

吴加香, 刘涛, 谢永辉, 等. 喷施茉莉酸甲酯对烟草叶片氧化酶活性及叶际微生物多样性的影响 [J]. 福建农业学报, 2022, 37 (6): 720–726.
WU J X, LIU T, XIE Y H, et al. Effect of Spraying Methyl Jasmonate on Oxidase Activity and Interleaf Microbial Diversity of Tobacco Leaves [J].
Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2022, 37 (6): 720–726.

喷施茉莉酸甲酯对烟草叶片氧化酶活性及 叶际微生物多样性的影响

吴加香^{1,2}, 刘涛^{1,2}, 谢永辉³, 黄之远^{1,2}, 字淑慧^{1,2*}

(1. 云南农业大学西南中药材种质创新与利用国家地方联合工程研究中心, 云南 昆明, 650201; 2. 云南农业大学农
学与生物技术学院, 云南 昆明 650201; 3. 云南省烟草公司昆明市公司, 云南 昆明 650051)

摘要:【目的】探索茉莉酸甲酯 (MeJA) 影响烟草抗氧化酶活性与叶际微生物多样性及其相关性。【方法】设喷
施 0.5 mmol·L⁻¹ 茉莉酸甲酯 (+MeJA) 和不喷施 (CK) 处理, 在喷施 72 h 后分别测定烟草叶片的超氧化物歧化酶
(SOD) 活性、过氧化物酶 (POD) 活性、总酚含量和过氧化氢 (H₂O₂) 积累量, 烟草叶际细菌、真菌的丰富度和
多样性。【结果】与 -MeJA 相比, +MeJA 显著提高了烟叶中 SOD 和 POD 的活性及 H₂O₂ 的积累, 显著降低叶际细
菌和真菌的丰富度, 极显著提高叶际真菌的多样性; SOD 活性和 H₂O₂ 积累量与高氏白粉菌属呈显著负相关,
POD 活性与青枯菌属和伯克霍尔德氏菌-卡巴拉尼亚-帕拉伯克霍尔德氏菌属呈正相关。【结论】烟草喷施茉莉酸甲
酯不仅能激活叶片中抗氧化酶活性, 而且能改变叶际真菌优势菌属占比, 烟草叶片中氧化酶活性与真菌菌属占比具
有一定的相关关系。

关键词: 茉莉酸甲酯; 烟草; 叶际微生物; 抗氧化酶

中图分类号: S 572

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2022) 06-0720-07

Effect of Spraying Methyl Jasmonate on Oxidase Activity and Interleaf Microbial Diversity of Tobacco Leaves

WU Jiaxiang^{1,2}, LIU Tao^{1,2}, XIE Yonghui³, HUANG Zhiyuan^{1,2}, ZI Shuhui^{1,2*}

(1. National-Local Joint Engineering Research Center on Germplasms Innovation & Utilization of Chinese Medicinal Materials in
Southwest China, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China; 2. College of Agronomy and Biotechnology,
Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201, China; 3. Kunming Tobacco Company of
Yunnan Province, Kunming, Yunnan 650051, China)

Abstract: 【Objective】Effects of spraying methyl jasmonate (MeJA) on the antioxidant enzyme activity and interleaf
microbial diversity of tobacco leaves were investigated. 【Method】Superoxide dismutase (SOD) activity, peroxidase (POD)
activity, total phenolic content, hydrogen peroxide (H₂O₂) accumulation as well as abundance and diversity of interleaf bacteria
and fungi in tobacco leaves were measured 72 h after spraying the plant growth regulator at 0.5 mmol·L⁻¹ (+MeJA) or without
(CK) as control. 【Result】The MeJA spray significantly increased SOD and POD activities and H₂O₂ accumulation but
reduced the microbial abundance and increased the fungal diversity in the tobacco leaves. The SOD activity and H₂O₂
accumulation significantly inversely correlated with Golovinomyces, whereas POD positively correlated with Ralstonia
and Burkholderia-Caballeronia-Paraburkholderia. 【Conclusion】Tobacco leaves sprayed by MeJA not only activated the
antioxidant enzyme activity but also altered the dominant fungi distribution in them, resulting in a correlation between oxidase
activity and fungal genus share in tobacco leaves.

