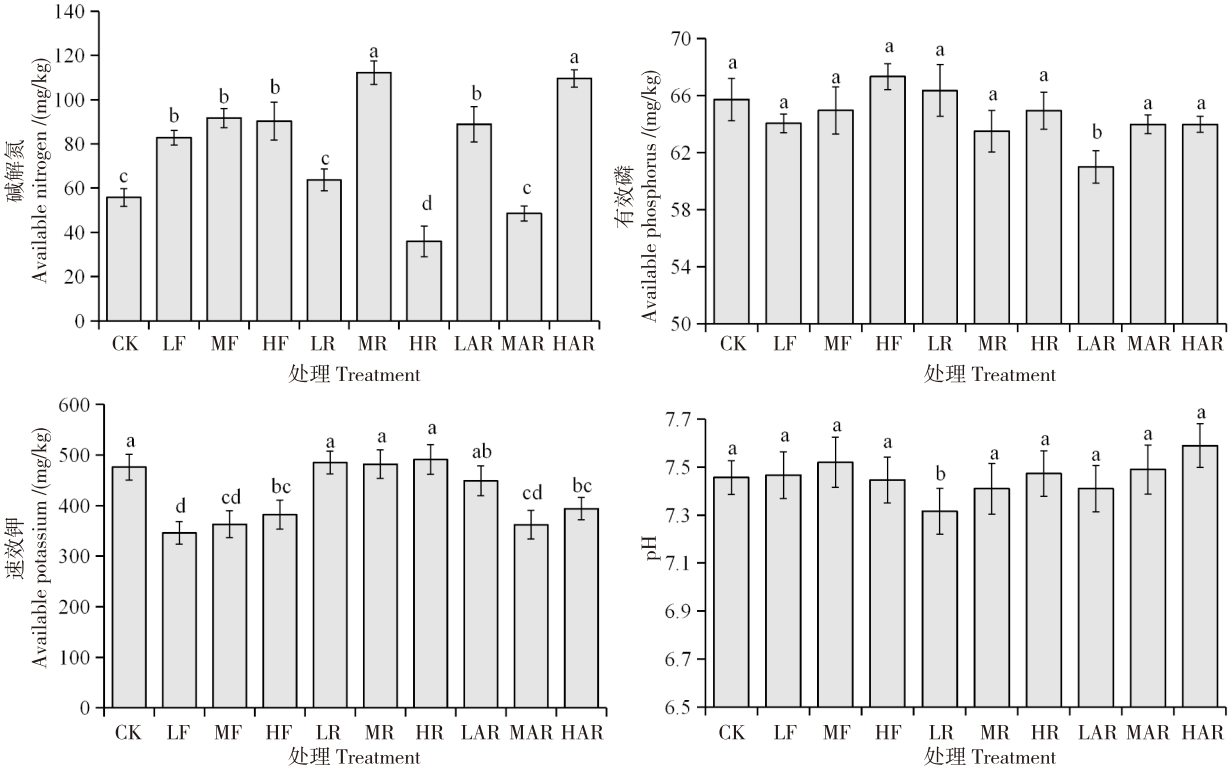


图2 不同处理下的土壤养分性状

Fig. 2 Soil nutrient properties under different treatments

2.4 不同处理下土壤生态因子的相关性分析

为深入解析不同浓度富马酸、实际根系分泌物及模拟根系分泌物处理下土壤养分、酶活性及微生物数量的变化规律,采用Pearson相关性分析探究其关联性(图3)。部分典型相关性结果如下:过氧化氢酶活性与蔗糖酶活性、有效磷含量呈显著正相关(r值分别为0.702、0.655);土壤放线菌数量与碱解氮含量、pH及细菌数量呈显著正相关(r值分别为0.65、0.68、0.725);有效磷含量与真菌数量呈显著负相关(r = −0.814)。结果表明,酶促反应、微生物群落与土壤养分循环之间存在紧密的协同或制约关系,共同驱动土壤生态系统对不同外源物质处理的响应与适应。