Key words: methyl jasmonate; tobacco; phyllosphere microorganisms; antioxidant enzyme

收稿日期: 2022-02-23 初稿; 2022-06-01 修改稿

作者简介: 吴加香 (1995-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 作物栽培理论 (E-mail: 3252736156@qq.com)

* 通信作者: 字淑慧 (1971-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 乌头属植物繁育及规范化种植技术 (E-mail: zsh7525@163.com)

基金项目: 云南省科技计划重大科技专项 (2017AB002、2018BB015、2018ZF011); 云南省烟草公司科技计划项目 (2020S30000242026)

0 引言

【研究意义】植物与微生物互作具有促进宿主植物健康生长、营养吸收、提高抗逆性及防病原菌侵害等多种有益功能^[1]。植物通过微生物解毒酶（如超氧化物歧化酶，过氧化物酶，过氧化氢酶等）抑制体内活性氧，通过促进内生菌落定殖使其选择性地募集有益微生物并帮助植物适应环境，这是植物与微生物互作的关键^[1]。【前人研究进展】与植物地下部分的微生物群落相比，植物地上部的叶际由于受光照、湿度、温度、养分利用率以及昼夜温度波动等影响而拥有更具动态性的微生物群落，这些微生物群落因能进一步影响植物的生长性、抗逆性及减轻病原菌的侵害等功能而受到人们关注^[2]。这其中，外源喷施茉莉酸甲酯（MeJA）通过提高 SOD 活性、H₂O₂ 积累^[3]、POD、TP^[4]等含量，抑制真菌性病害，减少农药施用量，而得到人们的青睐。植物喷施 MeJA 不仅通过诱导植物的抗氧化酶活性提高植株抗逆性，还对植物的病原微生物具有直接的抑制效果^[5]。例如，MeJA 诱导烟草对烟草炭疽病的抗性是通过提高苯丙氨酸解氨酶（PAL）活性而实现的^[6]，诱导猕猴桃提高 SOD、POD 等抗氧化酶活性可以产生软腐病抗性^[7]，诱导草莓对灰霉病^[8]、小麦对根腐病^[9]的抗性等，均说明 MeJA 可以诱导植物进一步提高抗病性。植物叶片中的 SOD、POD、H₂O₂ 积累和总酚（TP）含量高低，是衡量植物抗病性及抗逆性的重要指标。【本研究切入点】过去的研究大多都是通过叶片喷施 MeJA 诱导抗性而降低植物病害，但 MeJA 喷施对植物叶际有害微生物丰度的影响鲜见报道，以及植物喷施 MeJA 后，叶片抗氧化酶活性的改变对叶际微生物菌群的影响鲜见报道。【拟解决的关键问题】本试验以模式植物烟草为材料，通过外源喷施 MeJA，研究其诱导产生的抗氧化酶活性与微生物菌群之间的相关性，为进一步研究植物抗性机理提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试验设计

供试烟草为红花大金元；种植土壤购自昆明市斗南花鸟市场，每盆装入腐殖土 4 kg；供试茉莉酸甲酯购自美国 Sigma 公司，纯度为 95%，吸取 114.6 μL 95% 茉莉酸甲酯原液于烧杯中，加入 10 mL 无水乙醇溶解茉莉酸甲酯原液，待充分溶解后边搅拌边加入蒸馏水，定容至 1 L，配制为 0.5 mmol·L⁻¹ 的浓

度待用。加入 10 mL 无水乙醇后加蒸馏水，定容至 1 L，配制为对照喷施溶液待用。

采用盆栽试验，试验设 2 个处理：喷施茉莉酸甲酯（MeJA）和喷施含 1% 乙醇的蒸馏水（CK），每个处理 15 个重复，共种植 30 盆。试验地点位于云南省昆明市盘龙区云南农业大学教学实验大棚中。每周浇灌 1 次营养液，培养 30 d 后喷施茉莉酸甲酯，连续喷施 2 d，喷施的量以叶片不滴水珠为标准，3 d 后进行取样和相关指标的测量。

1.2 烟草样品的采集

喷施茉莉酸甲酯 3 d 后，带无菌手套，采集倒 3 叶，去除叶脉，装入 50 mL 离心管放入液氮保存，用于酶活性测定。其余每个处理取 3 个生物学重复样本，约 5~6 g 叶片立即放入无菌样品袋中置于冰上，带回实验室，称重样本，放入无菌管中，每克样本加入 10 mL 0.1 mol·L⁻¹ 磷酸钾缓冲液（pH=8.0），将样本超声洗涤 1 min，涡旋 10 s，此步骤重复 2 次，洗涤后的烟草叶片再用 70% 乙醇洗 2 次，储存在-80 ℃ 冰箱用于提取叶际微生物基因组 DNA。

1.3 烟草叶片酶活性测定

采用索莱宝试剂盒，采用可见分光光度法测定相关抗氧化酶活性和总酚含量。

1.4 烟草叶际微生物基因组 DNA 的提取

采用美国 MP 公司 FastDNA® Spin Kit for Soil 试剂盒提取，按试剂盒的试验步骤进行土壤微生物总 DNA 的提取，DNA 样品于-20 ℃ 保存待用。

1.5 PCR 扩增及 Illumina 高通量测序

在提取样本 DNA 后，按表 1 中 PCR 扩增引物进行 PCR 扩增。

表 1 PCR 扩增引物
Table 1 PCR amplification primers

微生物 Microbial	引物 Primers	序列 Sequence
细菌 Bacteria (V3+V4)	Forward	AACMGATTAGATACCKG
	Reverse	ACGGGCGGTGTGTRC
真菌 Fungi (ITS1+ITS2)	Forward	CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA
	Reverse	GCTGCGTTTCATCGATGC

按表 2 PCR 扩增反应体系扩增后，利用 Illumina 公司的 Miseq PE300 平台进行测序（上海美吉生物医药科技有限公司完成）。

1.6 数据处理与分析

试验结果用平均数±标准误表示，应用 SPSS

表 2 PCR 扩增反应体系及条件
Table 2 PCR amplification reaction system and conditions

反应体系 Reaction system		反应条件 Reaction conditions
反应成分 Reaction components	添加量 Amount added	
缓冲液 5×FastPfu Buffer 5×FastPfu	4 mL	95 ℃ 预变性 3 min Pre-denaturation at 95 ℃ for 3 min ↓ 27 个循环 (95 ℃ 变性 30 s, 55 ℃ 退火 30 s, 72 ℃ 延伸 30 s) 27 cycles (denaturation at 95 ℃ for 30 s, annealing at 55 ℃ for 30 s, extension at 72 ℃ for 30 s) ↓ 72 ℃ 稳定延伸 10 min Stable extension at 72 ℃ for 10 min ↓ 4 ℃ 保存 storage at 4 ℃
上下游引物 Upstream and downstream primers	0.8 mL	
脱氧核糖核苷三磷酸 dNTPs(2.5 mmol·L ⁻¹)	2 mL	
快速-pfu 聚合酶 Fast-Pfu Polymerase	0.4 mL	
DNA 模板 DNA template	10 ng	
双蒸水 ddH ₂ O	至 20 mL Up to 20 mL	

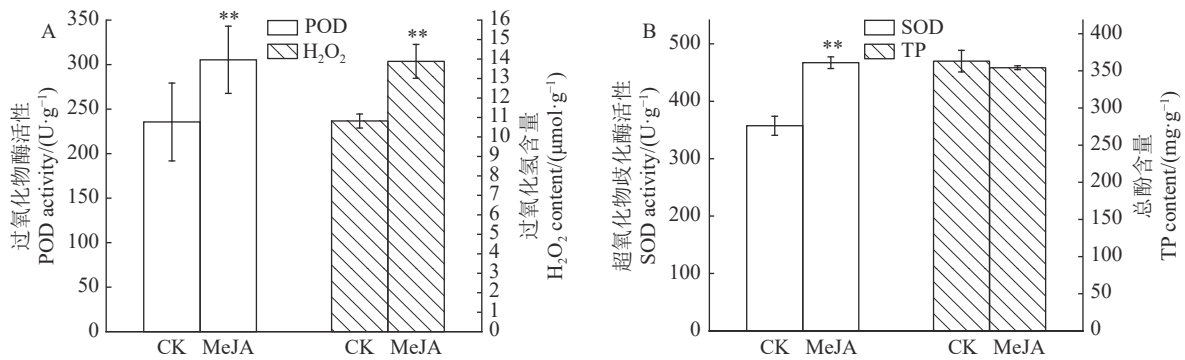
26.0 软件进行方差分析，利用单因素方差（One-way ANOVA）分析法，使用 Duncan 多重比较法进行

差异显著分析，使用 Origin 作图分析。
通过对原始数据的筛选、质控、去接头拼接，得到最优的序列，并根据相似度 97% 的 OTU 进行聚类，得到 OTU 丰度表，供以后的分析使用。根据序列 97% 的相似度，将序列归并并划分为多个 OUTs。利用 Mothur 计算丰富度指数 ACE 以及多样性指数 Shannon，并进行 Alpha 多样性分析；同时进行细菌群落分布、聚类分析和细菌功能预测分析。

2 结果与分析

2.1 茉莉酸甲酯对烟草抗氧化酶活性和总酚含量的影响

抗氧化酶活性提高和活性氧的产生是植物抗病早期的反应之一。由图 1 可知，与未喷施茉莉酸甲酯相比，喷施茉莉酸甲酯能极显著增加烟草叶片中的 POD、H₂O₂ 和 SOD 活性（ $P<0.01$ ）；TP 含量无显著差异（ $P>0.05$ ）。由此可知，喷施茉莉酸甲酯可以诱导植物产生抗性。