3 讨论

3.1 甘蔗间作花生根系分泌物对土壤酶活性的影响

土壤酶活性是反映土壤肥力和微生物代谢的重要指标。研究表明,不同有机酸对土壤酶活性的调控存在差异:烟草根系分泌的棕榈酸、肉豆蔻酸和月桂酸可增强土壤酶活性[21];外源添加乙酸能显著提升土壤中的过氧化氢酶活性[22];柠檬酸对脲酶、磷酸酶等的促进作用则随时间动态变化[23]。此外,外源施加乳酸、乙酸与富马酸均能促进土壤脲酶、蔗糖酶及过氧化氢酶活性,其中乳酸和富马酸的促进效果随浓度升高而增强,但高浓度乙酸会抑制过氧化氢酶活性[13]。然而,与上述研究结果不同,本研究进一步表明,根系分泌物对不同酶的调控具有明显选择性:酸性磷酸酶和脲酶在多数处理下显著升高,而过氧化氢酶对各类处理均无显著响应。本研究发现富马酸对过氧化氢酶活性无显著影响,与李彦林[13]的结果不一致,推测其差异主因是土壤类型不同:本研究与李彦林[13]使用的土壤理化性质及微生物背景存在显著区别,可能共同调控了富马酸对酶活性的作用效果。

土壤酶在土壤养分循环中发挥重要作用[24],例如:脲酶可催化尿素分解成氨和二氧化碳,为作物

	过氧化氢酶 Catalase	蔗糖酶 Sucrase	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	酸性蛋白酶 Acid protease	脲酶 Urease	碱解氮 Alkali-hydrolyzed nitrogen	有效磷 Available phosphorus	速效钾 Available potassium	pH	真菌数量 Number of fungi	细菌数量 Number of bacteria	放线菌数量 Number of actinomycetes
过氧化氢酶 Catalase	1	0.702*	0.305	0.041	−0.077	−0.072	0.655*	0.09	0.023	−0.309	−0.391	−0.028
蔗糖酶 Sucrase	0.702*	1	0.294	−0.312	0.132	0.124	0.344	0.011	0.068	0	−0.108	0.094
酸性磷酸酶 Acid phosphatase	0.305	0.294	1	0.009	0.479	0.026	0.33	−0.588	0.324	−0.166	−0.088	0.263
酸性蛋白酶 Acid protease	0.041	−0.312	0.009	1	0.242	0.063	−0.325	−0.376	0.104	0.211	−0.192	−0.199
脲酶 Urease	−0.077	0.132	0.479	0.242	1	0.303	−0.564	−0.348	0.491	0.629	−0.008	0.388
碱解氮 Alkali-hydrolyzed nitrogen	−0.072	0.124	0.026	0.063	0.303	1	−0.265	−0.252	0.198	0.265	0.447	0.65
有效磷 Available phosphorus	0.655*	0.344	0.33	−0.325	−0.564	−0.265	1	−0.002	−0.105	−0.814**	−0.106	−0.02
速效钾 Available potassium	0.09	0.011	−0.588	−0.376	−0.348	−0.252	−0.002	1	−0.574	0.111	−0.436	−0.323
pH	0.023	0.068	0.324	0.104	0.491	0.198	−0.105	−0.574	1	−0.151	0.627	0.68*
真菌数量 Number of fungi	−0.309	0	−0.166	0.211	0.629	0.265	−0.814**	0.111	−0.151	1	−0.299	−0.159
细菌数量 Number of bacteria	−0.391	−0.108	−0.088	−0.192	−0.008	0.447	−0.106	−0.436	0.627	−0.299	1	0.725*
放线菌数量 Number of actinomycetes	−0.028	0.094	0.263	−0.199	0.388	0.65*	−0.02	−0.323	0.68*	−0.159	0.725*	1

注:*表示在0.05水平上显著相关,**表示在0.01水平上显著相关

Note: * and ** indicate significant correlations at 0.05 and 0.01 levels, respectively

图3 不同处理下土壤生态因子的相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis of soil ecological factors under different treatments