POD 和 SOD 活性、H₂O₂ 含量测定鲜样，TP 含量测定干样；图中*表示 $P<0.05$ ，**表示 $P<0.01$ ；CK—未喷施茉莉酸甲酯，MeJA—喷施茉莉酸甲酯，图 2 同；A：茉莉酸甲酯处理后烟草叶片中过氧化物酶活性和过氧化氢含量的变化；B：茉莉酸甲酯处理后烟草叶片中超氧化物歧化酶活性和总酚含量的变化。

POD and SOD activities and H₂O₂ content were measured in fresh samples, and TP content in dry samples. * indicates $P<0.05$, ** indicates $P<0.01$. CK: no spraying, MeJA: spraying with MeJA; Same for Fig.2. Changes in POD activity and H₂O₂ content in tobacco leaves by spraying (A); changes in SOD activity and TP content in tobacco leaves by spraying (B).

图 1 茉莉酸甲酯对烟草抗氧化酶活性和总酚含量的影响

Fig. 1 Effect of methyl jasmonate on antioxidant enzyme activity and total phenol content in tobacco

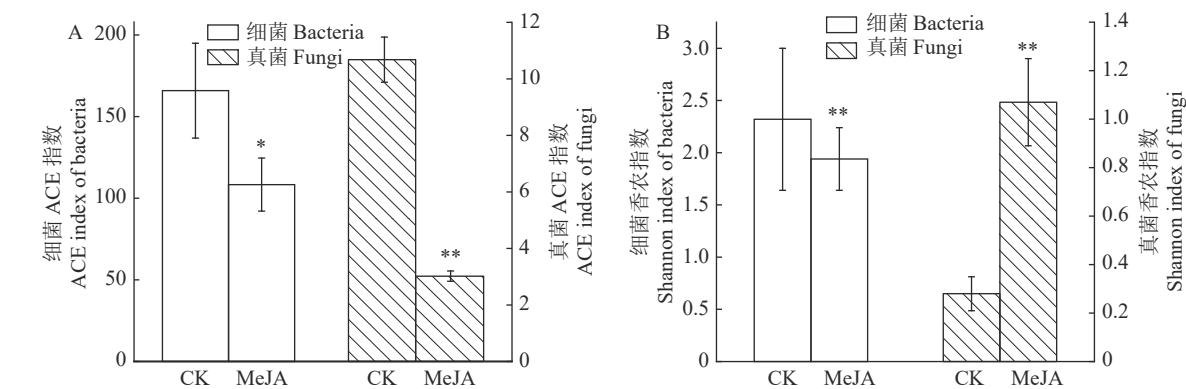
2.2 茉莉酸甲酯对烟草叶际微生物群落丰富度和多样性变化的影响

利用 Alpha 多样性分析微生物群落的丰富度和多样性。ACE 指数可反映群落物种丰富度，由图 2-A 可知，喷施茉莉酸甲酯显著降低烟草叶际微生物细菌的丰富度（ $P<0.05$ ），极显著降低烟草叶际微生物真菌的丰富度（ $P<0.01$ ）。Shannon 指数可反映群落物种多样性，由图 2-B 可知，喷施茉莉酸甲酯极显著降低烟草叶际微生物细菌的多样性（ $P<0.01$ ），极显著提高烟草叶际微生物真菌的多样性（ $P<0.01$ ）。

由此可知，喷施茉莉酸甲酯可降低烟草叶际细菌群落的丰富度和多样性；提高烟草叶际真菌群落的丰富度和多样性。

2.3 茉莉酸甲酯对烟草叶际微生物群落分类学组成的影响

图 3 展示了烟草叶际细菌、真菌在优势菌属（丰度 > 1%）分类学水平的物种分布柱状图。如图 3-A 所示，喷施茉莉酸甲酯烟草叶际优势真菌菌属 *Golovinomyces*（高氏白粉菌属，43.26%）、*unclassified_k_Fungi*（未分类真菌属，38.38%）、*Cutaneotrichosporon*



A: 茉莉酸甲酯处理后烟草叶际微生物 ACE 指数的变化; B: 茉莉酸甲酯处理后烟草叶际微生物 Shannon 指数的变化。
Changes on leaf microbial ACE index of tobacco leaf after spraying (A); changes of microbial Shannon index of tobacco leaf after spraying (B) .
图 2 茉莉酸甲酯对烟草叶际微生物群落丰富度和多样性变化的影响