提供可利用氮;磷酸酶能促进有机磷水解为无机磷供作物吸收;过氧化氢酶则与作物免疫活性相关[25],酶活失调会引起土壤养分恶化,限制植物养分吸收[26]。本研究中结合土壤养分变化结果发现,脲酶活性升高与碱解氮含量增加趋势一致,表明根系分泌物可能通过促进尿素水解加速有机氮向无机氮转化;磷酸酶活性升高则有利于有机磷矿化,提高土壤磷有效性。这表明,根系分泌物通过调控关键酶系间接驱动土壤氮磷循环,从而提升土壤肥力,为解析根系分泌物-土壤-酶活性的耦合机制及定向调控土壤肥力提供了理论依据。

3.2 甘蔗间作花生根系分泌物对土壤微生物的影响

根系分泌物通过提供碳源和信号分子共同驱动微生物群落的形成与演替[23]。根际土壤中的微生物群落通过调控土壤微生态过程,可有效缓解作物的养分胁迫压力、抑制病原菌的入侵扩散,同时提高对土壤中有毒物质的耐受水平,为作物营造更适宜的生长环境[27]。研究表明,花生可分泌丙氨酸和其他氨基酸以促进镰孢菌生长[28]。根系分泌物中的类黄酮对土壤微生物具有显著影响:一方面,复杂类黄酮对微生物的作用具有差异性;另一方面,其能在豆科植物根系定向富集根瘤菌,通过调控微生物基因功能表达(如诱导根瘤菌结瘤基因*nod*表达,或影响氮循环基因*nifH*、*amoA*、*nirK*等活性)参与共生固氮过程[29,30]。此外,棉花根系分泌物的研究显示,中、高浓度分泌物能显著增加土壤细菌数量,但对放线菌数量无显著影响[31]。富马酸作为三羧酸循环中间产物,可被微生物直接利用以影响其能量代谢[32],本研究中,富马酸对土壤微生物数量的调控具有浓度依赖性(低浓度促细菌、中高浓度抑细菌,高浓度促进放线菌),而模拟根系分泌物的作用更偏向类群选择性(如促进真菌、抑制细菌、部分浓度抑制放线菌)。这一差异反映了富马酸与模拟根系分泌物对土壤微生物群落结构的调控具有类群特异性,为解析土壤微生态对不同外源输入的响应机制提供了数据支撑。

3.3 甘蔗间作花生根系分泌物对土壤养分的影响

根系分泌物中的有机酸是调控土壤有效性的重要因素,为植物的正常发育和土壤微生态改善提供支持。根系分泌物是植物与环境交互的产物,可通过改善土壤物理结构与化学环境,参与土壤养分从无效态向有效态的转化,进而促进植物生长[33]。研究表明,荒漠草原典型植物根系分泌物中的有机酸回接到原位土壤后,油酸和琥珀酸可使土壤中的有机碳、有效氮及速效磷的含量显著增加,且呈现明显的浓度依赖性,即分泌物浓度越高,土壤理化性状改善越明显[34];黄土高原区域研究亦发现,根系分泌物有机酸含量与土壤全氮、全磷、全钾及速效氮、有效磷、速效钾均呈显著相关[35]。与之对应,本研究结果显示,富马酸显著提高土壤碱解氮含量,同时降低速效钾含量,而实际根系分泌物与模拟根系分泌物对养分及pH的影响则表现出更强的浓度依赖性。结合脲酶活性与微生物变化可进一步解析其作用机制:一方面,脲酶活性升高促进有机氮矿化,是碱解氮增加的重要原因;另一方面,微生物群落结构变化(如细菌减少、放线菌增加)可能影响养分的固定与释放过程,从而改变土壤养分动态平衡。此外,有机酸通过酸化作用或络合作用促进矿物中养分释放,然而释放后的养分可能通过微生物或植物快速吸收,导致速效钾含量下降。与前人研究相比,本研究进一步表明,不同类型根系分泌物在调控土壤养分时具有差异化作用路径:单一有机酸(富马酸)表现出相对稳定的调控效应,而复杂分泌物则呈现更强的环境依赖性,这一差异强调了根系分泌物在调控土壤养分过程中的多机制协同作用。

4 结论

本研究通过不同浓度的实际根系分泌物、富马酸组合模拟根系分泌物及富马酸处理土壤,揭示了甘蔗间作花生根系分泌物对土壤微生态的调控效应。结果表明,富马酸可显著提高脲酶和酸性磷酸酶活性,促进碱解氮含量增加,并对细菌和放线菌具有浓度依赖性调控作用(低浓度促进细菌生长、高浓度促进放线菌增殖);实际根系分泌物与模拟根系分泌物通过组分协同作用调控酶活性、养分转化及微生物群落结构。综上,富马酸是驱动土壤氮转化增强的关键因子,其通过“有机酸输入(富马酸)—微生物响应(细菌与放线菌浓度依赖性变化)—酶活性提升(脲酶与磷酸酶活性增强)”途径促进土壤氮素有效性,进而提高间作体系土壤肥力。

参考文献:

[1] 路贵龙,王朔,连玉珍,等.甘蔗制糖副产物的开发与利用[J].中国糖料,2020,42(2):75-80.

[2] 林秀芳,陈庆政,刘海东,等.广西花生生产成本与收益分析[J].湖南农业科学,2022(3):91-95.

[3] 耿星,吴罡腾,刘文,等.甘蔗间作花生栽培技术研究[J].仲恺农业工程学院学报,2025,38(1):1-5.

[4] Hu L F, Robert C A M, Cadot S, et al. Root exudate metabolites drive plant-soil feedbacks on growth and defense by shaping the rhizosphere microbiota [J]. Nat Commun, 2018, 9: 2738. DOI: 10.1038/s41467-018-05122-7.

[5] Chen Z J, Tian Y H, Zhang Y, et al. Effects of root organic exudates on rhizosphere microbes and nutrient removal in the constructed wetlands [J]. Ecol Eng, 2016, 92: 243-250. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.04.001.

[6] Wu H L, Wang X Z, He X J, et al. Effects of root exudates on denitrifier gene abundance, community structure and activity in a micro-polluted constructed wetland [J]. Sci Total Environ, 2017, 598: 697-703. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.150.

[7] 吴林坤,林向民,林文雄.根系分泌物介导下植物-土壤-微生物互作关系研究进展与展望[J].植物生态学报,2014,38(3):298-310.

[8] Gu Y A, Wang X F, Yang T J, et al. Chemical structure predicts the effect of plant-derived low-molecular weight compounds on soil microbiome structure and pathogen suppression [J]. Funct Ecol, 2020, 34(10): 2158-2169. DOI: 10.1111/1365-2435.13624.

[9] Wu C F, Wang F Y, Zhang H Q, et al. Enrichment of beneficial rhizosphere microbes in Chinese wheat yellow mosaic virus-resistant cultivars [J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2021, 105(24): 9371-9383. DOI: 10.1007/s00253-021-11666-4.

[10] 王倩倩,刘志强,陈康,等.不同土壤施磷和接种根瘤菌对大豆‖玉米间作系统氮磷吸收的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(12):1913-1924.

[11] 董楠.不同作物组合间作优势和时空稳定性的生态机制[D].北京:中国农业大学,2017.

[12] 黄宇,张海伟,徐芳森.植物酸性磷酸酶的研究进展[J].华中农业大学学报,2008(1):148-154.

[13] 李彦林,贺怀鹏,刘菁,等.不同根系分泌有机酸组分分析及其对土壤养分、酶活性的影响[J].北方园艺,2024(12):73-79.

[14] 衣婷婷,唐朝辉,李庆凯,等.玉米花生间作复合种植对花生根际微生态环境及其产量的影响[J].山东农业科学,2024,56(12):70-78,85.

[15] 唐秀梅,蒙秀珍,蒋菁,等.甘蔗间作花生对不同耕层土壤微生态的影响[J].中国油料作物学报,2020,42(5):713-722.

[16] Tang X M, Liao L L, Wu H N, et al. Effects of sugarcane/peanut intercropping on root exudates and rhizosphere soil nutrient [J]. Plants, 2024, 13(22): 3257. DOI: 10.3390/plants13223257.