Fig. 2 Effects of methyl jasmonate on the richness and diversity of tobacco phyllosphere microbial community

(毛孢子菌属, 8.38%)、*Lyophyllum* (离褶伞菌属, 4.82%)、*Alternaria* (链格孢属, 1.11%) 和 *Fusarium* (镰刀菌属 1.03%); 未喷施茉莉酸甲酯烟草叶际优势真菌菌属 *Golovinomyces* (高氏白粉菌属, 93.40%)、*unclassified_k_Fungi* (未分类真菌属, 4.81%)、*Cutaneotrichosporon* (毛孢子菌属, 0.11%)、*Lyophyllum* (离褶伞菌属, 1.41%)。其中

喷施茉莉酸甲酯显著降低烟草叶际上的高氏白粉菌属, 而显著增加了烟草叶际上的未分类真菌属, 未喷施茉莉酸甲酯的烟草叶际上链格孢属和镰刀菌属的丰度低于 0.01 未展示出。说明在属水平上叶际真菌群落结构是不稳定的, 喷施茉莉酸甲酯会影响烟草叶际真菌群落组成。

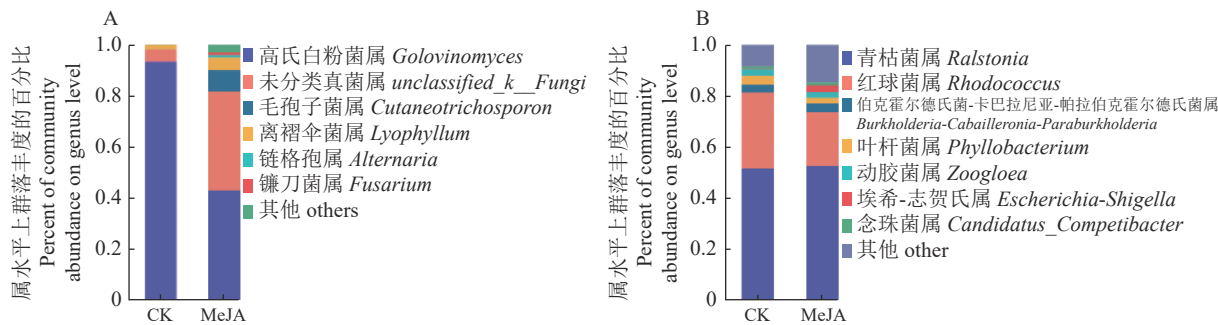


图 3 茉莉酸甲酯对烟草叶际真菌群落 (A)、细菌群落 (B) 在属水平上组成的影响
Fig. 3 Effects of methyl jasmonate on composition of phyllosphere fungal community (A) and bacterial community (B) at genus level in Tobacco

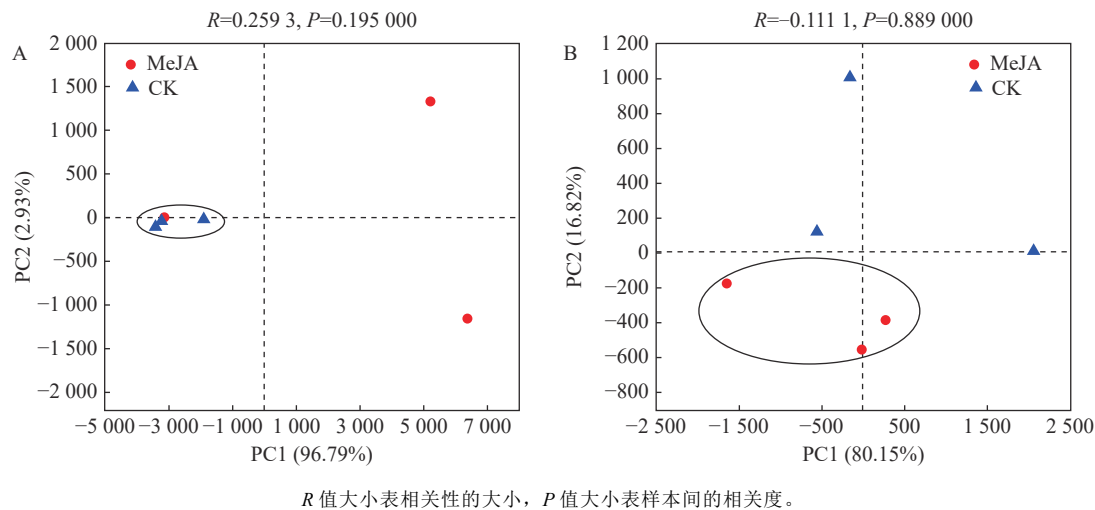
如图 3B 所示, 烟草叶际细菌菌属主要集中在 *Ralstonia* (青枯菌属, 51.64%~52.84%)、*Rhodococcus* (红球菌属, 20.81%~29.73%)、*Burkholderia-Caballeronia-Paraburkholderia* (伯克霍尔德氏菌-卡巴拉尼亚-帕拉伯克霍尔德氏菌属, 3.08%~3.41%)、*Phyllobacterium* (叶杆菌属, 2.29%~3.61%)、*Zoogloea* (动胶菌属, 2.36%~2.49%)、*Escherichia-Shigella* (埃希-志贺氏属, 0.43%~2.30%) 和 *Candidatus_Competibacter* (念珠菌属, 0.89%~1.16%); 其中, 青枯菌属和红球菌属为烟草叶际细菌优势菌种。说明在属水平上叶际细菌群落结构是趋于稳定的, 喷施茉莉酸甲酯对烟草叶际细菌群落组成的影响较小。

2.4 样本间主成分分析

主成分分析 (principal component analysis, PCA) 可反映样品间的差异和距离, 样品组成越相似, 则反映在 PCA 图中的距离越近。由图 4 可以看出, 真菌群落的 PC1 轴和 PC2 轴的主要贡献之和为 99.72%, 细菌群落的 PC1 轴和 PC2 轴的主要贡献之和为 96.97%; 由图可知, 喷施茉莉酸甲酯后, 样品间真菌群落差异较大; 而细菌群落细菌群落结构相似。

2.5 属水平的优势菌群与氧化酶活性相关性分析结果

为了解抗氧化酶活性与叶际微生物群落的关系, 对叶际中的优势菌群 (属水平) 和烟草氧化酶



R 值大小表相关性的 大小，P 值大小表样本间的相关度。
R value size indicates the magnitude of correlation, and P value size indicates the correlation between samples.

图 4 不同处理真菌群落 (A)、细菌群落 (B) PCA 分析

Fig. 4 PCA analysis of fungal community (A) and bacterial community (B) under different treatments

活性进行相关分析 (表 3)。结果表明, 高氏白粉菌属与 SOD 和 H_2O_2 活性显著负相关 ($P<0.05$); 青枯菌属与 POD 活性显著正相关 ($P<0.05$); 伯克霍尔

德氏菌-卡巴拉尼亚-帕拉伯克霍尔氏菌属与 POD 活性极显著正相关 ($P<0.01$)。而其他菌属与氧化酶活性的相关性均不显著 ($P>0.05$)。

表 3 不同处理氧化酶活性与属水平的优势菌群丰度 Pearson 相关性分析

Table 3 Pearson correlation analysis on oxidase activity and abundance of dominant flora at genus level under varied treatments

属 Genus	超氧化物歧化酶 SOD	过氧化物酶 POD	过氧化氢 H_2O_2	总酚 TP
高氏白粉菌属 <i>Golovinomyces</i>	-0.734*	0.037	-0.435*	-0.426
未分类真菌属 <i>unclassified_k_Fungi</i>	0.237	-0.702	0.534	0.232
毛孢子菌属 <i>Cutaneotrichosporon</i>	-0.601	-0.357	0.979	0.116
青枯菌属 <i>Ralstonia</i>	-0.535	0.867*	-0.406	0.148
红球菌属 <i>Rhodococcus</i>	0.377	-0.793	0.478	0.472
叶杆菌属 <i>Phyllobacterium</i>	0.557	-0.271	-0.111	0.620
伯克霍尔氏菌-卡巴拉尼亚-帕拉伯克霍尔氏菌属 <i>Burkholderia-Caballeronia-Paraburkholderia</i>	-0.990	0.963**	-0.600	-0.184

*表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关; **表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关。
* Indicates significant correlation at $P<0.05$ level; ** indicates significant correlation at $P<0.01$ level.