[17] Drake J E, Darby B A, Giasson M A, et al. Stoichiometry constrains microbial response to root exudation- insights from a model and a field experiment in a temperate forest [J]. Biogeosciences, 2013, 10(2): 821-838. DOI: 10.5194/bg-10-821-2013.

[18] Renella G, Egamberdiyeva D, Landi L, et al. Microbial activity and hydrolase activities during decomposition of root exudates released by an artificial root surface in Cd-contaminated soils [J]. Soil Biol Biochem, 2006, 38(4): 702-708. DOI: 10.1016/j.soilbio.2005.06.021.

[19] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.

[20] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.

[21] 于会泳,宋晓丽,王树声,等.低分子量有机酸对植烟土壤酶活性和细菌群落结构的影响[J].中国农业科学,2015,48(24):4936-4947.

[22] 陆红飞,乔冬梅,齐学斌,等.外源有机酸对土壤pH值、酶活性和Cd迁移转化的影响[J].农业环境科学学报,2020,39(3):542-553.

[23] 刘振华.间作及添加根系分泌物对玉米花生生长发育和土壤理化性质的影响[D].沈阳:沈阳农业大学,2023.

[24] 郭斌.缓控释氮肥对夏玉米氮素利用及产量的影响[D].保定:河北农业大学,2021.

[25] 谢秋丽,唐玉娟,苏厚人,等.不同株龄田七根际土壤微生物和酶活性变化[J].广西师范大学学报(自然科学版),2017,35(3):149-156.

[26] 孙雪婷,龙光强,张广辉,等.基于三七连作障碍的土壤理化性状及酶活性研究[J].生态环境学报,2015,24(3):409-417.

[27] 许江,戴慧敏,刘国栋,等.不同土地利用方式下土壤酶活性的变化研究[J].地质与资源,2020,29(6):579-584.

[28] Li H G, Zhang F S, Rengel Z, et al. Rhizosphere properties in monocropping and intercropping systems between faba bean (*Vicia* faba L.) and maize (*Zea mays* L.) grown in a calcareous soil [J]. Crop Pasture Sci, 2013, 64(10): 976-984. DOI: 10.1071/cp13268.

[29] Wang L Y, Hou B C, Zhang D S, et al. The niche complementarity driven by rhizosphere interactions enhances phosphorus-use efficiency in maize/alfalfa mixture [J]. Food Energy Secur, 2020, 9(4): e252. DOI: 10.1002/fes3.252.

[30] Li C J, Kuyper T W, Van Der Werf W, et al. A conceptual framework and an empirical test of complementarity and facilitation with respect to phosphorus uptake by plant species mixtures [J]. Pedosphere, 2022, 32(2): 317-329. DOI: 10.1016/s1002-0160(21)60076-0.

[31] 周慧杰.棉花根系分泌物对棉田土壤微生物的影响[J].安徽农业科学,2013,41(36):13880-13882.

[32] Vranova V, Rejsek K, Formanek P. Aliphatic, cyclic, and aromatic organic acids, vitamins, and carbohydrates in soil: a review[J]. Sci World J, 2013, 2013: 524239. DOI:10.1155/2013/524239.

[33] Chen J R, Shafi M, Wang Y, et al. Organic acid compounds in root exudation of Moso Bamboo (*Phyllostachys pubescens*) and its bioactivity as affected by heavy metals [J]. Environ Sci Pollut Res, 2016, 23(20): 20977-20984. DOI:10.1007/s11356-016-7323-8.

[34] 高雪峰,贾渊. 荒漠草原植物根分泌物中有机酸组分分析及其生态效应研究[J].生态环境学报,2020,29(10):1927-1934.

[35] Dong Z, Wei T X, Zhu Q K. Root exudates in *Hippophae* rhamnoides of different growth states detected by GC-MS [J]. Asian J Chem, 2013, 25(18): 10076-10078. DOI:10.14233/ajchem.2013.15152.

(责任编辑:郭学兰)