3 讨论与结论

在植物的生长过程中, 植物的健康状况和抗病能力与防御酶活性密切相关^[10]。茉莉酸甲酯在植物的生长发育和植物应激防御反应中发挥重要作用, 外源喷施 MeJA 可作为重要逆境胁迫信号物质, 诱导植物产生一系列免疫响应, 如激发植物抗逆蛋白和相关防御基因的表达^[11]。以往的研究表明, 茉莉酸甲酯可提高植物超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 活性和过氧化氢 (H_2O_2)、植物总酚 (TP) 积累^[12, 13], 增强植物的抗逆性, 从而有效抵

御病原菌的侵入。在本研究中, 喷施茉莉酸甲酯极显著提高烟草叶片中超氧化物歧化酶活性、过氧化物酶活性和过氧化氢的积累。结果表明, 喷施茉莉酸甲酯可以提高植物的防御酶活性, 诱导植物启动抗性, 增强植物对环境胁迫的耐受性, 也会诱导植物对病原微生物产生抗性, 同时植物内环境的变化也会影响植物的生长发育, 改变植物叶际或内生优势菌群^[14]。

关于植物与微生物关系的建立, 前人使用了共生关系来描述, 两者之间是一种长期的生态相互作用, 可以从互惠到寄生^[15]。微生物群落与作物生长

发育的关系是微生物生态学和作物病害防治研究的重要课题^[1]。植物的健康状况与植物叶际微生物群落多样性有关^[16]。定殖在叶片的微生物可以改善生态系统(如有毒污染物的植物修复^[17]和对植物生长有利的重要元素循环^[18])或有助于植物降低病原体的侵染^[19],这些微生物被认为是植物益生菌^[20]。在以往关于植物益生菌的研究中,前人通过施用生物菌肥从而降低病原体感染植物,提高叶际微生物群落的丰富度和多样性,降低植物的病害指数,促进植物生长。本结果表明,与未喷施茉莉酸甲酯的烟草相比,喷施茉莉酸甲酯的烟草叶际细菌丰富度和多样性显著降低,叶际真菌丰富度显著降低,但多样性极显著升高;且微生物群落组成表明,喷施茉莉酸甲酯后烟草叶片的高氏白粉菌属显著降低,可降低烟草白粉病的发病情况。同时,喷施茉莉酸甲酯主要是影响烟草叶际的真菌群落组成,在减少高氏白粉菌属的同时,增加了另外2种有害真菌属,可能是由于植物叶际对微生物生长的可用资源有限^[21,22],所以在降低白粉菌属后其他劣势菌属得以生长,且可能茉莉酸甲酯对链格孢属和镰刀菌属无抑制作用。主成分分析也表明茉莉酸甲酯对真菌群落的组成影响较大,对细菌群落组成影响极小,细菌群落相对稳定。叶际优势菌属与抗氧化酶活性相关性分析表明,高氏白粉菌属与超氧化物歧化酶活性和过氧化氢积累呈显著负相关关系,青枯菌与超氧化物歧化酶活性呈显著正相关关系,但抗氧化酶活性与微生物群落之间的相互影响机制尚不清楚,亟待进一步研究。

茉莉酸甲酯可以提高植物抗氧化酶活性,诱导植物防御启动;减少植物叶际的有害微生物,促进植物的生长发育。未来的研究还可以将茉莉酸甲酯作为一种重要的植物抗病诱导剂,诱导不同植物对细菌、真菌、卵菌和病毒等其他植物病原体,对其诱导的潜在作用和相关机制进行深入探究。这种研究将有助于我们理解诱导植物抗病性的机制及其在农业中的应用,以增强植物抵抗各种病原体的感染。

参考文献:

- [1] TRIVEDI P, LEACH J E, TRINGE S G, et al. Plant-microbiome interactions: From community assembly to plant health [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2020, 18 (11): 607–621.
- [2] LAJOIE G, KEMBEL S W. Host neighborhood shapes bacterial community assembly and specialization on tree species across a latitudinal gradient [J]. *Ecological Monographs*, 2021, 91 (2): 668–672.
- [3] GUPTA R, ELKABETZ D, LEIBMAN-MARKUS M, et al. Cytokinin drives assembly of the phyllosphere microbiome and promotes disease resistance through structural and chemical cues [J]. *The ISME Journal*, 2022, 16 (1): 122–137.
- [4] WANG H B, KOU X H, WU C E, et al. Methyl jasmonate induces the resistance of postharvest blueberry to gray mold caused by *Botrytis cinerea* [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100 (11): 4272–4281.
- [5] KĘPCZYŃSKA E, KRÓL P. The phytohormone methyl jasmonate as an activator of induced resistance against the necrotroph *Alternaria porrif. sp. solani* in tomato plants [J]. *Journal of Plant Interactions*, 2012, 7 (4): 307–315.
- [6] 宾金华, 姜胜, 黄胜琴, 等. 茉莉酸甲酯诱导烟草幼苗抗炭疽病与PAL活性及细胞壁物质的关系 [J]. *植物生理学报*, 2000, 26 (1): 1–6.
- [7] BIN J H, JIANG S, HUANG S Q, et al. The relationship between methyl jasmonate induced anthracnose resistance of tobacco seedlings and phenylalanine ammonia lyase activity and cell wall substances [J]. *Acta Photophysiológica Sinica*, 2000, 26 (1): 1–6. (in Chinese)
- [8] 盘柳依, 赵显阳, 陈明, 等. 茉莉酸甲酯调控防御酶活性诱导猕猴桃果实抗采后软腐病 [J]. *植物保护*, 2019, 45 (1): 75–80.
- [9] PAN L Y, ZHAO X Y, CHEN M, et al. Regulation of defense enzymes by methyl jasmonate to induce the resistance of kiwifruits against soft rot [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (1): 75–80. (in Chinese)
- [10] SAAVEDRA G M, SANFUENTES E, FIGUEROA P M, et al. Independent preharvest applications of methyl jasmonate and chitosan elicit differential upregulation of defense-related genes with reduced incidence of gray mold decay during postharvest storage of *Fragaria chiloensis* fruit [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2017, 18 (7): 1420.
- [11] MOTALLEBI P, NIKNAM V, EBRAHIMZADEH H, et al. Exogenous methyl jasmonate treatment induces defense response against *Fusarium culmorum* in wheat seedlings [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2017, 36 (1): 71–82.
- [12] ALI N D, SORKHOH N, SALAMAH S, et al. The potential of epiphytic hydrocarbon-utilizing bacteria on legume leaves for attenuation of atmospheric hydrocarbon pollutants [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 93 (1): 113–120.
- [13] YU X X, ZHANG W J, ZHANG Y, et al. The roles of methyl jasmonate to stress in plants [J]. *Functional Plant Biology:FPB*, 2019, 46 (3): 197–212.
- [14] 吴莹莹, 吴碧球, 陈燕, 等. 茉莉酸甲酯诱导水稻对褐飞虱抗性与植株总酚含量的关系研究 [J]. *西南农业学报*, 2012, 25 (2): 462–466.
- [15] WU Y Y, WU B Q, CHEN Y, et al. Relations between resistance of rice induced by methyl jasmonate, brown plant hopper(*Nilaparvata lugens*) and total phenol content [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 25 (2): 462–466. (in Chinese)
- [16] 赵显阳, 盘柳依, 陈明, 等. 茉莉酸甲酯对辣椒抗青枯病的诱导效应

- 及抗氧化酶活性的影响 [J]. 植物保护学报, 2018, 45 (5): 1103–1111.
- ZHAO X Y, PAN L Y, CHEN M, et al. Inductive effect of methyl jasmonate to bacterial wilt and the effects on the activities of antioxidant enzymes in pepper seedlings [J]. *Journal of Plant Protection*, 2018, 45 (5) : 1103–1111. (in Chinese)
- [14] ROMAN-REYNA V, PINILI D, BORJA F N, et al. The rice leaf microbiome has a conserved community structure controlled by complex host-microbe interactions[J]. *bioRxiv*, 2019, DOI:10.1101/615278.
- [15] HAN G Z. Origin and evolution of the plant immune system [J]. *The New Phytologist*, 2019, 222 (1) : 70–83.
- [16] BABALOLA O O. Beneficial bacteria of agricultural importance [J]. *Biotechnology Letters*, 2010, 32 (11) : 1559–1570.
- [17] PAWLIK M, PIOTROWSKA-SEGET Z. Endophytic bacteria associated with *Hieracium piloselloides*: Their potential for hydrocarbon-utilizing and plant growth-promotion [J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health Part A*, 2015, 78 (13/14) : 860–870.
- [18] FÜRNKRANZ M, WANEK W, RICHTER A, et al. Nitrogen fixation by phyllosphere bacteria associated with higher plants and their colonizing epiphytes of a tropical lowland rainforest of *Costa Rica* [J]. *The ISME Journal*, 2008, 2 (5) : 561–570.
- [19] LINDOW S E, BRANDL M T. Microbiology of the phyllosphere [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, 69 (4) : 1875–1883.
- [20] BERLEC A. Novel techniques and findings in the study of plant microbiota: Search for plant probiotics [J]. *Plant Science*, 2012, 193/194: 96–102.
- [21] VAN ELSAS J D, CHIURAZZI M, MALLON C A, et al. Microbial diversity determines the invasion of soil by a bacterial pathogen [J]. *PNAS*, 2012, 109 (4) : 1159–1164.
- [22] MOTALLEBI P, NIKNAM V, EBRAHIMZADEH H, et al. Methyl jasmonate strengthens wheat plants against root and crown rot pathogen *Fusarium culmorum* infection [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2015, 34 (3) : 624–636.

(责任编辑: 吴宇琳)